Peter B. Scott

The Robotics Revolution

THE COMPLETE GUIDE FOR MANAGERS AND ENGINEERS

Basil Blackwell

Питер Скотт

Промышленные роботы-переворот в производстве

Сокращенный перевод с английского

Москва
«ЭКОНОМИКА»
1987

6900.1

~~ББК 32.816~~
С44

Автор предисловия и научный редактор: доктор технических наук, профессор Л. И. ВОЛЧКЕВИЧ

Рецензенты: член-корреспондент АН СССР Е. П. ПОПОВ, кандидат технических наук В. Б. КУЧЕРОВ

Переводчики: кандидат технических наук Ю. В. САМОЙЛОВ, В. Б. БЕНЕВОЛЕНСКИЙ

Скотт П.

С44 Промышленные роботы — переворот в производстве: Сокр. пер. с англ./Авт. предисл. и науч. ред. Л. И. Волчкевич. — М.: Экономика, 1987.— 304 с.

Видный английский специалист в области робототехники рассматривает широкий круг организационных, экономических и технических вопросов, связанных с применением промышленных роботов. Книгу следует рассматривать как введение в робототехнику. В ней освещаются вопросы экономического обоснования внедрения роботов в фирмах, даны оценки эффективности вариантов роботизации. Описаны типы и конструкции роботов, принципы их работы и системы управления ими.

Для широкого круга специалистов, соприкасающихся с проблемами робототехники, студентов.

С $\frac{0604040000-200}{011(01)-87}$ 31—87 ББК 32.816

© Peter B. Scott, 1984
© Сокращенный перевод на русский язык, предисловие и оформление «Экономика», 1987

ПРЕДИСЛОВИЕ

В течение длительного времени в различных отраслях производства сосуществовали, почти не смешиваясь и не влияя друг на друга, два разнородных вида производства.

Первый вид — это высокоавтоматизированное и высокоэффективное массовое производство, которое базируется на высокопроизводительных поточных и автоматических линиях, многопозиционном и многоинструментальном технологическом оборудовании. Широкомасштабная автоматизация автомобильной, тракторной, подшипниковой, часовой промышленности и других отраслей, начатая еще в 50-е годы, привела повсеместно к созданию «безлюдных» производств в масштабах участков и даже цехов. Однако такие производства до недавнего времени базировались в основном на специальном оборудовании, которое не обладало «гибкостью», способностью переналаживаться на выпуск разнообразной продукции. В результате при смене объектов производства подавляющая часть технологического оборудования, оснастка и инструменты списывались независимо от физического состояния.

Второй вид — это неавтоматизированное серийное и индивидуальное производство, которое всегда базировалось на универсальном технологическом оборудовании с ручным управлением, ручной или механизированной сборке, контроле, транспортировке и складировании изделий. Такое производство обладает высокой «гибкостью» с точки зрения выпуска разнообразнейшей продукции, однако малопризводительно, требует непосредственного участия человека во всех элементах производственного процесса преимущественно на уровне ручного труда.

Сейчас такому «сосуществованию» приходит конец, так как ни один из названных видов производства не

может существовать в сложившихся традиционных формах.

Революционные преобразования массового производства диктуются высокими темпами научно-технического прогресса, быстрой сменяемостью объектов производства. Растягивание сроков выпуска конкретной модели автомобиля, трактора, электродвигателя до сроков, сопоставимых со сроками предельного износа производственного оборудования, означает отставание в техническом прогрессе. А списывать огромное количество специального оборудования после нескольких лет или месяцев работы губительно для экономики.

Поэтому высокоавтоматизированному «безлюдному» массовому производству требуется «гибкость», т. е. возможность периодической мобильной перестройки на крупномасштабный выпуск иной продукции.

Не менее значительные коренные преобразования должно претерпеть серийное и индивидуальное производство, и движущими здесь являются в первую очередь факторы социальные.

Быстрый рост образовательного, культурного, материального уровня трудящихся, когда подавляющая часть рабочих имеет образование не ниже среднего, существенно изменил наши требования к условиям работы и содержательности трудовых процессов.

Ручной труд, особенно малоквалифицированный, монотонный и тяжелый, становится все более непривлекательным, непрестижным, нежелательным, особенно для молодежи. Поэтому тот технический арсенал средств неавтоматизированного производства, который составляет сейчас его основу, уже в обозримом будущем станет социально неприемлемым, социально невозможным. Иными словами, переналаживаемому производству необходимы автоматизация, «безлюдность» при выполнении и технологических, и вспомогательных процессов.

Таким образом, к двум традиционным видам производства необходимо добавить третий — гибкое автоматизированное производство, которое призвано обеспечить выпуск разнообразнейшей продукции, как на универсальных станках, но без участия человека, так и на автоматических линиях.

Есть все основания полагать, что именно предстоящее десятилетие станет переломным этапом в развитии техники производств, историческим рубежом между эпохами господства неавтоматизированного и автоматизированного производства. Потому что именно сейчас для этого созрели, с одной стороны, острейшая социальная необходимость, с другой — необходимые научно-технические предпосылки, связанные с появлением и развитием многих новейших средств автоматизации.

К ним относятся в первую очередь автоматические системы управления на основе средств вычислительной техники и промышленные роботы, которые призваны революционизировать производство, поднять его на качественно более высокий уровень.

Появление и развитие промышленных роботов, безусловно, явились одним из крупнейших достижений науки и техники последних лет. Они позволили расширить фронт работ по автоматизации технологических и вспомогательных процессов, открыли широкие перспективы создания автоматических систем машин для гибкого, переналаживаемого производства.

Промышленные роботы избежали периода недоверия и недооценки, трудностей становления. Наоборот, ни одному техническому средству не доставалось даже авансом столько восторженных похвал, ни одному не уделялось столько внимания. Об этом можно составить представление хотя бы по материалам данной книги. В нашей стране за короткие сроки создана целая сеть специализированных предприятий и организаций по роботостроению во многих машиностроительных и приборостроительных министерствах. Если в десятой пятилетке было выпущено около 6 тыс., в одиннадцатой — почти 50, то в двенадцатой пятилетке намечено выпустить около 100 тыс. промышленных роботов.

Казалось бы, сочетание безусловной прогрессивности и повышенного внимания должно было обеспечить триумфальное шествие роботов, их весомый вклад в решение задач интенсификации производства, сокращения ручных работ и т. п. Однако пока этого не происходит.

Возьму на себя смелость утверждать, что роботизация производства переживает сейчас серьезный кризис, который выражается в явном несоответствии между затратами сил и средств, с одной стороны, и реальной их отдачей — с другой. И кризис вызван не какими-то вдруг открывшимися недостатками промышленных роботов, а допущенными просчетами в осуществлении технической политики в области роботизации.

Автор книги приводит некоторые данные об этом. Согласно проведенному анализу в Англии 44 % фирм,

занявшихся роботизацией производства, объявили о неудачах, и цифра эта представляется скорее заниженной, потому что далеко не всякая фирма отважится признаться в своих просчетах. Половина из указанных фирм объявила о прекращении работ по роботизации производства.

По нашему мнению, создавшаяся в настоящее время ситуация обусловлена комплексом объективных и субъективных факторов.

Идет становление принципиально нового научно-технического направления, и трудности и неудачи здесь неизбежны. Промышленные роботы имеют слишком короткую историю, чтобы обладать одними достоинствами и не иметь недостатков в конструкциях и практике применения.

Однако дело не только в этом. На протяжении длительного времени промышленные роботы рассматривались с позиций не действенного средства повышения эффективности производства, а лишь как некий эквивалентный заменитель человека на производстве, призванный высвободить его от монотонных и тяжелых, непривлекательных ручных работ. Именно такая концепция робота как «железного человека» со стальными мускулами и мощным электронным мозгом, который не прогуливает и не устраивает забастовок, а работает неутомимо круглосуточно и круглогодично, проходит красной нитью через всю книгу П. Скотта.

Безусловно, эта красивая легенда, обещавшая одним махом избавить рабочих от ручного труда, а руководителей от множества забот и трудностей в случае немедленного приобретения и применения в большом количестве роботов, оказалась в определенный момент необыкновенно привлекательной. Она искусно стимулировалась промышленными фирмами, вложившими немало средств в организацию выпуска промышленных роботов, подогревалась средствами массовой информации. И в этом мощном «роботоажиотаже» до поры до времени тонули трезвые голоса.

Разумеется, концепция «очеловечивания» промышленных роботов сыграла определенную положительную роль на ранних этапах роботостроения благодаря простоте и наглядности, особенно для тех, кто не знал глубоко тонкости производства, но обладал правом решать. Это помогало становлению нового направления, убирало многие препятствия с пути немногих в то время энтузиастов, ускоряло разработки, создание первых поколений конструкций.

Но впоследствии, когда промышленные роботы стали выходить на широкую дорогу производственного применения, именно концепция «робот заменяет человека» в отрыве от конечных задач и остального арсенала технических средств производства явилась источником множества трудностей и неудач сегодняшнего дня.

Прежде всего она глубоко ошибочна в сущности. Робот не может заменить человека. Человека может заменить лишь другой человек, желательно более сильный, квалифицированный, добросовестный.

В разнообразии функций и возможностей, подвластных человеку, в том числе в сфере производства, роботы в состоянии взять на себя лишь считанное число функций, которые во многих случаях не превышают возможности таких традиционных средств механизации и автоматизации, как ленточные транспортеры, вибрационные загрузочные устройства, обычные манипуляторы с цикловым управлением, которые известны уже десятки лет. Более того, все те отличительные свойства по сравнению с человеком, которые мы восторженно приписываем промышленным роботам, на самом деле обычные свойства любых технических средств производства. Ленточный транспортер тоже заменяет человека, высвобождая его от тяжелого ручного труда, вообразите себе армаду грузчиков с мешками на плечах, бегущих рысью через весь цех. Ленточный транспортер не курит, не прогуливает и не требует квартиры для семьи или места в детском саду, но никому в голову не приходило подобными аргументами обосновывать применение данных транспортеров, например, по сравнению с цепными конвейерами.

Сложившееся у широких слоев населения под влиянием средств массовой информации идеализированное представление о роботах, которые якобы способны полностью заменить людей на производстве и позволяют в кратчайшие сроки осуществить «технологическую революцию», перестроить основы промышленного производства и т. п., не отражает реального положения дел. В действительности же осуществляемое быстрыми темпами массовое внедрение роботизированных систем во многом дестабилизировало промышленное производство и породило немало серьезных проблем. Это произошло потому, что реальные возможности роботов были

преувеличены и некоторые образцовые примеры преподносились как типичные. Такое упрощенное и неточное представление о роботах небезвредно хотя бы потому, что маскирует проблемы, с которыми приходится сталкиваться на практике, и может побудить потребителей сделать необоснованный выбор.

Превратное понимание роботизации, нацеливание ее не на решение коренных проблем повышения эффективности производства (качество, производительность, себестоимость), а лишь на имитацию некоторых ручных действий человека в надежде, что все остальное приложится, тоже не столь безобидны, как это может показаться.

Во-первых, отсюда лишь один шаг до роботизации ради самой роботизации. И как следствие — разочарование и дискредитация, потому что производство с его суровыми законами неизбежно отторгает дорогие, тихоходные и малонадежные конструкции. Во-вторых, и сами разработчики, действуя по принципу «лишь бы робот, лишь бы манипулировал», начинают искать самые легкие, а не самые эффективные пути.

Ведь с точки зрения возможностей повышения эффективности производства различные типы роботов далеко не равнозначны. Так, их применение на операциях сварки, окраски, нанесения гальванопокрытий, очистки позволяет существенно повышать качество продукции прежде всего за счет стабилизации технологических режимов. Производительность оборудования повышается здесь за счет «многорукости», быстродействия, увеличенной грузоподъемности, человек полностью выводится из рабочей зоны и избавляется от труда в неблагоприятной среде.

В то же время при загрузке металлорежущих станков промышленные роботы на качество изделий не влияют. По производительности оборудования, как правило, получается проигрыш, так как ручная загрузка деталей массой до 3—5 кг выполняется человеком в несколько раз быстрее. Следовательно, выигрыш можно получить лишь по фонду заработной платы, да и то незначительный, так как один рабочий обслуживает 2—3 станка с ЧПУ и без роботов. Почему же тогда подавляющее большинство разработок адресуется не сварке, окраске, гальванопроизводству, а загрузке металлорежущих станков или прессов, т. е. наименее перспективным направлениям? Ответ один — если подходить к роботизации как к задаче имитации действий человека, то так проще, легче, удобнее.

Длительное время большинство промышленных роботов создавалось как конструкции напольного типа, что явилось следствием вольного или невольного подражания человеку, который стоя обслуживает станок.

По нашим данным, промышленные роботы напольной конструкции составляют 53 % общего количества, еще 39 % — с креплением на базовых узлах оборудования и лишь 8 % — подвесные конструкции (портальные и т. д.).

Между тем напольные конструкции — самые нерациональные и неэкономичные, так как требуют значительных дополнительных площадей, вызывают психологическое напряжение при наладке и обслуживании, имеют минимальные возможности «многостаночного» обслуживания.

А ведь промышленные роботы могут работать «вниз головой», и даже лучше!

Робот роботу рознь! И хотя автор высказывает эту очевидную мысль, но во всем остальном содержании книги какой-либо отличительной черты между роботами транспортно-загрузочными и технологическими не проводится, перспективность и эффективность промышленных роботов рассматриваются как некая всеобщая и в общем бесконфликтная категория.

Практика сегодняшнего дня развеивает подобные иллюзии. На сегодняшний день потенциально эффективными являются прежде всего роботы для точечной и шовной сварки, в том числе в автомобильной промышленности. Но и здесь опыт внедрения говорит о тяжелом и сложном процессе повышения мобильности роботов, их быстродействия и надежности в работе, который необходимо пройти, пока потенциальные возможности не станут реальностью.

По сравнению с традиционными поточными и автоматическими сварочными линиями автомобильной промышленности роботизированные комплексы должны по идее обеспечивать значительно большую гибкость работы оборудования: при переходе к выпуску любой новой модели автомобиля в принципе достаточно ввести необходимые изменения в программу, с помощью которой осуществляется управление роботом. В действительности, однако, столь гибкие системы пока еще не существуют. На сегодняшний день роботизированные

комплексы приспособлены к выпуску весьма ограниченного числа видов продукции. Если, например, квалифицированному рабочему для перехода от одной производственной операции к другой практически требуется всего несколько секунд, то перепрограммирование роботов или при наличии требуемой программы их переналадка в связи с переходом к производству автомобиля с другим типом кузова, хотя и прежней модели, представляет собой достаточно сложный процесс. Реальные сдвиги в этой области произойдут лишь с внедрением в производство новых поколений промышленных роботов, обладающих значительно большим объемом «памяти», и с разработкой более совершенных языков программирования. Достаточно малейшей неисправности одного из роботов, и работа на всей линии автоматически прекращается. Оборудование, таким образом, простаивает, причем зачастую при определении причины отказа и степени серьезности неисправности представители ремонтных служб делают неточные заключения и прогнозы, завышая или занижая предполагаемые затраты времени, необходимого для устранения неисправности.

Не случайно поэтому на многих промышленных предприятиях в конце каждой конвейерной линии дополнительно устанавливают оборудование, позволяющее выполнять вручную те операции, которые не смог осуществить тот или иной вышедший из строя робот. Подобные действия, в результате которых доля ручного труда на роботизированных участках в короткий срок возрастает до 30—40 %, нередко становятся поводом для серьезных проблем.

К настоящему времени миф о непогрешимости и всемогуществе промышленных роботов, согласно которому автоматизация производства сводится к его роботизации, замене рабочих на производстве промышленными роботами, ничего, кроме вреда, не приносит. Концепция эта подразумевает, что технологические процессы, конструкции и компоновки машин остаются в основном на прежнем уровне, но высвобождаются от необходимого присутствия человека. Это неверно. Содержание любого процесса производства составляли и будут составлять технологические процессы получения материалов, их обработки, контроля и сборки изделий, материализованные в конструкциях и компоновках машин, аппаратов и их систем. Именно в них закладываются все потенциальные возможности качества и количества выпускаемой продукции, экономической эффективности производства. Никакая автоматика и робототехника не может дать более того, что заложено в технологии.

Между тем все технологические процессы неавтоматизированного производства обладают невысоким потенциалом из-за низкой интенсивности, отсутствия концентрации операций, их совмещения во времени. Одностороннее замещение функций человека в системах, которые десятилетиями складывались применительно к ограниченным возможностям, бесперспективно.

Немалое количество автоматизированного роботизированного оборудования, спроектированного высококвалифицированными разработчиками, оказалось неудачным лишь потому, что все усилия разработчиков были направлены на «искоренение» ручных операций, а вопросы качества продукции, быстродействия машин и их надежности в работе упускались из виду. Иначе говоря, правильные общие лозунги типа «ручной труд — на плечи машин» иногда понимаются формально и прямолинейно, а автоматизацию пытаются свести к созданию технических средств, имитирующих ручные действия человека при манипулировании или управлении машинами. В результате появляется новая техника, работающая, как сейчас модно говорить, по «безлюдной технологии», но громоздкая и дорогая, малопроизводительная и ненадежная, а в итоге экономически неэффективная.

Автоматизация производства есть комплексная конструкторско-технологическая задача создания новой техники, принципиально отличной от технического арсенала средств неавтоматизированного производства.

Генеральное направление комплексной автоматизации производственных процессов — не в замене человека при обслуживании известных машин и аппаратов, а в создании высокоинтенсивных технологических процессов и высокопроизводительных средств производства, которые были бы вообще невозможны при непосредственном участии человека.

Правильное понимание сущности автоматизации, основной направленности работ в этой области является необходимой предпосылкой формирования научных принципов и научных основ технической политики в области роботизации на производственном уровне.

Особенностью современного этапа научно-технического прогресса является то, что определяющим фактором

при разработке новой техники становится ограниченность материальных и людских ресурсов. Необходимо так выбирать ограниченное количество объектов разработки, чтобы при реальных возможностях получать наибольшие социально-экономические результаты.

В стратегическом плане это означает поворот к первоочередному техническому перевооружению именно тех звеньев производства, где мы можем добиться результатов благодаря применению прогрессивной технологии, новых методов и процессов, — концентрации операций, многопозиционной и многоинструментной обработки или сборки.

В тактическом плане это означает избегать тиражирования тех технических средств роботизации, которые не обеспечивают высоких конечных результатов или эти результаты односторонние, например сокращение времени ручного обслуживания. При этом в конкретных производственных условиях следует руководствоваться наряду с известными методами расчетов и обоснований рядом принципов технической политики.

Первый принцип — принцип достижения конечных результатов: средства роботизации должны не просто имитировать или замещать действия человека, а выполнять производственные функции быстрее и лучше, лишь тогда они будут по-настоящему эффективными. Изменение численности какой-либо категории работающих или замена ручного манипулирования автоматическим — не цель и не результат.

Анализ работ по автоматизации показывает, что 60—70 % экономического эффекта получается благодаря более высокой производительности автоматизированного оборудования по сравнению с неавтоматизированным; 15—20 % — за счет повышения или стабилизации качества и лишь 10—15 % — благодаря экономии фонда заработной платы. Поэтому при планировании и обосновании работ по роботизации необходимо предварительно проанализировать, как могут повлиять намечаемые мероприятия на качество и количество выпускаемой продукции; численность обслуживающего персонала.

Именно такие факторы обеспечили приоритетное развитие технологических промышленных роботов, которые позволяют получить выигрыш по всем источникам эффективности благодаря улучшению качества изделий, повышению производительности машин, сокращению численности производственного персонала, работающего в тяжелых и вредных условиях производства.

Второй принцип технической политики при роботизации производства — принцип комплексности подхода. Все важнейшие компоненты производственного процесса — объекты производства, технологии, основное и вспомогательное оборудование, системы управления и обслуживания, кадры, удаление отходов — должны быть рассмотрены и в конечном итоге решены на новом, более высоком уровне. Иногда достаточно упустить из поля зрения хотя бы один компонент производственного процесса, например конструкцию изделия, и вся система мероприятий по автоматизации оказывается неэффективной. Тем более неперспективны попытки сводить автоматизацию лишь к преобразованию отдельных компонентов, скажем, созданию сложных и дорогих систем микропроцессорного управления при сохранении отсталой технологии, а таких примеров немало. И промышленные роботы, и автоматизированные системы управления должны разрабатываться и внедряться с учетом прогресса технологии и конструкции и в комплексе приспосабливаться к требованиям производства — лишь тогда они будут эффективными.

Третий принцип технической политики при автоматизации производства — принцип необходимости: средства роботизации, включая самые перспективные и прогрессивные, должны применяться не там, где их можно приспособить, а там, где без них нельзя обойтись.

Значимость современных средств электроники и вычислительной техники — не только и не столько в замене функций человека при обслуживании известных машин, но прежде всего в открывающихся возможностях создания на их основе средств производства, которые раньше не могли быть созданы.

Подавляющее большинство универсальных металлорежущих станков, прессов, сварочных установок однопозиционные и одноинструментные. В них одновременно обрабатывается лишь одно изделие одним инструментом. Это объясняется ограниченными возможностями человека, который не может одновременно управлять несколькими процессами или объектами. Применение современной электроники позволяет создавать оборудование с высокой степенью концентрации технологического процесса, со многими одновременно действующими

механизмами и инструментами. Поэтому техническая политика, особенно при создании роботизированных производственных систем для серийного производства, должна быть направлена в первую очередь на проектирование и внедрение многоинструментных и многопозиционных машин с дифференциацией и концентрацией операций, которые в десятки раз производительнее обычного однопозиционного оборудования и где ручные, нероботизированные операции невозможны. Не нужно устраивать конкуренцию с человеком там, где он «врос корнями»; следует терпеливо искать в качестве первоочередных объектов роботизации такие, где человек в паре с действующими механизмами конкурировать с роботом не сможет.

Наконец, четвертый принцип — принцип своевременности: внедрение и тиражирование недостаточно созревших технических решений недопустимы.

К сожалению, зачастую, упоенные широкими перспективами роботизации, мы стремимся к быстрейшему тиражированию конструкции роботов, едва-едва доведенных до уровня «способных функционировать».

В конечном итоге внедрение дорогих, малонадежных и тихоходных систем и средств автоматизации приводит лишь к их дискредитации.

На развитие роботизации как нового научно-технического направления несомненно повлияло и то обстоятельство, что первоначально созданием промышленных роботов стали заниматься специалисты по вычислительной технике, технической кибернетике и т. д., которые ранее производственными вопросами автоматизации не занимались и вполне искренне верили, что самое главное — это создать конструкцию робота, прежде всего систему его управления, и комплекс управляющих программ для процессов манипулирования, имитирующих действия человека, а остальное, как говорится, будет делом техники. К такой формации специалистов по робототехнике принадлежит и автор книги. По-видимому, совсем не случайно, что автор, приводя множество фамилий и адресов разработчиков конструкций, схем, математического обеспечения, не рассматривает ни одного конкретного примера производственного, цехового внедрения промышленных роботов, ограничиваясь лишь общими положениями и рекомендациями.

Промышленные роботы не являются чем-то сверхъестественным. Их внедрение может быть эффективным

или убыточным, сокращать кадровый дефицит или обострять его — все зависит от конкретных условий.

Значимость промышленных роботов не в замене человека при обслуживании известных машин. Они явились тем недостающим звеном, которое позволило объединять разрозненное технологическое оборудование в комплексные гибкие автоматизированные производственные системы машин и приборов. Именно таким системам принадлежит будущее. Поэтому промышленные роботы будут и впредь развиваться и завоевывать все новые позиции, как бы мы ни старались дискредитировать их поспешными и непродуманными действиями. Однако не следует смешивать перспективы с реальными возможностями сегодняшнего дня. Очень спорно с учетом несовершенства конструкции и неподготовленности производства, а также допущенных ошибок, чтобы промышленные роботы уже в ближайшее время могли существенно повлиять на общий уровень ручных работ на производстве, тем более на уровень производительности труда во всех возможных приложениях.

И тем не менее будущее за промышленными роботами. Придет время, когда без промышленной робототехники представить себе и производство, и быт будет столь же трудно, как сегодня без автомобиля или телевизора.

Сейчас технический уровень промышленных роботов растет стремительными темпами. Прогресс роботостроения сегодня как залог успехов роботизации завтра — таков лейтмотив книги, с которым нельзя не согласиться. Раскрыть будущее промышленных роботов с позиций уже не научной фантастики, а конкретного научного анализа и прогнозирования — это важнейшая, увлекательная задача. И я надеюсь, что читатель по достоинству оценит с этих позиций книгу П. Скотта.

Л. И. Волчкевич,
профессор, д. т. н.

ЧАСТЬ I

БИОГРАФИЯ РОБОТОТЕХНИКИ

Глава 1

О чем вся эта суета. Основы робототехники

Робототехника, не роботы

Эта книга о потенциально широкой области робототехники, а не только о тех роботах, которые существуют уже сейчас. Другими словами — эта книга была написана в то время, когда вокруг создания и применения роботов бушевали страсти, и если бы она была посвящена только тем их образцам, которые имелись на период написания, тогда то, что вы сейчас читаете, безнадежно устарело бы.

Темпы развития робототехники связаны с успехами в области совершенствования вычислительных машин. Часто цитируемые статистические данные в отношении их сводятся к следующему. Если бы автомобилестроение развивалось так же быстро, как вычислительная техника, то тридцатилетней давности автомашина «Роллс Ройс» стоила бы сейчас 2 фунта стерлингов, на весь срок эксплуатации хватило бы заправки одной пинты бензина и машина развивала бы достаточную тягу для движения на крутом подъеме. Этот пример в какой-то степени показывает, как быстро сейчас движется вперед робототехника. Однако, хотя техника и усложняется с большей скоростью, тем не менее принципы, лежащие в основе быстрого развития, изменяются сравнительно медленно. Овладение этими принципами и является ключом к раскрытию секретов нового мощного «взрыва» робототехники.

Истоки робототехники

Человечество стремилось создать механическое подобие себя задолго до того, как были начаты первые работы в этом направлении, которые в конце концов привели в начале 60-х годов к успешному применению промышленных роботов.

В течение всей истории человечество в своем воображении создавало машины, наделенные способностью чувствовать (по крайней мере частично). В древних греческих мифах бога огня Гефеста сопровождали, помогая ему, две живые статуи из чистого золота. Позднее он построил бронзового гиганта Талуса для охраны острова Крит от вражеского нашествия. Более двух тысяч лет назад Герон Александрийский в «Трактате о пневматике» описал множество автоматов, таких, как движущиеся фигуры и поющие птицы,— прямо древнегреческий «Диснейленд». Интересно, что эти замечательные игрушки оставались единственным реальным применением пневматики.

Примерно в 1500 г. Леонардо да Винчи построил для Людовика XII механического льва, который при въезде короля в Милан выдвигался, раздирал когтями грудь и показывал герб Франции. Такие постоянно усложняющиеся механические автоматы оставались модными и на протяжении последующих четырех столетий. Но слово «робот» вошло в английский язык лишь в начале двадцатого века после того, как появилась пьеса Карела Чапека «R. U. R.» (Россумские универсальные роботы). В пьесе «роботы» выращивались биологическим путем, и их нельзя было отличить от людей, разве что только по отсутствию эмоций. Сам термин был образован от чешского слова «робота», означающего принудительный труд, и от слова «работник», означающего раб. Хотя эти создания в пьесе получили бы сегодня скорее название «андроиды», чем «роботы» (которые, как теперь считается, должны быть механическими), неправильное употребление этого слова стало повсеместным.

Слово «роботикс» (робототехника) придумано мастером научной фантастики писателем Айзиком Азимовым. В рассказе «Скиталец», появившемся в марте 1942 г. в сборнике «Поразительная научная фантастика», А. Азимов впервые выдвинул три знаменитых закона робототехники.

1. Робот не может причинить вред человеку или своим бездействием позволить причинить вред человеку.

2. Робот должен исполнять приказы, отданные человеком, за исключением тех случаев, когда эти приказы нарушили бы первый закон.

3. Робот должен защищать себя, если это не нарушает первого или второго законов.

Хотя А. Азимов в то время и не осознавал, но именно тогда впервые появилось в печати слово «робототехника». Джо Энгельбергер, основатель фирмы «Юнимейшн», считающийся отцом современной промышленной робототехники, отметил, что три закона А. Азимова до сегодняшнего дня остаются теми стандартами, которым при проектировании должны следовать специалисты по робототехнике.

Что такое робот?

До настоящего времени не выработано единой концепции относительно того, из чего же состоит робот. Даже в отношении сравнительно недавно появившегося понятия «промышленный робот» нет международного соглашения о его определениях — границы термина устанавливаются весьма произвольно. Например, в Японии роботом называется **устройство,** действующее по принципу **взять-положить,** т. е. простая механическая рука, движения которой ограничены механическими упорами. Однако на Западе подобное устройство, не обладающее гибкостью (если кто-нибудь не передвинет упоры), считается особым видом **жесткого автомата,** а не роботом.

Итак, когда же мы имеем дело с робототехнической системой, а когда просто с традиционной формой автоматики?

Например, поставлена задача: отрезать кусок от большого металлического листа. Рассмотрим как саму операцию резания, так и манипулирование с листом. Варианты решения этой задачи в соответствии с уровнем сложности используемых технических средств можно представить в такой последовательности.

1. Человек вручную сгибает лист вперед-назад, пока не отломится кусок металлического листа.

2. Лист разрезается с помощью ручного инструмента.

3. Лист разрезается с помощью инструмента с каким-либо силовым приводом.

4. Лист разрезается на специальном оборудовании под управлением человека.

5. Режущий станок автоматически выполняет заданную последовательность резки, которую нельзя изменить; загрузку листа осуществляет человек либо поточная линия.

6. Устройство типа «взять-положить» берет лист из единственного фиксированного положения и загружает в станок, который затем отрезает лист в заданной последовательности. Положение листа для захвата и последовательность операций резки могут быть изменены путем механической переналадки станка.

7. Простой робот с **позиционной системой** управления забирает лист из произвольного положения и загружает его в станок, который вырезает один из нескольких возможных профилей и конфигураций (возможных в зависимости от того, откуда робот берет лист).

8. Робот с контурным управлением по **сплошной траектории** мягко берет один из многих листов и с управляемым ускорением загружает его в станок, который вырезает один из многих сложных профилей.

9. Вся робототехническая система является частью значительно большей системы, управляемой компьютером. Виды профилей могут изменяться в зависимости от номенклатуры производимых изделий.

10. Вся робототехническая система использует значительный объем визуальной и тактильной информации, например, для поиска листа.

Уровни с первого по шестой считаются (на Западе) жесткой (или специализированной) автоматизацией, хотя ясно, что на шестом уровне уже достигается значительная гибкость. Седьмой уровень представляет собой простейшую робототехническую систему, поскольку возможность изменения запрограммированных движений манипулятора позволяет классифицировать его как робот. Далее, металлорежущий станок может быть снабжен устройством **числового программного управления** (ЧПУ). Такой автоматический станок управляется мини- или микрокомпьютером с использованием предварительно записанной последовательности операций механической обработки деталей. Однако, хотя его и можно перепрограммировать, станок с ЧПУ нельзя отнести к

роботам, поскольку он может, например, только резать металл. Устройства уровней 9 и 10 уже находят ограниченное применение на заводах, однако их широкое распространение сдерживается необходимостью решения ряда проблем.

Сейчас приняты различные определения роботов. Как правило, роботами называют механизмы, которые целиком или частично имитируют человека — внешность, действия, иногда то и другое. Что же касается определений промышленного робота, то они различаются по степени общности. Например, Японская ассоциация промышленных роботов подразделяет роботы по уровню сложности на шесть классов: ручные манипуляторы; устройства типа «взять-положить»; программируемые манипуляторы; роботы, обучаемые вручную; роботы, управляемые на языке программирования; роботы, способные реагировать на окружающую среду.

В Европе и США термин «промышленный робот» не включает первые два класса японской трактовки. Британская ассоциация по робототехнике (БАР) определяет робот как «перепрограммируемое устройство, предназначенное для манипулирования и транспортировки деталей, инструментов или специализированной технологической оснастки посредством вариабельных программируемых движений по выполнению конкретных производственных задач». Определение, используемое Американским институтом по робототехнике, в основном схоже с трактовкой БАР и характеризует робот как «перепрограммируемый многофункциональный манипулятор, предназначенный для перемещения материалов, деталей, инструментов или других специальных устройств посредством программируемых движений для выполнения разнообразных задач».

Таким образом, термином «робот», как он трактуется на Западе (и в этой книге), не охватываются такие устройства, как дистанционно управляемые манипуляторы **(телеоператоры), искусственные конечности**, основанные на принципах бионики, или **протезы,** поскольку эти устройства управляются человеком, хотя они и основаны на той же технологии, что и роботы. Отнесение японцами к роботам устройств типа «взять-положить» и ручных манипуляторов серьезно затрудняет сравнение статистики производства и использование роботов в Японии, Западной Европе и США. Однако для того чтобы преодолеть эту путаницу, японцы предложили термин **мехатроника**, делающий акцент на взаимосвязи механики и электроники как главной особенности всех видов этой техники.

Рука робота

Вполне вероятно, что в один прекрасный день мобильные роботы получат широкое распространение, но в настоящее время уровень развития, которого достигли промышленные роботы, лучше всего характеризуется понятием «механическая рука», прикрепленная к полу, стене, потолку или к машине, снабженная специальным **рабочим органом,** которым может быть захват или какой-нибудь инструмент, например сварочный или покрасочный пистолет. Рука приводится в движение гидравлическим, электрическим, а иногда и пневматическим приводом в заранее запрограммированной последовательности движений под управлением контроллера (управляющего устройства), который, как правило, основан на микропроцессоре и способен определять положение руки благодаря устройствам **обратной связи** в каждом узле.

Роботов обычно программируют операторы, передвигая руку в нужной последовательности либо путем воспроизведения этой последовательности с помощью устройства дистанционного управления. Некоторые сложные роботы могут программироваться непосредственно голосом, отдачей приказаний передвинуться на заданное расстояние и в заданном направлении. Новейшие образцы роботов оснащены сенсорной обратной связью и способны реагировать на происходящее в непосредственной близости от них. Для увеличения протяженности **рабочего пространства,** в котором может действовать рука, роботы устанавливают на направляющие или рамы и тем самым сообщают им ограниченную подвижность. Диапазон размеров весьма велик — от миниатюрных сборочных роботов, способных маневрировать в пространстве объемом около десяти кубических сантиметров, до роботов, созданных фирмой «Ламбертон Роботикс» в Шотландии, которые могут перемещать поковки массой до 1,5 т в пространстве объемом в несколько кубических метров.

Тем не менее огромное большинство промышленных роботов можно уподобить человеку, который слеп, глух,

нем, однорук, со связанными и залитыми бетоном ногами. Но несмотря на эти «невероятные увечья», рука робота уже внесла выдающийся вклад в производство. Однако это стало возможным только благодаря тому, что среда, в которой она работает, вплоть до настоящего времени специально «строилась» для нее и не является идентичной среде, в которой человек выполнял ту же работу.

Различные конфигурации руки

Основная роль руки состоит в том, чтобы перемещать захват или инструмент в заданные точки пространства при соответствующей ориентации. Чтобы сориентировать объект любым образом и в любой точке пространства (рис. 1), рука должна иметь шесть степеней свободы — три **поступательные** (вправо и влево, вперед и назад, вверх и вниз) с целью достичь любой точки и три **вращательные** для обеспечения любой ориентации. Дополнение конструкции робота захватом, который может открываться и закрываться, не дает дополнительной свободы для робота, во всяком случае не более, чем мог бы дать вращающийся шпиндель.

Роботы должны иметь три поступательные степени свободы, но многие конструкции могут быть лишены одного или более вращательных сочленений, что дает существенную экономию в стоимости без заметной потери в способности выполнять такие работы, как манипуляция простыми деталями. Рабочие зоны (все точки пространства, которые может достичь рука робота) различаются по форме, что зависит от конфигурации, выбранной для конструкции руки. Распространенная классификация руки роботов по конструкции включает группирование по координатной системе трех **главных** (поступательных) **осей,** которые обеспечивают вертикальный подъемный ход, ход внутрь и наружу, вращательное или поперечное движение относительно вертикальной оси робота. Различают шесть основных типов.

1. Робот, действующий в *цилиндрической системе координат.*

На рис. 2 показан робот, горизонтальная рука которого может вдвигаться и выдвигаться параллельно основанию, двигаться вверх и вниз по вертикальной стойке (оставаясь параллельной основанию), а основание

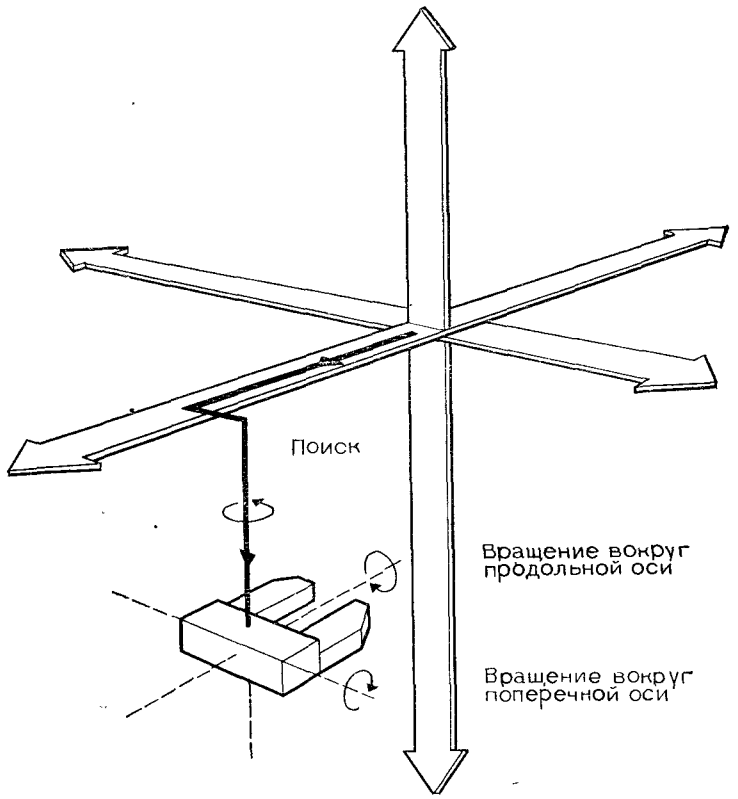

Рис. 1. Шесть движений, требуемых для любой ориентации захвата в любой точке пространства

поворачивается вместе с рукой и стойкой вокруг вертикальной оси, образуя рабочую зону, имеющую частично цилиндрическую форму. Это соответствует цилиндрической системе координат, которая определяет точки в пространстве и поэтому подходит для этого типа робота. Следует отметить, что блоки управления современных роботов обладают вычислительной мощностью, которая позволяет определять точки в одной из многих различных систем координат (как хорошо знакомые x, y, z в декартовой системе координат) независимо от типа робота. Тем не менее **цилиндрическая система координат** остается «естественной» для такого рода роботов, типичные образцы которых выпускают фирмы «Фанук», «Прэб» и «Сейко».

2. Робот, действующий в *сферической (полярной) системе координат.*

На рис. 3 показан робот, имеющий одну руку, которая может вдвигаться, выдвигаться и вращаться на основании, как и раньше, но использует вращательное вертикальное движение вместо поступательного, образуя в пространстве таким образом частично сферу. Типичные образцы такого рода роботов выпускаются фирмой «Юнимейшн».

3. Робот, действующий в *декартовой (прямоугольной) системе координат.*

Этот тип робота (рис. 4) обладает тремя взаимно перпендикулярными осями перемещений. Он состоит из стойки, которая движется вверх и вниз; поперечной балки, к которой подвешена стойка, по которой она может двигаться влево и вправо; балка в свою очередь способна перемещаться вперед и назад. Таким образом, полностью обеспечивается движение по осям x, y и z.

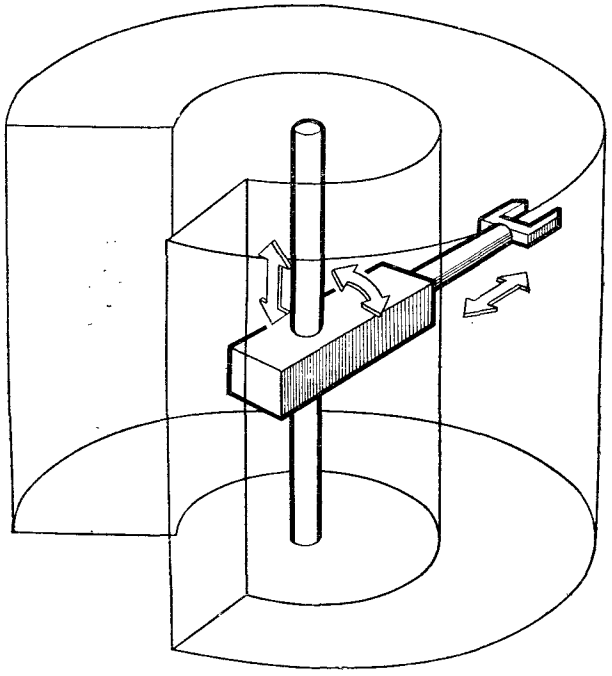

Рис 2. Робот, действующий в цилиндрической системе координат

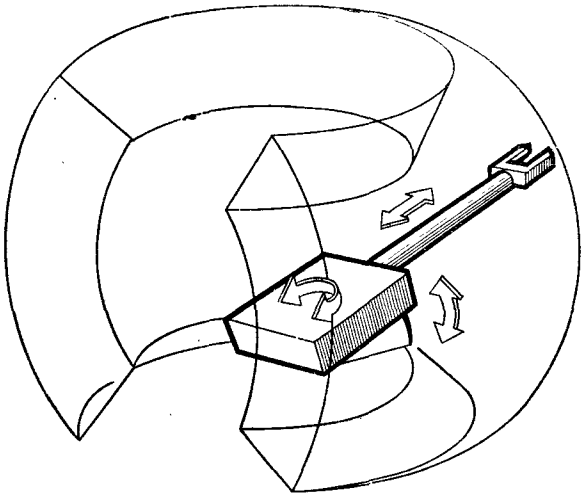

Рис. 3. Робот, действующий в сферической (полярной) системе координат

Эта конфигурация идеально позволяет применять **декартовую (или прямоугольную)** систему координат. Образцы таких роботов могут иметь сверху раму, как сборочный робот «ИБМ-7565» (первоначально «PC1») и «Оливетти сигма». Механические свойства этой конфигурации

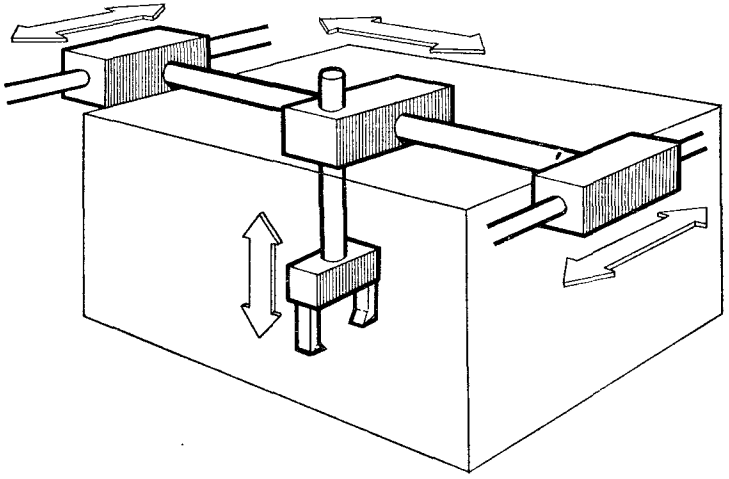

Рис. 4. Робот, действующий в декартовой (прямоугольной) системе координат

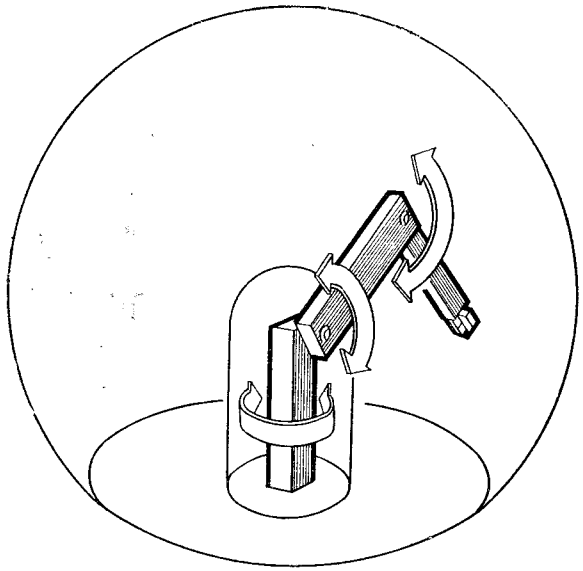

Рис. 5. Робот (рука), действующий в угловой системе координат

позволяют широко применять такие роботы там, где требуется высокая точность, например на сборочных операциях.

4. Робот, действующий в *угловой системе координат* (с рукой, шарнирно сочлененной).

Пример четвертого класса роботов, иногда известных как **антропоморфные**, приведен на рис. 5. Он состоит из способных вращаться соединений, называемых «плечом» и «локтем» (как у человеческой руки), закрепленных на «талии», состоящей из вращающегося основания, которое обеспечивает третью степень свободы. Преимущество такой конфигурации — очень большая рабочая зона, что позволяет минимизировать размеры производственных площадей, необходимых для размещения робота в цехе. Типичными примерами являются роботы, выпускаемые фирмами «АСЕА», «Цинциннати милэкрон» и «Юнимейшн» (серии «Пума»).

5. *Роботы типа «СКАРА».*

В апреле 1981 г. впервые появился робот принципиально новой конструкции, созданный в Японии в университете Яманаси, названный «СКАРА»[1] (рис. 6). Он подобен роботу, действующему в угловой системе координат, но его вращающиеся сочленения расположены в горизонтальной, а не в вертикальной плоскости с использованием вертикальной оси для подъема захвата. Такая конструкция сочетает свойства роботов, действующих в угловой и цилиндрической системах координат. За счет жесткости конструкции в вертикальном направлении роботы типа «СКАРА» могут нести гораздо более высокие полезные нагрузки, чем другие сборочные роботы,— до 30 кг. Многие компании участвовали в исследовательских работах по созданию «СКАРА», а «Пентел» и «ГЕК» разработали собственные модели. Фирма «ИБМ» заключила лицензионное соглашение на продажу роботов типа «СКАРА» — таких, как «ИБМ-7535».

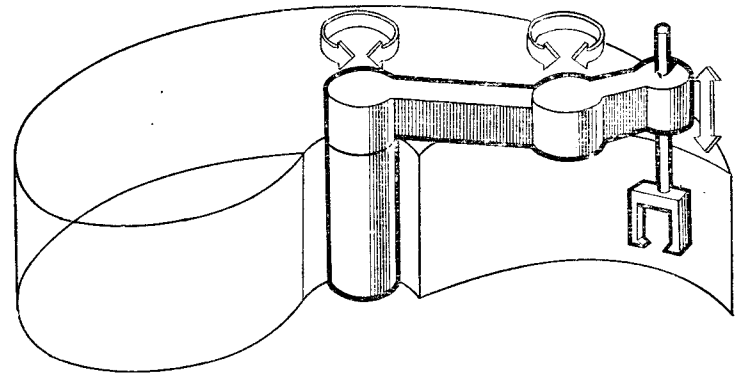

Рис. 6. Робот типа «СКАРА»

6. *Параллельно действующий робот.*

Радикальный отход от традиционных конструкций роботов осуществлен при создании исследовательского робота «ГЭДФЛАЙ»[2]. Робот «ГЭДФЛАЙ» имеет диск с инструментами, подвешенный на трех парах стержней. Изменяя длину стержней, можно перемещать рабочий орган по шести степеням свободы. Особенно важно, что благодаря сочленениям, собранным не последовательно,

[1] SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) — рука сборочного робота с избирательной податливостью.

[2] GADFLY (GEC Advanced Device For Assembly) — усовершенствованное устройство для сборки компании «ГЕК».

как в других роботах, а параллельно, система может быть очень легкой, быстрой и точной. Однако это преимущество сводится на нет из-за малой рабочей зоны. Такие роботы могут найти применение для легких сборочных операций.

Классификация роботов

Кроме классификации роботов по конфигурации руки широко используются и другие классификационные принципы.

Роботы с жесткой и изменяемой последовательностью перемещений. Устройства такого типа, действующие по принципу «взять-положить», хотя, строго говоря, не относятся к роботам, тем не менее часто называются роботами с жесткой последовательностью перемещений. Ход в каждом направлении движения по оси определен установкой механических жестких упоров, а датчики, как правило, представлены конечными выключателями, которые могут воспринимать только конечные точки, а не промежуточные. Такие устройства нельзя перепрограммировать на выполнение новой задачи. Они должны быть заново переналажены и отлажены, как традиционные автоматические механизмы.

Роботы с изменяемой последовательностью перемещений могут выполнять различные задачи или последовательности операций по новой программе. Однако в настоящее время созданы устройства типа «взять-положить», которые включают различные жесткие упоры по соответствующей программе. Например, у робота «МХУ Сеньер» фирмы «АСЕА» установлены на каждой оси семь упоров, каждый из которых может управляться по своей программе, что позволяет выполнять сложные последовательности. Кроме того, конечно, в промышленности всегда существует соблазн относить к роботам любые манипуляционные устройства типа «взять-положить».

Роботы со следящей системой и без нее. Роботы с изменяемой последовательностью перемещений должны обладать способностью останавливать отдельный узел руки в любой точке траектории. Существуют два подхода к решению этой задачи. При простейшем техническом решении контроллер просто посылает энергию к узлу, как только получен сигнал, что руке требуется занять нужную позицию. При использовании некоторых специальных электрических моторов (**шаговых двигателей** и т. д.) такой подход приемлем, но в целом управление с **открытым контуром** без обратной связи относительно информации о действительном положении того или иного узла весьма неточно — рука робота может где-нибудь застрять и совсем перестать двигаться. Поэтому во всех роботах, кроме **учебных,** используют другое решение задачи, которое предполагает размещение на каждом узле **сервомеханизма,** эффективно контролирующего фактическое положение узла и положение, которое контроллер «хочет», чтобы узел занял, а затем перемещающего руку до тех пор, пока положения не совпадают. Роботы, использующие управление с **замкнутым контуром,** называются роботами со **следящей системой** или просто **сервороботами.**

Роботы с позиционными и контурными системами (действующие от точки к точке и по сплошной траектории управления). Два типа контроллеров, используемых в промышленных роботах, обладают следующей особенностью. У многих роботов первых поколений компьютерной памяти хватало для запоминания лишь дискретных точек в пространстве, по которым должна двигаться рука. Траектория движения руки между этими точками не задавалась, и ее нередко трудно было предсказать. Такие роботы с позиционным управлением еще широко распространены и вполне пригодны для таких работ, например, как точечная сварка. С уменьшением стоимости запоминающих устройств появилась возможность увеличить число запоминаемых точек. Многие изготовители используют термин **многоточечное управление,** если в компьютерной памяти можно хранить очень большое число дискретных точек.

Для некоторых видов работ (покраска распылением и дуговая сварка) необходимо, чтобы рука робота, следуя по траектории, управлялась непрерывно. Такие роботы с **контурным управлением** в действительности разбивают сплошную траекторию на большое число отдельных близко расположенных друг от друга точек. Положения точек записывают во время программирования или вычисляют при фактическом движении путем интерполяции, например между двумя точками для образования прямой линии. Эти роботы можно рассматривать как естественное развитие систем с позиционным управлением. Фактически существует «серая зона», в которой

системы многоточечного управления могут аппроксимировать сплошную траекторию системы, если рука робота не останавливается в каждой дискретной точке, а плавно проходит через них.

Роботы первого, второго, третьего поколений. К **роботам первого поколения** обычно относят «глухие, немые и слепые роботы», которые нашли широкое распространение на предприятиях. **Роботы второго поколения**, которые совсем недавно появились в лабораториях, сейчас можно встретить и на заводах. Роботы второго поколения очень похожи на роботы первого поколения, используют различную сенсорную информацию об окружающей среде, чтобы корректировать свое поведение при выполнении производственной операции (что соответствует наиболее сложному, шестому классу в упомянутой ранее японской классификации роботов). Сенсорные системы включают устройства технического зрения и **тактильные датчики**, обеспечивающие «ощущение касания».

Некоторые роботы второго поколения называют интеллектными роботами. Но этот термин следовало бы отнести к **роботам третьего поколения**, которых нет еще даже в лабораториях. Сейчас только начались исследования по созданию роботов, наделенных «здравым смыслом». Тем не менее такие исследования действительно приведут к созданию так называемых **интеллектных роботов**, которые будут наделены «чувствами» и способностью распознавать объекты внешнего мира и, таким образом, в перспективе станут в какой-то степени обладать способностью действовать самостоятельно.

Несмотря на все многообразие классификационных признаков, существуют «серые зоны». Например, один простой датчик еще не делает устройство роботом второго поколения. Необходимо, чтобы датчик значительно влиял на действия робота. Но что значит «значительно»? Более того, даже принятые определения отличаются друг от друга. Некоторые специалисты относят к первому поколению роботов устройства типа «взять-положить», так что все прочие типы робототехнических устройств оказываются передвинутыми на одно поколение «вверх».

Вполне возможно, что в конечном итоге только роботов второго поколения можно будет считать настоящими роботами, относя первое поколение к программируемым устройствам, обычным манипуляторам и т. п.

Что могут делать современные роботы

Применение современных промышленных роботов увеличивает производительность оборудования и выпуск продукции, улучшает качество продукции, заменяет человека на монотонных и тяжелых работах, помогает экономить материалы и энергию. Кроме того, они обладают достаточной гибкостью, чтобы использовать их при выпуске продукции средними и малыми партиями, т. е. в той области, где традиционные средства автоматизации неприменимы. Мелкосерийная продукция имеет большой рынок. Исследования показывают, что подавляющее большинство деталей, закупаемых даже военными организациями, были выпущены партиями менее 100 штук, а в Великобритании согласно проведенным оценкам примерно 75 % всех металлических деталей выпускалось партиями менее 50 штук.

Роботы еще не обладают многими важнейшими качествами, присущими человеку, например не способны к разумному реагированию на непредвиденную обстановку и изменение рабочей среды, к самообучению на основе собственного опыта, использованию тонкой координации системы «рука — глаз». Роботы с захватами или подобные им применяются для выполнения манипуляционных операций, например **при удалении заусенцев, литье, очистке слитков, ковке, термообработке, точном литье**, обслуживании станков на погрузке-разгрузке, формовке, упаковке, размещении деталей в палеты и складировании.

Руки роботов вместо захватов могут оснащаться различными инструментами для выполнения работ, начиная с покраски распылением, нанесения клеевых и изоляционных покрытий и кончая сверлением, зенкованием, закручиванием гаек, шлифовкой, пескоструйной очисткой. Кроме того, роботы можно использовать для точечной и дуговой сварки, тепловой обработки и резания с помощью пламени или лазера, а также при очищении с помощью водяных струй (подробнее см. гл. 10). Следует отметить, что первоначальные иллюзии о возможности создать универсальный робот, способный выполнить почти любую работу — от сборки до точечной сварки, теперь в значительной степени развеяны. В настоящее время роботы приобретают специализацию, становясь покрасочными роботами, сварочными роботами, сборочными роботами и т. д.

Наконец, в отношении потенциальной замены рабочих «стальными воротничками» следует помнить, что робот может заменить только того, кто «работает, как робот». Однако недалеко то время, когда роботы смогут заменить людей не только на утомительной, повторяющейся или тяжелой работе, но и на работах, которые, как считалось раньше, требуют сноровки, приобретаемой с опытом. Поэтому вполне понятно, что у многих распространение роботов вызывает беспокойство в связи с возможным ростом безработицы (подробнее см. гл. 13).

С появлением сложных робототехнических устройств нельзя более утверждать, что роботы просто заменят людей на непривлекательных работах, однако человечеству грозит деградация, если оно, опасаясь безработицы, будет продолжать растрачивать свои силы, просто выполняя роль машины.

Глава 2

От Древней Греции до фабричной смазки. Эволюция робототехники

Развитие современной робототехники

Хотя отрасль, которую мы классифицируем как робототехнику, появилась всего несколько десятилетий назад, исследования в области того, что мы называем робототехникой, шли уже давно по линии работы над **искусственным интеллектом (ИИ)**, вычислительной техникой управления, механическими и электрическими устройствами.

Робототехника — в высшей степени многодисциплинарный предмет, основанный на знаниях в области вычислительной техники, механики, электроники, математики, гидравлической техники, металлургии, систем управления, физиологии, промышленной социологии и т. д. Хотя основной упор сейчас делается на разработку робототехники для промышленности, это далеко не единственное возможное направление развития робототехнических устройств.

В то время как автоматы, которые, двигаясь подобно людям или животным, предвосхитили появление современных роботов, появились также и системы, которые нельзя назвать роботами, но которые тем не менее действовали подобно им. Первые механические вычислительные машины были созданы в XVII в. Паскалем и позднее Лейбницем, а вскоре была реализована концепция программируемой машины в 20-х годах XVIII в., на основе ее во Франции были созданы особые ткацкие станки, в которых подъем необходимых нитей для воспроизведения требуемых сложных рисунков ткани управлялся набором перфокарт, усовершенствованных Жаккардом в 1801 г.

В 1823 г. Чарльз Бэбидж создал механическую «разностную машину» для автоматического вычисления таблиц навигации, страхования и астрономии. Эта первая модель годилась лишь для того, чтобы делать такие таблицы, и не могла действовать как универсальный калькулятор. Проекты более сложного механического компьютера, который Бэбидж назвал «аналитической машиной», позволили бы осуществлять программирование требуемой задачи посредством перфокарт, подобных тем, что использовались в ткацких станках Жаккарда. К сожалению, концептуальный подход Бэбиджа был правильным (что подтвердилось впоследствии), достижимая в его время точность механообработки деталей была недостаточно высокой, чтобы сконструировать надежно работающие машины. В США в 1873 г. К. М. Спенсер построил первый токарный автомат для изготовления винтов, гаек и шестерен, автоматически управляемый с помощью копиров, установленных на двух вращающихся барабанах, которые он назвал «умными колесами». Один барабан с копирами осуществлял движения заготовки, другой — управлял последовательностью операций резания. Примерно в то же время в Англии Джеймс Клерк Максвелл описал действие шарового регулятора, применявшегося для регулирования паровых машин. Он был одним из первых, кто провел систематическое исследование принципа обратной связи, являющегося сегодня основой автоматического управления и регулирования.

В 1890 г. доктор Герман Холлеринт, работавший статистиком американского бюро по переписи населения, применил перфокарты для записи необходимых данных каждого лица, что позволило автоматизировать обработку данных. В 1930 г. был сконструирован первый **аналоговый компьютер**, а потребности, возникшие во

время второй мировой войны, ускорили создание математических основ управления с обратной связью для высокоскоростной наводки артиллерийских орудий с применением радарного слежения. В 1944 г. фирма «ИБМ» создала первый автоматический **цифровой компьютер.** Имея 750 тыс. деталей и 50 миль проводов, компьютер складывал два числа за одну треть секунды; деление же занимало 10 с.

В военный период были запатентованы программируемые машины для покраски методом распыления. Пришло время для объединения производственных возможностей механических систем, способных физически манипулировать объектами, и электронного компьютера, обладающего способностью управлять и необходимой гибкостью. Считалось, что первый такой компьютер был создан в Пенсильванском университете в 1946 г. «ЭНИАК» и состоял из 18 тыс. электронных ламп и занимал площадь 1700 квадратных ярдов. Однако английский эквивалент был создан в Блейтчли парк, Букингэмшир, и работал уже в 1944 г., когда был успешно применен для расшифровки немецкого кода «Энигма».

В 1948 г. Норберт Винер опубликовал книгу «Кибернетика, или управление и связь в животном и машине» и тем самым положил начало новому направлению теории управления и обратной связи, которое с тех пор называется **кибернетика** — название, использованное Ампером за сто лет до этого и выведенное из того же слова, что и «регулятор», изучение которого также положило начало целому направлению. В тот же период В. Грей Вальтер демонстрировал маленькую подвижную «черепаху», в которой механический контакт применялся для поиска пути между объектами направления к свету и возвращения к подзаряжающим устройствам.

В 1948 г. англичане построили в Манчестерском университете первый компьютер, который запоминал программу инструкций. В том же 1948 г. был создан транзистор. Малые размеры, низкая потребность в энергии и высокая надежность уготовили транзистору судьбу совершить революционный переворот в вычислительной технике. До того времени даже при неограниченных затратах и отсутствии ограничений на размеры было бы невозможно создать мощный компьютер, хотя бы только потому, что электронные лампы были весьма ненадежны. В 1950 г. английская компания «Ферранти» изготовила «Марк I стар», который, вероятно, был первым в мире коммерчески доступным компьютером. С начала 50-х годов электронные компьютеры непрерывно развивались за счет усовершенствования запоминающих устройств и общей конструкции системы. В 1951 г. было запатентовано универсальное цифровое запоминающее устройство для автоматического управления станками.

В 1954 г. Джордж Дивол запатентовал конструкцию, которая считается первым промышленным роботом. Конструкция состояла из универсального манипулятора с автоматическим запоминающим устройством и позиционной системой управления. Два года спустя Дивол в США встретился с Джозефом Энгельбергером, работавшим аэрокосмическим инженером, и они решили заняться конструированием гибких машин для заводской автоматизации. В 1958 г. робот конструкции Дивола был создан. Позже Дивол передал первые патенты фирме «Кондек», впоследствии выросшей в «Юнимейшн», которую возглавил Энгельбергер. В 1972 г. «Юнимейшн» стала первой фирмой по производству роботов.

Летом 1956 г. термин **искусственный интеллект** (ИИ) стал популярным благодаря Джону Маккарти (основавшему две ведущие в мире лаборатории в области искусственного интеллекта). В 1957 г. корпорация «Плэнет Корпорейшн» (США) разработала устройство, действовавшее по принципу «взять-положить» и которое можно было «программировать» посредством штифтовых панелей. В этот период в США насчитывалось менее 2 тыс. компьютеров, в Западной Европе — 140. В начале 60-х годов роботы первого поколения были запатентованы, а первая промышленная установка была разработана Энгельбергером и Диволом в 1961 г.

Первый робот для разгрузки литейных машин был применен на автомобильном заводе фирмы «Дженерал Моторс», Нью Джерси. Он был очень похож на своих современных потомков. Следует отметить, что механические прообразы робота были созданы раньше. Широкое внедрение роботов задерживало отсутствие управляющего устройства (контроллера). Это объясняется тем, что компьютеры были тогда еще слишком громоздки и дороги для того, чтобы их можно было применить к роботам: в США, например, их насчитывалось 7 тыс., в Западной Европе — 1500.

В середине 60-х годов роботы получили способность переходить к одной из нескольких записанных программ в зависимости от внешних условий и были разработаны контурные системы управления. Примерно в то же время исследованиями по робототехнике стали заниматься в Массачусетсском технологическом институте (МТИ), в Стенфордском исследовательском институте (СИИ) и Эдинбургском университете, а в конце 60-х — начале 70-х годов СИИ разработал мобильный робот модели «Шейки», оснащенный телевизионной камерой, дальномером и детектором ударов, что позволило роботу выполнять поиск пути вокруг препятствий.

Первые роботы хотя и включали запоминающие устройства, тем не менее состояли из электронных логических компонентов, которые были жестко связаны между собой так, что позволяли посредством электроники выполнять определенный набор задач, эффективно копировавший функции устройств **жесткой** автоматизации. В 1968 г. в МТИ соединили робот с универсальным компьютером «РДР-6». Так родился первый гибкий робот. В 1974 г. фирма «Цинциннати милэкрон» создала первый коммерческий доступный робот «ТЗ», управляемый мини-компьютером. Такие **перепрограммируемые роботы** с программным обеспечением были эффективнее, чем машины со специализированными электронными схемами, они могли работать в нескольких системах координат, реагировать на сигналы датчиков и использовать сложные методы обучения.

Исследования в области робототехники, хотя и не всегда поддерживаемые надлежащим образом, в течение 70-х годов стали прибыльными.

Однако в 1973 г. Джеймс Лайтхил представил в Совет по научным исследованиям (который финансирует большинство университетских исследований в Великобритании) доклад о бесперспективности исследований по ИИ. Это заключение почти сразу повлекло за собой уменьшение финансирования исследований. Хотя исследованиями в области искусственного интеллекта занимались не только специалисты по робототехнике, несомненно, доклад Лайтхила снизил шансы Великобритании вывести в 70-х годах робототехнику на мировой уровень.

В США Вик Шейнман создал для роботов манипуляторы (руки) небольших размеров сначала в Стенфорде, а затем в МТИ. После образования компании

«Викарм» для осуществления своих проектов он передал их фирме «Юнимейшн», которая приступила к разработке руки для робота «ПУМА» (один из первых коммерческих сборочных роботов). В Стенфорде в 1973 г. была создана первая интегрированная с компьютером роботизированная сборочная установка для сборки десятикомпонентного водяного насоса. В 1976 г. «Дрейпер Лэбс» разработала устройство, действовавшее как **плавающее незакрепленное запястье** для захвата изделий во время сборки с учетом погрешностей их расположения. Это было в тот же год, когда капсула-робот, установленная на межпланетной станции «Викинг 1», построенной НАСА, совершила посадку на Марсе.

Не считая случайных разработок в механике роботов, прогресс в области робототехники достигался в основном за счет развития вычислительной техники. С середины 60-х годов плотность памяти компьютеров ежегодно практически удваивалась и обеспечивала мощность за десять лет в тысячу раз, за двадцать лет — в миллион раз больше. Разработка в конце 60-х годов **больших интегральных схем (БИС)** с размещенными на кристалле кремиия тысячами элементов позволила достичь невозможной ранее вычислительной мощности за доступную цену. Так со времени электроламповой эпохи началась эра уже третьего поколения компьютеров.

Тем не менее следует отметить, что простая миниатюризация электроники не делает ее автоматически дешевле. Изготовление первой интегральной схемы по какому-либо конкретному проекту немыслимо дорогое дело. Только благодаря исключительной функциональной гибкости и огромной потенциальной применимости чипов их можно продавать миллионами одинаковых экземпляров (распределяя таким образом большую стоимость исследований и разработок на большой объем выпуска).

Компьютерные языки смогли стать с внутренней стороны значительно сложнее, так, чтобы с внешней стороны они были проще для пользователя-неспециалиста. Сложные системы **распознавания образов** позволили создать искусственное зрение с ограниченными возможностями по крайней мере в лабораторных условиях. В начале 80-х годов началась серьезная работа по созданию роботов второго поколения, которые обладали бы достаточной вычислительной мощностью и были способны

изменять свое поведение согласно информации датчиков об окружающей среде, например выполнять сложные операции, такие, как дуговая сварка и сборка. Это требует использования компьютеров на **сверхбольших интегральных схемах (СБИС)** с чипами, память каждого из которых способна вмещать десятки и сотни тысяч бит информации. Сложность и количество взаимных соединений на таких чипах потрясающи: больше, чем улиц на карте воображаемого города, расположенного на всей территории США.

Мировой экономический кризис, в условиях которого возникла необходимость повышать производительность труда, вызвал повышенный интерес к использованию роботов в промышленности. Были начаты исследования, цель которых состояла в выяснении, как лучше применять роботы, при каких условиях они экономически эффективны и как проектировать и управлять внедрением робототехники.

Развитие промышленной робототехники

Промышленность необязательно должна была стать первым крупным рынком сбыта робототехники. Было бы несерьезно рассматривать современную робототехнику как модное направление промышленной автоматизации, которое после того, как спадет первоначальный интерес к нему, станет лишь еще одним средством производства в руках инженера. Хотя это полностью соответствует истине относительно той части робототехники, которая называется промышленной, потенциально существует много непромышленных приложений, которые по значимости однажды смогут превзойти промышленную робототехнику. Если бы тридцать лет назад человечество научилось создавать очень сложные компьютеры, в то время как успехи в области механики оказались бы очень скромными, у нас сейчас было бы огромное число «интеллектных» **домашних роботов** и мы бы задавались вопросом, когда же, наконец, робототехника найдет себе практическое применение в промышленности. Во многих отношениях это было подобно тому, как древние греки использовали принципы действия паровой машины для демонстрации ловких трюков в храмах, и потребовалось еще почти два тысячелетия, прежде чем те же принципы получили практическое применение.

Современная индустрия выросла из средств механизации в эпоху промышленной революции, которая началась во второй половине XVIII в., когда Джеймс Уатт создал паровую машину. При механизированном производстве появилась возможность изготавливать детали, почти не отличавшиеся друг от друга, и в таком количестве, что в начале XIX в. промышленник Эли Уитни смог произвести для правительства США 12 тыс. мушкетов, в которых одинаковые детали были взаимозаменяемы. Массовая продукция действительно заняла ведущее место в промышленности, и в конце XIX в. постоянное требование наращивать объемы производства подталкивало усовершенствование металлорежущих станков в направлении, которое привело к созданию автоматически управляемых станков, например автоматического токарного станка Спенсера.

Вероятно, жажда новых автомобилей вызвала спрос на более хорошие инструменты для их производства, а создание Генри Фордом **конвейерной линии** привело к тому, что к 1914 г. его компания выпускала более миллиона автомобилей в год. Однако, хотя такой вариант автоматизации производства пригоден для выпуска большого объема продукции при сокращении затрат человеческого труда и низкой стоимости единицы продукции, тем не менее он требует **времени на подготовку к выпуску продукции** (при крупных изменениях в конструкции может потребоваться несколько лет для создания автоматической линии) и, таким образом, демонстрирует присущую ему гибкость.

В течение длительного времени **серийная продукция** среднего и малого объема производилась только на традиционных станках с ручным управлением. Но в конце 40-х годов Джон Т. Пэрсонс предложил кодированные перфокарты для автоматического управления **фрезерным станком,** на котором обрабатывались лопасти сложной формы для вертолета. В 1949 г. Военно-воздушные силы США заключили с лабораторией сервомеханизмов МТИ договор о создании фрезерного станка с **числовым программным управлением.** Десятилетие спустя станки с ЧПУ успешно использовались в промышленности и начались работы по созданию языка программирования, получившего название «АПТ»[1]. Систе-

[1] APT (Automatic Programmed Tool) — средство автоматического программирования.

мы ЧПУ или компьютерное прямое числовое управление нельзя рассматривать как «робототехническое», так как они в отличие от роботов не обладали гибкостью относительно *вида операций*.

Хотя числовое управление все шире стало использоваться в специальных машинах, начиная от вязальных станков и кончая станками, копирующими чертежи, все-таки для промышленных роботов 60-х годов, которые были действительно универсальными манипуляционными машинами, еще только предстояло найти область эффективного применения. В то время как станки с ЧПУ могли заменить квалифицированного рабочего, выполняющего вручную то, что делала машина, роботы были способны только к неквалифицированному труду, все еще сравнительно недорогому. Кроме того, не совсем было ясно, где лучше использовать робот, так как не было таких видов механизированного труда, которые можно было бы автоматизировать с помощью роботов.

По мере усложнения управляющих роботом устройств и появления методов организации рабочей среды робота, способных компенсировать некоторые недостатки роботов, стала экономически эффективной роботизация таких процессов, как покраска распылением. В 70-х годах промышленная робототехника стала рассматриваться как один из аспектов производства, управляемого с помощью компьютера (КАМ)[1].

Механическая часть робототехнического устройства была уже достаточно хорошо отработана. Сдерживающим фактором в развитии роботов в первую очередь являлись трудности создания систем управления, хотя вычислительные устройства, имевшиеся в продаже, позволяли осуществлять экономически эффективную интеграцию промышленных роботов и системы технологического оборудования, что могло обеспечить выполнение многих работ по манипулированию материалами и таких операций, требующих труда рабочих средней квалификации, как покраска и точечная сварка.

К концу 70-х годов прогнозы увеличения вычислительной мощности побудили многие страны усиленно вкладывать средства в исследования, связанные с созданием роботов второго поколения, в надежде, что применение такой технологии поможет им преодолеть

[1] CAM (Computer aided manufacture) — автоматизированная система управления производством.

экономический кризис. Кроме того, планы мирового сообщества в области вычислительной техники по созданию в течение десятилетия **компьютеров пятого поколения** стимулировали исследования в области искусственного интеллекта и связанных с ним направлений. Таким образом, сочетание различных исторических факторов привело к тому, что в начале 80-х годов был дан мощный толчок разработке робототехники вообще, и созданию промышленных роботов в частности.

Все это следует рассматривать как проявление всеобъемлющей технической революции, начавшейся в 70-х годах и основанной в значительной степени на создании интегральных схем, что позволило выпускать такие товары, как миниатюрные калькуляторы, персональные компьютеры, видеоигры и «цифровые» часы. «Человек с улицы» — обыватель оказался подверженным непосредственному воздействию новой наукоемкой техники, и, следовательно, даже среди представителей наиболее консервативных профессий возникло ощущение, что «происходит что-то важное». **Информационная технология** стала модной фразой, так как компьютерная техника в виде устройств обработки текстовой информации и электронной почты проникла в офисы не только компаний, выпускающих наукоемкую продукцию, но даже в конторы фирм традиционных отраслей.

Робототехника в мире

Несмотря на то что истоки робототехники берут начало на Западе, Япония была той страной, которая извлекла наибольшую пользу из роботов первого поколения. Один из факторов, способствовавших этому, вероятно, состоял в том, что в противоположность принятой на Западе практике многие японские фирмы имеют системы «пожизненного найма», так что японский менеджер мог позволить себе составлять более долгосрочные и более рискованные планы, включающие применение роботов, чем его западные коллеги. Подобным же образом введение робототехники не вызывало страха у рабочих Японии, поскольку работа где-нибудь на фабрике им была гарантирована.

Хотя из-за различия определений, принятых в мире, очень трудно составить точную картину распределения парка роботов в различных районах мира, все же было предпринято немало таких попыток, из рассмотрения

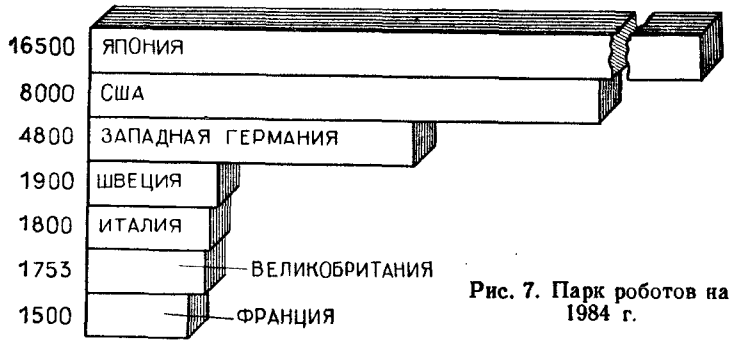

Рис. 7. Парк роботов на 1984 г.

которых можно получить общее представление. К 1970 г. в мире насчитывалось всего несколько сотен роботов, включая 200 шт. в США и 150 шт.— в Японии. В середине 70-х годов, однако, количество роботов приблизилось к 4000 единиц, а к 1984 г.— примерно к 37 тыс. В настоящее время, по-видимому, в Японии больше, чем в какой-либо другой стране, установлено роботов, даже при учете различий в определениях. Однако различия в определениях могут привести к существенной разнице в подсчете численности: например, в 1981 г. Япония объявила о наличии у нее 70 тыс. роботов, в то время как, исходя из определения, принятого на Западе, она обладала лишь около 8 тыс. Интересно отметить, что большая часть японских робототехнических устройств относилась к технике более низкого уровня, чем на Западе.

Тем не менее в целом Европа по количеству роботов превосходит даже Японию. Интересно отметить, что самое высокое отношение роботов к числу рабочих в действительности наблюдается в Швеции, а не в Японии.

Хотя Япония и занимает первое место в мире по количеству фактически установленных роботов, но в области исследований по робототехнике она не имеет превосходства. В число лидеров по исследовательским работам наряду с Японией следует включить США, Великобританию и Западную Германию.

По оценке фирмы «Артур Д. Литл», мировой рынок роботов будет ежегодно расти в среднем на 28 %, от 175 млн. долл. в 1983 г. и 600 млн. долл. в 1987 г. до 2 млрд. в 1992 г., что соответствует ежегодному выпуску 50 тыс. роботов.

По данным фирмы «Фрост энд Саливэн», Япония в 1982 г. производила 7000 программируемых роботов, США — 1800, Европа — 3200. Крупными поставщиками роботов являются: фирма «Юнимейшн», ставшая филиалом корпорации «Вестингауз»; «АСЕА» — шведская электротехническая компания; «Цинциннати милэкрон», США; «ИБМ» — многонациональный компьютерный гигант; японские фирмы «Хитати» и «Фузитцу Фанук».

Кроме того, крупные компании все больше пытаются внедриться на рынок робототехники путем слияния с отдельными производителями роботов и заключения лицензионных соглашений с другими фирмами. Такие лицензионные соглашения, по-видимому, представляют собой лишь краткосрочное мероприятие.

Из имеющихся в мире современных промышленных роботов до сих пор почти все относятся к первому поколению и применяются на таких операциях, как покрытие поверхностей, точечная сварка, манипуляция деталями и обслуживание станков.

В Японии применяются в основном роботы низкого технического уровня, в то время как в других странах преобладает тенденция использования роботов второго поколения, которые выполняют более сложные виды работ (дуговая сварка и сборка). По прогнозам, во второй половине 80-х годов сборка станет главной сферой приложения роботов.

Похоже, что спрос на роботы для точечной сварки, применяемые в основном в автомобильной промышленности, близок к насыщению, а производство таких роботов, вероятно, снизится к концу 80-годов. Имеются прогнозы, что простые конструкции обучающих роботов, применяемые в образовании, в будущем будут использоваться на промышленных предприятиях.

Ирония судьбы заключается в том, что основная часть парка роботов применяется в поточном производстве автомобильной промышленности, т. е. там, где присущую им гибкость никогда не удастся полностью реализовать. По оценкам фирмы «Криэйтив Стрэтеджис Интернейшнл», специализирующейся на изучении рынка, 75 % имевшихся в США в 1980 г. роботов использовалось в автомобилестроении. В то же время в развивающихся странах, где большая часть производства связана с выпуском среднего и малого объема продукции, идеально подходящего для роботизации, в настоящий момент применение роботов экономически неоправдано.

ЧАСТЬ II

ТЕХНОЛОГИЯ РОБОТОТЕХНИКИ

Глава 3

Тактика сильной руки. Механика робота I. Конструкция и методы описания

Анатомия манипулятора

В гл. 1 были рассмотрены четыре основных распространенных типа конструкций руки промышленного робота: цилиндрическая (вращение — перемещение — перемещение); сферическая (вращение — вращение — перемещение), декартова (перемещение — перемещение — перемещение) и угловая (вращение — вращение — вращение). Тем не менее этими типами не ограничиваются возможные варианты, например некоторые фирмы начали выпуск конструкции руки типа «СКАРА», где применяется тип «вращение — вращение — перемещение» для трех главных узлов, в которых в отличие от сферических систем оба вращения происходят в одной и той же вертикальной плоскости.

Конечно, можно иметь несколько исполнительных механизмов, действующих *параллельно*. На практике в промышленных роботах применяются, как правило, только конструкции исполнительных механизмов, соединенных последовательно. Но даже если рассматривать все возможные конструкции манипуляторов (для трех главных осей), то при игнорировании тех, которые фактически не позволяют образовать полезную рабочую зону, остаются еще 37 различных возможных конструкций для систем. На рис. 8 представлена новая конструкция робота типа «вращение — перемещение — вращение».

В данной конструкции предплечье на конце горизонтальной телескопической опоры может вращаться в вертикальной плоскости, в результате чего образуется рабочая зона путем вращения всей системы вокруг вертикальной оси.

До настоящего времени применялось небольшое количество конфигураций. При малой вычислительной мощности (что было до недавнего времени) удобнее было использовать такую конфигурацию робота, которая соответствует одной из обычных координатных систем (сферической или прямоугольной). Если это выполнено, можно перейти к определению координат, которые понятны как пользователю, так и роботу. В противном случае придется производить сложные вычисления для преобразования координат. Однако такие преобразования должны осуществляться с большой скоростью. Поэтому, пока не будет достаточной вычислительной мощности, преобразования выполнять в **реальном масштабе времени** нельзя.

Кроме трех степеней свободы **(осей движения)**, которые должны иметь все роботы, узел запястья включает от одной до трех дополнительных степеней свободы в зависимости от назначения робота. Запястья проектируются в модульном варианте так, что одна и та же модель робота может быть снабжена различным числом степеней свободы. В настоящее время получила распространение практика, когда спустя несколько лет владельцы отсылают на завод, например, пятиосные

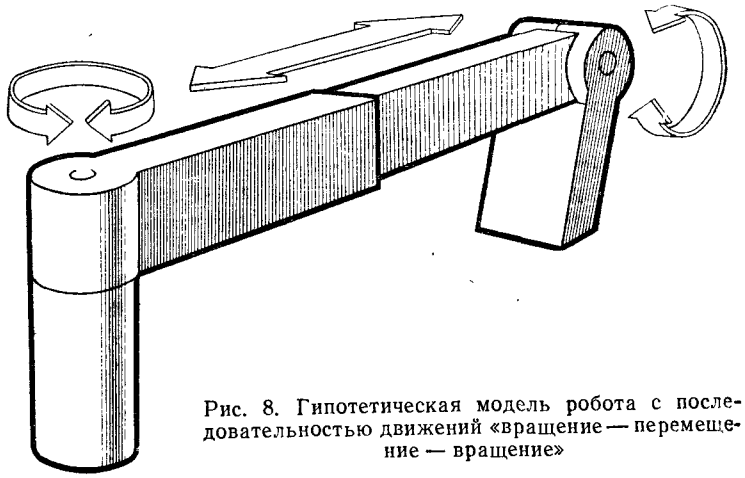

Рис. 8. Гипотетическая модель робота с последовательностью движений «вращение — перемещение — вращение»

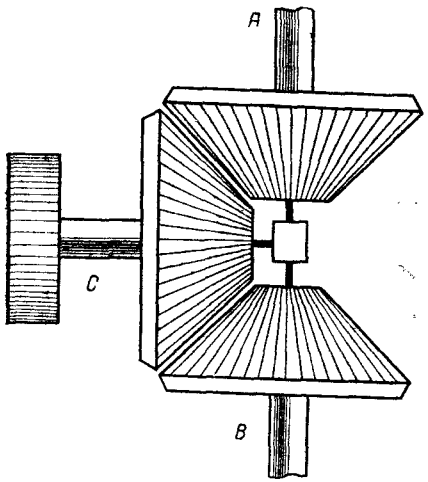

Рис. 9. Дифференциально-зубчатый механизм

роботы для доукомплектования до шести осей, расширяя таким образом область их применения.

Запястья устроены так, что каждая ось вращения проходит через одну и ту же точку. Чтобы обеспечить вращение вокруг продольной оси и движение типа поиска, обычно применяют **дифференциально-зубчатый механизм,** показанный на рис. 9. Валы *A* и *B* приводятся в движение независимо друг от друга, а рабочий орган крепится к концу вала *C*. Если валы *A* и *B* движутся с одинаковой скоростью, но в противоположных направлениях, то вал *C* вращается относительно главной оси, приводя в движение рабочий орган. Если валы *A* и *B* оба движутся в одинаковом направлении (и с одной и той же скоростью), то вал *C* не будет вращаться относительно оси валов *A* и *B*, вызывая вращение рабочего органа. Неодинаковые скорости валов *A* и *B* приведут к одновременным движениям типа вращения вокруг продольной оси и поиска.

На практике наиболее часто применяются конструкции роботов, действующих в угловой системе координат. Многие роботы имеют рабочие зоны, представляющие собой полный сфероид вокруг центральной оси, причем базовый узел может вращаться, не совершая полного оборота, а рука совершает движения относительно вертикального положения, делая таким образом доступным любой сектор (рис. 10).

Вращающиеся руки наиболее применимы для сборочных работ, тем не менее используются конструкции типа «СКАРА», которые остаются жесткими в вертикальном направлении при небольшой податливости в горизонтальной плоскости. Роботы, действующие в прямоугольной системе координат, можно применять для сборки.

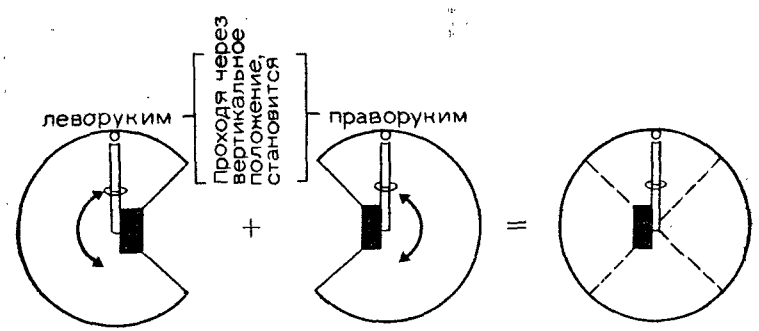

Рис. 10. План сочлененной руки робота, показывающий, как лево- и праворукие конфигурации образуют рабочие зоны, перекрывающие друг друга

Для перемещения тяжелых грузов часто используются роботы, действующие в цилиндрической системе координат, поскольку центральную стойку можно сделать очень жесткой, закрепляя ее сверху и снизу. Для обслуживания станков цилиндрические конфигурации роботов не применяются, так как здесь необходимо горизонтальное движение. Наконец, роботы, действующие в сферической (полярной) системе координат, могут обладать большой гибкостью в отношении труднодоступных мест и способны перемещать более тяжелые грузы, чем эквивалентное им устройство, действующее в угловой системе координат. Поэтому «полярные» роботы применяются при точечной сварке или перемещении материалов.

Преобразования

Для проведения расчетов конкретной конфигурации робота используются математические методы, которые позволяют определить абсолютное положение и ориентацию рабочего органа робота, исходя из относительных позиций узлов, необходимых для приведения рабочего органа в нужную позицию. Такого рода расчеты необходимы для управления роботом.

Каждая жесткая секция руки робота-манипулятора может рассматриваться как имеющая собственную замкнутую систему координат. В этом случае необходимо определить положение и ориентацию системы координат

относительно **базовой системы**, чтобы фактически вычислить позицию секции руки робота. На рис. 11 представлено абсолютное положение рассматриваемой секции робота (например, рабочего органа) по отношению к выбранной базовой системе (система координат — прямоугольная). Базовая система, например, могла бы быть так выбрана, что начало ее координат приходилось на центр базы робота с горизонтальной плоскостью X—Y с осью Y. Эквивалентную систему координат относительно заданной секции руки робота можно рассматривать как «плавающую» в пределах базовой системы.

Для описания начального положения второй системы координат (см. рис. 11) можно лишь определить направление **вектора** из начала координат O_B базовой системы к началу второй системы. Однако это не дает информации об ориентации второй системы. Математически ориентацию можно определить, используя **матрицу** размерностью 3×3. Три величины в столбце представляют точки X, Y и Z ориентации отдельной оси второй системы так, как если бы она была прямой линией в базовой системе. Определяя таким образом ориентацию для каждой из трех осей второй системы (беря три столбца матрицы), можно определить ориентацию второй системы.

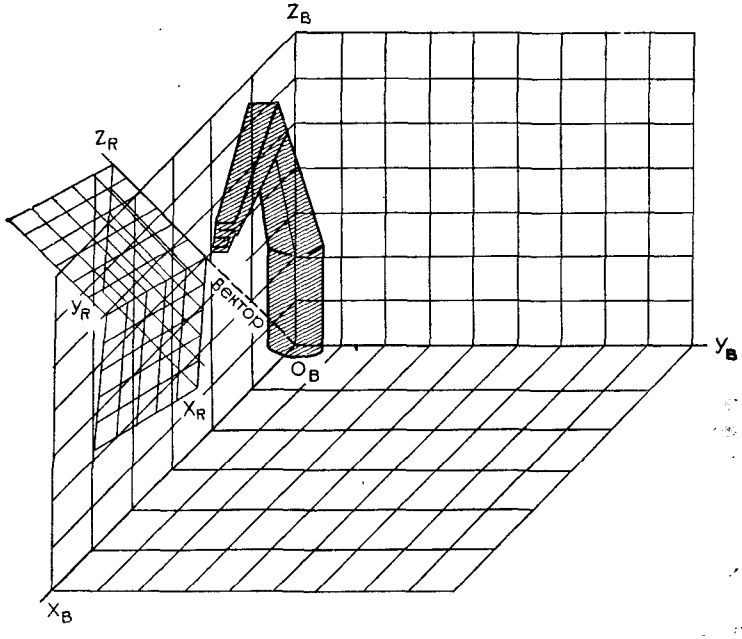

Рис. 11. Система координат рабочего органа робота, показанная в системе координат базы робота

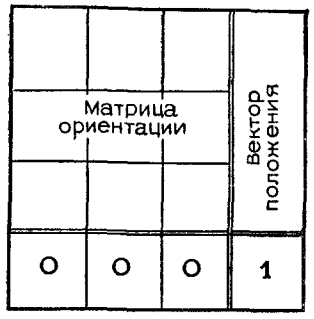

Рис. 12. Построение однородного преобразования

Для того чтобы определить координаты любой точки рассматриваемой секции робота, необходимо произвести некоторые действия под вектором. На практике это осуществляется с помощью однородного преобразования с использованием легко составляемой матрицы размерностью 4×4 (рис. 12) путем присваивания положению вектора матрицы ориентации цифр 0001. В этом виде преобразование можно сделать умножением координат точки во второй системе (в форме X, Y, Z, 1, где 1 — масштабный фактор) на однородную матрицу преобразования.

На практике не всегда возможно определить набор вторичных систем координат в терминах базовой системы. Во-первых, роботы не состоят из серий независимых секций, «плавающих» в базовой системе,— секции связаны друг с другом последовательно. Во-вторых, положения обслуживаемых объектов (таких, как детали в палете), которые не связаны с роботом, могут оставаться неподвижными относительно друг друга, но не относительно базовой системы.

Чтобы учесть эти факторы, можно применить однородные преобразования для описания положений и ориентаций относительно друг друга двух систем координат, отличающихся от базовой системы. В этом случае координаты каждой детали на палете, например, задавались относительно палеты. Применяя относительные преобразования, которые описывают зависимость между объектами и палетой, можно было бы сравнительно легко определить абсолютные координаты объектов в точке покоя.

Таким образом, связывая вместе ряд вычислений относительных преобразований, можно выработать цепь различных систем, в которых известны только относительные положения и ориентации соседних систем. Наиболее важным звеном цепи обычно является рука

робота. Используя относительные преобразования, можно начать от базы робота (закрепленной относительно базовой системы), проходя через каждый узел по очереди, пока не будет определено абсолютное положение (в отношении базовой системы) самого рабочего органа.

Углы Эйлера

Рассмотрим подробнее три вращательных звена для ориентации рабочего органа робота под любым углом.

Например, на планере пилот выполняет три операции в процессе управления: движение ручки управления вперед и назад для изменения угла поверхностей рулей высоты на хвосте; движение ручки управления из стороны в сторону для поворота поверхностей элеронов на задних краях крыльев и управление рулем с помощью ножных педалей.

Перемещение ручки управления вперед переводит планер в носовое пикирование; назад — заставляет нос задираться. Это фактически управление движением относительно поперечной оси планера, заставляющее «колебаться» в том же направлении движения, в каком колеблется лодка в бурном море (рис. 13, *а*). Движение ручки управления из стороны в сторону заставляет вращаться весь планер вокруг оси фюзеляжа. Это управление вращением вокруг продольной оси (рис. 13, *б*). Наконец, нажатие на педали руля заставляет нос планера поворачиваться из стороны в сторону, благодаря чему планер поворачивается в горизонтальной плоскости и ложится на новый курс. Это движение известно как поиск (рис. 13, *в*).

На практике возникают вторичные эффекты при данном управлении, которые позволяют планеру более эффективно, например, делать вираж, чем при использовании руля. Тем не менее пилот может поворачивать планер независимо в одном из трех взаимноперпендикулярных направлений. Используя те же понятия относительно поворотов вокруг поперечной и продольной осей и понятие поиска, специалист по робототехнике может определить фактические углы каждого из трех типов вращения и ориентацию одной координатной системы относительно другой. Если относительные ориентации установлены, эти типы движения описываются **углами Эйлера**.

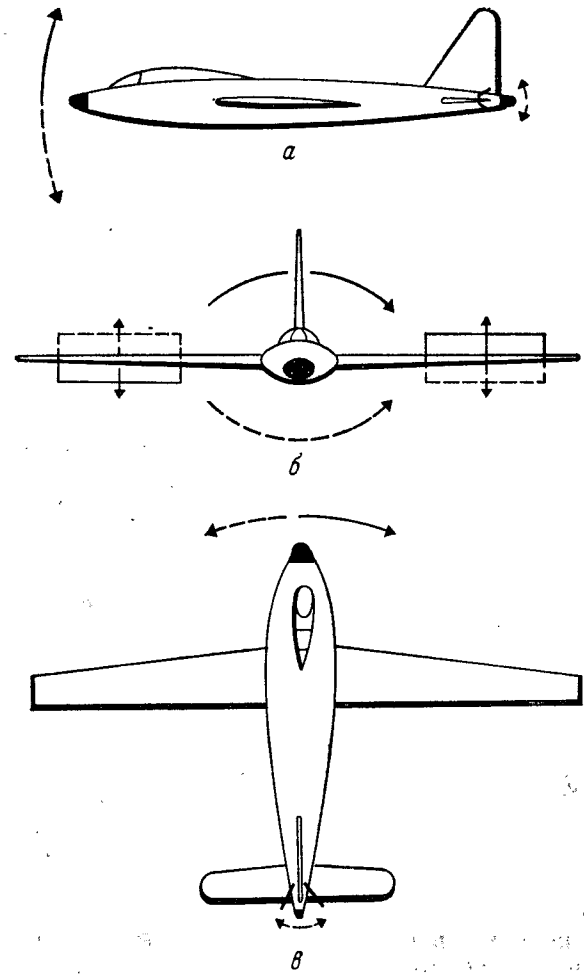

Рис. 13. Вращения вокруг поперечной и продольной осей, а также поиск применительно к планеру:
а — вращение вокруг поперечной оси; б — вращение вокруг продольной оси; *в* — поиск

При определении углов Эйлера важной является последовательность вращений. Обратимся к примеру с планером. Вращение вокруг продольной оси на 90° по часовой стрелке, за которым следует задирание носа на 90° и поворот на правый борт, приведет к тому, что курс планера останется в горизонтальной плоскости

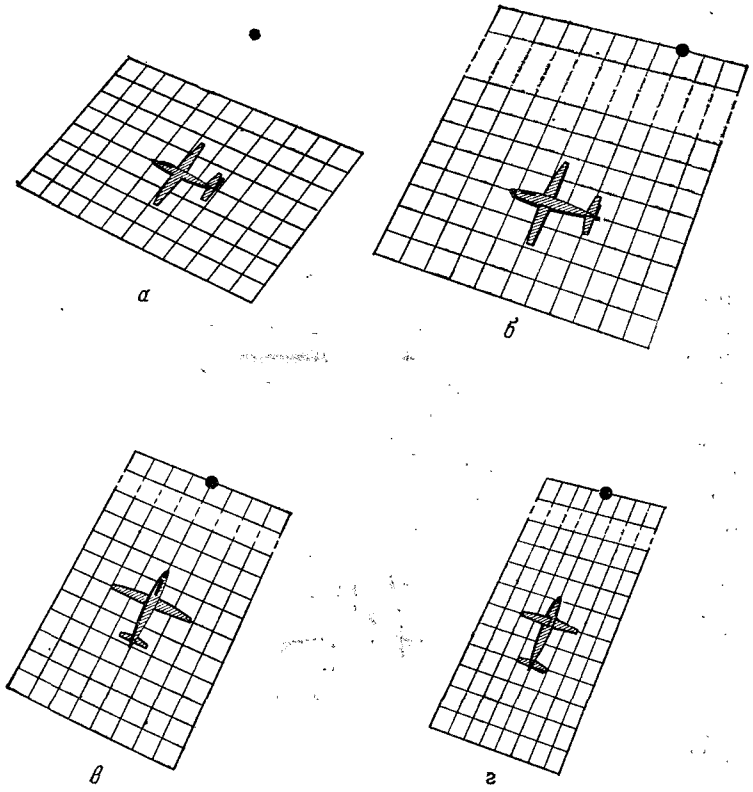

Рис. 14. Достижение требуемой ориентации посредством вращений в последовательности типа «вращение вокруг продольной оси — поиск — вращение вокруг продольной оси»

(хотя планер и повернется на бок) под прямыми углами к первоначальному курсу. Вращение на 90° вокруг поперечной оси, за которым следует вращение на 90° вокруг продольной оси, создаст направление к звездам. Последовательность углов Эйлера рассматривается как вращения «вокруг продольной оси — поперечной оси — поиск». Используя углы Эйлера, можно построить матрицу вращения 3×3 для включения в однородную матрицу преобразования.

В действительности нет единой точки зрения относительно того, к каким углам относятся углы Эйлера. Мы рассматривали углы с последовательностью вращений типа «вокруг продольной оси — вокруг поперечной

оси — поиск», однако существует и другой подход, который заключается в измерении углов в соответствующей последовательности «вращение вокруг продольной оси — поиск — вращение вокруг продольной оси». Представьте, что планер (рис. 14, *а*) переделан для полета в космосе, тогда легко заметить, что новый подход позволяет самолету принять любую выбранную ориентацию (например, прямо к выбранной звезде). Планер может вначале вращаться вокруг продольной оси, пока плоскость крыльев и фюзеляжа не пересечет нужную звезду (рис. 14, *б*). Самолет затем может рыскать, совершая движение поиска, пока нос не укажет на звезду (рис. 14, *в*). Наконец, дальнейшее вращение может выверить крылья к любой требуемой плоскости (рис. 14, *г*).

«Вращение вокруг продольной оси — поперечной оси — поиск» и «вращение вокруг продольной оси — поиск — вращение вокруг продольной оси» являются адекватными методами достижения требуемой ориентации. Следовательно, оба подхода можно применять для составления однородных матриц преобразования. При рассмотрении фактической конструкции запястья робота создать три сочленения под взаимно прямыми углами, как требовалось бы для случая вращения «вокруг продольной оси — поперечной оси — поиск», часто труднее, чем применить вращающееся запястье, на котором прикреплено устройство для поиска и вращения вокруг продольной оси типа дифференциально-зубчатого механизма (см. рис. 9). В конструкциях, в которых две узловые оси выровнены относительно друг друга, вращение вокруг одной из них приводит к идентичному движению рабочего органа, в этом случае рука робота теряет одну степень свободы.

Кинематика

Рассматривая движения руки робота-манипулятора без учета сил (что представляет кинематику руки), можно считать, что манипулятор состоит из ряда отдельных секций, соединенных друг с другом шарнирами. Узлами такого **сочлененного манипулятора** могут быть либо **узлы вращения**, либо **возвратно-поступательные узлы**, звенья поддерживают между узлами жесткую взаимосвязь, которая поддается моделированию. Узел вращения может вращаться только вокруг одной оси, и эта взаимосвязь выражается углом между рассматри-

ваемым узлом и следующим, варьируемым. При возвратно-поступательном движении связь зависит от расстояния между данным узлом и следующим, варьируемым. Последовательность узлов и связей получила название кинематической цепи.

Используя такую модель, можно построить вокруг каждого узла отдельную систему координат. Естественно, должен быть принят соответствующий метод назначения определенных систем к каждому узлу. Обычно используются условные обозначения Денавита — Хартенберга, которые определяют последовательность, состоящую из вращения, за которым следуют два поступательных перемещения, затем опять вращение, с тем чтобы привести любую систему координат в точное соответствие со следующей. Из требуемых для этого величин вращений и перемещений можно легко вывести однородное преобразование, описывающее относительные положения и ориентацию между двумя системами координат.

Однородные преобразования, описывающие зависимость между связями манипулятора, называют **А-матрицами.** Другими словами, А-матрица является описанием изменения в ориентации и положении между данной связью и следующей. Таким образом, А1 — положение и ориентация первой связи манипулятора; А2 — относительные преобразования между системой координат первой и второй связей. Перемножая относительные преобразования (А-матрица), получаем абсолютные координаты (в базовой системе) любой отдельной связи. Другими словами, положение и ориентацию третьей связи в базовых координатах можно определить умножением матриц А1, А2, А3.

Матрицы, полученные из А-матриц, называют **Т-матрицами,** и для манипулятора с шестью связями (с шестью степенями свободы) абсолютное местоположение рабочего органа (на шестой связи) определяется Т-матрицей: $T(6) = A1 \cdot A2 \cdot A3 \cdot A4 \cdot A5 \cdot A6$. Следовательно, зная отдельные А-матрицы для каждой связи в данное время (другими словами, данную конфигурацию руки), вычисляют положение рабочего органа робота. После выполнения преобразований выводят из полученной матрицы ориентацию рабочего органа относительно углов Эйлера.

В робототехнике с помощью кинематических расчетов определяют отдельные положения узлов руки робота или заданное абсолютное положение рабочего органа (Т6). Другими словами, мы знаем текущие положения, ориентацию **(позу)** рабочего органа и точку останова рабочего органа. Все, что требуется,— это перечень всех новых положений узлов для того, чтобы прийти в нужное новое положение рабочего органа. Это решение важно для управления рукой, однако вывести такое решение для руки, скажем, с шестью осями — непросто.

Нет алгоритма, с помощью которого можно вывести кинематические уравнения, необходимые для решения поставленной задачи, поэтому большую роль здесь играет опыт специалиста. Тем не менее раз составлены приближенные кинематические уравнения для конкретной конструкции руки, то нетрудно вычислить нужную конфигурацию руки путем подстановки в точные уравнения. Естественно, хотя имеется только одна поза рабочего органа (Т6), соответствующая конкретному набору положений узлов, может существовать более одной возможной конфигурации руки, которая реализуется точно в той же самой позе рабочего органа. Например, в случае традиционного антропоморфного робота с сочлененной рукой позу захвата можно получить локтем вверх (рис. 15, *а*) или локтем вниз (рис. 15, *б*). Однако на практике обычно требуется провести расчеты только для одного положения.

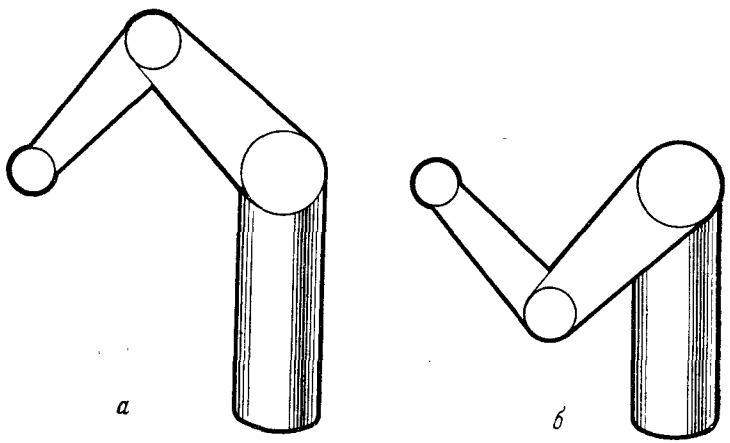

Рис. 15. Две возможные конфигурации руки с одинаковыми положениями рабочего органа:

а — локтем вверх; *б* — локтем вниз

Динамика

В предыдущем подразделе мы рассматривали кинематику руки робота, не обращая внимания на силы и **крутящие моменты,** необходимые для осуществления движений. В связи с быстрым увеличением доступности вычислительной техники появляется возможность включить в стратегию управления рукой ее **динамическую модель.**

На практике многоосные руки роботов представляют собой сложные динамические системы, рассчитать которые трудно. Для решения этих проблем используют математический метод Лагранжа, позволяющий получать динамические уравнения для очень сложных систем. **Лагранжиан** — это разность кинетической и потенциальной энергий системы, выраженная в любой системе координат, не обязательно прямоугольной.

Составив лагранжиан для конкретного робота-манипулятора, можно получить динамические уравнения, которые соотносят силы и крутящие моменты, приложенные к руке, с положениями, скоростями, и ускорениями руки. Другими словами, если заданы приложенные силы и крутящие моменты, то уравнения определяют результирующие движения руки. Если же имеются решения кинематических уравнений, то нет необходимости решать динамические уравнения (которые для всех задач, кроме тривиальных, в общем виде неразрешимы), поскольку необходимые движения руки известны и требуется узнать, какие должны быть приложены силы и крутящие моменты для того, чтобы их осуществить.

Получаемые в матричной форме динамические уравнения, как правило, чрезвычайно сложны и содержат несколько тысяч членов. Тем не менее, найдя составляющие компоненты уравнений, которые являются фактически наиболее весомыми, и упростив их, можно достаточно быстро решить уравнения для непосредственного применения при управлении рукой робота. Информация, получаемая из упрощенных уравнений, свидетельствует о **действующих силах инерции** каждого узла руки (другими словами, зависимость между крутящим моментом и результирующим ускорением в узле) и **инерционной связи** между узлами. Перекрестная связь представляет собой зависимость между приложенным крутящим моментом в узле и результирующими ускорениями. Если инерционные взаимосвязи малы, то всю

модель руки можно упростить, рассматривая ее как независимые механические системы.

Помимо действующих сил инерции и инерционных взаимосвязей необходимо установить, какие дополнительные крутящие моменты следует приложить к узлам руки робота для противодействия тяготению. В определенных случаях масса руки робота может затруднять ее движение, или действовать вместе с приводными системами, или вообще не оказывать влияния.

Кроме того, следует учитывать и другие эффекты, например трение. На практике, однако, некоторые эффекты большую часть времени малы и становятся значительны лишь при больших скоростях, когда точное позиционирование руки робота не имеет большого значения. Следовательно, такие эффекты часто можно не учитывать.

Мобильные платформы

У мобильных роботов есть «традиционная» рука, размещенная на платформе. Варианты конструкции платформы показаны на рис. 16.

Подвижные опоры конструкционно похожи на руки манипулятора, однако трудности, связанные с огибанием углов или перемещением по пересеченной местности при использовании подвижных опор вместо колес, пока не позволили создать мобильные роботы на подвижных опорах. Существует много проектов колесных или гусе-

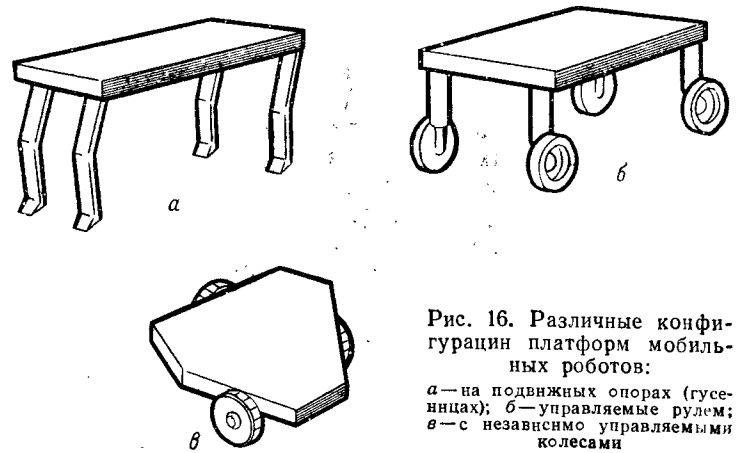

Рис. 16. Различные конфигурации платформ мобильных роботов:

а — на подвижных опорах (гусеницах); *б* — управляемые рулем; *в* — с независимо управляемыми колесами

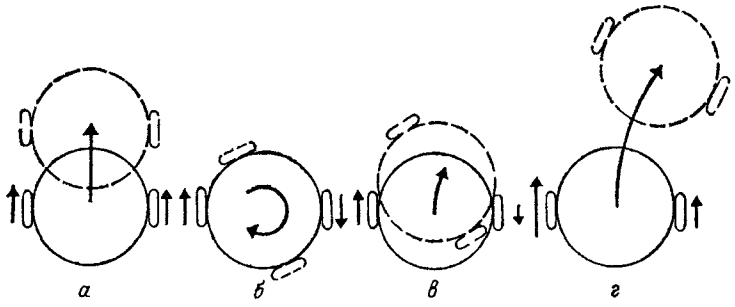

Рис. 17. Характеристики независимых приводных колес нерулевого управления

ничных платформ роботов. Аппаратам с управляемыми колесами требуется значительное пространство для огибания углов, но тем не менее они успешно применяются в различных устройствах (например, как автопогрузчики с вилочным захватом для робототехнических операций).

Рулевое управление Акермана (как в автомобилях) считается трудным для управления в ограниченных пространствах и невозможным для использования в робототехнике. В основном управляется фактически одно колесо, а два других используются лишь для движения аппарата вперед. В системе, приближающейся по маневренности, т. е. с независимо направляемыми колесами, используются два (неуправляемых) независимых приводных колеса наряду с одним или несколькими пассивными «колесиками» (предназначенными для поддержания равновесия платформы). Если два колеса движутся в одном направлении и с одинаковой скоростью, то платформа движется вперед по прямой (рис. 17, *а*). Если два колеса движутся с одинаковой скоростью, но в противоположных направлениях, то платформа будет вращаться относительно точки, расположенной посередине двух колес (рис. 17, *б*).

Следовательно, можно сделать так, чтобы платформа двигалась по отрезкам прямых между точками, направляясь к пункту, останавливаясь, вращаясь для поиска нужного направления, затем снова двигаясь в новом направлении и т. д. Если колеса двигаются с различными скоростями, то платформа будет вращаться относительно любой точки на линии между двумя колесами (колеса вращаются в противоположных направлениях — рис. 17, *в*). Если два колеса вращаются в одном направлении, то платформа двигается по дуге, радиус которой зависит от отношения скоростей колес (рис. 17, *г*). Те же свойства относятся и к любым гусеничным аппаратам.

Чтобы уменьшить пространство, требуемое для огибания углов, и решить вопросы, связанные с рулевым управлением, в конструкцию некоторых мобильных роботов включают транспортный механизм с независимо направляемыми колесами (например, колеса с роликами на периферии).

На рис. 18 показан робот с тремя колесами, у которого неприводные ролики размещены на окружности каждого колеса, а колеса установлены вокруг платформы в виде равностороннего треугольника. Колесо может двигаться в любом направлении за счет вращения вокруг своей оси. Для выбора направления движения два или три колеса могут приводиться в движение одновременно, а так как платформа имеет контакт с грунтом лишь в трех точках, то подвесных систем не требуется.

Четырехколесная конструкция (рис. 19) состоит из платформы с четырьмя традиционно размещенными колесами, но с роликами, установленными под углом к окружностям каждого колеса. Платформа движется вперед и назад традиционным способом, но может перемещаться и боком при движении каждого колеса в противоположном направлении к двум другим. Подобным образом можно заставить платформу двигаться по окружности при движении колес на одной стороне в

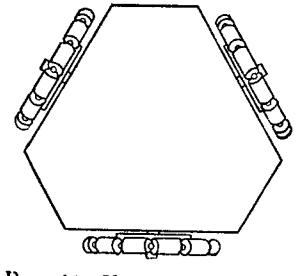

Рис. 18. Конструкция платформы с тремя независимо управляемыми колесами

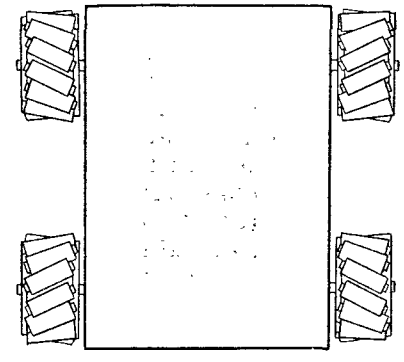

Рис. 19. Конструкция платформы с четырьмя независимо управляемыми колесами

противоположном направлении к расположенным на другой стороне. Для контакта платформы с грунтом всеми четырьмя колесами необходимо использовать подвесную систему. Четырехколесная конструкция малоэффективна.

По мере увеличения использования мобильных роботов в промышленности как для таких работ, как загрузка удаленных друг от друга станков, так и для работ вне заводских цехов, например для работ в оранжереях, большее значение приобретает работа над различными модификациями конструкций подвижных платформ. Система привода, приемлемая для робота-манипулятора, закрепленного на полу, может не подходить к такому же манипулятору, который вынужден нести на себе энергообеспечение, куда бы он ни направлялся.

Глава 4

Как приложить усилие к локтю. Механика робота II. Приводные системы

Гидравлические приводы

Когда более двух десятилетий назад были применены первые роботы «Юнимейт», они двигались под аккомпанемент жалобного воя и лязга гидравлического приводного механизма. Гидравлический привод казался естественным подходом: имевшийся контроллер был сравнительно примитивным, требовавшаяся полезная нагрузка для робота была выше той, которая, казалось, подходила для электрических моторов, а управляемые вручную гидравлические устройства подобного рода десятилетия применялись, например, в мостовых кранах, тракторах (для заднего хода).

Преимущества гидравлических систем заключаются в их способности создавать большие усилия при относительно малых размерах исполнительного механизма за счет высокого давления жидкости, примерно в сто раз превышающего атмосферное. Насосное оборудование громоздко, однако жидкость направляется по трубопроводу малого сечения для обеспечения движения узла

робота с использованием сравнительно небольшого устройства. Кроме того, жидкость (разновидность минерального масла) обладает свойством при движении составных частей гидравлической системы смазывать их. При огнеопасной обстановке масло заменяется невоспламеняемой жидкостью, например смесью двухатомного спирта с водой.

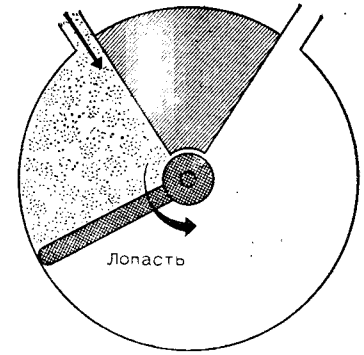

Рис. 20. Роторный лопастной исполнительный механизм

При высоких рабочих температурах, например в литейных цехах, в качестве гидравлических жидкостей используют сложные эфиры фосфорной или кремниевой кислоты.

В конструкциях роботов применяют различные методы и устройства для преобразования высокого давления гидравлической жидкости в полезное движение. В основном это **гидравлические поршни**, обеспечивающие линейные (с определенной длиной) или вращательные движения между заданными точками, **гидравлические моторы** непрерывного вращения. **Роторный лопастной исполнительный механизм** — разновидность гидравлического поршня — предназначен для обеспечения вращения менее чем на один оборот. Механизмы состоят из одной или более лопастей (обычно одной для роботов), закрепляемых на центральном валу радиально (рис. 20), и вращаются внутри корпуса под действием подаваемой в камеру жидкости. Лопасть (связанная с валом) будет двигаться, пока не займет требуемое угловое положение. Движение назад осуществляется благодаря подаче

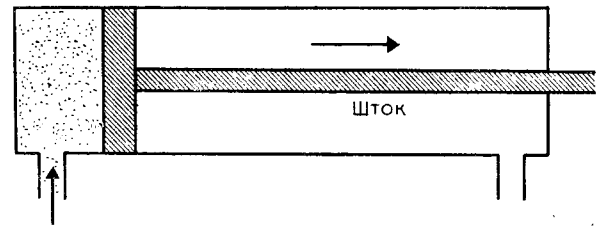

Рис. 21. Гидравлический цилиндр

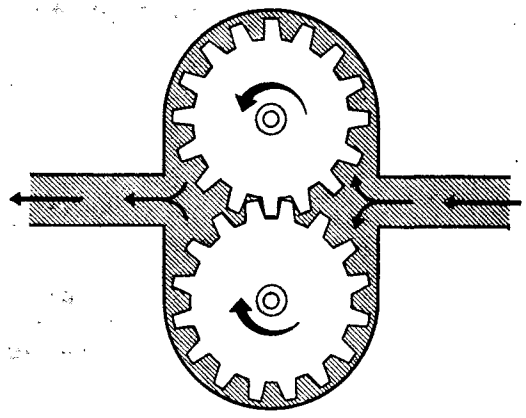

Рис. 22. Гидравлический шестеренчатый мотор-насос

жидкости в другую камеру с противоположной стороны лопасти. **Гидравлические цилиндры** обеспечивают также линейное перемещение (рис. 21) за счет подачи масла с одного или другого конца цилиндра с поршнем внутри.

Вид гидравлического мотора зависит от стоимости и требований эксплуатации робота. На практике нехарактерно использование гидравлических моторов для роботов, поскольку потребность в сложном передаточном механизме может свести на нет преимущества гидравлики.

В некоторых конструкциях мотора гидравлические цилиндры прикреплены к ведущему колесу для преобразования возвратно-поступательного движения во вращательное (например, как в паровозах или поршнях двигателей внутреннего сгорания). На рис. 22 показан принцип работы мотора, когда жидкость подается в малый зазор между корпусом двумя взаимосцепленными шестернями. Так как жидкость не может пройти между шестернями, она обходит их у поверхности корпуса (в зазорах между вершинами зубьев). Благодаря этому шестерни вращаются.

Третья разновидность гидравлического мотора показана на рис. 23. В этой конструкции ряд подрессорных лопастей размещен на роторе на конце выходного вала. Ротор расположен эксцентрично внутри цилиндрического корпуса. Таким образом, подрессоренные лопасти выталкиваются, образуя ряд камер. Однако, поскольку ротор расположен эксцентрично с камерой, то по мере

его вращения заданная камера будет изменять размеры, практически сходя на нет в месте, где ротор ближе всего подходит к корпусу. При таком размещении масло, поступившее с одной стороны корпуса, не в состоянии пройти за точкой, где ротор ближе всего к корпусу, но, толкая лопасти (и ротор), масло может пройти сквозь мотор через большие камеры.

Выбор гидравлического привода для использования в конструкции робота зависит от многих факторов, однако чем проще привод, тем лучше. Простой гидравлический цилиндр (надежный и недорогой) часто применяется для всех систем и используется как гидравлический привод, либо непосредственно двигающий телескопический узел, либо обеспечивающий вращение посредством воздействия на рычаг. На рис. 24 показан робот-манипулятор, вращение плеча A' которого осуществляет цилиндр A, предплечья B' — цилиндр B.

Если требуются более высокие динамические характеристики, то пользуются одной из конструкций гидравлического мотора с системой зубчатых передач. Хотя этот привод энергетически выгоден и обеспечивает хорошие эксплуатационные качества, стоимость его намного больше и, будучи механически более сложным, он менее надежен. Следовательно, возрастут и эксплуатационные расходы.

Рассмотренные три вида гидравлических приводных устройств позволяют сделать вывод, что каждая из этих конструкций может эксплуатироваться в качестве гидравлического насоса. Аналогично поршневому насосу

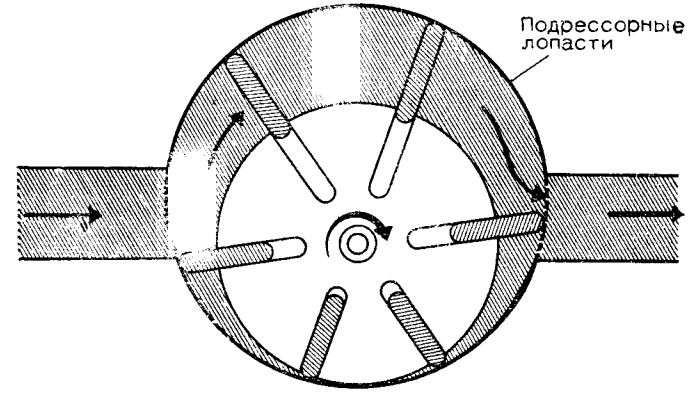

Рис. 23. Гидравлический лопастной мотор-насос

3 Зак. 611

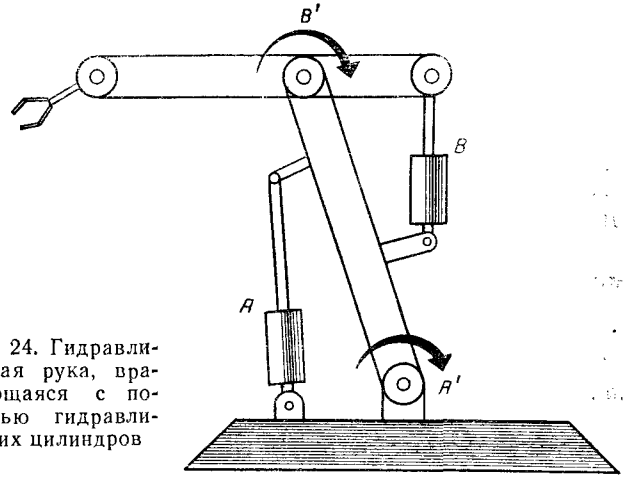

Рис. 24. Гидравлическая рука, вращающаяся с помощью гидравлических цилиндров

может действовать и поворотное колесо, которое посредством электрического мотора всасывает и откачивает масло с помощью линейного поршня (принцип действия велосипедного насоса). Уменьшить пульсацию на выходе можно, используя несколько поршней, каждый из которых прикреплен к различным точкам вокруг колеса.

Вращение двух шестерен во втором виде мотора позволяет использовать его как насос. Масло из подводящего к корпусу патрубка попадает в зазоры между впадинами зубьев и корпусом и затем по мере вращения шестерен выбрасывается через выходные отверстия. На этом основана работа ротора в лопастном моторе, где масло засасывается в расширяющиеся камеры у входного отверстия, а затем выталкивается, как только камеры начинают сжиматься у выходного отверстия. Рассмотренные насосы могут использоваться для обеспечения необходимого давления жидкости и приведения в действие гидравлического робота. На практике поршневой насос применяется для удвоения давления в некоторых других моделях (давление достигает нескольких сот килограммов на квадратный сантиметр). В большинстве роботов используют или шестереночный насос (обычно для систем, предназначенных для выполнения легких работ), или лопастной (для тяжелых работ).

Несмотря на высокое давление, гидравлические насосы в роботах обычно не в состоянии подавать большой *объем* масла в заданный отрезок времени. Тем не менее в случае когда телескопическому поршню необходимо на полной скорости пройти с максимальным ходом за короткий период, гидравлической системе требуется жидкости больше, чем может дать насос. Расход жидкости пополняется за счет хранящейся под высоким давлением жидкости в **гидравлическом аккумуляторе.** Насос или нагнетает масло в накопительный подрессоренный поршень, или поддерживает масло под нужным давлением посредством газа высокого давления, действующего на диафрагму. Этот аккумулятор затем питает оставшуюся часть системы.

Когда потребность в гидравлической жидкости превышает производительность насоса, объем жидкости в аккумуляторе, находящейся под высоким давлением, убывает. Однако такая неожиданная потребность кратковременна (в следующий момент роботу, может быть, придется бездействовать в течение нескольких секунд), так что насос вскоре сможет восстановить истощенный аккумулятор.

Аккумуляторы, применяемые в роботах типа «Юнимейт-200», отличаются от гидравлических насосов тем, что увеличивают скорость расхода масла более чем в три раза. Преимуществом гидравлических систем является способность их «запасать» энергию и таким образом справляться с возникающими колебаниями нагрузки. Однако это преимущество частично снижается, так как гидравлический робот использует одно и то же высокое давление, даже поднимая всего несколько граммов.

Кроме того, насос, аккумулятор, исполнительные механизмы и остальная часть гидравлической системы робота постоянно усложняются. Например, объединяются несколько клапанов как для управления расходом и направлением жидкости, так и для регулирования давления. Во избежание повреждения системы в состав включают **систему сброса давления,** которая позволяет жидкости течь обратно от любого исполнительного механизма через клапан сброса давления, если (возможно, из-за того, что рука пытается поднять слишком тяжелый груз) давление жидкости поднимется выше заданного значения, подобно действию клапана в скороварке. Однако гидравлическая жидкость не должна вырываться наружу, она должна возвращаться по трубам в резервуар для гидравлической жидкости. То же самое

применимо для жидкости, вытесняемой действующим исполнительным механизмом (нагнетание жидкости в одну камеру поршня, естественно, выталкивает ее из другой). Таким образом, для всей системы должна иметься сеть трубопроводов для возврата жидкости.

Клапаны сервоуправления необходимы для управления потоком как жидкости высокого давления к исполнительному механизму, так и жидкости низкого давления обратно. Следовательно, задача электрического клапана — одновременно закрывать или открывать две трубы. Но для обратного действия устройства клапан должен «обменивать» конечное назначение двух труб (например, связывать линию высокого давления с одной из двух камер линейного исполнительного механизма). Такие селекторные клапаны, как правило, довольно дороги.

Стоимость клапанов, как правило, не снижается по мере уменьшения их размеров. Таким образом, в небольших роботах они могут стать очень дорогими. Другие проблемы, связанные с гидравликой (такие, как низкие температуры, увеличивающие вязкость жидкости и способные сделать робот «вялым»), делают гидравлические приводы роботов для многих приложений менее привлекательными, чем электрические.

Недавно, однако, предполагалось, что **электрореологические (ЭР) жидкости** могли бы, наконец, решить эту проблему в робототехнике. Эти так называемые **жидкости-джемы** состоят из суспензии мельчайших неметаллических частиц (диаметром около одной тысячной доли миллиметра) в масляной среде. При нормальных условиях суспензии ведут себя, как традиционные жидкости, однако при воздействии на них высокого электрического напряжения они немедленно «замерзают» внутри электрического поля и ведут себя, как твердое тело. Такая быстрая смена состояния (в одном из направлений) может произойти в пределах миллисекунды.

Это свойство электрореологических жидкостей можно было бы использовать для сложных недорогих клапанов. Оптимальные условия для создания электрореологического эффекта, как было установлено, возникают при подаче напряжения 2000 В через щель диаметром 1 мм. Контролировать расход ЭР-жидкости через трубу можно было бы просто, если бы она протекала между двух пластин, закрепленных параллельно, и взаимодействовала бы с электронной системой, управляющей ро-

ботом. При отсутствии напряжения на пластинах жидкость проходила бы свободно. Однако при подаче напряжения она затвердевала бы между пластинами и блокировала поток. При наличии двух отдельных клапанов, размещенных на одном из разветвлений вилки гидравлического трубопровода, было бы легко отвести поток жидкости по одному из двух путей простым переключением напряжения с одной группы пластин на другую. В настоящее время считается, что практически такие системы могут появиться только через несколько лет.

Электрические приводы

Хотя многие из читателей, возможно, не имеют опыта обращения с гидравлическими системами, каждый ежедневно так или иначе соприкасается с электрическими моторами. Независимо от того, являются ли они моторами постоянного тока (часто работающими на батареях) для заведения двигателя автомобиля или моторами переменного тока (работающими от сети) для поворота барабана сушилки или стрелок электрических часов, их возможности хорошо известны. В робототехнике используются различные типы электромоторов и, чтобы оценить преимущества и недостатки электрических приводов по сравнению с гидравлическими системами, необходимо детально разобраться и определить, какие электромоторы подходят для роботов.

Первый коммерческий промышленный робот с электроприводом был применен в 1974 г. шведской корпорацией «АСЕА». Для роботов с электроприводами применялись моторы постоянного тока не столько из-за их достаточно большой мощности, сколько из-за возможности легко управлять ими с помощью сравнительно простой электроники. Хотя и требуется постоянный ток, батареи (для неподвижных роботов) используются редко. Вместо этого переменный ток выпрямляется в эквивалентный постоянный.

Мотор постоянного тока включает набор электромагнитов, закрепленных на выходном валу, который расположен между полюсами большого магнита (постоянного или электромагнитного). Большой магнит имеет два набора полюсов и может «толкать вокруг» электромагнит с энергией. Всякий раз, когда электромагнит притягивается большим магнитом и выравнивается по положению

с ним, механизм переключения на выходном валу изменяет электрические соединения с обмотками, так, что большой магнит в дальнейшем больше не притягивает эту обмотку, а притягивает другую. Таким образом, электромагниты заставляют мотор вращаться, постоянно следя за притяжением большого магнита.

Простота в управлении скоростью обеспечивается подаваемым на обмотки мотора напряжением: чем оно выше, тем быстрее вращается мотор. Подобным образом крутящий момент зависит от изменения тока. Смена полюсов изменяет направление вращения мотора. Как контроллер узнает, с какой скоростью должен перемещаться заданный узел, описано в гл. 5, но если известна величина скорости, то для того чтобы непосредственно управлять мотором постоянного тока, необходимо величину скорости привести к пропорциональному уровню электрического напряжения (а затем при необходимости усилить напряжение).

Менее известен **шаговый электродвигатель.** Этот тип электродвигателя обладает свойством вращаться с некоторой скоростью в одном из двух направлений, а также останавливаться в любом из точного числа чередующихся положений.

В более сложных моделях выходные валы могут поворачиваться к любому из двухсот различных угловых положений за оборот (т. е. менее двух градусов за шаг). Этот вид мотора применяют на некоторых печатных аппаратах.

Принцип действия шагового электродвигателя фактически заключается в инверсии мотора постоянного тока с большим числом электромагнитных обмоток, окружающих *постоянный* магнит, прикрепленный к выходному валу, и устройством механического переключения, заменяемым электронным эквивалентом. Вращение выходного вала автоматически не требует переключения соединений обмоток, которые бы не смогли заставить магнитное поле постоянного магнита «догнать» магнитное поле притягивающей обмотки. Вместо этого благодаря электронному переключению на правильную комбинацию полярностей обмотки можно сделать так, чтобы вал притягивался только к нужной катушке. Следовательно, можно узнать единственное положение вала, соответствующее конкретной комбинации переключения.

Если выбирается эквивалентная комбинация переключения, которая приводит к тому, что постоянный

магнит притягивается только той обмоткой, которая следует за притягиваемой до того обмоткой, то вал будет поворачиваться на угол, равный расстоянию между смежными обмотками. Путем последующего притяжения магнита к каждой смежной обмотке можно при полном управлении заставить вращаться вал с высокой скоростью, в любой момент зная его положение. Благодаря такому контролю положения не всегда обязательно проверять, где остановился шаговый мотор, что делает его идеальным для обучаемых роботов. Для крупных промышленных роботов шаговые электродвигатели сегодня слишком дороги и маломощны, даже самые большие имеют мощность менее 1 л. с. Наибольшая полезная нагрузка для роботов с шаговыми электродвигателями составляет около 50 кг, как, например, для робота «Локомэн», сделанного фирмой «Пендэр Роботикс», Великобритания.

До недавнего времени считалось, что моторы переменного тока нельзя применять в роботах из-за трудностей в управлении скоростью их вращения. В простейшем виде мотор переменного тока состоит из внешних электромагнитов, размещенных вокруг центрального ротора, но без каких-либо устройств механического переключения. Однако из-за того, что переменный ток (например, в электросети) постоянно меняет полярность (сначала течет в одном направлении, а потом в противоположном несколько раз в секунду — 50 раз в Великобритании и 60 раз в США), переменный ток электроснабжения можно просто непосредственно связать с электромагнитами. Тогда изменение направления тока в обмотках будет изменять в них полярность, как это происходит при механическом переключении в моторе постоянного тока; в обмотках появится электромагнитное поле для вращения (почти так, как если бы обмотки вращались механически сами).

Скорость вращения ротора на выходном валу (которая «собирается вокруг» вращающимся полем) тесно связана с частотой изменения направлений переменного тока. В моторе переменного тока уменьшение электрического напряжения не влияет на скорость вращения; мотор будет вращаться в соответствии с частотой переменного тока до тех пор, пока напряжение не станет столь низким, что мотор остановится. Наиболее простым способом постоянного изменения скорости вращения мотора является пропорциональное изменение частоты

переменного тока. Уменьшение частоты в два раза приведет к такому же снижению скорости.

До недавнего времени изменять частоту переменного тока (независимо для каждого мотора робота) было трудно. Однако благодаря развитию современных электронных устройств, способных манипулировать высокими мощностями, появилась возможность легко генерировать меняющиеся частоты, соответствующие требуемой мощности. Каждое изменение направления тока заставляет мотор некоторое время вращаться, и чем больше будет изменений в секунду, тем быстрее он будет вращаться. Такие моторы очень мощны и уже производятся. Например фирма «Фанук» включает их в конструкцию серийно выпускаемых промышленных роботов.

Принято считать, что дешевые приводы переменного тока в большинстве роботов будут в конечном счете медленно вытеснять менее долговечные приводы постоянного тока.

Рассмотренные выше электромоторы вращаются с большой скоростью, но с малым **крутящим моментом.** Поэтому, чтобы передать мощность от моторов к нагрузке при увеличении приводного крутящего момента, необходим передаточный механизм с высоким коэффициентом редукционной передачи. Недавно были созданы низкоскоростные моторы, развивающие высокий крутящий момент, в которых использованы магнитные материалы. Такие моторы легки и компактны и благодаря своим характеристикам могут быть связаны с нагрузкой без применения трансмиссий.

В настоящее время проводятся исследовательские работы в этом направлении, например в университете Карнеги-Меллон и МТИ, США. В таких роботах каждый узел приводится в движение непосредственно мотором без трансмиссий. Такой подход может представляться весьма спорным, поскольку каждый мотор размещается на стороне узла, приводимого в движение. Например, мотор, приводящий в действие плечо, должен преодолевать и тяжесть моторов, размещенных на локте и запястье (традиционно эти узлы приводятся в движение на расстоянии, с тем чтобы уменьшить степень, с которой масса моторов добавляется к нагрузке на другие узлы). Если трудности будут преодолены, то управляемые руки будут обладать замечательными свойствами, например отсутствием **мертвого хода,** низким трением и низкой **податливостью,** высокой надежностью и сокращенной потребностью в комплексном техническом обслуживании и переналадке. Недавно созданный в МТИ образец мотора способен развивать скорость до 5 м/с.

Другим видом электрического мотора, который может широко применяться в конструкциях роботов (особенно для больших роботов портального типа), является линейный мотор. В отличие от других традиционных конструкций электромоторов такие моторы вместо вращения создают прямолинейное движение. В принципе их можно рассматривать как моторы переменного тока, у которых «разрезали» одну сторону, затем «развернули» ее во всю длину. Управляя полярностью обмоток линейного мотора, можно заставить сердечник мотора скользить вдоль пути с высоким качеством управления. И наоборот, линейный мотор может оставаться неподвижным, а «путь» будет скользить относительно мотора. Преимуществом линейных моторов является то, что они не требуют ни подшипников, ни трансмиссии, поэтому потребности в техническом обслуживании очень низки. Моторы способны очень быстро набирать ускорение и могут передвигаться со скоростью около 1 м/с.

Линейные моторы редко применяются даже в исследовательских роботах. Возникает вопрос: что предпочтительнее — электрические приводы или гидравлические? Что касается роботов первого поколения, то гидравлические моторы применяются в тех, которые используются для перемещения предметов полезной нагрузкой больше 10 кг, несмотря на то, что первые гидравлические роботы имели резкие рывки при движении, подтекали и были ненадежны. Легкие роботы, обычно работающие в менее вредной среде, как правило, приводились в движение моторами постоянного тока, так как высокая стоимость сервоклапанов препятствовала применению гидравлики.

Однако, несмотря на значительное увеличение надежности, гидравлические приводы стали реже применяться не только для легких роботов, предназначенных для выполнения таких операций, как сборка, но и для тяжелых работ. Крупнейший в мире робот, созданный фирмой «Ламбертон Роботикс», манипулирует предметами с полезной нагрузкой 1,5 т, используя электрические сервомеханизмы постоянного тока. Использование электроприводов можно объяснить тем, что обслуживание

любого робота требует электриков и механиков, а гидравлические роботы нуждаются еще и в других специалистах.

Электроприводы обычно энергетически более эффективны, чем их гидравлические эквиваленты, и в целом роботы склонны стать бесшумными. В ряде случаев, например по соображениям безопасности, предпочтение может отдаваться скорее гидравлическим, чем электрическим, приводам (способным при искрении вызвать пожар в воспламеняемой среде). Гидравлические системы обладают способностью выдерживать сильные механические удары. По-видимому, для тяжелых работ гидравлика в ближайшем будущем будет оставаться наиболее эффективным по стоимости вариантом. Следует отметить, что сборочный робот «ИБМ-7565» с максимальной полезной нагрузкой в 2,3 кг приводится в движение гидравлически. Некоторые роботы смешанного типа также используют гидравлические приводы для главных осей, а электроприводы — для запястья.

Очевидно, для мобильных роботов выбор следует остановить на электроприводах как для создания тягового усилия (в некоторых небольших мобильных роботах используются шаговые моторы), так и для манипулятора, который несет на себе подвижная платформа. Сам манипулятор вряд ли будет большим (если платформа должна транспортировать его), так что электромоторы, вероятно, применялись бы даже тогда, когда он был бы немобильным. С другой стороны, платформа должна перемещать не только себя и любой манипулятор, но также и энергооборудование. В настоящее время наиболее распространенным видом энергооборудования являются автомобильные аккумуляторные свинцово-кислотные батареи, которые позволяют роботам действовать несколько часов. Электрический гидравлический насос, конечно, более экономичен, чем аккумулятор (при снабжении энергией гидросистемы), неэффективное преобразование энергии из электрической в гидравлическую значительно бы уменьшило период, в течение которого робот мог бы работать без перезарядки.

Другие приводы

Пневматические приводы сравнительно дешевы, бесшумны и надежны, их легко монтировать и обслуживать, а утечка воздуха вызывает небольшой шум. Пневматические приводы обладают сходством с гидравлическими (с полным набором линейных и вращательных исполнительных механизмов и моторов), но не имеют дополнительных сложностей возвратной сети низкого давления (воздух просто выходит в атмосферу). Пневмосистемы высокого давления обычно пломбируются в заводских условиях. Пневматические узлы системы менее точны, но намного дешевле своих гидравлических эквивалентов.

Такие системы имеют недостатки. В большинстве систем используются давления, которые лишь в несколько раз превышают атмосферное, и если только не применяются цилиндры большого диаметра, полезные нагрузки для руки не могут быть высоки. Кроме того, воздух не выступает в роли естественной смазки, как жидкость, и может содержать водяные пары, способствующие окислению.

Однако наибольший недостаток связан с тем, что почти невозможно контролировать положение пневматического цилиндра. Как только давление внутри цилиндра достигает величины, достаточной для преодоления противодействующих сил, поршень будет двигаться до тех пор, пока на что-нибудь не натолкнется. Остановить его посередине пути очень трудно (не говоря уж о точности, скажем, в один миллиметр), и обычно в нужный момент применяют тормоз. Сложно контролировать и скорость движения. Как правило, требуется пульсация поступающего с различными скоростями воздуха.

Поршень можно снабдить пружиной так, чтобы сила, которую должен преодолеть сжатый воздух, постоянно увеличивалась в цилиндре, где движется поршень, а заданное давление воздуха выталкивало поршень к единственной точке, где сила действия пружины точно уравновешивала бы силу сжатого воздуха. В этом случае пружина тактически борется против движения, которое пытается совершить робот.

Если робот захватывает предмет, то масса предмета либо прибавляется, либо вычитается из эффекта регулирующей пружины.

Считается, что пневматику нельзя использовать для скоростного и точного контроля положения руки, который требуется в робототехнике. Если все-таки необходимы затраты на устройства обратной связи и управления, то есть смысл иметь более дорогие типы приводов, но с лучшими характеристиками. Тем не менее

пневматические приводы идеальны для применения в устройствах типа «взять-положить», выполняющих заданную последовательность движений, для которых пределы хода определены установленными концевыми жесткими упорами.

В этих системах, когда контроллер дает команду, чтобы какой-либо узел двигался от одного концевого упора до другого, соответствующий воздушный клапан открывается и сжатый воздух уходит к требуемому исполнительному механизму, двигая его до тех пор, пока он не натолкнется на упор. Некоторые пневматические манипуляторы способны включать и выключать различные концевые упоры. Использование пневматики для выполнения тяжелой работы обеспечивают автоматические, постоянно меняющиеся концевые упоры (по возможности двигающиеся с помощью электричества). Конструкции с такими устройствами можно отнести к полностью робототехническим.

Несколько слов о мобильности

Если энергию, затрачиваемую роботом, сравнить с энергией, затрачиваемой человеком при выполнении той же работы, то окажется, что робот потребляет энергии в *сто раз больше*. Это поразительное проявление технологической неэффективности робототехнических приводов по сравнению с нашей «слабой» мускульной тканью. Поэтому должны быть проведены исследования, прежде чем наши роботы по эффективности сравняются с живыми организмами, однако мы знаем, что стремимся к достижимой цели.

Вопросы сбережения энергии — важное направление исследования, не столько из-за экономии, проявляющейся в заводских счетах за электричество (роботы потребляют *не очень* много энергии), сколько из-за того, что чем меньше энергии потребляют узлы робота, тем дольше они могут функционировать, используя заданный источник энергии на мобильном роботе. С повышением значения, которое придается мобильности роботов, может потребоваться увеличить время между двумя перезарядками. Когда робот простаивает при перезарядке батарей, он приносит убытки. На практике предпочтительнее заменить отработанный блок питания заряженным (оставив старый блок на автоматическую перезарядку и используя его потом вновь). Однако это дорого, и если робот простаивает, это не практично.

Какими же представляются краткосрочные прогнозы? Быстрое вращение маховиков представляет собой эффективный способ накопления механической энергии и обладает преимуществом не только отдавать энергию, но и использовать запасенную энергию для повторного использования. Поэтому робот мог бы, например, воспользоваться тем, что сила тяжести способствует опусканию тяжелого груза. Вместо того, чтобы тратить энергию для противодействия тяготению при опускании, робот мог бы превратить часть потенциальной энергии полезной нагрузки в кинетическую энергию маховика, чтобы использовать ее потом для подъема груза. Точно так же мобильный робот, спускающийся с возвышения, мог бы превратить часть потенциальной энергии (которая растрачивалась бы иначе при использовании тормозов) для повторного использования. Этот подход в экспериментальном порядке уже нашел применение в некоторых автобусах, предназначенных для работы на холмистой местности. Мобильные роботы, функционирующие в закрытых помещениях, не могут быть оснащены двигателями внутреннего сгорания. Такие роботы должны быть оснащены электрическим источником питания. Проблема экономии энергии менее остро стоит в условиях функционирования роботов в закрытых помещениях. Однако, если когда-нибудь будут созданы безлюдные заводы, то могли бы быть сняты и ограничения на местное загрязнение атмосферы и можно было бы подумать о применении двигателей внутреннего сгорания. Конечно, можно было бы создать различные типы «блоков питания». Вместо сжигания нефтяных продуктов вполне вероятна эксплуатация двигателей внутреннего сгорания с применением водорода (многие экспериментальные автомобили в США таким образом переделаны), преимущество которого состоит в том, что побочным продуктом является водяной пар.

Наконец, модуль атомного питания — излюбленная тема научных фантастов — в действительности сравнительно прост в изготовлении и рассматривается как средство энергообеспечения хирургически имплантируемых протезов искусственного сердца. Естественно, он мог бы оказаться идеальным для всех типов мобильных роботов. К сожалению, плутоний, используемый для энергообеспечения таких мини-генераторов, ядовит. До

сих пор опасения относительно вероятного разрыва защитного кожуха вокруг плутония (например, при взрыве), приводящего к выбросу смертоносного содержимого, вызывают серьезные сомнения в возможности практического применения таких устройств.

Трансмиссии

За исключением случая непосредственно приводимых в движение роботов, каждый приводной блок в роботе требует передаточного механизма. Существует много таких механизмов, ни один из которых в действительности специально не предназначен для роботов. В их конструкциях могут применяться цепные (как в велосипеде) или ременные передачи. Зубчатые ременные передачи можно использовать для приведения в действие не только узлов вращения, но и телескопических узлов. Шестерни можно применять как для замедления быстрого вращения моторов, так и для создания сложных движений запястья с использованием механизма дифференциации.

Вращение можно преобразовать в прямолинейное движение различными способами, в большинстве из которых используется либо **кремальерный механизм,** либо **шарнирный винт.** В кремальере, показанной на рис. 25, небольшая шестерня поворачивается относительно прямой зубчатой рейки. Тот же принцип можно применить и в реверсе. Гидравлический поршень может двигать рейку (или можно использовать два поршня, один прикрепленный к рейке сверху, а другой снизу поршня), обеспечивая таким образом вращательное движение шестерни с очень высоким крутящим моментом на выходе.

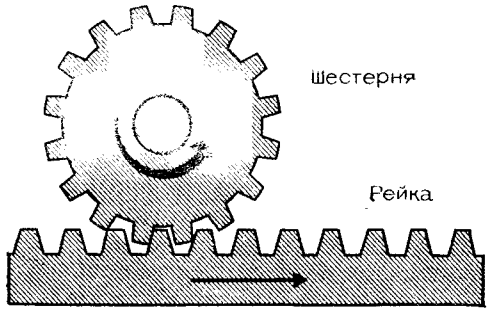

Рис. 25. Реечно-цилиндрическая передача

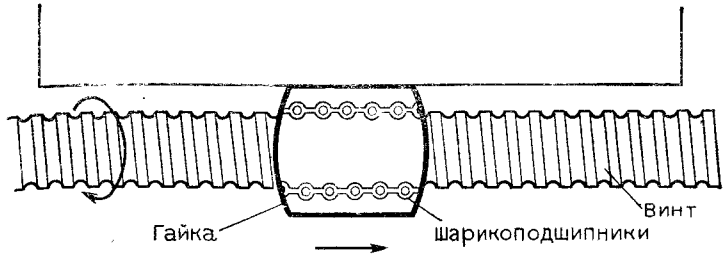

Рис. 26. Передача с шаровым винтом

При необходимости более высокой точности или передачи больших усилий используется механизм «винт-гайка» (рис. 26). Механизм имеет гайку на длинном винте. Поворот винтового шпинделя заставляет медленно перемещаться гайку, которая не может вращаться. Все, что прикреплено к гайке, двигается вместе с ней. Этот же механизм обычно используется, например, для перемещения рабочего стола фрезерного станка. На практике гайка обычно двигается на шарикоподшипниках, обеспечивая высокоэффективную передачу (около 90 % эффективности против 30 % без подшипников). Используя две размещенные вместе подпружиненные гайки, но раздельно на различных бороздах винта, можно исключить мертвый ход.

Все шире применяются в роботах **волновые передачи.** Эти системы являются крупным достижением в создании трансмиссий, так как обеспечивают большое снижение скорости на одной ступени (иногда несколько сотен к единице) наряду с высоким крутящим моментом на выходе.

Волновая передача состоит из трех частей, показанных схематично на рис. 27: **генератора волн, гибкого и жесткого колес.** Гибкое колесо — зубчатое стальное кольцо, которое легко деформируется. На практике, однако, оно приобретает форму эллипса из-за эллиптического генератора волн, помещенного внутрь и действующего как шаблон. Генератор волн сконструирован так, что даже если гибкое колесо фиксировано, генератор еще может скользить вокруг по внутренней поверхности колеса и таким образом вращаться. Вращение осуществляется путем установки шарикоподшипников (в виде **круговой орбиты**) на поверхности генератора волн так, что между контактирующими поверхностями

гибкого колеса и генератора возникает очень малое трение. Поскольку генератор не круглый, то при вращении его внутри неподвижного гибкого колеса он будет так деформировать колесо, что с внешней стороны будет казаться, хотя оно и не вращается, что у него две выпуклости (соответствующие двум точкам эллипса), которые движутся вокруг своей окружности.

При полной волновой передаче генератор волн и гибкое колесо устанавливаются внутри жесткого колеса, состоящего из твердого стального кольца с зубцами внутри. Размеры зубцов на гибком и жестком колесах совпадают, но на гибком колесе обычно на два зубца меньше, чем на жестком. В результате зубцы эллиптического гибкого колеса зацепляются с зубцами жесткого колеса только в двух областях — вокруг главной оси эллипса. Если жесткое колесо установлено неподвижно, то при вращении генератора волн (см. рис. 27) эти *области контакта* (не само гибкое колесо) вращаются с генератором волн, зацепляя (без проскальзывания) каждый зуб гибкого колеса со следующим зубом жесткого колеса.

Поскольку на гибком колесе на два зубца меньше, чем на жестком, то как только гибкое колесо пройдет всю поверхность жесткого колеса (другими словами, генератор волн завершит один полный оборот), гибкое колесо остановится на расстоянии двух зубцов от на-

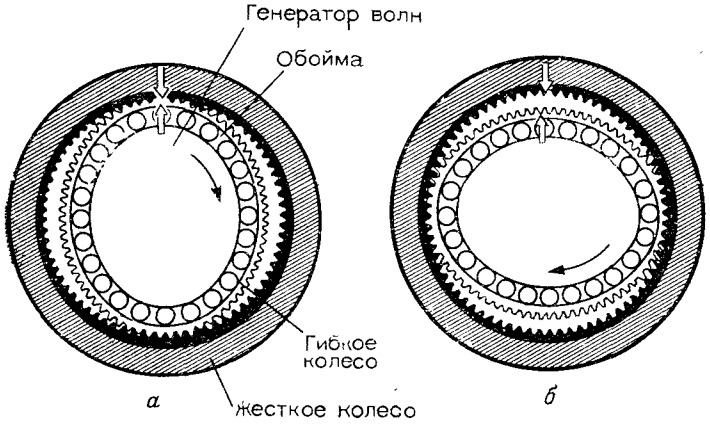

Рис. 27. Составные части и действие волновой передачи:
а — в начальный момент; *б* — после одного оборота генератора

чальной точки. При каждом обороте генератора волн гибкое колесо перемещается на два зубца в противоположном направлении. Это означает, что если генератор связан с входным валом, а гибкое колесо — с выходным валом, то будет получен высокий коэффициент редукции зубчатой передачи. Используемые на практике конструкции этого механизма легки, компактны, с минимальным мертвым ходом, надежнее и эффективнее традиционных многоступенчатых зубчатых передач. Широкое распространение они получают в роботах с электрическими приводами.

Технические характеристики функционирования роботов

Рассмотрим, что же в действительности означает термин «точность», относится ли он к тому, насколько хорошо робот может автоматически следовать по прямой между двумя заданными точками, или к тому, насколько хорошо он может найти заданные точки? Относится ли точность только к позиционированию робота в тот же день, когда он запрограммирован, или необходимо учитывать любое отклонение, которое может произойти через месяцы постоянного выполнения роботом той же самой работы? Взяты ли спецификации после **периода разогрева?** Применимы ли они ко всем осям или только к одной?

Для термина «точность» нет определения, так что в каждом конкретном случае следует выяснить, что же конкретно понимается под этим термином. Специалисты в области робототехники проводят различие между **точностью робота** и его **способностью к повторяемости** позиции. С одной стороны, *точность* характеризует степень соответствия фактической позиции робота желаемой или заданной. С другой стороны, *способность к повторяемости* характеризует степень соответствия повторяемых движений при тех же условиях. Здесь прямая аналогия с другими видами «попадания в цель», например со стрельбой из винтовки. «Кучность» попадания в цель показывает высокую точность и высокую повторяемость. Хорошая «кучность», но вдали от нужного положения показывает высокую повторяемость, но низкую точность, наводя на мысль, что прицелы нуждаются в регулировке. Широкий разброс, но в основном сконцентрированный на цели, демонстрирует низкую повторяемость, но

высокую точность, указывая на необходимость большей практики в стрельбе.

Другими словами, точность можно рассматривать как ошибку в позиционировании, когда робот в первый раз движется к точке. Повторяемость — это ошибка (относительно первой позиции) при последующих движениях к той же точке из того же направления и при тех же условиях. Оба измерения, как правило, следует проводить после угасания любых вибраций в руке робота, хотя это, конечно, может потребовать большей паузы.

В целом повторяемость вызывает больший интерес, чем абсолютная точность, и многие изготовители ссылаются только на спецификации повторяемости, чтобы избежать путаницы. На повторяемость действуют такие факторы, как жесткость, разрешение датчиков, полезная нагрузка и скорость. Крупные роботы обладают повторяемостью 1 мм и больше; для более мелких роботов повторяемость обычно колеблется в пределах ±0,1 мм (100 мкм), что примерно равно толщине человеческого волоса, повторяемость высокоточных роботов значительно выше.

На практике роботы, как правило, не имеют одинаковой повторяемости при выполнении всего объема работы, и, таким образом, приведенные цифры следует рассматривать как неудовлетворительный вариант (обычно, когда рука полностью вытянута и достигает границы рабочей зоны). Тем не менее вопрос остается: относится ли повторяемость к характеристикам за день, неделю или год?

В этом вопросе нет единого мнения, значения повторяемости часто рассматриваются по отношению к руке робота, движущейся (после периода достаточного разогрева) к точке, расположенной на границе рабочей зоны, перемещающейся по всем координатам к другой стороне этой зоны и затем движущейся обратно к упомянутой точке, и так непрерывно в течение определенного периода времени. Полезная нагрузка и скорость должны быть максимальны. Некоторые специалисты, чтобы сделать различие между измерениями частой повторяемости и измерениями за более долгий период, разделяют повторяемость на **кратко-** и **долгосрочную.** Долгосрочная повторяемость хуже краткосрочной, поскольку любое число различных факторов (от изнашивания до термического расширения) может вызывать отклонение руки робота. Следует помнить, что измерения повторяемости позиции обычно проводятся *при одних и тех же условиях*, чтобы не учитывать того, что снятие тяжелой нагрузки может привести к подскоку руки робота, вызывая значительное отклонение рабочего органа.

Некоторые специалисты подразделяют точность на **воспроизводимую и динамическую точность.** Воспроизводимая точность относится к различию между позицией, записанной во время обучения, и фактической позицией при последующем воспроизведении этой точки. Из-за того что различные виды ошибок относятся к воспроизводимой точности в зависимости от того, запрограммирована ли эта точка в прошлом процессором, не связанным в данное время с роботом, или с использованием методов **обучения показыванием,** метод обучения должен быть точно определен. Осевая регулировка относится к первому методу, но автоматически компенсируется во втором.

Динамическая точность характеризует степень, с которой фактические движения руки робота соответствуют желаемым или заданным.

Чем быстрее движется робот, тем ниже точность и повторяемость. Нет смысла пытаться сделать один робот, превышающий по размерам другой, предполагая, что у второго робота будут те же абсолютные ошибки. Наличие у робота узлов, каждый из которых движется с высокими максимальными скоростями, не означает автоматически, что робот сможет выполнить задание быстрее, чем другой робот с более низкими максимальными скоростями.

Это объясняется тем, что узел робота не достигает мгновенно **скорости вращения** (скорости, с которой он движется после начальной фазы ускорения). Он должен достичь скорости вращения при ускорении движения, некоторое время сохранять ее, а затем начать замедлять движение, чтобы остановиться в нужном положении.

Скорости ускорения и замедления зависят от массы руки, мощности привода и типа системы управления, и маловероятно, что все они будут одинаковыми для разных роботов.

Если движение данного узла ограничено, то рука может не достичь своей скорости вращения до того момента, когда она должна замедляться. Робот мгно-

венного действия (хотя, может быть, и с более низкой фактической скоростью вращения) мог бы в действительности выполнить то же движение скорее, поскольку более высокой скорости он достиг фактически быстрее, чем потенциально более быстрая модель (он может даже временно достичь своей скорости вращения до того, как ему нужно будет замедляться). Это означает, что знание величин скоростей вращения не всегда поможет решить, какой из двух роботов быстрее выполнит данную работу.

Есть много способов для проверки характеристик данного робота. Рассмотрим эксперимент для проверки руки робота как на повторяемость, так и на ошибку рассогласования, когда рука приближается к точке на большой скорости.

Способ основан на применении специального куба, содержащего три индукционных датчика, расположенных под прямыми углами друг к другу. Куб помещается в металлическую оболочку, выходной сигнал с каждого датчика зависит от того, как далеко он находится от окружающей оболочки, и изменение датчиков фиксируется на диаграмме.

До того как выходной сигнал датчика может интерпретироваться как специфическое расстояние, куб калибруется, т. е. в него помещаются прокладки, которые позволяют определить, какому выходному сигналу датчика они соответствуют.

Затем этот специальный куб прикрепляют к концу руки робота, и робот выполняет повторяющийся цикл запрограммированных движений, вначале приближаясь к оболочке на скорости от различных углов (для проверки на промах) и затем оставаясь некоторое время неподвижным в оболочке (для измерения повторяемости робота, а также для определения, насколько стационарен робот в действительности).

Мы рассказали о механике робота. Но поскольку мы рассматривали пока только безжизненную массу соединений и приводных систем, то до робота еще далеко. Мы должны обеспечить метод управления этими механизмами: сначала на низком уровне, а затем на уровне, на котором мы роботу можем сказать, что мы хотим, чтобы он делал.

Глава 5

Паровые машины и компьютеры. Управляющие системы I. Кибернетика

Роботы и управление

Обычно конструкцию промышленного робота разделяют на три основных компонента: механическую руку, механический привод и управляющую часть (контроллер). В этой главе мы рассмотрим контроллер сначала на нижнем уровне, который скрыт от пользователя, и затем на более высоком уровне, на котором пользователь фактически взаимодействует с системой.

На нижнем уровне контроллер выполняет несколько функций: начинает, управляет и заканчивает любые движения руки робота, перемещая ее к определенным точкам в определенной последовательности; контроллер должен хранить в памяти все эти точки, ориентации и последовательности для будущего извлечения, так же как и взаимодействия с любыми внешними датчиками и устройствами, которые могут быть связаны с роботом. Таким образом, контроллер регулирует поток энергии и других источников в системе, чтобы выполнить заданную операцию. Контроллер может быть представлен различными устройствами: от простой электромеханической системы и **жидкостной логической** системы, в которой логические операции моделируются вместо электричества изменением потока (давления) газа или жидкости, или электронного устройства задания последовательности с фиксированным монтажом и до микропроцессора или полного мини-компьютера. В настоящее время для любых, кроме простейших, неробототехнических устройств типа «взять-положить», редко используется что-либо другое, чем контроллеры на основе микропроцессоров. Единственными роботоподобными устройствами без автоматического регулирования с использованием сервомоторов являются либо настольные учебные роботы, управляемые шаговыми моторами, либо устройства с ограниченной последовательностью движений типа «взять-положить». В системах типа «взять-положить» применяются простые контроллеры, которые приводят в действие исполнительные механизмы в за-

данной последовательности. При этом не требуется знаний о фактических положениях узлов, так как рабочий орган, начав движение, продолжает двигаться, пока не натолкнется на жесткий концевой упор. В более сложных системах в некоторых заранее заданных точках вдоль оси используются различные упоры с конечными переключателями. В этих случаях исполнительные механизмы будут двигаться, пока не достигнут соответствующих конечных переключателей.

Наиболее распространенным видом контроллера для систем типа «взять-положить» является устройство универсального назначения, выполненное на базе микропроцессоров и известное как **программируемый контроллер (ПК)** или **программируемый логический контроллер (ПЛК).** Такие контроллеры используются для управления более широким диапазоном систем, чем простые манипуляторы. Их способность последовательно выполнять определенную программу при ограниченной возможности обратной связи идеально подходит для несложных роботоподобных устройств.

Обратная связь

Если рассматривать старые паровые машины, которые стимулировали появление первых работ по теории управления, то можно увидеть, что проблемы, связанные с отсутствием сенсорного устройства для подтверждения действия управляющего сигнала, возникают, когда существует некоторое внешнее изменяющееся влияние на всю систему. Например, необходимо, чтобы выходное колесо паровой машины работало с постоянной скоростью. До тех пор пока нагрузка на колесо не меняется, можно было бы поставить рычаг, который регулирует мощность машины, в заданное положение. Достигнув определенной скорости, машина, вероятно, продолжала бы работать с той же скоростью. При увеличении мощности и машина увеличит скорость. Можно отметить положения регулятора рычага, соответствующие различным абсолютным скоростям. Но что, если нагрузка на машину начнет меняться или изменится давление пара, если бойлер будет нагреваться? Очевидно, отмеченные «абсолютные скорости» потеряют смысл.

Когда происходит **возмущение,** управление без обратной связи приводит к аварии. Джеймс Уатт решил

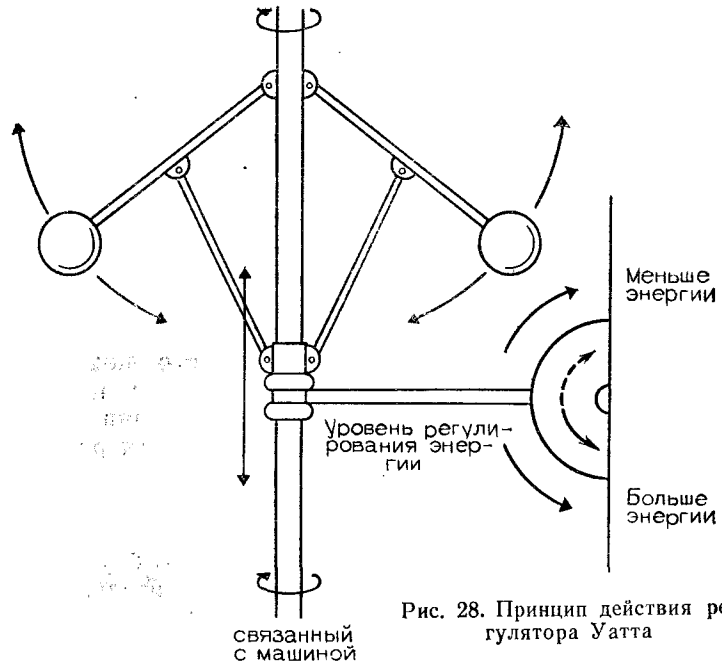

Рис. 28. Принцип действия регулятора Уатта

эту проблему посредством регулятора (рис. 28), который состоит из двух тяжелых шаров, подвешенных на валу и вращающихся с той же скоростью, что и машина. Чем быстрее движется машина, тем больше сдвигаются шары под действием центробежной силы. При этом они тянут вверх муфту, связанную с рычагом, управляющим энергией, подводимой к машине. Система устроена так, что чем быстрее движется машина, тем больше раздвигаются шары и снижается уровень поступления энергии (или наоборот, чем медленнее движется машина, тем меньше отклоняются шары и тем выше поднимается регулятор пара). Можно автоматически компенсировать изменения нагрузки на машину, увеличивая или уменьшая поступление энергии, требуемой для поддержания необходимой скорости.

Управляемая система с **замкнутым контуром** и наличием **обратной связи** показана на рис. 29. Все сервомеханизмы обладают одними и теми же свойствами независимо от того, являются ли они чисто механическими устройствами, как регулятор Уатта, или электронными системами, используемыми в роботах. Эф-

фект достигается за счет применения детектора рассогласования, возвращающего сигнал, который пропорционален различию требуемого значения параметра и *фактической величины* (которое отслеживается и отсылается обратно в систему, формируя, таким образом, замкнутую «петлю» в концептуальном процессе управления). Если обратная связь не используется, управляющий контур разомкнут, снижаются чувствительность и точность системы.

На рис. 30 приводится обобщенная простая система управления с обратной связью, которая может применяться на каждом узле робота. **Преобразователь** воспринимает требуемое состояние (например, положение или скорость) и преобразует информацию в подходящую для системы автоматического регулирования форму (например, электрическое напряжение на выходе преобразователя прямо пропорционально положению узла). Сигнал обратной связи вычитается из входного сигнала (требуемое положение). Таким образом, создается **сигнал рассогласования,** который после усиления до необходимого уровня управляет исполнительной системой робота. Если же входной сигнал и сигнал обратной связи одинаковы, то сигнал рассогласования равен нулю, таким образом, состояние системы не меняется. Если два сигнала неодинаковы, то усиленный сигнал рассогласования будет управлять узлом, чтобы снова довести сигнал до нуля. На практике системы исполь-

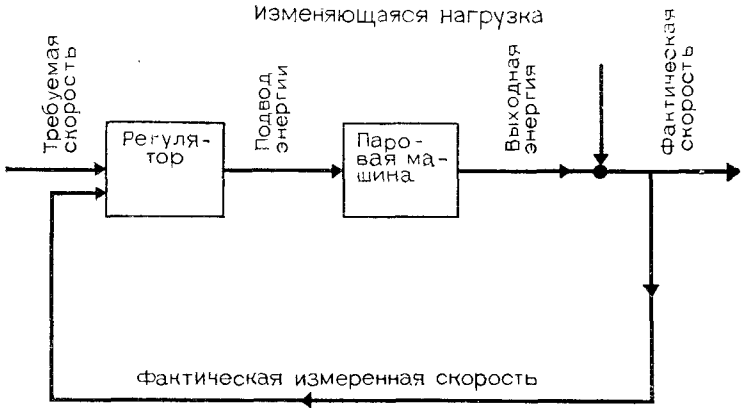

Рис. 29. Последовательность процесса обратной связи, используемой в регуляторе Уатта

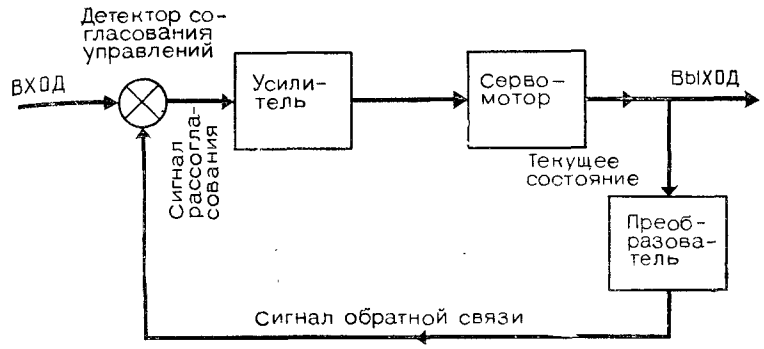

Рис. 30. Обобщенная простая система управления с обратной связью

зуют **отрицательную обратную связь.** Система, использующая **положительную обратную связь,** в которой сигнал рассогласования вынуждает систему функционировать так, что она дает еще больший по величине сигнал рассогласования, безусловно, неприемлема.

Сущность управления с обратной связью в том, что система может находиться в неустойчивом состоянии и скорее колебаться около желаемого значения, чем фактически достигать его. Такая реакция **недодемпфированной** системы показана на рис. 31, *а*, где система достигает, но проскакивает желаемое «устойчивое состояние» и продолжает колебаться относительно точки с уменьшающейся амплитудой, стремясь к нужному состоянию. Противоположная задача возникает в **передемпфированных системах** (рис. 31, *б*), где система достигает устойчивости только спустя длительное время.

Система с **критическим демпфированием** (рис. 31, *в*) позволяет быстрее и без каких-либо колебаний достичь устойчивого состояния, но тем не менее еще довольно медленно. В реальных системах обычно выбирается уровень демпфирования, которое приводило бы к легкому, но допустимому проскакиванию (как показано на рис. 31, *г*) и обеспечивало быструю реакцию системы.

До сих пор рассматриваемые устройства обратной связи использовали **аналоговую обратную связь,** где система работает при сравнении различных величин сигналов. В робототехнических системах используется другой тип обратной связи, называемый **цифровой обратной связью,** где все сигналы представлены в форме

двоичных импульсов. При аналоговой обратной связи информация о положении представляется величиной электрического напряжения, при цифровой обратной связи данные о положении передаются эквивалентно потоку дискретных электрических импульсов, цифровой компаратор сравнивает число импульсов обратной связи с первоначальным значением и дает сигнал рассогласования.

Пример системы, включающей обратную связь по положению и скорости, показан на рис. 32. Система представляет собой сложное устройство обратной связи и включает управление как положением, так и скоростью. Во многих роботосистемах управление скоростью существенно, если для конечного позиционирования требуется поддерживать высокие уровни точности. В нашем примере системы автоматического регулирования управляются аналоговым электрическим напряже-

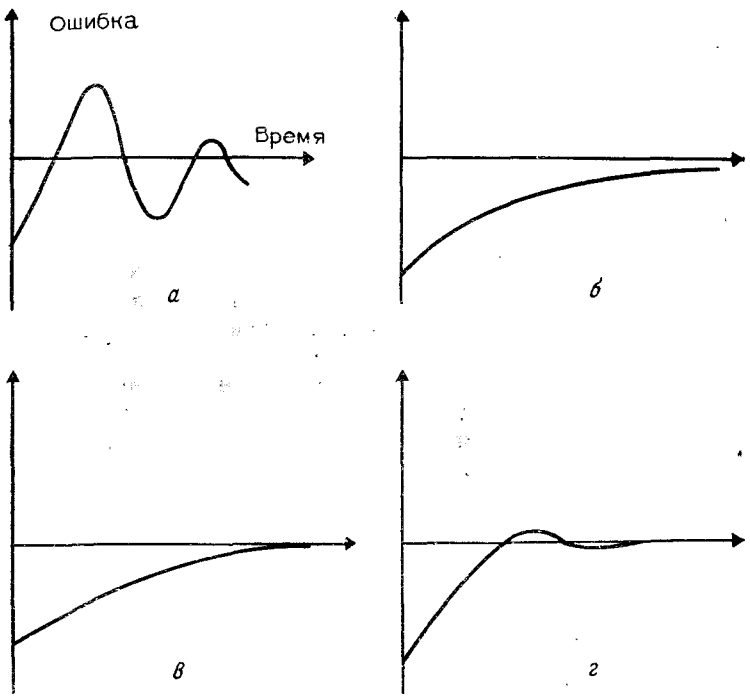

Рис. 31. Различные формы реакции системы:
а — недодемпфированная; *б* — передемпфированная; *в* — критическое демпфирование; *г* — рациональное демпфирование

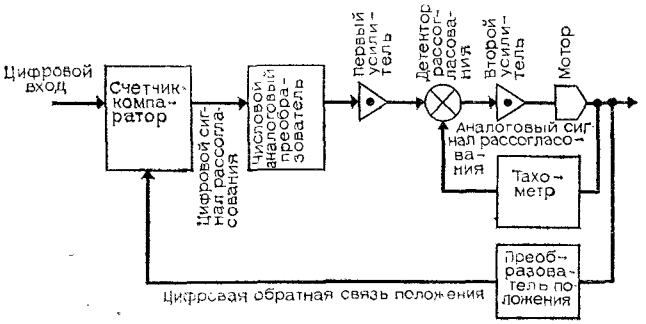

Рис. 32. Система, включающая обратную связь по положению и скорости

нием. Таким образом, чтобы преобразовать импульсный сигнал рассогласования в аналоговое напряжение, прежде чем он будет усилен до последующей обработки, в схему включают **аналогово-цифровой преобразователь (АЦП).** В отличие от преобразователя положения, который выдает цифровой сигнал, преобразователь скорости **(тахометр)** показан как аналоговое устройство, и его сигнал, пропорциональный скорости движения узла, отсылается обратно для того, чтобы преобразовать существующий выходной сигнал от первого управляющего усилителя.

Без контура обратной связи по скорости позиционная обратная связь фактически обеспечит контроль предельной скорости, так как чем сильнее сигнал рассогласования (соответствующий большому расстоянию между желаемой и фактической позициями), тем больше будет напряжение, управляющее силовой системой узла. Следовательно, если рука все больше и больше отстает от сигнала команды, то мотор, управляющий узлом, автоматически увеличит скорость. Однако такой контроль скорости обеспечивает относительно малую реакцию и его характеристики свойственны контролю позиционной обратной связи. Включение промежуточного контура обратной связи по скорости позволяет быстро корректировать изменения скорости и стабилизирует всю систему автоматического регулирования.

Выбор каждого усилителя в системе с многими обратными связями сильно влияет на реакцию системы. Например, если коэффициент второго усилителя

(см. рис. 32) велик, то слабый сигнал ошибки обратной связи по скорости может вызвать большие изменения в сигнале к мотору и соответственно в скорости мотора. Подобно этому, если слишком велика мощность первого усилителя, то естественное демпфирование в системе может быть подавлено и система будет колебаться около требуемого положения.

На практике должны быть подобраны оптимальные значения точности позиционирования, быстроты реакции и диапазон регулирующих колебаний.

Определить положение и скорость движущегося узла можно либо по положению сервомотора, либо используя **прямую обратную связь,** когда преобразователь устанавливает именно положение движущегося узла. Легко заметить, что первый способ не дает точных данных из-за люфтов и мертвых ходов узла. Однако второй способ, являясь более точным, обходится дороже, поэтому часто используют **непрямую обратную связь.**

Позиционное управление

Существуют три способа позиционного управления роботом, но каждый использует независимое положение сервомотора для каждого узла и фактическая траектория руки робота между заданными не рассматривается. Контроллеру робота нет необходимости использовать полную кинематическую модель. Простейший вид управления роботом — **последовательное управление узлом,** при котором на данном отрезке времени действует только один узел, в то время как все другие неподвижны. Результирующая траектория, по которой следует рабочий орган руки, похожа на зигзаг поперек рабочей зоны, и, следовательно, время, требуемое для движения от одной заданной точки к другой, будет значительно больше, чем необходимо. Тем не менее последовательное управление требует простейших структур управления и может также удовлетворять требованиям систем, состоящих из большого числа модулей, где каждый можно заменить многоузловым манипулятором.

При **бескоординатном управлении узлами** все узлы движутся одновременно. Тот факт, что один узел завершил заданную ему часть пути, не означает, что другие узлы сделали то же самое. Каждый узел движется по своей траектории и в свое время, а затем ждет, когда

другие завершат свой путь. Отсутствие координации между различными осями не позволяет рассчитать траекторию и скорость рабочего органа при движении его между заданными точками.

При **терминально-координатном управлении узлами** движения отдельных узлов согласованы так, что все они начинают и останавливаются вместе. Этот метод более удобный, хотя и более дорогой из трех методов.

Контурное управление

Если наибольший интерес представляет вид фактической траектории, по которой следует рабочий орган робота между двумя точками, то необходимо, чтобы контроллер использовал кинематическую модель, промежуточные движения должны интерполироваться, а не задаваться. Каждая ось должна одновременно пройти минимальное расстояние, чтобы достичь следующей промежуточной точки в пространстве, с тем чтобы рабочий орган располагался на управляемой заданной траектории. Для такой сложной системы обычно используют в качестве контроллера мини- или микрокомпьютер с разрядностью 16 бит.

Интерполяция может быть либо **линейной** между двумя удаленными друг от друга точками (например, сварочные роботы можно заставить совершать зигзагообразное движение поперек основной траектории, совмещенное с поступательным движением вдоль основной траектории), либо при более совершенном контроллере — круговой.

Существуют различные подходы к управлению по сплошной траектории с использованием различного объема информации о фактической траектории. Простейшим методом является прямое управление сервомоторами, не требующее знаний о траектории. Подробности описания траектории могут быть в памяти робота, при управлении моторами руки контроллеру необходим сигнал рассогласования, показывающий различие фактического положения руки и заданного. Этот метод контурного управления широко применяется в современных промышленных роботах.

В более сложных системах используется метод, при котором учитывается изменение траектории непосред-

ственно перед следующим положением рабочего органа.

Планирование траектории используется, когда знания о траектории включают в математическую модель руки робота и параметры перемещаемого груза, а подобная картина ускорения для каждого узла вычисляется вместе с прогнозами для требуемого управления мотором по желаемой траектории. При таком подходе учитывают влияние сил тяготения, инерции, демпфирования, трения, и это позволяет выполнять движения с большей точностью при скоростях, недостижимых в других случаях.

Дополнительные усовершенствования

Использование преобразователей облегчает выполнение поступательного перемещения и вращения не только отдельных точек руки робота, но и их совокупностей. Тем не менее сложность вычислений при преобразованиях иногда порождает медлительность и неточность. Контурное управление такими системами основано на применении интерполяционной функции к преобразованным положениям в математической координатной системе, отнесенной к статичному окружению робота, и затем в реальном времени быстро преобразующей их в положения узлов, которые робот может «понять», непрерывным потоком импульсов для осуществления движения узла по промежуточным точкам основной траектории.

Полезно обеспечить робота способностью выполнять задание с сопутствующей корректировкой программы. Часто робот производит действие над объектами, которые движутся в пространстве, подобно тому, как если бы они были расположены на конвейере. Сопутствующая корректировка программы была бы необходима при изменяющейся во времени скорости конвейера, когда автоматически отпадает возможность синхронизации движений робота и конвейера. В этом случае робот обучается манипуляции с неподвижным объектом, а затем, следя за скоростью конвейера, автоматически производит преобразование координат, таким образом косвенно синхронизируясь с конвейером.

Глава 6

Делайте, как вам говорят. Управляющие системы II. Программирование и программное обеспечение

Виды аппаратуры

В первых системах управления роботами программа управления внутренними процессами зависела от выбора и соединения реле (а позже простых полупроводниковых логических элементов). Любые изменения программы влекли перестройку контроллера, в котором электронные логические элементы жестко связаны между собой и настроены на выполнение одной задачи. Программирование представляло собой очень медленный процесс и было ограничено набором инструкций. Память состояла только из таких устройств, как дисковые или барабанные кулачки, **штекерные панели**, перфоленты, потенциометры или **жидкостные системы**, обладающие очень ограниченными возможностями.

Использование в современных управляющих системах микро- и мини-компьютеров открывает большие возможности для программирования, обеспечивает бо́льшую гибкость при простоте работы и облегчает перепрограммирование. Возросшая вычислительная мощность компьютеров позволяет использовать не только датчики, реальный масштаб времени и подвижные системы координат, но также и библиотеки часто применяемых программ.

Память нередко разбивают на быструю **внутреннюю (первичную)** память и более медленную и дешевую **внешнюю (вторичную)** память. Оперативная память представляет собой полупроводниковые устройства, которые хотя и относительно дешевые с хорошим быстродействием, но имеют недостаток — при выключении энергии теряют информацию. Поэтому полупроводниковые устройства памяти нередко снабжают батареями, позволяющими сохранить информацию во время короткого прерывания доступа энергии. Более длительное хранение нескольких программ большого объема осуществляется благодаря использованию устройств внешней памяти, например на гибких дисках или перфокартах.

В конце 70-х годов появились **динамические** полупроводниковые запоминающие устройства, которые в отличие от традиционной статической памяти требуют обновления содержания несколько раз в секунду. Такие устройства намного дешевле и компактнее, чем статическая память, однако они более чувствительны к электрическим помехам и почти не используются в промышленном оборудовании.

Запоминающие устройства на **магнитных сердечниках,** которые состоят из мельчайших ферритовых колец, обладают свойством не терять записанную в них информацию при отключении энергоснабжения. Такие системы, надежно хранящие информацию, называются постоянными. Современным эквивалентом запоминающего устройства на магнитных сердечниках является так называемая ЦМД-память, которая хранит данные как микроскопические магнитные «пузыри». Такие запоминающие устройства способны не только сохранять информацию при отключении электроэнергии, но и удерживать большие массивы данных, могут обойтись без дополнительной запоминающей среды.

Для одновременного управления несколькими различными системами (такими, как различные узлы руки робота) можно использовать один быстродействующий процессор. Функционирование осуществляется за счет переключения единственного процессора с такой быстротой, что возникает впечатление, что каждая система имеет свой компьютер. В настоящее время каждый узел робота снабжается отдельным процессором. Кроме того, для наблюдения за ними устанавливают дополнительный процессор. Такие многопроцессорные системы имеют различную архитектуру построения, отличаются друг от друга степенью автономии, с которой действуют отдельные процессоры, по возможности распределяя память по «тесно связанной» сети или по «свободно связанной» системе, действуя как вполне независимые микрокомпьютеры. Обычная конфигурация представляет собой некоторую разновидность иерархии со следующими друг за другом уровнями процессоров, занимающихся все более и более глобальными проблемами управления подобно структуре социального управления обществом.

Общение компьютера робота с внешним миром (независимо от того, делается ли это посредством преобразователей внутреннего состояния или внешних **периферийных устройств)** осуществляется путем ввода и вывода данных на цифровые электронные устройства. Интерфейсы все больше и больше оснащаются внутренним программным обеспечением. Компоненты интерфейса, такие, как электронные фильтры, выпрямляющие устройства, цифроаналоговые и аналогово-цифровые преобразователи, традиционно представленные аппаратурными средствами, можно заменить программным обеспечением.

Хотя в результате и теряется скорость, это часто вполне допустимо — простой программируемый АЦП может еще распознавать частоты более 1000 Гц (циклов в секунду) — за счет простоты и гибкости. Действительно, магистральное направление заключается в том, что задачи, решаемые ранее специализированным оборудованием, решаются с помощью усовершенствования программных средств.

Виды программирования

При программировании робота на выполнение работы используют самые разные способы. Не представляет труда напечатать на терминале последовательность точечных координат, а потом отправить по этим точкам руку робота (это мог бы быть идеальный способ программирования расстановки объектов в определенном порядке на специальной **платформе-палете).** Трудности возникли бы при попытке применить идеальный способ для обучения робота сложным покрасочным работам, выполняемым в настоящее время человеком.

Устройства с ограниченной последовательностью операций типа «взять-поставить» нельзя программировать — их надо перестраивать, и это не позволяет им быть роботами. Иногда такая перестройка рассматривается как ручное программирование и включает установление новой логической последовательности путем соединения определенным образом воздушных трубопроводов, создания соединений в штекерной панели или установки конечных переключателей или механических упоров. Но и тогда возможности устройства очень ограничены.

Настоящих роботов можно научить либо с помощью **текстуального программирования,** либо путем **показа** (например, покраски распылением).

При использовании метода **обучения показом** человек проводит руку робота через последовательность

положений, которые робот потом автоматически повторит. Этот метод нашел широкое применение при решении контурных задач, например покраски или покрытия из краскопульта. Существуют две разновидности метода обучения показом: программирование **проведением** и программирование **прохождением.**

В первом случае, помимо обычного манипулятора и контроллера, требуется вспомогательное устройство (специальное приспособление к запястью руки робота или отдельная **обучающая рука**). Чтобы этим методом обучить робот, оператор устанавливает переключатели и кнопки на контроллере, которые помогут выбрать программу для данной операции, скорость отбора точек, записывающихся в памяти компьютера, осуществить синхронность с транспортерами и организовать взаимную синхронность, с помощью которой оператор осуществляет ручное управление рукой робота. Оператор вручную выполняет необходимую работу, проводя руку через весь цикл.

Если применяется устройство, прикрепленное к запястью робота, то рука робота приводится в движение оператором. Для этого рука робота должна быть уравновешена, а если используется гидравлический привод, то давление в нем должно быть снижено так, чтобы оператор не «боролся против» системы привода робота. При обучении робота покраске распылением программист красит выбранную поверхность, используя распылитель в качестве рабочего органа, передвигает узлы робота и записывает свои движения и дополнительные, например включение и выключение пистолета для распыления.

Тонкую работу не позволяет выполнять сопротивление при движении руки (особенно на границах рабочей зоны). В таких случаях используется отдельная обучающая рука, состоящая из очень легкого каркаса идентичной кинематической схемы. Преимущество «проводящих» способов — несложность программирования. Программировать может человек, хорошо знающий программируемую работу, но не знающий языков робота. Так как траектории записываются путем запоминания большого числа точек, любое редактирование привело бы к возникновению разрыва траектории. Поэтому отредактировать траекторию — это перепрограммировать ее заново.

В отличие от «проводящих» систем метода обучения показом системы другой его разновидности — «проходящие» системы — в основном используются при позиционном управлении. Обучающие аппараты действуют как устройства управления на расстоянии, с помощью которых программист переводит руку робота в различные положения. В упрощенном виде аппарат состоит из переключателя каждого узла робота с кнопкой памяти.

Более сложные аппараты включают функциональные клавиши для временных задержек, ручного или автоматического управления скоростью, выдачи выходных сигналов или ожидания входных и специальную кнопку для аварийной остановки. Системы управления, обладающие вычислительной мощностью, позволяют при обучении выбрать одну из нескольких координатных систем (таких, как прямоугольная или цилиндрическая). Используя только один переключатель, программист может, например, передвинуть рабочий орган в положение, параллельное оси x, хотя это и включает одновременное движение нескольких узлов.

«Проходящие» системы записывают только конечные точки траектории. Траектория между ними, необходимая при воспроизведении, зависит от вида интерполяции. Контроллер может изменять последовательность операций вследствие изменения условий, возникающих во время работы, используя специальные библиотечные программы. Редактирование программ может быть очень сложным, когда приходится проводить отдельные вставки, модифицировать или стирать фрагменты программ. Проверить программу можно, проводя руку шаг за шагом через последовательность точек. Контроллер может осуществлять разнообразные функции, например по временным задержкам или выходным сигналам, и поскольку в памяти хранятся только конечные дискретные точки, удается записать большое число программ.

Тем не менее такие методы, как правило, ограничивают возможности программиста сравнительно простыми программами с малым числом условных переходов, задаваемых при обучении робота.

Виды программного обеспечения

Составление сложных программ для роботов включает написание настоящего программного обеспечения в противоположность просто программированию робота посредством обучения показом, хотя такое обучение само

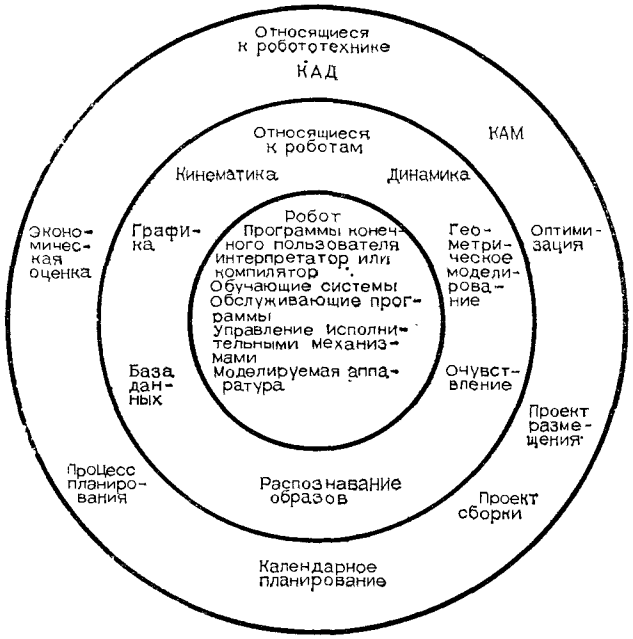

Рис. 33. Различные виды робототехнического программного обеспечения

автоматически составляет простое программное обеспечение, согласно которому впоследствии действует робот.

В робототехнике программное обеспечение рассматривают как область, простирающуюся от программного обеспечения непосредственно самих роботов, программного обеспечения систем, связанных с роботами, до программного обеспечения, относящегося к робототехнике в целом и охватывающего оба упомянутых выше вида. Несмотря на наличие таких классификаций, не всегда ясно, к какой группе должен быть отнесен тот или иной вид программного обеспечения, используемого в робототехнике. На рис. 33 представлены различные виды робототехнического программного обеспечения.

В центральное ядро программного обеспечения робота входят программы, написанные конечным пользователем, и программное обеспечение интерпретатора, который переводит программы пользователя на язык, понятный контроллеру. Программное обеспечение контроллеров разнообразно: позволяет работать различным

обучающим системам, обслуживающим программы; реагирует на сигналы обратной связи каждого сочленения руки; кроме того, позволяет использовать программное обеспечение для моделирования таких средств, как аналогово-цифровые преобразователи.

Программное обеспечение роботов также разнообразно. Роботосистемы технические могут выводить информацию с помощью графических систем, что требует специального программного обеспечения, а сложные контроллеры в состоянии улучшать характеристики роботов за счет применения кинематических или динамических моделей руки, которая должна обладать способностью реагировать в реальном масштабе времени, требуя, таким образом, значительной вычислительной мощности. Роботы второго поколения, основанные на использовании сенсорной информации (зрительной и тактильной), увеличивают объем программного обеспечения, вовлекаемого в процессы толкования полученной информации.

Сенсорные устройства (видеокамеры, наборы датчиков) способны обеспечить систему обратной связи большим объемом информации, и один центральный компьютер не сможет ее обработать. Поэтому до того, как информация поступит к главному процессору, ее упрощает предварительный процессор с программным обеспечением. Распознавание изображений и другая интерпретация сенсорных данных часто сложны для специального программного обеспечения, обрабатываемого на центральном процессоре компьютерной системы робота. Поэтому дополнительное программное обеспечение обычно обрабатывается на компьютерах такой архитектуры, которая специально выбирается для таких **алгоритмов.**

Электронная система не только хранит информацию, но и использует сложное программное обеспечение для извлечения выбранных данных. В настоящее время продолжается совершенствование программного обеспечения управленческих **баз данных.**

Программное обеспечение робототехники основано на широком использовании различных дисциплин. Сочетание автоматизированных систем проектирования (КАД) [1] и управления производственными процессами

[1] CAD (computer aided design) — система автоматизированного проектирования.

(КАМ) (для формирования систем КАД/КАМ) обеспечивает условия для создания и хранения проектов изделий с помощью компьютеров и автоматического их изготовления на основе информации, хранимой в чертежном компьютере. Сложность программного обеспечения, используемого в обеих системах, чрезвычайно велика.

С этими проблемами тесно связана оптимизация проектирования размещения робототехнических модулей или, возможно, целых заводов; проектирования сборки, начиная от проектирования продукции, легко собираемой роботами, и кончая проектированием наилучшей последовательности выполнения сборки; методов календарного и текущего планирования.

Наконец, областью, которой, по-видимому, суждено внести значительный вклад в робототехнику, является **искусственный интеллект.** Вид программного обеспечения, используемого в системах ИИ, должен сильно отличаться от используемого в современной вычислительной технике и в идеале требует другой архитектуры аппаратных средств. Тем не менее, поскольку такие новые комплексы все более становятся доступными, программы ИИ, по-видимому, должны заметно изменить способы, с помощью которых конечные пользователи будут программировать свои роботы.

Программирование пользователями с помощью программного обеспечения

Программное обеспечение робота можно рассматривать как средство организации взаимодействия двух главных частей системы: механики, включающей манипулятор робота, захват и любые другие подобные компоненты, и сенсорных устройств, обеспечивающих робот информацией об окружающей обстановке с программистом (рис. 34).

Программное обеспечение для механики и сенсорных устройств можно разделить на три общих уровня, зависящих от степени абстракции по отношению к манипуляторам и датчикам. На низшем, наименее абстрактном уровне **программного обеспечения механики** применяют программы, сконцентрированные на работе узлов и исполнительных механизмов механической системы. Такое программирование определяет каждое движение,

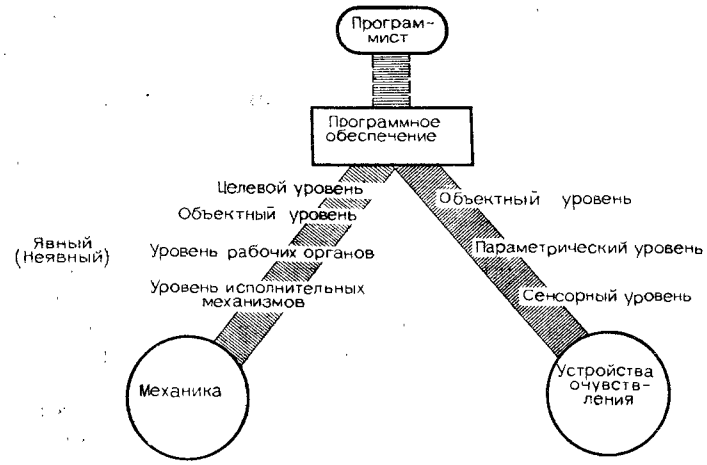

Рис. 34. Различные уровни абстракции программного обеспечения пользователя в робототехнической системе

существенные элементы действия отдельных исполнительных механизмов, положения узлов и т. д. Программирование на этом уровне в принципе несложно (программист должен только детализировать задачу), но может быть утомительным, делая неэффективным использование и программиста, и робота. Попытки взаимодействия с окружающей робота средой затруднены из-за жесткой структуры записанных данных. Программы трудно редактировать, так как они специфичны для повторного использования.

Относительные положения каждого узла руки робота не представляют интереса для программиста. Программиста обычно интересует положение рабочего органа по отношению к объекту, с которым он работает. Пока рука робота сама не войдет в контакт с чем-либо из его окружения, ее фактическая конфигурация не имеет значения. Поэтому были разработаны языки программирования на уровне рабочих органов, которые позволяют программисту описывать движения не в терминах движений отдельных узлов, а относительно требуемых положений и движений рабочего органа робота. Такие языки также обычно называются **языками уровня манипуляторов.**

Программист определяет конечные точки траектории и ориентации, так же как и параметры скорости, на

основе этих данных контроллер затем интерполирует траектории в реальном масштабе времени. Некоторые системы допускают математическое описание требуемого положения рабочего органа, например в прямоугольных координатах такая информация обычно передается посредством физического движения рабочего органа к требуемому **положению** и последующего использования датчиков внутреннего состояния руки в качестве **цифрового преобразователя** — устройства для автоматического представления фактических положений в цифровых величинах. Затем контроллер интерпретирует положения узлов руки как соответствующую позу для рабочего органа и записывает ее. В случаях когда задана высокая точность позицирования, контроллер должен записать каждое положение отдельных узлов (как в программах на уровне исполнительных механизмов) и таким образом избежать ошибок, связанных с математическими преобразованиями. Если исключить этот вариант, то после перемещения рабочего органа к обученной позе конфигурация руки робота может отличаться от заданной при обучении — это ведь положение рабочего органа, а не руки, что здесь рассматривается.

Языки уровня рабочих органов включают множество программных конструкций, например команды изменения последовательности операции и подпрограммные средства, позволяющие описывать сложные действия и ограниченное взаимодействие с простыми датчиками. Программирование на этом уровне похоже на работу на традиционном компьютере и получает все большее признание в промышленности. Программисты не только могут писать программы общего характера, пригодные для повторного использования, вносить изменения и расширять их, но впоследствии, вероятно, группы специалистов будут составлять более сложные уникальные программы.

Если вычислительная процедура становится длинной или сложной и трудной для понимания или описания, желательно использовать **структурированный** машинный язык в противоположность **неструктурированному.** Хотя оба языка могут быть одного и того же уровня абстракции, структурированная форма обладает достаточно ограниченным синтаксисом и дисциплинирует программиста при разделении проблемы на более простые части. Ограничивая число способов, с помощью которых можно написать программу, управляя логическим «потоком», пронизывающим программу, структурированный язык уменьшает возможность ошибок.

Рассмотренные низкий и промежуточный уровни абстракции относятся к явным языкам и требуют от программиста точного знания того, что робот должен делать.

Высший уровень абстракции использует неявные методы программирования, когда роботосистема сама ответственна за принятие решений для достижения поставленной цели, основанных на понимании объектов, с которыми она работает. Программы этого уровня связаны с относительными положениями и движениями лишь объектов, перемещаемых во время выполнения работы, а не робота и даже не рабочего органа. Языки объектного уровня используют символьные описания манипулятора, рабочего пространства и объектов, включенных в задачу для определения положений, перемещений и действий.

Для осуществления моделирования требуется значительная вычислительная мощность, и подобающее его использование позволяет интегрировать роботы в системы КАД/КАМ. Кроме того, сам робот может быть освобожден от фактического участия в обучающем процессе и программы могут быть составлены так, чтобы использовать независимые от вида задачи (а иногда и от вида манипулятора) модули подпрограмм, уже хранящиеся в библиотеке, которые потом можно будет заказать.

Хотя только роботы второго поколения обладают сенсорными устройствами и работа в этой области в значительной степени носит экспериментальный характер, тем не менее аналогичные уровни абстракции, используемые в программном обеспечении механики, применяются и при программировании сенсорных устройств. На низшем уровне абстракции, сенсорном уровне, каждый отдельный выходной сигнал датчика учитывается программистом. На промежуточном, параметрическом уровне программист сосредоточивается на нескольких характерных признаках или параметрах, получаемых от датчиков, проводящих раннюю обработку данных. На самом высоком объектном уровне символьные объекты учитываются с помощью базы данных модели окружающей среды, как и при программном обеспечении механики.

Текстуальное программирование

Различные виды программирования представлены в табл. 1

Таблица 1

Различные виды программирования роботов

Неявный	Объектный уровень (модель окружающей среды) Уровень рабочих органов	Текстуальное программирование	Структурированный. Неструктурированный
Явный	Уровень исполнительных механизмов	Обучение показом	Прохождение Проведение

Текстуальные языки, применяемые в промышленных роботах, почти все являются языками типа «уровня рабочих органов». К сожалению, каждый изготовитель сам разрабатывает язык для своего робота. Это привело к тому, что языки не соответствуют друг другу и не стандартизированы. Поэтому не удивительно, что до сих пор не разработан единый язык. Существуют в основном два метода, которые используются при создании языков для роботов.

В первом методе начинают с деталей системы управления роботом, а затем создают вокруг них синтаксис, который описывает движения робота. При необходимости разрабатываются дополнительные языковые конструкции, позволяющие контроллеру менять последовательность операций при изменении условий работы. Достоинство созданного таким образом языка заключается в том, что он очень точно описывает манипуляционную задачу.

Однако в современных робототехнических системах программа пользователя может содержать больше данных, чем просто набор инструкций движения и очувствления, например: разделы для обеспечения подходящего интерфейса для оператора, калибровочные процедуры и расчеты, способы исправления ошибок и обработки ограниченных данных. В данном случае подход к созданию языка заключается в том, чтобы начать с существующего универсального языка и расширять его за счет конструкций, необходимых для удовлетворительного управления роботосистемой. Такой подход имеет преимущество, заключающееся в том, что базовый язык

уже есть и меньше требуется усилий, а следовательно, меньше вероятность ошибок.

Важным требованием при создании текстуального языка является обеспечение его диалоговых возможностей (с пользователем). Однако нелегко сделать так, чтобы язык стал «дружественным» к пользователю. Чтобы удовлетворить противоречивым требованиям, часто приходится идти на компромисс. Термин «пользователь», применяемый для обозначения лица, взаимодействующего с программным обеспечением робота, охватывает многие группы лиц с различными потребностями и квалификацией:

операторов, взаимодействующих с системой, реагируя на ее простые напоминания, но не работающих с программой робота;

обслуживающий персонал, применяющий специальные программы для проверки системы и имеющий доступ к ограниченному числу команд, которые скрыты от обычного пользователя;

пользователей пакетов прикладных программ, способных в деталях разобраться в задаче, используя интерфейс упрощенного программирования и по возможности выбирая подходящий вариант из появляющегося на экране меню;

программистов, использующих компьютерный язык для написания программ с учетом специфики конкретной задачи робота и применяющих библиотечные подпрограммы; составителей пакетов прикладных программ, создающих подпрограммы для библиотек, которыми пользуются другие специалисты.

Такой широкий диапазон создает проблемы для «дружественных» пользователю систем — мгновенно появляющееся на экране терминала сообщение одному пользователю может показаться полезным напоминанием, тогда как у опытного программиста может вызвать лишь раздражение. Подобным же образом средства, предлагаемые языками широкому пользователю, могут показаться некоторым из них слишком сложными. Однако специальные языковые конструкции для скрытия информации, ловушки ошибок и т. д. могут оказаться существенными для написания тех самых прикладных пакетов, которые потом будет применять широкий пользователь.

В настоящее время в промышленности используются различные текстуальные языки, например «ВАЛ»

фирмы «Юнимейшн», «АМЛ» фирмы «ИБМ» для сборочных роботов, «СИГМА» фирмы «Оливетти» для роботов типа «Сигма», «РЭЙЛ» фирмы «Автомэтикс», «ТИЧ» фирмы «Бендикс», «ИНДА» фирмы «Филипс» и др.

Примером продолжающейся естественной эволюции языков роботов является «ВАЛ», вначале неструктурированный и сильно напоминающий «БЭЙСИК». Новый вариант языка «ВАЛ» не только структурирован, но и значительно усилен, что обеспечивает его такими возможностями, как внешняя коммуникация, сложные вычислительные процедуры и возможность параллельно выполнять программы пользователей.

Язык «АМЛ» очень сложный и хорошо структурированный, семантически мощный язык робота. Фирма «ИБМ» предприняла необычный шаг, впервые создав совершенно новый универсальный язык, придав ему функции, необходимые для эксплуатации роботов. По заявлениям сотрудников фирмы, это позволило им сознательно выбирать проектные компромиссы. Сам же язык так организован, что наиболее полезные подпрограммы можно «подтянуть» до команд нового языка, перекодировав их без изменения функций.

Как уже отмечалось, языки объективного уровня разрабываются, например, в Эдинбургском университете — язык «РАПТ», Стенфордском — языки «АЛ» и «ЛАМА» и Пердьюйском — «ПАЛ».

Будущее программного обеспечения

Возникает вопрос: исключит ли современное стремление к структурированным текстуальным языкам с большим числом языковых конструкций все другие виды программирования? Обучение путем показа — это легкий метод передачи роботу манипуляционной сноровки человека, и ни один текстуальный язык уровня рабочего органа, вероятно, никогда не сможет с ним конкурировать. Несомненно, что на языке объектного уровня при достаточном понимании задачи (например, покраска распылением) теоретически можно было бы описать последовательность движения, которая была бы по крайней мере не хуже демонстрируемой человеком. Действительно, это могла бы быть задача, за которую не брался ни один человек, например комплексное покрытие в открытом космосе. Подход с использованием языка объектного уровня был бы единственно возможным видом программирования. Такое развитое программирование на **объектном уровне** в действительности можно рассматривать как отдельный целевой уровень программирования (выше, чем объектный уровень), при котором методы искусственного интеллекта используются для обеспечения способности планирования и решения задач. Однако следует подчеркнуть, что решение таких сложных задач все еще недоступно, хотя время, когда они будут решены, стремительно приближается.

Между тем практическое программирование, по-видимому, останется разделенным между способом обучения путем показа и текстуальным программированием на уровне рабочих органов. Текстуальное программирование, возможно, не все станет структурированным (новичку легче обучиться неструктурированному языку программирования). Если пользователь только собирается работать с системой на низком уровне, то ему вполне доступен неструктурированный язык, хотя это и может привить ему неправильное представление о программировании, что приведет к трудностям при составлении сложного программного обеспечения.

В идеале должна развиваться разновидность стандартизованного сложного языка, которую возможно применять в различных типах роботов, но которая была бы так составлена, что пользователи низкого уровня, не изучая всех тонкостей языка, могли бы применять его независимую подгруппу. Кроме того, всю систему программного обеспечения следует создавать в модульном варианте, когда каждый уровень программного обеспечения строится на возможностях модулей более низкого уровня. На самом низком уровне могла бы быть система диспетчерского управления другими программами робота, тогда как на самом верхнем уровне было бы программное обеспечение, разрабатываемое пользователем. Такая организация обеспечивала бы гибкость так, чтобы замена любого отдельного уровня (например, применение новой операционной системы, позволяющей использовать программное обеспечение на самом современном быстродействующем процессоре) не влияла бы на выполнение программ всех других уровней. Подобным образом, замена одной конфигурации робота другой не влияла бы на выполнение программы.

При использовании роботов новых конструкций рассмотренная система имеет преимущества как для поставщиков роботов, так и для пользователей. Тем не менее вопрос, как же будет фактически осуществлена стандартизация (являющаяся универсальной в станках с ЧПУ), еще пока не решен. Возможно, что еще до международного соглашения такой, например, язык, как «АМЛ», разрекламированный благодаря проявляемому к нему интересу на международном уровне, может стать стандартом де-факто для всей индустрии роботов, как десятилетия назад стал «ФОРТРАН» для индустрии ЭВМ.

Глава 7

Чувства и чувствительность. Сенсорные устройства внешнего состояния

Принципы очувствления

В течение короткого промежутка времени роботы стали обладать органами чувств, на развитие которых у человека ушли миллионы лет. Органы чувств робота не могут пока состязаться с органами человека, но зачаточные, эквивалентные человеческому зрению, осязанию и слуху стали привычными. Например, обоняние используется для обнаружения утечек в корпусах автомобилей.

В этой главе мы рассмотрим сенсорные устройства **внешнего состояния,** от которых робот получает информацию об окружающей среде. Подключение внешних датчиков в робототехническую систему позволило квалифицировать ее как робот второго поколения. Роботы первого поколения имеют только датчики **внутреннего состояния,** например шифратор для определения положений узлов робота (см. гл. 5). Такое устройство (с помощью которого человек ощущает положение тела) не дает информации об окружающей робота обстановке, и этим робот первого поколения отличается от робота второго поколения.

Специфические сенсорные устройства включаются в конструкцию робота и позволяют выполнять специфические задачи. Такие датчики настроены на регистрацию

некоторых явлений, которые они должны воспринять и обеспечить правильную реакцию робота при минимуме вычислений. Для восприятия внешнего мира этот подход можно использовать при решении таких, например, задач, как слежение за скоростью ленты транспортера, но для других, более сложных, задач требуются датчики **общего характера.** Например, техническое зрение, хотя дороже и сложнее для программирования, чем специфическое очувствление, тем не менее применяется для слежения и предупреждения неполадок, которые пропустил бы специфический датчик. Сенсорные устройства используются в мобильных роботах, действующих в неорганизованной и непредсказуемой обстановке.

Любого вида преобразователь связан с контроллером робота с помощью компьютера в диапазоне от видеокамеры до простого микропереключателя. Как отмечалось выше, такие сенсорные устройства, как камеры, обеспечивают большой объем данных, они обычно должны быть связаны с отдельным дополнительным **процессором,** который упрощает информацию, а затем передает ее контроллеру робота. Устройства, сочетающие стадию очувствления и предварительную обработку данных и таким образом снабжающие нужной информацией, относят к **быстродействующим сенсорным устройствам.** Более простые датчики связаны непосредственно с компьютером, управляющим роботом, и если процессор обладает достаточным быстродействием, то большое число таких датчиков фактически может обслуживаться одним компьютером.

Способность одного компьютера следить за несколькими датчиками основана на методе, известном как **мультиплексирование.** Представьте аналоговый преобразователь, который дает сигнал между 1 и 2 Гц, возникающий, например, при измерении вибрации. Выходное напряжение от датчика изменяется по определенному закону. Поэтому компьютеру не нужно следить за ним. В определенные мгновения (рис. 35, *б*) он отбирает значения напряжения, затем выполняет другую задачу (как при псевдопараллельной обработке данных) и снова отбирает напряжение до того, как оно радикально изменится.

Путем интерполяции между различными отобранными значениями выходного напряжения можно с помощью компьютера восстановить полный сигнал так, как если бы он наблюдался непрерывно. Теоретически

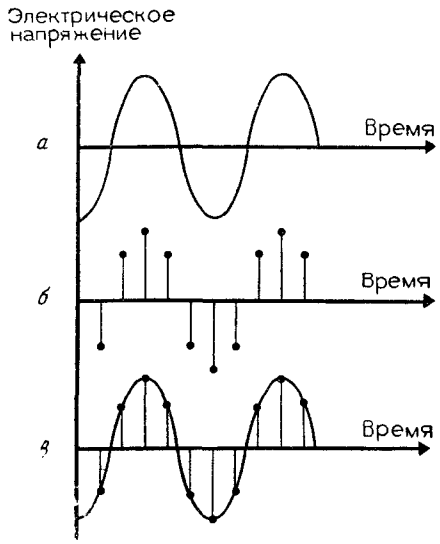

Рис. 35. Принцип многократного отбора выходного сигнала:

а — сигнал выходного напряжения; *б* — отобранные мгновенные значения напряжений (в данном случае за период сигнала выбраны 6 точек); *в* — реконструированный сигнал

сигнал необходимо отобрать на удвоенной максимальной частоте, которая может быть на выходе с преобразователя. В нашем примере выходной сигнал с датчика нужно мгновенно регистрировать каждую четверть секунды.

Чтобы получить точное значение, время, требуемое для снятия и сохранения амплитуды сигнала, должно быть минимальным. При этом следует применять различные методы, которые могут быстро «удерживать» значение выходного сигнала для последующей обработки. Несомненно, что использование таких методов сбора данных высвобождает время, в течение которого компьютер может управлять роботом или следить за другими датчиками.

Для **формирования данных** обрабатывают сигналы аналоговых датчиков. Чтобы повысить значение сигнала, его пропускают через предварительный усилитель, или вентиль (оптический), или трансформатор для низких частот, электронные фильтры, аналоговый линеаризатор (чтобы компенсировать нелинейные характеристики используемого датчика) и, наконец, через аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). АЦП может передавать несколько сигналов по одному каналу, используя при этом быстрое переключение или различные полосы частот между несколькими различными преобразователями. Предварительная обработка сигнала, состоящая из аналоговой фильтрации и линеаризации, может быть заменена на обратный процесс использования эквивалентов цифровой схемы после прохождения через АЦП.

АЦП, как и схемы последующей обработки, можно заменить программой, входящей в программное обеспечение.

Управление роботом заключается в слежении за несколькими различными преобразователями с тем, чтобы обнаружить, изменился ли какой-либо выходной сигнал. Этого можно достичь одним из двух основных способов. Первый способ — последовательно осуществляют проверку с помощью контроллера с целью узнать, зарегистрировал ли он что-либо. Если нет, то контроллер переходит на следующий датчик, если да, то выполняется соответствующее действие. Датчики, более склонные к изменениям, проверяют чаще. Но при проверке всегда существует опасность того, что изменение произойдет после проверки и, следовательно, изменение (даже важное) не будет зарегистрировано до тех пор, пока контроллер не проверит остальные датчики.

Второй способ — **прерывающий**, когда процессор не следит за датчиком, пока не будет получен прерывающий сигнал, указывающий на изменение его показаний. Затем процессор выполняет программу проверки с целью обнаружить, какой датчик вызвал прерывание. Этот способ применяется, когда от датчиков идут только случайные сигналы, так как компьютер не связан постоянным слежением за ними и может использоваться для других целей до получения сигнала о прерывании.

Проведя классификацию прерывающих сигналов от различных датчиков по степени важности, возможно сделать так, чтобы такой важный датчик, как детектор столкновения, прерывал информацию от всех других датчиков и нацеливал контроллер на обслуживание этого прерывания, отдавая ему предпочтение перед другими, даже если какой-либо другой датчик уже обслуживается.

Для всех систем, обладающих многими сенсорными устройствами, необходимо «взвешивать» реакции различных датчиков, если они входят в противоречие друг с другом. Например, в мобильном роботе один датчик мог бы оповестить об обнаружении им на пути робота крупного объекта, в то время как другой (датчик другого типа) ничего не обнаружил.

Осязание

Существуют две разновидности очувствления: **осязание**, или **контактное очувствление**,— очувствление посредством контакта с объектом и **неконтактное очувствление** — очувствление на расстоянии посредством таких способов, как техническое зрение и т. д. Осязание может принимать множество форм с различной степенью сложности и используется в захватных устройствах робота.

В простейшей форме осязание осуществляется с помощью контактных преобразователей **бинарного очувствления**, которые способны лишь определять, коснулось ли их что-нибудь или нет. Такие устройства выполнены в виде микропереключателей, размещенных, например, на **пальцах** захватного устройства таким образом, что они вдавливаются, когда захват берет объект. Более подробную информацию о касании можно получить, размещая несколько переключателей. Вместо переключателей в некоторых системах используются силометрические датчики, что позволяет получать количественные значения, а не ответ типа «да» или «нет». Бинарные, или непрерывно меняющиеся, системы, имеющие преобразователи в нескольких точках, относят к **простым датчикам касания**, чтобы отличить их от полных устройств **тактильного очувствления**, состоящих из набора непрерывно меняющихся силовых датчиков, генерирующих структуру и способных обеспечивать ответ различной степени, который позволяет определить характер физической поверхности. Более сложные виды тактильного очувствления еще находятся в стадии разработки.

Простые контактные датчики используются, например, в сборочных роботах, контактное обследование иногда применяется для определения размеров. Если простейшее бинарное переключение не используется, то напряжение и усиление измеряются косвенно величиной

деформации резистивного деформационного измерительного устройства (ДИУ). ДИУ состоят из тонкой полоски резистивного материала, например медно-никелевого сплава, протравленного соответствующим образом, на тонком гибком листе подложки. Номинальное сопротивление на таких датчиках составляет примерно 100 Ом, но когда гибкая подложка согнута или покороблена, сопротивление изменяется в зависимости от длины полоски и физических характеристик сплава. Эти изменения сопротивления измеряются обычно путем включения устройства в мостиковую схему.

Широкое распространение резистивные материалы для осязания получили благодаря их дешевизне, теплостойкости и легкости изготовления, однако проблемы, возникающие в связи с явлением гистерезиса и неудовлетворительным динамическим диапазоном, заставляют предполагать, что в будущих системах могут использоваться другие технологии.

Пьезоэлектрическое преобразование, при котором деформация кристалла вызывает небольшие электрические напряжения, имеет недостатки: во-первых, не имеет характеристики постоянного тока, во-вторых, фиксирует лишь изменения. Тем не менее в некоторых приложениях это может найти применение, хотя в настоящее время данные устройства слишком хрупки для использования в промышленных условиях. Очувствление с использованием емкостных устройств слишком чувствительно к влиянию внешних электромагнитных полей, чтобы иметь практическое значение. Кроме того, как и при индукционном очувствлении, его реакция слишком сильно зависит от вида соприкасаемого материала.

Тактильное очувствление, хотя и носит в основном экспериментальный характер, но уже широко применяется во многих областях, таких, например, как заводская сборка, быстрое адаптивное захватывание произвольно ориентированных деталей, манипуляция гибкими материалами, определение массы и центра инерции, а также в качестве дополнения к системам технического зрения. В то время как искусственное зрение можно использовать для определения местоположения и идентификации объектов, тактильное очувствление — для последующих манипуляций, где важно знать силу, давление и податливость.

Простой пример, который раскрывает значение осязания для человека,— это навинчивание гайки на болт,

Гайка обычно провертывается в обратном направлении, пока не «попадет» в виток резьбы, поэтому, чтобы не сорвать нарезку, ее осторожно закручивают при постоянной проверке. Техническое зрение в данном примере не используется. Это тот уровень сложности, с которым тактильные системы стремятся состязаться путем слежения за касанием, силой, давлением и проскальзыванием.

Подход к проектированию таких систем заключается в создании набора датчиков на тонкой гибкой подложке, которая может быть помещена на захвате. Подложка должна быть податливой, а вся конструкция — долговечной. Набор, состоящий из 10×10 силовых чувствительных элементов на площади 5 см^2, достаточен для решения многих задач. Каждый элемент должен быстро реагировать с чувствительностью, которая позволяет регистрировать объекты от 0,001 до 1 кг при слабом гистерезисе. Многие конструкции были созданы с использованием некоторой разновидности проводящей пластмассы, соединенной с решеткой вытравленных электродов на инертной подложке. Контактные усилия вызывают местные деформации, которые в свою очередь определенным образом изменяют местное сопротивление полосы. Затем проводятся измерения электродной решеткой и составленный «образ» можно обрабатывать.

В образце, разработанном в университете Карнеги-Меллон (США), инертная подложка заменена сверхбольшой интегральной схемой, которая действует как параллельный компьютер специального назначения, так что тактильный датчик выполняет не только преобразование усилий, но и обработку данных об «образце».

Бесконтактное очувствление

Определение расстояния до близкорасположенного объекта. Существует группа датчиков, которая фактически не включает осязание, тем не менее они реагируют на близкорасположенные объекты. Максимальный диапазон действия таких датчиков составляет около 30 см, но многие выпущенные образцы могут действовать на значительно более близких расстояниях. Некоторые из устройств, используемых для осязания, пригодны также и для **определения приближения к объекту**, как, например, индукционные и емкостные системы. Индукционные системы могут чувствовать металлы на расстоянии в несколько миллиметров, тогда как емкостные системы — наличие непроводящих материалов, таких, как дерево или стекло, а также железа и цветных металлов на расстояниях до нескольких сантиметров. Разновидность обнаружения близости объекта основана на использовании струй воздуха, которые отклоняются или отражаются, если объект оказывается вблизи. В таких системах могут использоваться жидкостные логические системы, с тем чтобы применить это отражение для непосредственного вызова требуемой реакции. Наиболее распространены датчики приближения к объекту, основанные на оптических методах, когда инфракрасный или видимый свет, излучаемый передатчиком, размещенным в модуле датчика, фокусируется в точку пространства, находящуюся на расстоянии в несколько сантиметров от датчика. Фотодатчик, размещенный в том же модуле, что и передатчик, фокусируется на ту же точку пространства. Когда в точке нет объекта, свет, отражаемый обратно к датчику, очень слаб. При приближении какой-либо поверхности к точке отражение увеличится и приведет к образованию максимального сигнала, когда поверхность окажется точно в точке фокуса.

Такие устройства занимают объем всего в несколько кубических сантиметров и размещаются на рабочем органе робота. Они способны очень точно измерить расстояния, но когда более важно увеличить диапазон измерения расстояния, свет не фокусируется в одной точке и датчик только регистрирует уровень отраженного света, который зависит от расстояния и типа поверхности отражающего объекта. Устройства такого типа могут регистрировать объекты, удаленные на десятки сантиметров: некоторые объекты отражают свет слабо, другие — хорошо, иногда из-за положения объекта сигнал будет идти мимо датчика. Поэтому все эти проблемы возникают и с прозрачными материалами. Датчики способны **модулировать** собственное излучение (обычно в несколько килогерц) и регистрировать только отраженный свет, модулированный таким же образом, отфильтровывая посторонние сигналы.

Дальнее обнаружение объектов. Информацией об объекте или внешнем мире робот могут обеспечить датчики ближнего расстояния и некоторые визуальные системы. Существуют различные подходы, специфичные для дальнего обнаружения.

Наиболее популярный — использование ультразвука. В таких системах используется сонарный принцип передачи коротких импульсов ультразвука (с частотами, превышающими 20 кГц) от пьезоэлектрического кристалла и последующего измерения времени, необходимого для возвращения отраженного импульса от соседнего объекта. Зная скорость распространения звука в воздухе (около 300 м/с), можно подсчитать расстояние, проходимое звуковым импульсом, а разделив полученную величину пополам, получить расстояние до объекта. Фирма «Поляроид» разработала ультразвуковой искатель для автоматического фокусирования своих камер. Сонар «Поляроида» экономичен, поскольку выпускается поточным способом и имеет отработанную конструкцию.

В некоторых других системах, основанных на использовании более коротких волн, ультразвук более высоких частот позволяет получить более высокое разрешение. Такие системы способны составить карты местности (с использованием информации о глубине).

Однако более низкие частоты имеют преимущества, поскольку меньше ослабляются в воздухе и применяются для измерения более длинных расстояний. Точность определения дальности ультразвуковых систем колеблется в пределах порядка 1 см для дальности в несколько метров при использовании сигнала в 40 кГц, а звуковой сигнал 1 кГц дает точность порядка 30 см при дальности 50 м и более. Система «Поляроид» снабжена цифровым выводом, и на практике точность составляет около 1 см при расстояниях от 0,3 до 30 м. Датчик определяет отражения в пределах 20° от главной оси, хотя это значение можно существенно уменьшить, поместив его в специальный звукоприемник. Обеспечить круговой обзор возможно благодаря использованию соответствующих акустических рефлекторов, разворачивающих луч до 90° от главной оси.

При использовании составных сонарных систем необходимо различать источники импульсов. Это можно сделать путем использования либо различных частот для различных систем (если число этих систем не слишком велико), либо различных скоростей импульсов для различных передатчиков. В этих системах отраженный сигнал регистрируется только при совпадении частоты регистрации и частоты датчика. Возможны различные усовершенствования для упрощения сонара, например использование фазированных решеток для формирования узконаправленного импульса в отличие от традиционных лучей, где угловое разрешение составляет более 10°. Однако маловероятно, что такая постановка задачи облегчит решение по сравнению с анализом визуальной информации.

Несмотря на преимущества, ультразвуковые устройства могут приводить к акустической интерференции, и так как некоторые поверхности (особенно материалы, подобные губке) поглощают переданный сигнал, любая большая плоская поверхность действует как акустическое зеркало, которое, пока оно стоит «носом», может привести к тому, что большие поверхности вообще не будут обнаружены. Отраженные сигналы быстро затухают с расстоянием, так что эхо от соседних объектов может заглушить отзвуки от объектов, расположенных дальше.

Дальномеры, использующие лазерные лучи или радиоволны, как в радаре, не подходят для коротких расстояний, характерных для робототехники, так как время распространения этих излучений составляет всего несколько наносекунд на метр расстояния (хотя для некоторых космических роботов такие системы идеальны). В целях безопасности можно использовать **Допплеровские системы** — устройства, измеряющие изменения в высоте тона сигнала, распространяющегося от относительно движущегося объекта. Хотя они и не обеспечивают полной информации о расстоянии, зато хорошо чувствуют относительное движение.

В основе метода определения расстояния до объекта используется триангуляция (тригонометрическая съемка), когда два устройства размещаются вдоль базовой линии на расстоянии друг от друга, угол между базовой линией и заданным объектом тщательно измеряется каждым устройством. Сравнивая оба показания, можно вычислить фактическое расстояние до объекта. Оптические системы, пригодные для роботов, могут либо применять **пассивную освещенность**, где используется только окружающий свет и триангуляция проводится с помощью стереозрения, либо метод активной освещенности, исключающий трудности при регистрации изображения. При методе **активной освещенности** медленно сканирующий коллимационный источник света (например, твердотелый инфракрасный излучатель или лазер) образует широкое пятно света, движущееся по поверхности соседних объектов. Пятно обнаруживает быстро

сканирующее сенсорное устройство (источник света обычно модулируется, с тем чтобы помочь выделить его от фонового освещения). Серии триангуляционных показаний строятся по мере сканирования пятна через окружающую среду.

Зрение. Зрение робота должно стать жизненно необходимым сенсорным устройством в сложных системах. По некоторым оценкам, промышленность, изготавливающая системы технического зрения, ежегодно удваивает их выпуск. Возможно, к 1990 г. выпуск таких систем достигнет 1 млрд. долл. От других органов чувств системы технического зрения отличаются тем, что, обладая необходимой быстротой, оставляют объект в неприкосновенности. Такие сенсорные устройства обеспечивают большой объем информации о видимой обстановке — от распознавания типа, местоположения, дальности и ориентации объектов до сложной информации обратной связи, необходимой манипулятору или тележке для выполнения задачи. Сенсорные устройства можно использовать для визуального наблюдения и контроля качества.

Методы, применяемые в системах технического зрения роботов, очень сложны, поэтому рассмотрим их только в общих чертах. Стоит также напомнить, что многое из того, что связано с обработкой изображения, применимо и к другим сенсорным устройствам, таким, как тактильные датчики. Дело в том, что многие из первых работ по созданию искусственного зрения стимулировались заинтересованностью НАСА в создании таких систем для исследований космического пространства.

В 1973 г. в Ноттингемском университете (Великобритания) была создана первая система зрения робота — система «СЕРЧ» (полуинтеллектный робот для манипулирования компонентами). Система состояла из подвижного захвата, управляемого компьютером, который определял положения простых форм, попадавших в поле зрения камеры. В пределах 5 с объекты могли быть опознаны и подвергнуты манипуляции. К сожалению, отсутствие коммерческого интереса к разработке привело к тому, что система не нашла широкого применения.

Камеры, используемые в системе зрения роботов, можно поместить сверху или сбоку робота. Прикрепив камеру к запястью робота, можно получить хороший

обзор рабочей зоны. Развитие **волоконной оптики** дало возможность устанавливать камеры на небольшом расстоянии от запястья и передавать изображение посредством системы зеркал или по кабелю, состоящему из волокон. Это дает возможность получать изображения даже из таких мест, где камеру нельзя установить, например в ладони захвата. Такие камеры представляют собой либо телевизионные трубки типа «видикон», либо твердотелые камеры (**приборы с зарядной связью ПЗС** — устройства или камеры, в которых данные накапливаются посредством мельчайших пакетов электрических зарядов), состоящие из мозаики (или иногда только линий) отдельных фоточувствительных элементов.

Хотя такие ПЗС-камеры представляют относительно новую технологию, можно ожидать, что благодаря исключительной надежности и своим размерам, массе и характеристикам потребляемой мощности они скоро в значительной степени вытеснят традиционные телевизионные трубки в системах искусственного зрения роботов. Можно применять и простые камеры, состоящие из одного ряда фотоэлементов, для получения полного двумерного изображения, при размещении **линейно-сканирующей камеры** поперек конвейера.

Разрешающая способность системы технического зрения определяется числом отдельных точек (или элементов изображения), которые должны быть различимы на изображении и обычно не превышают 512×512 элементов. Изображения с разрешением ниже 64×64 элемента ухудшаются при цифровой обработке. В традиционных телевизионных трубках ухудшение может быть весьма значительным, в то время как в твердотелых камерах благодаря присущей им структуре достоверность изображения очень высока.

Аналоговый сигнал любой из используемых камер преобразовывается в цифровую форму на аналогово-цифровом преобразователе, а информация накапливается так, чтобы ее мог обработать компьютер. **Накопитель информации** — это устройство для хранения основы телевизионного изображения для последующей компьютерной обработки. Это устройство входит в состав быстрой памяти компьютера, для которой каждый адрес памяти соответствует элементу изображения. Каждый элемент изображения может быть простым элементом черного или белого цвета. В сложных системах

отдельный элемент можно представить в цифровой форме любого из 256 **серых тонов,** изменяющихся в диапазоне от черного до чисто-белого. В будущем зрение робота сможет использовать цветную информацию. В настоящее время представляется весьма спорным вопрос, оправдываются ли в большинстве областей применения роботов небольшие дополнительные преимущества использования цвета с учетом необходимых дополнительных компьютерных вычислений.

Только некоторые системы зрения роботов используют информацию о серых тонах, другие же системы в целях экономии времени вычислений поступают следующим образом, создавая бинарный вариант, предварительно «вычисляют» изображение. Затем, выбирая пороговый уровень яркости, можно сделать каждый элемент изображения черным, если его значение ниже порогового, и белым, если больше. Так создается силуэт. Освещение таких систем играет важную роль, т. е. если тени на объекте принять за фон, то воспринимаемая форма объекта радикально изменится. Что же касается сильно отражающих объектов, то они также могут вызвать ложные эффекты. Изменение порогового уровня отрицательно отразится на интерпретации системы объекта.

Чтобы преодолеть эти трудности, объекты освещают снизу, а если это невозможно, то применяют трубчатые флюоресцентные лампы. Можно также поместить объекты на фоне, покрытом флюоресцентными материалами, а затем осветить их ультрафиолетовым светом, чтобы создать резкий контраст между фоном и лежащими нефлюоресцентными объектами. Цветные фильтры перед линзами камеры значительно усиливают контраст. Пассивное освещение важно, если требуется получить ясное изображение интересующих деталей, и часто общая надежность и эффективность данной системы зрения определяются тем, насколько удачно это сделано.

С помощью разных методов роботы способны различать объекты на общем фоне. Например, контуры объектов можно определить по изменениям в цвете или яркости или по фону, который они «вымарывают». Если изображение меняется в течение времени, то объекты можно различать благодаря относительному движению между ними и их задним планом, фактическому движению относительно друг друга, движению наблюдателя, вызывающему изменение в положении объекта

вследствие параллакса. Эффект параллакса можно получить с помощью стереовидения, как это делает человек (в некоторых случаях можно даже использовать больше, чем два вида объектов).

Наиболее распространенная форма определения в визуальных системах некоторых простых компонентов рабочей сцены, используемая в сложных системах роботов с применением серых тонов, включает **определение контура объектов.** Первый этап действия таких систем, обрабатывающих изображения, заключается в делении изображений на участки с одинаковой яркостью или цветом. Определение контура включает измерение изменений в яркости по всему изображению. Резкое изменение интенсивности отмечается на **контурной карте.** Специальная аппаратура позволяет с большой скоростью выполнить процессы определения контуров. Иногда поступают иным образом — поверхности в фактической обстановке разделяются путем поиска областей адекватной яркости.

Поскольку предполагаемые «края» на контурной карте, как правило, представляют собой короткие прерывистые линейные сегменты, то задача заключается в том, чтобы соединить их в непрерывные линии, которые бы соответствовали фактическому контуру объектов. Результаты обработки накапливаются в более сжатой форме представления данных с помощью, например, такого метода, согласно которому линии описываются путем задания (для каждого элемента изображения на линии) направления (одного из восьми возможных направлений) следующего элемента изображения.

Наиболее трудным для робота является конечный этап, когда производится **распознавание образов,** т. е. признаки изображения должны соответствовать признакам объектов, о которых система «знает». Широко распространены два подхода: шаблонное соответствие, когда код изображения подбирается к набору «шаблонов» возможных объектов и выбирается лучшее соответствие; распознавание по признакам, когда набор полученных признаков более высокого уровня, таких, как площадь, периметр, центр площади, подбирается к набору соответствующих признаков известных объектов.

На практике трудно решить такую проблему, как частичное перекрывание одной детали другой. Задача выбрать одну деталь из нескольких для многих стала символом совершенства, к которому должно стремиться

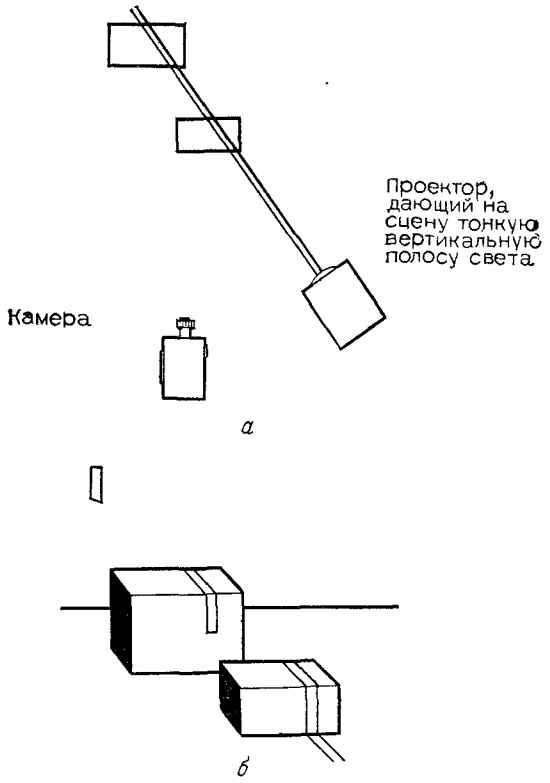

Рис. 36. Принцип действия структурированного света:
а — план системы; *б* — вид сцены со стороны камеры

зрение роботов. Эта проблема впервые была решена в университете Род Айленд. Однако этот метод, прежде чем применять в промышленности, необходимо значительно улучшить.

Глубина информации трехмерного изображения может быть визуально получена путем либо активной, либо пассивной освещенности. Если для определения расстояния нельзя использовать специальную технику освещения, следует получить и обработать изображение сцены с различных точек наблюдения, либо применяя две (или более) слегка удаленные друг от друга камеры, либо используя одну камеру, которая может двигаться. В том и в другом случае определенные точки в

каждом изображении должны соответствовать друг другу, и зная угол установки камеры относительно сцены, можно вычислить расстояние до точек, используя простую триангуляцию. Системы изображения в основном двумерные, использующие ограниченный объем информации о глубине для различения объектов, обычно относятся к $2\frac{1}{2}$-мерной системе.

В триангуляционных системах активной освещенности камера стоит на одном конце базовой линии, а сканирующий лазер (или его эквивалент) — на другом. Камера может легко обнаружить яркое пятно лазера и определить эффективный угол к нему, используя элемент изображения, на который он падает. Корреляция угла с текущим значением угла сканирующего луча позволяет определить расстояние до пятна с помощью триангуляции.

Другой формой активной освещенности, используемой в некоторых системах зрения роботов, является **структурированный свет.** Такие системы проектируют тонкую полоску света (вместо единственного пятна) на сцену (рис. 36), одновременно получая огромное число триангуляций. Тот же метод использовался для получения ясных двумерных изображений крупных объектов на конвейере, проходящих под линейно-сканирующей камерой. Полоска света сияет в плоскости, которая находится под углом к плоскости обзора камеры, но сделано так, что две плоскости пересекаются на конвейере на линии точно под камерой (рис. 37, *а*). Где конвейер пуст, камера видит яркую полоску света, но там где появляется крупный объект, сверху кажется, что линия

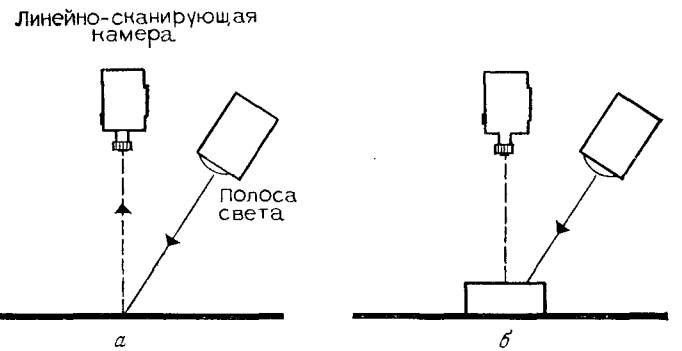

Рис. 37. Принцип действия системы «Консайт»

отклоняется от обзора камеры (рис. 37,*б*). Этот принцип применен в системе «Консайт», разработанной фирмой «Дженерал Моторс» в 1977 г., где используются две полоски света, проектирующиеся из различных точек. Использование таких простых методов должно в значительной степени послужить промышленности, пока действительно не станут доступны дешевые и быстрые сложные системы искусственного зрения.

В настоящее время продаются отдельные системы зрения роботов, но их стоимость составляет около 25 000 долл.— половину или больше стоимости настоящего «слепого» робота, к которому будет придана эта система. Однако «АСЕА» ввела первую интегрированную «систему зрения», работающую в заводских условиях, которую могут элементарно программировать рабочие. Подсчитано, что в 1981 г. в США роботов, оснащенных системами технического зрения, насчитывалось около 1 %, к 1990 г. эта цифра приблизится к 25 %.

Глава 8

Рука об руку. Рабочие органы и подача деталей

Рабочие органы. Типы захватов

Робот можно рассматривать не более как удобное средство для передвижения устройства, закрепленного на конце руки робота, в различные точки пространства. Рабочие органы имеют разнообразные формы: захваты, инструменты и датчики.

Большинство рабочих органов предназначено для захвата предмета. Захваты не только берут заготовки, но также центрируют и ориентируют их, более сложные приспособления включают некоторые формы очувствления (например, установить или определить, есть или нет детали). Захват должен быть легким, так как максимальная полезная нагрузка включает и массу рабочего органа.

Если предмет необходимо точно удерживать в положении, то захват должен быть максимально жестким и сжимать предмет с достаточной силой, чтобы он не вы-

скользнул (слишком большое усилие может повредить заготовку).

Тяжелые грузы должны располагаться ближе к оси захвата, чтобы исключить действие больших по величине **крутящих моментов** на захват и робот.

Гибкость захватов роботов, как правило, невелика, и поэтому захваты выбираются или проектируются для каждого конкретного случая. Это отражается на стоимости захвата, которая часто составляет до 10 % стоимости робота. Наиболее распространенная форма захвата — это зажимный механизм, подобный клещам, в котором сменяемые **пальцы** захватывают объект либо с внешней стороны, либо «раскрываясь» изнутри. В основном такие захваты оснащены двухпальцевыми устройствами, управляемыми пневматическими или гидравлическими приводами. Гидравлика обеспечивает большие сжимающие усилия, но с ее помощью достичь требуемого уровня усилия труднее, чем при использовании пневматики. Некоторые захваты, приводимые в действие с помощью пневматики, для взятия деталей используют механизм рычажного типа, увеличивающий усилие поршня в 20 раз. Электрические захваты, способные закрываться в точном положении (а не только быть либо полностью открытыми, либо полностью закрытыми), пока мало распространены.

Для предотвращения выскальзывания из захвата или вращения детали пальцевые устройства покрывают упругими прокладками или используют самовыравнивание, чтобы каждая часть тисков имела по крайней мере в двух точках контакт с манипулируемым предметом. Конструкция захвата должна быть обеспечена достаточной **силой трения**, чтобы удержать детали при ускорении руки робота. При подъеме детали на полной скорости сила, действующая на деталь, может в нормальных условиях в 2—3 раза превышать ее массу. Для прокладок захватов чаще используют полиуретан, соединенный со сталью. У полиуретана высокий коэффициент трения, он легко обрабатывается, выдерживает тысячи часов циклов сжатия и разжатия. Если захваты должны забирать горячие детали (как, например, при ковке), то выбрать подходящие материалы для пальцев трудно.

Для перемещения больших, но легких предметов (картонные ящики и коробки) захваты оборудуют парой независимо управляемых тисков, размещенных на значительном расстоянии друг от друга. Для перемещения

меньших по размеру, но тяжелых, плоских или имеющих форму ящика предметов захваты оснащаются специальным рычажным механизмом, который позволяет тискам сдвигаться, при этом их поверхности остаются параллельными. Хрупкие предметы, такие, как стеклянные бутылки, можно забирать, не перемещая тисков, а раздувая пузырь или баллон, помещенный предварительно внутрь или вокруг предмета. Получаемая область тесного контакта позволяет для заданной массы использовать очень малые давления контакта, кроме того, поверхность предмета не повреждается.

Вакуумные захваты используются при перемещении предметов с ровными, сухими и чистыми поверхностями. Существует много вариантов таких захватов, но в основном они имеют одну или несколько присосок, с помощью которых прикрепляются к поверхности поднимаемого предмета, и специальное устройство **(вентури)** или вакуумный насос для создания необходимого **разрежения**. Легкие объекты или объекты с липкими или полированными поверхностями перемещают с помощью **систем выдувания**, которые изменяют направление механизма разрежения, создавая в присосках избыточное давление и заставляя присоски отстать от поверхности предмета. Система выдувания применяется для любого типа поверхности. Преимущество вакуумных систем состоит в том, что их можно применять, когда одна поверхность объекта доступна для схватывания.

Железные предметы поднимают, используя свойство магнетизма (электромагниты). Конфигурации предметов и условия аналогичны тем, где используются вакуумные захваты. При этом следует соблюдать осторожность, так как плоские поверхности могут соскользнуть к магниту под прямым углом, а посторонние металлические частицы притянуться вместе с нужным предметом. Постоянные магниты применяются во взрывоопасных средах или при температурах свыше 60 °С. Однако магнитам требуются некоторые средства либо принудительной разгрузки, либо смещения магнитных полюсов (например, в специальных магнитных столах), которые могут возбудить магнетизм в манипулируемых деталях. Электромагниты исключают такие трудности за счет размагничивания, достигаемого короткой сменой полярности или путем резкого повышения переменного тока.

Используют и другие типы захватов для взятия предметов, например: **адгезионные захваты** — липкие пальцы

берут легкие материалы, такие, как ткань, по возможности используя подвижную ленту липкого материала подобно машинописной ленте; **прокалывающие захваты** — захват протыкает предмет или материал, который нужно поднять; ковши, черпаки или шпатели — простое цепляние крючком детали.

Гибкость

Спроектировать захват — достаточно трудная задача, поскольку число манипулируемых деталей постоянно увеличивается. Некоторые роботы оснащены устройством, состоящим из двух независимых захватов на одном запястье. При вращении запястья тот и другой захват будут перемещаться в нужное положение, например один захват устанавливает детали в металлорежущий станок, а другой — снимает детали. Эта конструкция применяется, когда необходимо манипулировать деталями двух различных форм. Если же предметы имеют несколько различных форм, используются робототехнические системы, способные автоматически заменять либо часть, либо весь захват. Это можно осуществить, прикрепляя различные захваты к выступу на запястье робота или прикрепив один постоянный захват для взятия других захватов.

В настоящее время в МТИ (США), Крэнфилдском технологическом институте (ВБ) и ИПА (Штутгарт) разработаны **универсальные захваты**, способные брать большое число различных деталей. Универсальные захваты представляют собой три или более (часто независимо управляемых) объединенных пальца по аналогии с человеческой рукой. Заманчиво попытаться непосредственно подражать человеческой руке, но поскольку для этого требуется иметь 22 степени свободы, то такую задачу чрезвычайно трудно решить. На практике, по-видимому, всего три пальца могут эффективно манипулировать многими деталями. В большинстве проектов применяется захват с тремя пальцами с различной степенью обратной связи, так как эффективность такого устройства значительно выше эффективности других устройств.

При пассивном подходе к формированию адаптации используется традиционный захват, у которого пальцы имеют прокладки с обивкой, заполненной сыпучим

5 Зак. 611

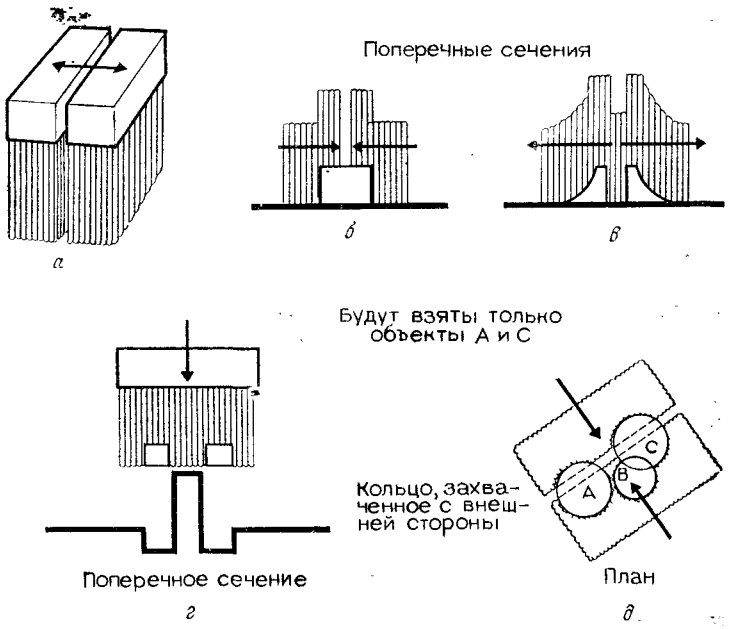

Рис. 38. Принцип действия универсального захвата «Омнигриппер»

порошком. Когда предмет забирается роботом, набивка образует форму вокруг поверхности предмета и затем фиксируется, предшествуя движению захвата соединением всех частиц вместе. Это возможно при электронамагничивании железных частиц или при применении вакуума для заполнения. Однако при таком пассивном подходе и **антропоморфной руке** трудно почувствовать, где точно находится взятый предмет относительно запястья робота.

Конструкция захвата, разработанная в Государственном колледже (Лондон), которая, видимо, разрешит некоторые из этих проблем, получила название «Омнигриппер». Этот захват оснащен двумя параллельными слегка разделенными пальцами, каждый состоит из множества тесно расположенных стержней 8 × 16, которые перемещаются вверх и вниз независимо друг от друга (рис. 38, *а*). Опускание захвата на предмет выталкивает некоторые стержни вверх, образуя таким образом нечто вроде пальцев, приспособленных к детали. Чтобы захватить предметы с внешней стороны, разделенные пальцы должны быть сдвинуты вместе (рис. 38, *б*) или слегка раздвинуты (от «закрытой» позиции) для захвата с внутренней стороны (рис. 38, *в*).

Обратную связь от каждого стержня «Омнигриппера» обеспечивает тактильная информация об объекте (включая параметры высоты), позволяющая распознавать предметы,— это компенсация за неточное позиционирование детали и восприятие внешней обстановки. Стержни, фактически не держащие предмет, будут подняты вверх, если они коснутся чего-то нового (рис. 38, *г*).

«Омнигриппер» одновременно берет два предмета и более и используется для выбора и разделения заходящих друг на друга деталей, потому что фактически захватываются только те детали, которые окружены стержнями двух пальцев (рис. 38, *д*); другие лишь сдвигаются.

Податливость

В некоторых случаях в захвате робота желательно сделать «зазор» (или **податливость**), который мог бы быть полезным при небольших отклонениях в позиционировании деталей. На рис. 39 приведены ошибки позиционирования при помещении предмета типа штифта в отверстие. В нашем примере поперечные ошибки могут привести к тому, что штифт пройдет мимо отверстия. Но если штифт начал движение и его цель — попасть в отверстие, то угловые ошибки вызывают либо заклинивание, либо большие контактные силы.

Если штифт захвачен достаточно податливо, то небольшие боковые смещения осей можно скорректировать и по скошенной кромке «привести» штифт к отверстию. Некоторые робототехнические системы используют **активную податливость**, где сенсорная обратная связь (почти всегда по силе) используется для уменьшения боковых и угловых ошибок путем принуждения захвата выполнять компенсирующие движения. Силовые датчики для такой активной податливости обычно размещаются в самом захвате, в некоторых конструкциях они включаются в узлы робота. Скорость, с которой реагируют все системы, зависит от величины допустимой контактной силы.

В настоящее время ведется большая работа по созданию **пассивной податливости** с использованием чисто

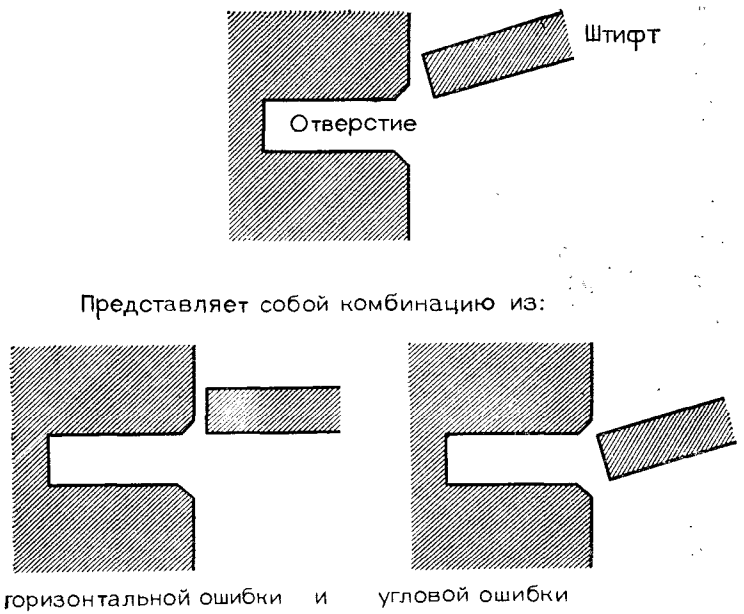

Рис. 39. Ошибки позиционирования — комбинация горизонтальных и угловых ошибок

механических решений проблемы. Неправильное представление связано с верой в то, что всегда достаточно только использовать присущую податливость «небрежной» руки робота. Это иногда имеет место, но такая конструктивная податливость не всегда годится. Представьте себе штифт, который по угловым координатам сцентрирован на отверстие, но слегка отходит от центра. Если штифт удерживается «свободно», то при спуске он попадет на скошенную кромку, создав момент, который не позволит штифту выравнивать угловые параметры. Если все-таки он входит в отверстие, то происходит **защемление** (которое можно снять путем смены направления приложенной силы и момента) или заклинивание (которое можно снять, вытащив штифт и снова его вставив).

Фактически требуемая податливость скорректировала бы боковую ошибку без угловой. Роботы типа «СКАРА» пригодны для выполнения вставок в сборочных работах, поскольку они обладают большой боковой конструктивной податливостью при малой угловой по-

датливости по горизонтальному направлению и малой боковой (хотя высокой угловой) податливостью в вертикальном направлении. Конечно, такие конструкции не смогут справиться с горизонтальными угловыми ошибками с таким же успехом, как с боковыми. В этих случаях используют механические многоосевые «поплавки», известные как устройства **податливости удаленного центра**, показанные схематично на рис. 40. Они прикрепляются к любому запястью робота, как платформа для самого захвата.

Эти устройства спроектированы таким образом, что любая угловая ошибка создает момент, который заставляет одну часть устройства поворачиваться около удаленного центра (обычно размещенного на самом удаленном конце от захвата, удерживающего предмет), но не вызывает бокового движения. Отдельная секция устройства позволяет первой секции двигаться независимо в горизонтальном направлении без вращения заготовки. Такое устройство имеет те же характеристики позиционирования, что и в случае, когда штифт вытаскивается, а не вставляется в отверстие. Уже создано много

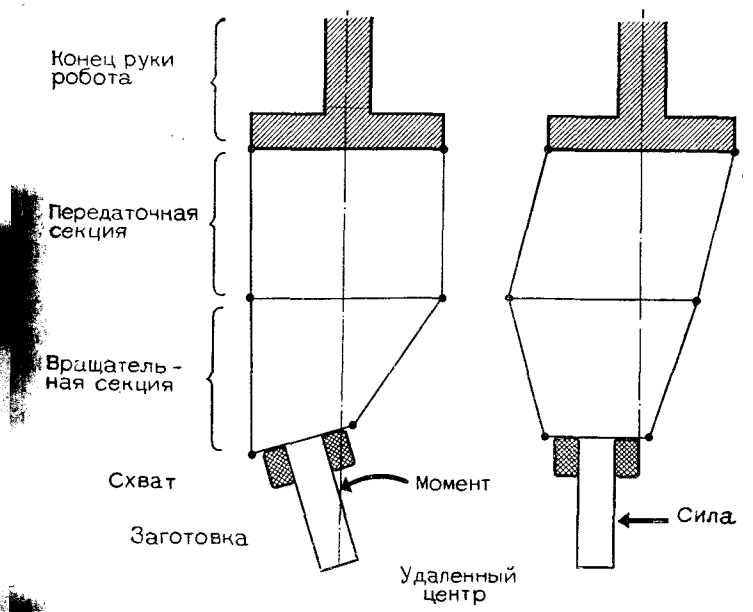

Рис. 40. Принцип действия устройства податливости удаленного центра

вариантов таких устройств: от приспособлений, использующих пружинные рычаги, до пневматических трубопроводов, обеспечивающих нужную ответную реакцию. В конструкциях используются минимальные силы для того, чтобы достичь плотного соединения (особенно полезного в сборочных работах), они допускают большее разнообразие допусков деталей и сокращение остановок машин из-за защемления и заклинивания. Можно осуществлять вставки с намного более высокими допусками, боковые отклонения могут быть столь же большими, что и примененная скошенная кромка, и даже могут быть произведены прессовые посадки, при которых используемый деформирующийся штифт имеет диаметр больше, чем отверстие, в которое он будет вставлен.

Инструменты и датчики

К запястью робота кроме различных захватных устройств прикрепляются различные инструменты и датчики. Типичными инструментами являются аппараты для точечной сварки, дуговой сварки и резки, нагревательные паяльные лампы, пистолеты для окраски напылением, клейкие и изоляционные ленты, приспособления для автоматического завинчивания гаек, сверла и зенкеры, граверы, гаечные ключи, шлифовальные устройства ленточного и дискового типа, водоструйные устройства и лазеры. Созданы специальные системы, передающие свет посредством зеркал или волоконной оптики, которые направляют вдоль каждого шарнирного сочленения руки робота лазерный луч, который выходит из проектора, размещенного в запястье.

Хотя еще часто экономически невыгодно ориентировать робот только на получение данных очувствления, время от времени полезно использовать рабочий орган в качестве датчика. Сенсорные датчики иногда используются при определении точности физических размеров изделий, а ультразвуковые контактные датчики — для обнаружения трещин толщиной в человеческий волос.

Подача деталей

Подаваемые заготовки. Поскольку роботы все больше используются в сложных системах для обработки или сборки деталей, необходимо разобраться в методах

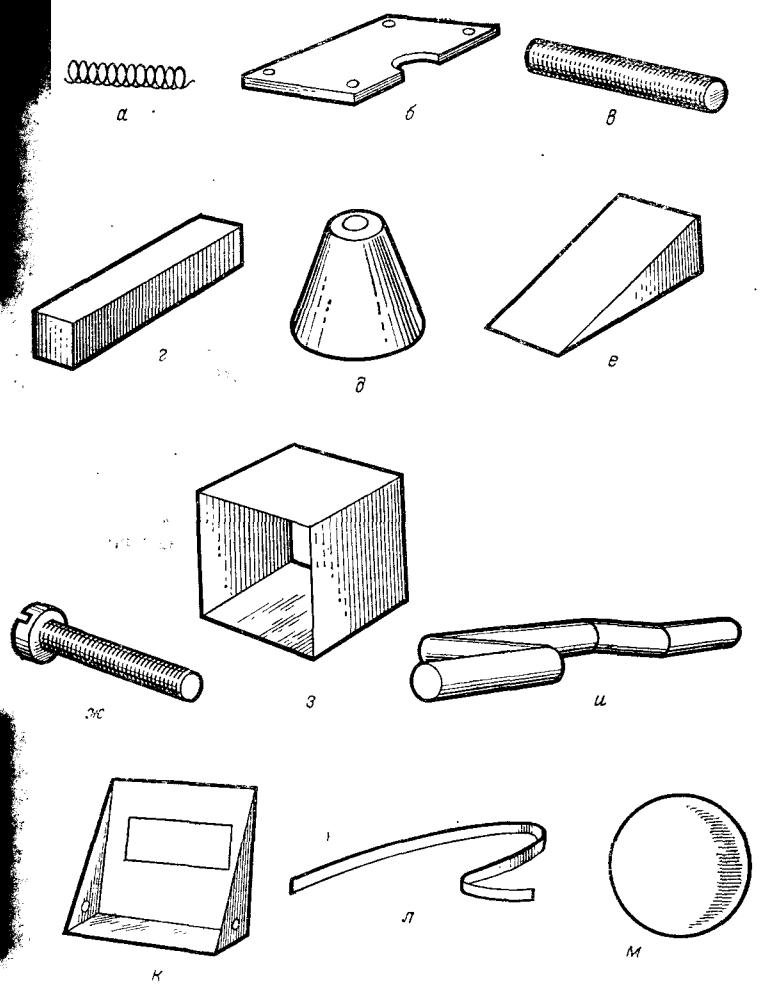

Рис. 41. Классы различных форм деталей:
а — сцепленная; *б* — плоская; *в* — цилиндрическая; *г* — призматическая; *д* — коническая; *е* — пирамидальная; *ж* — с головкой; *з* — полая; *и* — сложного вращения; *к* — неправильной формы; *л* — длинная; *м* — сферическая

подачи заготовок роботу. Методы подачи заготовок роботу основаны на традиционных инженерных подходах.

Чтобы такие устройства удовлетворяли всем требованиям, следует выбрать метод для конкретной заготовки. На рис. 41 представлены различные формы деталей. Детали могут быть сцепленные, как спиральные

пружины; плоские; цилиндрические; призматические; конические; пирамидальные; винтового типа с головками (включая все простые ступенчатые варианты последних четырых форм); пустотелые, как секции ящика; подобные сложным телам вращения, как коленчатый или кулачковый вал; твердыми телами неправильной формы, как прессованные или штампованные изделия; длинные, как стальные ленты; сферические.

Перемещающие системы. Системы для перемещения платформы (или **рабочих носителей — спутников**) с изделиями независимо от степени автоматизации должны обладать определенными свойствами. Перемещающая система должна исключать относительное движение между носителем и рабочей позицией и обеспечивать правильную ориентацию объекта между позициями. В последнее время большое распространение получили **автоматически управляемые тележки**. Однако в основном рабочий носитель не имеет собственного независимого перемещающего механизма, а является частью более крупной перемещающей системы.

Такие системы обычно классифицируются в зависимости от конфигурации их размещения и непрерывности работы. Системы **непрерывного перемещения** передвигают рабочие носители с постоянной скоростью мимо рабочих позиций. Автоматическая рабочая головка или робот должны двигаться вместе с объектом, пока не закончится операция, а затем вернуться в первоначальную позицию, чтобы начать работу на следующем объекте. В **прерывистых системах** перемещение рабочих носителей сочетается с их остановом перед неподвижными инструментами или инструментальными головками для выполнения требуемых операций над изделиями.

Если все рабочие носители системы двигаются одновременно, то система представляет собой машину **сблокированного** (жесткого) типа, т. е. любая незапланированная остановка рабочей головки приводит к остановке всей системы. С другой стороны, при **свободно перемещающихся носителях** рабочие позиции разделены промежуточными накопителями заготовок и перемещение к (или от) накопителю происходит только тогда, когда конкретная рабочая головка выполнила требуемую операцию. В этом случае отказ на одном рабочем органе не влечет остановку всей системы, так как запасы заготовок из соседних накопителей доступны для других рабочих органов.

Перемещающие системы можно расположить по прямой линии, при этом предусмотрев возможность возврата рабочих носителей с конца линии (где выгружаются готовые изделия) к началу. Системы с непрерывным перемещением и жестко сблокированные машины размещаются по **роторной** конфигурации, при которой стол поворачивается так, чтобы подавать заготовки под рабочие органы, расположенные вокруг стола. Заготовка обрабатывается, проходя через каждый рабочий орган, т. е. при повороте стола от одной рабочей позиции к другой одно готовое изделие удаляется из системы.

Конвейерные механизмы линейных систем включают ведомые рольганги, конвейеры типа «шагающей штанги» (в которых подъемная штанга передвигает объекты вперед, поднимая и опуская на опорные балки), рабочие носители с цепной передачей (где носители связаны цепью) и сцепленные системы, в которых рабочие носители касаются друг друга концами, а механизм толкает конец носителей.

Питатели и накопители. Детали, предназначенные для сборки, часто складываются в беспорядке в бункеры или приемные желоба. Такие бункеры в некотором роде выполняют роль накопительных систем с дополнительной функцией ориентации деталей. При использовании магазинов для складирования деталей не требуется последующей ориентации. Детали закладываются в специальные контейнеры соответствующим образом ориентированными и доставляются на рабочую позицию с помощью пружинного устройства, сжатого воздуха или под действием силы тяжести. Особый вид магазина представляет палета, в которой детали размещаются обычно рядами «гнезд» горизонтально на опорной панели.

Использование магазинов не требует загрузочных лотков и сокращает время простоев. Однако, как правило, магазины вмещают незначительное количество деталей и дорого стоят. Идеальное место заполнения магазинов — место изготовления деталей, но это может вызвать трудности транспортировки. В некоторых случаях применяют магазины одноразового пользования (подобно контейнерам, применяемым для упаковки таблеток, когда каждая таблетка размещается отдельно). Детали могут соединяться в лентах (как электрические элементы для сборки схем) или, если детали штампуются из ленты, то можно оставлять временные связи,

которые ликвидируются только тогда, когда требуется деталь. Хотя автобункер требует точной регулировки скорости подачи деталей роботу, так как она может значительно опережать быстродействие робота, и более подходит для жесткой автоматизации, он по-прежнему широко распространен. В вибробункерах по внутренней поверхности пологой чаши проложена специальная дорожка. Чаша вибрирует с помощью электромагнита, а помещенные детали медленно поднимаются по спусковой дорожке к выпускному отверстию в верхней части.

Преимуществом таких питателей является сравнительная легкость, с которой ориентирующие устройства могут включаться в емкость.

На специальных дорожках вибробункеров сделаны сужения и отсекатели, которые позволяют пропускать только правильно ориентированные детали. В **пассивно ориентирующих устройствах** детали, не имеющие желаемой ориентации, возвращаются обратно в чашу. **Активно ориентирующие устройства** имеют специальные каналы для переориентации деталм. Они производительнее пассивных.

Питающие устройства менее гибки, чем роботы, использующиеся для загрузки. Кроме того, стоимость таких загрузочных устройств относительно велика из-за часто ненужного запаса скорости подачи. В Салфордском университете (Великобритания) делаются попытки автоматизированного проектирования загрузочных устройств с помощью системы КАД/КАМ, когда они создаются непосредственно исходя из быстродействия робота и конфигурации изделия.

Для ориентации без специальной обработки используются универсальные бункерные устройства с распознающей системой, которая может определить форму, положение и ориентацию детали, а затем либо отвернуть неверно ориентированные детали, либо нацелить активно ориентирующую систему на правильную ориентацию детали. Такие системы более гибки, хотя и дороги, и могут использоваться для быстрой загрузки различных магазинов разнообразными деталями, при этом для удовлетворения требований роботосистемы необходим только один питатель, в противном случае потребовалось бы столько различных питателей, сколько используется деталей. В специально **программируемых питателях** инструменты отбираются автоматически компьютером.

ЧАСТЬ III

РОБОТОТЕХНИКА В ДЕЙСТВИИ

Глава 9

Роботы с руками

Удаление заусенцев

Удаление заусенцев с помощью роботов — сравнительно новая область применения, поскольку требует довольно сложных роботов. Снятие заусенцев обычно выполняется вручную, рабочий осматривает детали, обнаружив острые металлические или пластмассовые неправильности (заусенцы), вышлифовывает или отрезает их. Это связано с большими затратами времени и увеличивает стоимость единицы продукции, так как механизировать эту операцию трудно.

В настоящее время при снятии заусенцев с помощью роботов не используется очувствление их. Хотя, несомненно, существуют большие потенциальные возможности для применения сложных визуальных (тактильных) систем при обследовании заготовок и удалении заусенцев. При отсутствии таких систем приходится проходить всю поверхность специальным инструментом независимо от того, нужно снимать заусенцы или нет. Так как инструмент требуется только для удаления сравнительно небольшого количества материала, можно перемещать инструмент с помощью руки робота, удерживая заготовку в стационарном положении.

Часто заготовка, которой манипулирует робот, используется как опора для инструмента при снятии заусенцев. В этом случае можно применять различные инструменты для различных этапов процесса снятия заусенцев. Специальный набор инструментов может оказаться необходимым, если, например, имеются области,

недоступные для использования традиционных инструментов. Кроме того, они должны обладать возможностью легкого перепрограммирования при изменениях форм заготовок и быстрого перехода с одной программы на другую. Требования, возникающие при шлифовке ребер стекла и полировке металла, во многом аналогичны требованиям при снятии заусенцев.

Литье в металлические матрицы

Первое использование роботов связано с обслуживанием литейной машины и до настоящего времени не потеряло актуальности. **Литье** цветных металлов включает следующие процессы: нагнетание расплавленного металла под давлением в формы (**матрицы**); затвердение металла; выпуск литья (обычно посредством автоматического вытягивания стержней, заделанных в матрицы); закалку литья в воде и удаление излишков металла. Матрицы очищаются часто воздушными струями и смазываются для предотвращения сцепления со следующей отливкой.

Такие действия идеально выполняют простые роботы, способные точно ориентировать детали при сравнительно простом захватывании (обычно с использованием стандартных захватов, называемых стояками, образованных в канале, где металл вдавливается в матрицы). При внедрении роботов нет нужды заменять такое оборудование. Кроме того, большую выгоду может представить высвобождение рабочих на ручных работах.

Использование роботов на разгрузке, закалке и кромкоуборке увеличивает производительность, точность, безопасность работ, повышает коэффициент использования основного оборудования. В тех случаях, когда составные части изделия, сделанные из другого материала, чем сплав отливки, должны быть помещены в матрицы перед процессом отливки, роботы также могут взять на себя эту задачу. Для выполнения несложной разгрузки робот можно заменить устройством типа «взять-положить».

Обрубка отливок

Несмотря на тяжелые условия работы человека в литейных цехах, роботы пока не нашли широкого распространения в этой отрасли промышленности. Роботы

все шире применяются для очистки (**обрубки**) отливок. До обрубки отливка будет покрыта посторонними кусками металла: частично выдавленного из формы, частично от стояков и связывающих каналов в форме. Все это необходимо удалить или газовой горелкой, или с помощью шлифовального инструмента, а так как объемы литья невелики, то работа выполняется вручную.

Отливки часто имеют сложную форму, и обрубка заусенцев требует времени и, следовательно, дорогостоящая: 20 % текущих затрат по литью приходится на обрубку, а сама работа является одной из наиболее трудоемких. Внедрение роботов, которые заменят человека, позволит исключить опасность для человека и использовать большие по размерам и более эффективные инструменты.

Во время обрубки иногда требуется удалить большое количество материала, поэтому есть смысл заставить робот манипулировать отливкой при фиксированном шлифовальном инструменте. Это эффективнее, чем манипулировать шлифовальным инструментом по фиксированной отливке. Когда отливка подводится к шлифовальному инструменту, то робот испытывает значительные динамические нагрузки, и поэтому рука (и захват) должна быть достаточно мощной. Что же касается снятия заусенцев, то отсутствие у роботов сенсорной обратной связи, требуемой для определения мест шлифовки, приводит к потерям времени и связано с трудностями подстановки отливки всеми гранями к инструменту.

Обработка давлением

Ковка металла ударами молота или прессом требует значительных физических усилий человека-оператора. При **ковке падением** раскаленные металлические болванки подвергаются ударам, находясь между молотом и наковальней при ковке молотом или между двумя матрицами — при матричной ковке. В отличие от ковки при **прессовании** горячая болванка помещается между пуансоном и матрицей, а затем медленно вдавливается в форму. Другие операции обработки давлением включают прокатку (болванкам придается требуемое поперечное сечение путем пропускания их через валки специальной формы) и расплющивание, при котором концы валов увеличивают путем ковки. Операция расплющивания полностью автоматизирована.

При ковочных операциях широко применяются роботы. Радикальное изменение формы деталей во время процесса ковки требует разработки сложных и крупных захватов роботов.

Роботы способны в течение длительного времени переносить раскаленные тяжелые заготовки с высокой скоростью, работая в агрессивной среде. В отдельные короткие периоды человек может работать быстрее роботов, но при выполнении длительной работы без роботов нельзя обойтись. Поэтому роботы все шире применяются на операциях обработки давлением. Сноровку опытного оператора при выполнении отдельных операций нельзя противопоставить возможностям роботов, так как у них отсутствует сенсорная обратная связь. Операторы, выполняя объемную штамповку, осторожно двигают деталь в промежутках между ударами молота, сами определяют число и силу ударов. Потребуется высокий уровень визуальной обратной связи, прежде чем роботосистемы смогут заменить человека.

Термическая обработка

Нагревание и охлаждение некоторых металлов в определенных циклах изменяют внутреннюю структуру, которая в свою очередь изменяет прочность, твердость и пластичность.

Первый вид термической обработки включает нагревание металла до очень высокой температуры и затем быстрое охлаждение опусканием в резервуар с водой или маслом. Некоторые сплавы быстро охлаждаются на воздухе. В результате такой закалки металл становится хрупким; поэтому, чтобы частично ослабить хрупкость, обычно после закалки используется **отпуск**. Этот процесс включает повторный разогрев металла до средних температур и затем охлаждение на воздухе.

Второй вид используется для того, чтобы сохранить общую прочность металла, обеспечив очень твердую его поверхность. Такое **поверхностное упрочнение** можно выполнить, либо нагревая только поверхность вслед за погружением в воду, либо покрывая горячий металл химическим флюсом. В тех случаях, когда металл нагревается в расплавленной соли, другие химикаты используются для получения требуемого химического состава на поверхности.

Для снятия напряжений или смягчения металла для последующей механической обработки пользуются отжиском. Процесс включает нагрев металла до высокой температуры и затем постепенное охлаждение в печи. Из всего вышесказанного следует, что процесс термической обработки является крайне вредным, выполняемым в агрессивной среде. Поэтому термообработка является идеальной технологией для роботизации, причем достаточно использование сравнительно простых конструкций роботов с позиционным управлением.

Точное литье по выплавляемым моделям

Высококачественное литье все больше находит применение в тех случаях, когда нужно получить готовую продукцию, не требующую или почти не требующую отделки, продукция должна иметь очень высокую пространственную точность и не иметь «следов соединения», оставляемых двумя половинами форм, используемых в традиционном литье. Процесс **точного литья** включает подготовку восковой модели нужного предмета. Ее получают путем нагнетания воска под давлением в металлическую матрицу правильной формы. Из-за того что матрица используется только для формования воска, срок ее службы велик, но что касается литья в металлические формы, то важно, чтобы между каждым циклом литья восковой формы металлическая матрица очищалась и смазывалась.

Затем восковую модель обкладывают слоем **огнеупорного материала**, непрерывно погружая модель в жидкий цементный раствор и давая возможность высохнуть. Таким образом, вокруг модели можно создать бесшовную форму любой требуемой толщины. Подготовка **форм оболочек** — утомительная и требующая больших затрат времени работа. Как только форма готова, модель освобождается от воска и форма помещается в печь для обжига. Фактическая металлическая отливка получается путем заливки металла в форму. После того как форма остынет, ее разбивают и освобождают отливку.

Простые конструкции роботов хорошо выполняют задачу непосредственного литья изделий, кроме того, их можно использовать и в процессе изготовления восковой формы, обучив выполнять операции погружения и сушки.

Загрузка-разгрузка станков

Обслуживание автоматических станков с ЧПУ, таких, как токарные, прецизионные, шлифовальные, фрезерные и сверлильные, все больше поручается роботам. В связи с ростом стоимости рабочей силы есть смысл автоматически загружать деталь в патрон станка, а после того как закончится цикл механической (автоматической) обработки, удалить деталь, затем, возможно, измерить ее, загрузить в следующий станок и т. д. Автоматизировать такие функции, как ориентация и обследование, которые в другом случае выполняются вручную, может оказаться сомнительным делом, но в гибких производственных системах, где они уже в значительной степени автоматизированы, введение роботов очень вероятно.

Типичный **роботизированный модуль** должен состоять из одного робота, обслуживающего один или несколько станков с ЧПУ. Это позволяет в те периоды, когда робот в другом случае простаивал бы (поскольку загруженная деталь находилась бы в механической обработке), использовать его на обслуживании другого станка. Можно сделать даже так, чтобы робот менял инструменты в станках с ЧПУ. Однако вследствие того, что детали при механической обработке могут радикально меняться по размерам и по форме, захваты роботов в этом случае оказываются сложными (и тяжелыми). Подходящие для таких функций роботы должны легко перепрограммироваться, быть достаточно повторяемыми и работать со скоростью, эквивалентной быстроте человека. Использование роботов в более сложных гибких производственных системах рассматривается в гл. 17.

Упаковка, укладка в палеты и штабеля

Поскольку роботы хорошо показали себя при обращении с деталями, передвижении тяжелых предметов с достаточной скоростью и точностью, они вполне пригодны для выполнения таких работ, как упаковка предметов в контейнеры или установка их в палеты — поддоны или приспособления для укладки и перемещения изделий. Палеты особенно полезны в заводском оборудовании не только из-за того, что их намного легче

брать и транспортировать, чем отдельные изделия, но и из-за того, что они позволяют также сохранять относительную ориентацию деталей. Роботы особенно хороши при часто меняющемся шаблоне или схеме расположения группируемых предметов, когда традиционная автоматика была бы непригодна. Действительно, с помощью сложных робототехнических систем можно собирать вместе не сгруппированные предварительно предметы, при этом робот определяет наилучшую структуру упаковки. Тем не менее в большинстве случаев робот используется просто для того, чтобы собрать вместе одинаковые предметы, хотя может оказаться необходимым уложить их в предварительно частично заполненной палете.

Диапазон изделий, которые можно укладывать таким образом с помощью роботов, очень велик. Это могут быть простые коробки, упаковки, мешки, металлические болванки, стеклянные листы или обсадные трубы, кирпичи или даже детали сложной формы (например, телевизионные трубки). Естественно, что такие области применения роботов имеются в промышленности повсеместно, представляя постоянно растущий робототехнический рынок. (Действительно, в Великобритании Ронтри Макинтош пытался применить роботы для наполнения коробок с полным набором различных типов шоколада для рабочих, занятых монотонной работой.) Конечно, когда предметы уложены в штабеля, можно потом использовать другие роботы для того, чтобы запустить процесс в обратную сторону! Такая **депалетизация** — перевод предметов из геометрически заданной схемы в другое размещение — может не потребовать какой-либо сенсорной обратной связи до тех пор, пока известна первоначальная планировка палет.

Формовка пластмасс

К чаще всего применяемым в промышленности пластмассам относятся **термопластики**, которые можно существенно размягчить при нагревании, но при охлаждении они вновь становятся твердыми, как прежде. Чтобы придать такой пластмассе требуемую форму, разработаны различные методы. Вероятно, наиболее важным из них является **инжекторная формовка**. Она очень похожа на литье в матрицы, при которой полимерные

гранулы сначала разогреваются, а потом втрамбовываются в охлажденную стальную форму, в которой пластмасса снова быстро затвердевает. Конечная продукция (вместе с заусенцами, которые должны быть впоследствии сняты) удаляется из разделенных матриц посредством эжекторных стержней. При ручном обслуживании существует опасность попадания рук человека в сдвигающиеся половинки матриц.

Противоположностью инжекторной формовки является **экструзионная формовка**, при которой смягченная пластмасса подается через нагретую матрицу для получения требуемого поперечного сечения для таких изделий, как трубы, стержни и листы. Образующаяся в результате вытяжка впоследствии приобретает форму и охлаждается барабанами, а затем разрезается на участки требуемой длины. Другие различные методы пластического формования включают в себя **отливку выдуванием** (пригодную для создания бутылок), при которой еще мягкая выдавленная труба помещается между подходящими матрицами и затем выдувается сжатым воздухом как баллон изнутри формы, и **термоформование**, при котором пластмассовый лист нагревается до размягчения и затем всасывается в охлажденную матрицу соответствующей формы.

При таких методах, как инжекторная формовка, все больше используются роботы, например для удаления отливок (особенно тех, которые велики и тяжелы), помещения специальных включений в матрицы перед литьем или укладки в палеты и упаковки отливок. Тем не менее удаление заусенцев остается проблемой, хотя некоторые отливки могут быть зачищены роботами, вероятно, из-за того, что условия работы на отливках из пластических материалов не считаются особенно непривлекательными и нет таких веских оснований, которые бы побуждали заменять здесь рабочих.

Прессовочные работы

Промышленные прессы используются для формования, профилирования и резки листового металла путем захвата листа между соответствующим образом обработанными матрицами. Этот процесс широко используется для производства таких деталей, как панели самолетов и автомобилей; он аналогичен некоторым процессам в ковке, но при холодной штамповке металл не нагревается, а остается при комнатной температуре.

Различные конструкции пуансона и матрицы могут быть использованы либо для пробивки отверстий и штамповки, либо для деформации листа требуемой формы, хотя в последнем случае нужно проявлять осмотрительность в том, насколько можно растягивать холодный металл без разрыва. В большинстве случаев операция прессования выполняется за один раз, приводя к очень короткому времени цикла, но производят такую продукцию, которая редко требует какой-либо ручной доделки после изъятия ее из пресса.

Из-за таких коротких временных циклов ручная погрузка и разгрузка прессов представляют собой монотонную и утомительную работу. Кроме того, края листа часто бывают острыми и ранят руки оператору, причем существует постоянная опасность того, что оператор не будет в точности соблюдать строгие правила техники безопасности и попадет под пресс. Хотя много сравнительно легкой работы на прессах продолжает выполняться вручную из-за того, что листы не ориентируются с достаточной точностью, чтобы робот мог с ними надежно управляться, некоторые более тяжелые и медленные работы сейчас выполняются довольно простыми роботами (или даже устройствами типа «взять-положить»). В дополнение к загрузочным работам роботы используются также для разгрузки прессов, вероятно, для того, чтобы затем передать деталь к стоящему рядом другому прессу. В этих случаях роботы будут эффективно использоваться при поддержании ориентации на соответствующем уровне.

Глава 10

Технологические роботы. Инструменты для роботов

Во второй части этой главы рассматриваются такие области применения, в которых робот не используется для перемещения материалов, а манипулирует каким-либо типом инструмента. В отличие от многих роботов, рассматриваемых в последней главе, за исключением нескольких областей, таких, как точечная сварка и склеивание, роботы, оснащенные инструментом, должны

обладать способностью следовать по сплошной траектории. Действительно, чтобы успешно выполнить некоторые работы, необходимо использовать довольно сложную сенсорную обратную связь. Роботы второго поколения уже начинают оказывать влияние на промышленность в такой области, как дуговая сварка.

Клеевые и изоляционные работы

Успехи в создании клеев привели к увеличению использования их как заменителей такого традиционного метода скрепления деталей, как клепка, особенно в связи с тем, что все больше и больше начали использоваться пластмассы. Одно из главных преимуществ клеев состоит в том, что напряжения распределяются по значительно большей поверхности, чем в большинстве других способов скрепления, но до сегодняшнего дня осуществлять соединение типа металл-на-металл с помощью клеев не удавалось так же успешно, как соединение типа пластмасса-на-пластмассу. Однако недавно стало возможным склеивать даже металлические поверхности, покрытые маслом, что привело к возникновению многих новых областей применения.

Ручные клеевые работы могут выполняться кистью или краскопультом, смесителем (для двухкомпонентных клеев) или тепловым пистолетом (для горячерасплавленных клеев). Применяемый способ разбрызгивания может привести к тому, что оператор должен будет работать в маске и быть обеспечен эффективной вентиляционной системой. Нанесение клеев на горячие поверхности может привести к дискомфортным условиям работы. Если оператор будет недостаточно проворным при завершении работы, то горячерасплавленные клеи остынут и будут затвердевать. Роботы же могут выполнять многие клеевые и изоляционные операции намного быстрее человека и более качественно. Такие роботы должны иметь контурную систему управления и обладать пятью степенями свободы, исключая случаи, где требуется нанести клей локально.

Дуговая сварка

Это одна из наиболее трудных работ как для человека, так и для робота. Процесс включает в себя использование специального сварочного пистолета, генерирующего сплошную электрическую **дугу**, которая должна «перепрыгнуть» от электрода на конце пистолета к свариваемому металлу. Температура на этой электрической дуге очень высока и достаточна, чтобы расплавить небольшую часть металла, куда попадает дуга. Если электрод пистолета сделан из того же металла, то он расплавляется и способствует заполнению свариваемого шва. В этом случае электрод обычно состоит из катушки проволоки, намотанной на барабан и автоматически подаваемой в пистолет, с тем чтобы постоянно заменять расплавляемый конец электрода.

Если дуга возникает в воздухе, свариваемый металл, как правило, сильно окисляется. Чтобы избежать этого, воздух должен быть каким-то образом удален из пространства, окружающего расплавленный металл под сварочным пистолетом. Хотя поверхность постоянно оплавляемого электрода можно покрыть флюсом, который сам будет расплавляться и таким образом предотвращать окисление, проще создать поток инертного газа (такого, как гелий или аргон), который будет обтекать конец пистолета и пространство вокруг дуги. Инертный газ, предотвращая любое окисление, может подаваться через гибкую трубку из газового баллона, находящегося на некотором расстоянии от сварки. Такая сварка — наиболее простая форма промышленных сварочных работ, хотя есть и ее модификация, в которой электрод сделан из вольфрама (который не плавится при высокой температуре дуги), так что любой добавочный материал, требуемый для заполнения сварочного шва, должен подаваться от отдельного стержня, сделанного из нужного металла.

Хотя дуговая сварка идеальна для формирования длинных газонепроницаемых соединений, это довольно трудная работа. Существуют различные типы обычно используемых швов, наиболее важные из которых: **соединение встык**, при котором два листа присоединяются друг к другу краями; **соединение внахлест**, при котором один лист слегка находит на другой по краю, и **угловые соединения**, когда один лист присоединяется к другому перпендикулярно (рис. 42). Однако во всех этих случаях электрод должен удерживаться на необходимом расстоянии от металлической поверхности так, чтобы дуга правильно плавила металл, а тот стекал в щель и заполнял ее до нужного уровня. При этом электрод не должен находиться слишком близко к поверхности,

иначе он приварится к ней. Если дугу слишком долго удерживать на одном месте, то температура металла в этом месте станет очень высокой, так что дугу нужно постоянно держать на оптимальном расстоянии. Если шов впоследствии будет подвергаться давлению, то сварщик должен попытаться сделать его за один проход, так как вероятнее всего, что протечки возникают, как правило, между двумя различными участками шва.

Помимо того, что сварщику на всем этом постоянно приходится концентрировать свое внимание, он подвержен действию дыма, искр и такому ослепительному излучению дуги, что может следить за процессом лишь через темное стекло защитной маски. Большой интерес, который проявляется сейчас к использованию роботов на сварке, вызывается уменьшением числа желающих выполнять сварочные работы из-за непривлекательности этой работы. Из-за относительно низких скоростей (например, 20 мм/с) и небольшой полезной нагрузки, которую при этом несет робототехническое устройство, для этих целей обычно применяются роботы с электрическим приводом, а из-за симметричности устройства обычно требуется только пять степеней свободы.

Обучение можно проводить либо **путем показа**, когда руку робота вручную передвигают по нужной траектории, либо путем задания точек, которые затем интер-

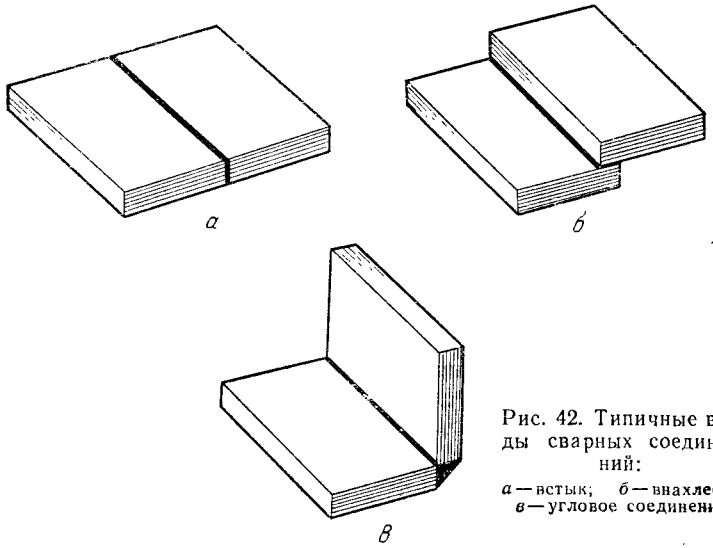

Рис. 42. Типичные виды сварных соединений:
а — встык; *б* — внахлест; *в* — угловое соединение

полируются роботами. Такие системы без какой-либо формы сенсорной обратной связи способны сваривать швы на деталях, которые точно позиционированы. Действительно, они могут выполнять работы намного качественнее, чем человек. Однако во многих практических приложениях такую точность позиционирования свариваемых деталей невозможно обеспечить.

Часто возникает необходимость использовать определенные формы сенсорного управления, с тем чтобы компенсировать неточности в проведении работы, возникающий со временем износ зажимных приспособлений и арматуры, термическое коробление заготовок при сварке и остаточные прогибы штампованных деталей. Для оптимальной сварки тонкого листового металла, используемого для оболочек корпуса автомобиля, сварочный факел должен быть позиционирован с точностью до 0,5 мм от идеального положения, но обычно сама заготовка позиционирована с точностью всего в несколько миллиметров. Несомненно, для того чтобы правильно следовать по траектории шва, робот должен делать больше, чем просто копировать траекторию, которой он обучен,— он должен использовать такую технологию выполнения шва, которая предусматривает изменение его движений. Пытаться вместо этого сокращать число вариантов позиционирования заготовок было бы слишком дорого.

Существуют два основных подхода к выполнению шва. **Двухпроходные системы** используют «пробное действие», в котором робот проходит вдоль ожидаемого маршрута шва (со скоростью, достигающей, возможно, 1 мм/с) без сварки, но со слежением, обычно визуальным, за любыми отклонениями от ожидаемых позиций. При втором проходе (сварке) робот в состоянии точно выполнить сварку обычно с помощью датчиков, защищенных от искр и дуги. Преимущество такой системы состоит в том, что очувствленный проход может осуществляться с максимальной скоростью, при которой информация от датчиков легко обрабатывается, с тем чтобы различить шов независимо от того, какой могла бы быть выбрана скорость для обеспечения оптимальной сварки (как правило, около 10 % скорости очувствления). Такая система не в состоянии компенсировать любые ошибки в заготовке, если она будет двигаться после первого прохода или вызывать термические искажения во время самого процесса сварки.

Альтернативой этому подходу является использование **однопроходной системы**. Такие системы чувствуют шов во время фактического сварочного процесса и динамично корректируют положение робота. В простейших системах робот программируется так, чтобы он мог определить центр шва либо с помощью электромеханического контактного датчика, либо следуя зигзагом поперек соединения, анализируя значения тока вольтовой дуги и напряжения. Такие системы, **чувствующие «сквозь дугу»**, представляют сейчас наиболее распространенную форму неконтактных устройств, следящих за швом. В более сложных системах шов может определяться визуально, например путем включения в сварочное устройство системы, которая направляет лазерный луч на поверхность заготовки и затем следит за заготовкой через одну или несколько телевизионных камер. Используя фильтры, можно предотвратить «ослепление» маломощного лазера ярким светом электрической дуги. При однопроходных системах необходимо также защитить камеры от брызг, возникающих в процессе сварки с помощью, например, кварцевых окошек.

Однопроходные системы, вероятно, будут быстрее, чем двухпроходные. Они имеют преимущества не только в динамичной коррекции ошибок позиционирования и в возможном обеспечении мощной техникой контроля качества, но также и в существенном уменьшении детализации программирования траектории. Возможности использования однопроходных устройств для сварных швов, основанных на магнитных и акустических явлениях, исследуются в Оксфордском университете (Великобритания). Возможные преимущества однопроходных устройств заключаются в том, что обработка данных в них проще, чем в визуальных системах, поэтому устройства были бы дешевле, а метод слежения с магнитным «вихревым потоком» обладает «иммунитетом» к дыму от дуги. Тем не менее для изделий сложной геометрии визуальные системы, вероятно, останутся единственно возможным вариантом.

Лазеры

Более 20 лет прошло после изобретения лазеров. Сегодня их мощность значительно возросла, и они все больше применяются в промышленности для раскроя сложных форм в широком диапазоне материалов, включая металл, пластмассы, композиты, керамику, дерево и даже ткань (для шитья на заказ). Для таких материалов, как металлы, обычно применяются лазеры на CO_2 мощностью 1 кВт и более. Листы могут проходить под лазерным лучом так, чтобы можно было получить требуемую форму — как простую, так и сложную, по желанию. Здесь нет износа инструмента, и лазером можно сделать узкие параллельные насечки, не прикладывая механических усилий, способных повредить заготовку. Кроме того, у лазера очень узкая зона нагрева, что позволяет мгновенно начать и остановить процесс резки. Помимо резки, лазер можно использовать также для сварки (при этом скорость будет больше, чем при традиционной дуговой сварке) или «рассеянный» световой луч — для термической обработки поверхностей. Таким образом, универсальность лазера делает его идеальным средством для **гибких производственных систем**, способных производить разнообразную продукцию.

Ясно, что область применения лазеров можно было бы расширить, если бы удалось манипулировать лучом с пятью степенями свободы, с тем чтобы обеспечить возможность действовать в трехмерном пространстве, включая способность поддерживать луч перпендикулярно сложной поверхности. Но лазеры требуемой мощности слишком велики и тяжелы для того, чтобы робот мог ими манипулировать с требуемой точностью. Однако недавно стало возможным создать традиционные роботы с гибким световодом. Примером такой системы может служить модель, разработанная фирмой «Дженерал электрик» (США), которая связывает гранатовый лазер на неодимо-итриевом алюминии мощностью 400 Вт с рабочим органом робота фирмы «Хитати» посредством гибкого кварцевого оптического волокна диаметром 1 мм. В прошлом были трудности, связанные с возможностью прохождения нужных количеств энергии по оптическим волокнам, но сейчас они успешно преодолеваются. Утверждают, что робот и лазер могут разделять 300 м, а потери энергии будут составлять всего 20 %. Действительно, группы традиционных роботов могут быть связаны с единственным лазером стоимостью 100 000 долл. посредством оптического кабеля стоимостью всего 10 000 долл. (для каждого соединения).

Иной подход представляет собой система «Кобра». В этой системе использован лазер на CO_2 фирмы «Ферранти» мощностью 400 Вт или 1250 Вт, размещенный

на раме по соседству с рукой робота «ИРБ-6» с пятью степенями свободы фирмы «АСЕА», а лазерный луч проводится к наконечнику серией из десяти зеркал, размещенных в шарнирных соединениях. На последнем этапе луч фокусируется линзами на поверхности заготовки. Для охлаждения линз вокруг них подается сжатый газ, и если газ инертный, то окисление исключается. В качестве варианта можно использовать вдуваемый в насечку кислород, что часто значительно увеличивает максимальную скорость резки. В других случаях струи газа используются для удаления дыма из области резки. Подходящие для этой работы роботы должны обладать широким диапазоном скоростей, так как режущий луч должен двигаться медленно, но точно, тогда как для поверхностной тепловой обработки скорость движения должна достигать 1 м/с.

Механические инструменты

В дополнение к различным рабочим органам с инструментом, используемым для специфических работ, рассмотренных в других параграфах этой части, имеется также большое число механических инструментов (обычно пневматических), с которыми легко обращается человек, но вместо этого их можно прикрепить прямо к руке робота, для управления которой не требуется сильная сенсорная обратная связь. Особенно выгодно прикрепить инструмент к руке робота (лучше, чем использовать руку для перемещения заготовок к фиксированному инструменту), когда заготовка тяжелее инструмента. Если для операций с той же заготовкой требуются различные варианты конструкций инструментов, то можно использовать метод автоматической смены инструментов по аналогии со сменой захватов, однако потери времени будут одинаковы, так что в этих случаях роботу фактически лучше взять заготовку (если возможно) и перемещать ее между двумя закрепленными инструментами.

Среди различных инструментов, которые обычно закрепляются на руке робота, имеются виды дрелей и сверлильных устройств иногда с механическими позиционирующими приспособлениями для увеличения точности и скорости, а также с использованием предварительной нагрузки для предотвращения отклонений. Как

указывается в последней главе, заусенцы можно снимать приспособлением, прикрепленным к руке робота, а соответствующим инструментом — гравировать. Обработку пескоструйным аппаратом и полировку объектов (таких, как нержавеющие стальные резервуары) можно выполнить путем присоединения либо кругового, либо ленточного варианта соответствующего абразивного инструмента.

Точечная сварка

В 70-х годах одним из главных приложений промышленных роботов стала автоматическая **точечная сварка.** Хотя значение других приложений сейчас и выросло, она представляет собой очень широкую область применения роботов первого поколения. Точечная сварка пригодна для соединения большинства видов металлических листов, особенно стальных. Процесс включает в себя зажатие листов между двумя мощными электродами на одну секунду. Между двумя электродами через два листа проводящего металла, которые наложены друг на друга, пропускается в течение очень короткого промежутка времени сильный ток (до 1500 А). Сопротивление такому сильному току небольшой колонки металла непосредственно между двумя электродами приводит к расплавлению небольших участков обоих листов, которые затем сплавляются вместе в одной точке.

Набор электродов обычно состоит из пистолета с двумя электродами, которые, как горячие щипцы, схватывают находящиеся между ними листы. Если пистолет предназначен для сварки далеко от края листов, у него должны быть сверхдлинные электроды. Для того чтобы продлить срок службы электродов, их концы могут заменяться, а сами электроды обычно охлаждают холодной водой. Однако такие пистолеты обычно очень тяжелы и громоздки, даже если они частично и поддерживаются подвесной системой сверху. Кроме того, всякий раз нужно перемещать силовые кабели вместе с пистолетом. Из-за того что сам период сварки непродолжительный, очень важно, чтобы к следующей позиции пистолет передвигался как можно быстрее. Делать это все человеку-оператору очень трудно.

Выполнение точечной сварки с помощью роботов особенно привлекает не только тем, что позволяет освободить человека от тяжелой и нудной работы, но также и

тем, что робот при сварке может делать меньше точек (за счет их более точного размещения), чем мог бы делать (неточно) человек. Тем не менее, чтобы выполнять такую работу, робот должен обладать высокой степенью жесткости и иметь мощные приводы для шести осей с крутыми характеристиками ускорений. Хотя обычно использовались только роботы с позиционной системой управления, встроенные в индексную производственную линию, отмечается увеличение спроса на роботы точечной сварки, которые могут работать на постоянно движущихся объектах, требуя, таким образом, сложных устройств, действующих по непрерывной траектории, со способностью регулировать соответственно программу.

Покраска и покрытие распылением

Как и в предыдущем случае, эти работы представляют собой главную область применения роботов первого поколения. Всякий раз, когда нужно нанести защитные покрытия на большое число изделий, используются методы распыления. В качестве таких покрытий чаще всего используется быстросохнущая краска или эмаль, грунтовочная краска и др. Для того чтобы достичь высокого качества, распыляющий пистолет следует перемещать, выдерживая нужные расстояния от поверхности и нанося покрытие несколькими тонкими слоями. Хотя этот процесс в некоторой степени можно автоматизировать, используя соответствующее оборудование (как в автомобильной промышленности), такую технологию нельзя успешно применить во всех случаях, например при покраске мест, до которых трудно добраться. Здесь нужно использовать людей. Такая работа, конечно, требует квалификации, но вместе с тем она очень неприятна. Покраска свободным распылением при правильной температуре требует работы в малых объемах, при этом необходимо надевать маски, так как многие растворители токсичны, а некоторые пигменты канцерогенны. Кроме того, на таких работах должны использоваться наушники, предохраняющие от шума, так как высокий уровень шума, создаваемый распылением, может в противном случае причинить непоправимый ущерб слуху работника.

Очень много энергии тратится на обеспечение высокого уровня вентиляции в окрасочных кабинах, что существенно увеличивает стоимость покраски распылением. Роботы с контурным управлением, обучаемые квалифицированным маляром с использованием специальных методов — когда руку робота вручную проводят по всему циклу заданной работы или когда для этой цели применяют **телеоператор**, идеально подходят для такой автоматизации, и различные фирмы построили роботы специально для выполнения таких работ.

Поскольку часто окрашиваются детали, движущиеся вдоль конвейера, должна быть гарантирована постоянная скорость их движения, покрасочные роботы должны обладать способностью соответственно регулировать свои программы.

Водометные устройства

Все шире становится область применения роботов, оснащенных инструментами, и хотя сегодня парк таких роботов пока невелик, в будущем они могут получить широкое распространение. Примером может служить использование мощных водометов как для очистки, так и для резки. В таких системах применяются специальные насосы, способные давать тонкую струю при большом давлении. Направив одну из струй на покрытый ржавчиной предмет, можно его очень быстро очистить. Действительно, американская компания «Юнайтед Спейс Бустерс» после каждого полета космических кораблей «Спейс Шаттл» использует водяные струи, управляемые роботом, для очистки обугленных и поврежденных поверхностей повторно используемых ускорителей.

Более тонкими струями (диаметром около 0,1 мм) действительно можно резать различные материалы, такие, например, как армированный стеклопластик. Струя делает очень тонкий надрез, не вызывая пыли, образуемой при механической резке. При добавлении в воду суспензии специальных частиц можно резать этим способом даже тонкие металлические листы! Не представляет больших трудностей присоединить к концу руки робота систему, образующую водяные струи под большим давлением, и похоже, что применение таких систем, начиная от очистки металла и кончая отделкой шлемов для езды на мопедах, увеличит число примеров «роботов с инструментами».

Глава 11

Перспективный рынок сбыта. Роботизированная сборка

Роботизированная сборка возникла в 80-х годах. До сих пор было в основном два возможных подхода для сборки деталей. Если объем требуемой продукции был достаточно большим, то для выполнения работы использовалась **жесткая автоматизация**. Если серия была не очень большой или сборочные работы были очень сложны, то не оставалось другого выбора, как прибегнуть к ручному труду.

Хотя роботы первого поколения 60-х годов идеально подходили для использования их при выпуске продукции малыми сериями, тем не менее вскоре стало ясно, что сборка требует слишком высокого уровня сенсорной обратной связи и адаптации, чтобы могли применяться роботы первого поколения. Таким образом, интерес к созданию **гибких сборочных систем**, иногда называемых **программируемыми сборочными системами**, больше не возникал, до тех пор пока в 70-х годах не появились первые роботы второго поколения. С появлением ограниченной сенсорной обратной связи при наличии сложных программ стало, наконец, возможно проводить эксперименты в области сборки с помощью роботов, и теперь такие системы все больше начинают применяться в промышленности.

Перепись, проведенная в США в 1970 г., показала, что треть работников на автозаводах заняты на сборочных операциях. Действительно, подсчитано, что во многих странах издержки на оплату труда сборочных работников составляют более 50 % общей стоимости промышленной продукции, а численность сборщиков достигает 40 % занятых в обрабатывающей промышленности. Сборка, несомненно, принадлежит к таким областям, где экономия, полученная от успешного применения робототехнических систем, оказала бы значительное влияние на развитие промышленности. Из-за этой потенциальной экономии в значительной степени возник интерес к этому вопросу в начале 80-х годов, когда люди поняли, что, по-видимому, сборке суждено стать одной из главных областей применения роботов второго поколения.

Тем не менее еще пока далеко до того времени, когда такие сложные работы, как автомобильная сборка, могли бы быть полностью поручены роботам, несмотря на заявление фирмы «Фиат», что их автомобили «сделаны руками роботов». Однако даже в этих условиях фирма «Фольксваген» недавно применила роботизированную сборку в производстве своей специально разработанной для таких методов сборки модели «Гольф», используя для этого предварительно собранные узлы. В этой производственной системе роботы участвуют в сборке всех четырех колес, присоединяют переднюю часть автомобиля (полностью собранную, с предварительно отрегулированными передними фарами), двигатель, трубопроводы, некоторые детали интерьера и т. д.

Проектирование изделий

При роботизированной сборке вопросы проектирования узлов, которые должны быть потом собраны, играют важнейшую роль. Традиционно слишком большие надежды возлагались на способности человека, на сложность и многосторонность его чувственных и манипуляционных навыков. Когда впервые проектируется какой-либо узел, почти всегда разрабатываются детальные рекомендации относительно типа машинного оборудования для его изготовления. Как правило, продукция проектируется с учетом возможностей этого оборудования. И лишь в особых случаях конструируется специальное оборудование.

В отличие от этого вряд ли когда-либо в прошлом изделия проектировались так, чтобы облегчить их сборку машиной либо человеком. Это объяснялось просто тем, что если сборка была слишком сложна для машины, ее всегда мог сделать человек. Даже если создавались автоматические сборочные устройства, это почти всегда было после того, как сам проект изделия давно уже был закончен. Несмотря на отсутствие внимания к проблеме сборки в процессе проектирования изделия в прошлом, многие считают, что эта область (если ее рассматривать как одну из основных стадий проектирования), вероятно, привела бы к значительным сокращениям стоимости сборки. Действительно, некоторые зашли настолько далеко, считая, что многие из предполагаемых статей экономии, получаемых от сборки роботами,

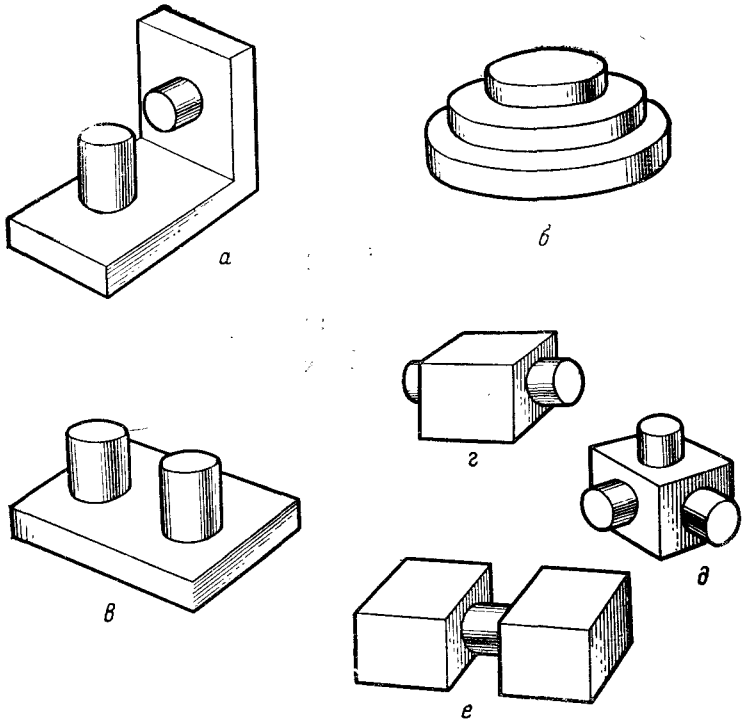

Рис. 43. Различные конструкции изделий:
а — каркасное изделие; *б* — штабельное изделие; *в* — изделие с базовым компонентом; *г, д, е* — модульные изделия

могут быть обусловлены не тем, что изделие было перепроектировано и потом собрано роботом, а просто тем, что оно вообще было перепроектировано. Например, перепроектирование кожуха изделия в виде единственной пластмассовой отливки вместо нескольких отдельных «бортов», каждый из которых нужно скрепить болтами с другими, может сделать сборку значительно проще как для человека, так и для робота.

Группы изделий, которые можно собрать на одном и том же оборудовании, иногда называются **семействами изделий**, хотя такие семейства могут радикально отличаться от тех изделий, которые группируются вместе в каталоге компаний. Типичные семейства состоят из различных вариантов одинаковых в своей основе изделий, таких, как моторы или часы. Некоторые из различных типов конструкций, которые можно выделить в

проекте изделия, показаны на рис. 43. Они включают в себя: **каркасные изделия**, в которых все компоненты закреплены на каркасе; **штабельные изделия**, сужающиеся от основания к вершине по типу положенных друг на друга «блинов» (закрепляемых часто таким простым средством, как стержень, пронизывающий их все по центру); изделия **базового компонента**, в которых один компонент выступает в роли основного при сборке и транспортировке; **модульные изделия**, в которых одни и те же элементы собираются различным образом с тем, чтобы получить различные изделия.

Стоит определить структуру изделия, как многие проблемы сборки, а с ними и соответствующий метод сборки фактически уже будут предопределены; так что на практике детальный проект компонента нужно рассматривать параллельно со структурой изделия. Это включает в себя определение форм, размеров, ориентации, материалов, качества поверхностей и требуемых допусков. Поверхности описываются как **функциональные**, если действительно используются для некоторых целей, они могут быть **связывающими**, соприкасающимися с другими компонентами, или **сборочными**, использующимися в процессе сборки для ориентации, транспортировки, позиционирования или направления. Свободные поверхности описываются как **нефункциональные**.

При проектировании, рассчитанном на роботизированную сборку, число отдельных компонентов следует максимально уменьшать. Вероятно, число компонентов можно свести даже к единице, изменяя способ производства так, чтобы отдельные детали фактически объединялись вместе еще на первом этапе изготовления. Этот метод использования «отливки во вкладыше», упомянутый в гл. 9, часто вполне подходит для такого соединения собираемых компонентов. Подобным же образом из-за того, что ориентация обычно так дорого стоит, вместо нее можно использовать некоторые из рассмотренных в гл. 8 методов, такие, как укладка в магазины, палеты, соединяя детали в узлы, хотя это тоже может быть недешево. Если все же ориентация необходима, следует попытаться упростить процесс, исключая компоненты с низким качеством. Должна быть уверенность также и в том, что те компоненты, которые использовались, либо симметричны, либо совсем асимметричны.

6 Зак. 611

Проблемы подачи деталей можно облегчить, исключая такие их виды, которые будут наезжать друг на друга, заклиниваться или приводить к беспорядку. Например, было бы выгодно заменить свободно свернутые спиральные пружины с открытым концом плотно свернутыми в спираль пружинами с закрытыми концами. Кроме того, затраты на подготовку деталей к роботизированной сборке можно уменьшить, если у двух компонентов будет достаточно сходная форма, чтобы их можно было подавать на сборку одним и тем же оборудованием. Транспортировка при самой сборке облегчается, если имеется некоторая форма базового компонента.

В ранних исследованиях, в которых рассматривался небольшой ряд различных изделий, собираемых без помощи роботов, показано, что в большинстве случаев более половины компонентов подавалось на сборку с одного какого-либо направления, около 20 % приходили с противоположного направления, а другие 10 % появлялись в плоскости, перпендикулярной этим двум направлениям. Только оставшиеся 10 % деталей прибывали с более сложных направлений, наводя на мысль, что традиционно изделия в основном относятся к семейству штабельных изделий.

В результате стало общепринятым считать, что сборка роботами должна в идеале быть подобна направлению слоев вдоль вертикальной оси или по крайней мере осуществляться с минимального числа направлений, насколько возможно. Это позволило бы выполнять сборку, используя меньше шести степеней свободы. Следовательно, можно было бы применить значительно более дешевый робот. Однако на практике оказалось, что трудности, вызываемые небольшим рассогласованием деталей, не позволяют применять подобные роботы, несмотря на их более низкую цену. Тем не менее какой бы подход не применялся, главное, конечно, состоит в том, чтобы конструкция изделия обеспечивала руке робота беспрепятственный доступ.

Для того чтобы облегчить захват роботом сложных деталей, в них можно сделать отверстие, которое позволило бы деталям самоцентрироваться, если рабочий орган раскрывается внутри отверстия для схватывания изнутри, или даже снабдить их плоской поверхностью, которая позволила бы поднять их с использованием вакуумного устройства. Подобный анализ образцов изделий относился к отмеченным выше различным «сборочным работам», таким, как соединение «вал-втулка», представляющее собой наиболее распространенную операцию, обычно выполняемую вдоль доминирующего направления. Другой наиболее распространенной работой было завинчивание винтов в корпус. Было установлено, что все из рассмотренных изделий могли бы быть собраны с использованием этих и десяти других операций: сварки или пайки, гофрирования, обеспечения временной опоры, удаления временной опоры, перевертывания изделий, удаления установочного штифта, прессовой посадки, вставки штифтоподобного компонента и фиксатора, вставки сложного штифтоподобного компонента и, наконец, вдавливания и закручивания компонента.

Из этих работ, вероятно, можно исключить способы крепления, используя методы объединения деталей. Когда это неосуществимо, используемый способ следует выбирать с осторожностью, помня об относительных трудностях различных методов, показанных на рис. 44. Любую вставку можно облегчить с помощью пазов на одной или двух деталях, и всякий раз, когда это возможно, следует применять самовыравнивающиеся и самозакрепляющиеся детали (например, штифт проектируется в одном компоненте, а соответствующее отверстие — в другом). Можно также иногда применять и защелкивающиеся детали. Однако изделие нередко требуется разбирать, поэтому единственным практическим решением здесь является винтовое соединение. В этом случае разнообразие типоразмеров винтов должно быть сведено к минимуму.

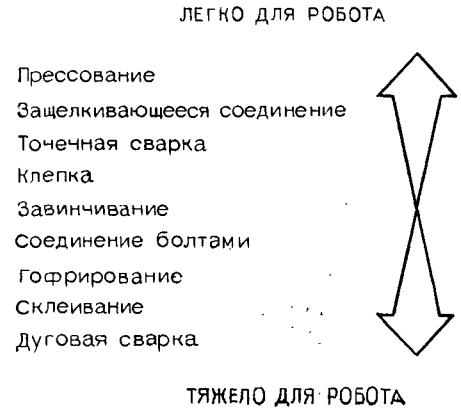

Рис. 44. Относительные трудности для робота в выполнении различных операций

Последовательность сборки

Изделия можно собрать в самой различной последовательности. Кроме того, последовательность, которая лучше всего подходит для ручной сборки, может не быть оптимальной при использовании роботов. Например, в гибких сборочных системах, где много роботов, необходимо тщательно «сбалансировать» операции, которые выполняет каждый робот, с тем чтобы сократить время простоя любой части системы. В результате необходимо из всех возможных последовательностей сборки как-то выбрать одну такую, которая согласно выбранному критерию представляет собой оптимальный вариант. Для всех видов сборочных операций, кроме самых простых, можно оценить лишь небольшое число возможных вариантов. Однако выбор этой совокупности вариантов представляет собой чрезвычайно трудную задачу.

Число инверсий изделий при сборке следует свести к минимуму, так как эта работа не только сложна, но и занимает много времени. Как отмечалось в гл. 8, при сборке роботами любой подход, который экономит время робота, сразу оборачивается сокращением издержек производства, поскольку обычно самый «медленный» робот определяет скорость всего процесса сборки. Следовательно, должны выбираться такие последовательности сборки, которые минимизируют время подачи компонентов, а при необходимости использования различных захватов — такие последовательности, в которых должно быть уменьшено число смен захватов. Этого можно добиться, либо одновременно собирая все компоненты изделия, подходящие для данного захвата, либо, если это возможно, собирая параллельно малые партии изделий так, чтобы время, потраченное на смену захвата, распределялось на несколько изделий.

Сравнение различных последовательностей сборки требует некоторого метода формализации описания. Подход к этой задаче, разработанный в лаборатории Чарльза Старка (США), состоит в использовании **дерева деталей**, простой пример которого показан на рис. 45, который описывает 5-компонентное изделие. При составлении схемы дерева сначала указываются все компоненты вместе с ориентирующим знаком, который показывает ориентацию компонента для правильной сборки. В показанном примере компонент *D* мог бы

быть болтом, который должен быть собран головкой вперед, что соответствует 1. Такие компоненты, как гайки и шайбы, симметричны, поэтому ориентирующего знака не требуется (например, компонент *E*).

Для тех компонентов, которые изображены в верхней части дерева деталей, считается, что временна́я ось идет от вершины к основанию. Добавление компонента или узла (рассматриваемого как набор компонентов, которые не выпадут при движении или перевертывании) к основной сборке обозначается линией со стрелкой, и сборка фактически происходит там, где соединяются в узел линии. Линии между уже собранными компонентами показаны без стрелок. Фиксации, которых следует по возможности избегать, обозначены буквой *F*, в то время как любые операции, подобные перевертыванию деталей, специально не обозначены (в случае перевертывания масса узла также указывается).

Ориентирующий знак располагается рядом с каждой стрелкой (если необходимо), указывается также расстояние в миллиметрах. Так обозначается кратчайший путь от компонента до места сборки. Некоторые детали могут быть включены в сборку с определенного расстояния, и в этих случаях второе расстояние помещается в скобках. Исходя из величины расстояния можно оценить время, которое было бы затрачено на каждое движение, а отсюда оценить время, требуемое на выполнение всей сборки.

Используя такие представления о последовательности сборки, можно попытаться оценить различные

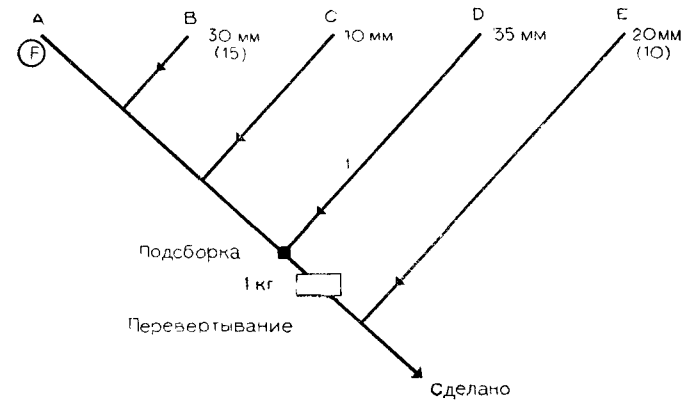

Рис. 45. Простой пример дерева деталей

подходы и, определяя недостатки той или иной последовательности, попытаться их устранить, видоизменяя сборку. Последовательность обычно считают предпочтительной, если она содержит меньше операций перевертывания специальных наглухо закрепленных деталей и узлов, но неясно еще соотношение между скоростью, стоимостью и сложностью. В настоящее время даже при составлении различных последовательностей сборки, которые должны быть оценены, необходим творческий подход человека-проектировщика, поскольку уже делались безуспешные попытки использовать теорию графов и методы линейного программирования, чтобы создать подобные последовательности автоматически.

С ростом мощи компьютеров вполне вероятно, что такие подходы будут в конечном счете плодотворными при оптимизации программ, выбирающих наилучшую последовательность сборки для данного изделия. Тем не менее вероятно также, что из-за наличия возможных вариантов последовательностей даже в случае использования сложных программ этого типа потребуются различные эвристические методы или эмпирически выведенные правила, с тем чтобы сузить область поиска, а не пытаться оценить все возможные варианты.

Размещение, расчет и оценка

Что касается выбора последовательности сборки, то для гибких сборочных систем (ГСС) невозможно с уверенностью определить оптимальную структуру (размещение). При тщательном проектировании и последующем анализе всегда возможно прийти к размещению, которое превзойдет любой существующий метод сборки изделия, позволяя сказать, что эта система «лучше». Однако, не имея какого-либо стандарта, который бы позволил сделать соответствующую оценку, трудно сказать, что эта система лучше всех.

Процесс проектирования ГСС должен как-то отражать желаемую гибкость в проекте изделия, определять качество и объемные показатели при выборе робота (роботов), загрузочных устройств, транспортеров, ориентирующих систем, устройств контроля и общего геометрического размещения. Тем не менее ясно, что, с одной стороны, любая попытка с помощью «грубой силы» вычислить любую возможную конфигурацию обречена

на неудачу, в то время как, с другой стороны, упрощения и приближения, требуемые для количественного выражения проблемы управления в математических терминах для того, чтобы найти оптимальное решение, до сих пор приводили к таким вариантам размещения, которые технически нельзя осуществить. Из всех этапов проектирования роботизированной сборки этот, вероятно, наиболее трудный и чреватый ошибками.

Проверка каждого предложенного размещения включает в себя проведение определенного расчета времени цикла, с тем чтобы получить оцениваемое время сборки, за которым следует анализ стоимостных показателей с целью определить, будет ли эффективна по стоимости проектируемая роботизированная сборка. Согласно самым грубым оценкам, полученным на основании опыта, типичный цикл сборки одного компонента составляет примерно 5 с. В общем случае любой цикл, короче указанного, вероятно, будет слишком быстрым для современного робота. При различных методах расчета времени цикла, предложенных в робототехнике, используют тот факт, что если известны динамика и управляющие алгоритмы робота, то относительно просто рассчитать и время сборки.

Хронометраж представляет собой методологию, созданную в 40-х годах для анализа работы человека, с помощью которой производственный процесс может быть разбит на элементарные движения и определено как время для каждого движения, так и общее время для данной работы. Сотрудники Пердьюйского университета разработали для роботов методологию, аналогичную хронометражу. Они должны были определить для роботов новые элементы движения при выполнении производственных операций, поскольку многие элементы производственных операций, выполняемых человеком, встречаются и у роботов, в то время как некоторые другие движения роботы выполнить не в состоянии. Если производственная операция проанализирована с помощью хронометража, ее можно передать для выполнения роботу, хотя многие элементы будут переходить в невыполнимые для робота движения, показывая, что метод выполнения операции нужно изменить. Следовательно, хотя список отдельных приемов и движений робота позволяет дать оценку времени цикла робота (а компьютер может даже перевести этот список в программу действий робота), первоначальное составление програм-

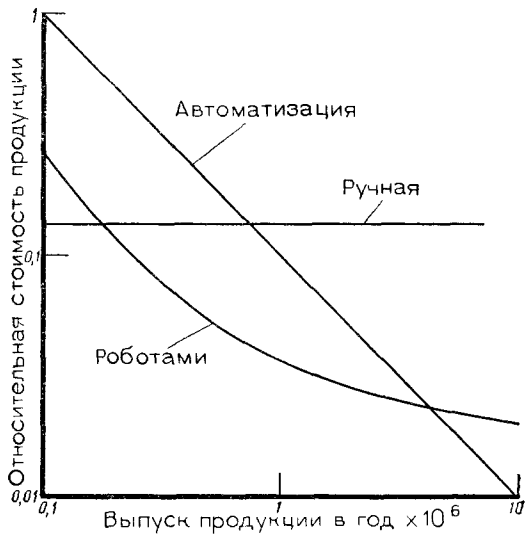

Рис. 46. Области экономических преимуществ для трех различных методов сборки

мы движений производственной операции робота часто весьма неудачно.

Стоимостный анализ издержек производства и обоснование эффективности роботизированной сборки сильно нуждаются в совершенствовании. Это касается и робототехники в целом. Эта тема подробно рассматривается далее. Тем не менее некоторые основные работы по обоснованию экономической эффективности роботизированной сборки уже проведены с использованием специально созданных экономических моделей. Упрощенный пример (рис. 46) показывает, что наибольший экономический эффект роботизированной сборки достигается при выпуске продукции сериями средней величины. Последующие исследования в этой области привели к аналогичным результатам. Удалось также установить, что экономический эффект роботизации сборки зависит от качества деталей и частоты изменений их конструкции.

Оптимизация систем роботизированной сборки

Из-за трудностей, присущих конструированию ГСС, сложно часто пересматривать всю систему, так что эта методология оказывается невосприимчивой к изменениям проекта изделия или робота. Вместо этого обычно

делаются попытки «модифицировать» существующие ГСС, если этого требуют значительные изменения конструкции изделия. Для технологии, специально рассчитанной на гибкость, это большой недостаток. Работа, проведенная Государственным колледжем (Лондон), описываемая ниже в общих чертах, предлагает методологию, которую можно использовать при анализе экономической эффективности роботизированной сборки.

Рассматривая роботизированную сборку, иногда удобно разделять при анализе стоимость гибких повторно используемых частей системы и стоимость тех ее частей (включая затраты на проектирование), которые жестко связаны с выпуском одного конкретного изделия и не могут в дальнейшем использоваться, когда этот тип изделия снимается с производства. Этот **принцип разделения различных типов издержек** дает ответ на вопрос, что лучше использовать — более дешевый или более быстрый робот, какой из них оказывает наибольшее влияние на стоимость единицы продукции. Как правило, лучше использовать робот, который будет в 2 раза более быстродействующим, чем наполовину дешевле.

Становится ясно, что с увеличением номенклатуры собираемых изделий следует стремиться к уменьшению количества узкоспециализированного оборудования и объемов затрат, жестко связанных с выпуском отдельных изделий, и соответственно пытаться увеличить долю затрат на гибкое оборудование, одинаковое для всей номенклатуры, с тем чтобы сохранить достигнутый уровень эффективности.

Обычно быстрее (и, таким образом, дешевле для больших партий) можно осуществлять сборку, используя узкоспециализированное оборудование (рис. 47), с учетом того, как часто должны проводиться изменения в проекте. В экстремальном случае для очень больших серий изделий используется особое оборудование жесткой автоматизации, которое можно применять для сборки узкой номенклатуры изделий. Для еще больших серий используется система, представляющая собой традиционный тип жесткой автоматизации. Концепция оптимизации систем автоматизации сборки основана на следующем принципе: «Для оптимизации роботизированной сборки часть общей стоимости ГСС, воплощенная в оборудовании, предназначенном для выпуска только одного конкретного изделия, должна быть пропорциональна доле времени, затрачиваемого на сборку

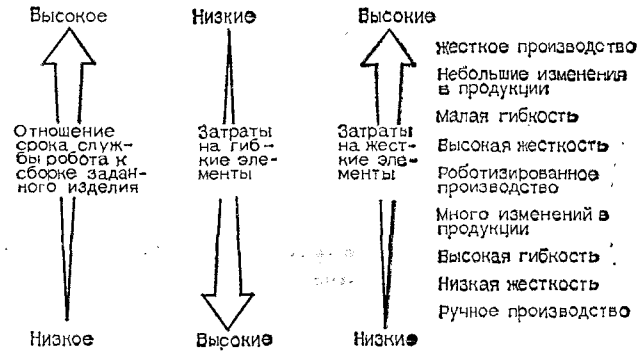

Рис. 47. Меняющееся соотношение между жесткими и гибкими элементами «идеальной» системы, зависящей от частоты изменений собираемых изделий

данного изделия, в общем фонде рабочего времени системы».

На основе проведенных выше исследований становится ясно, что существуют оптимальные величины серий для каждой ГСС, являющейся наиболее эффективной при сборке определенного набора различных изделий, каждое из которых собирается в течение некоторого периода времени. Например, каждые шесть месяцев на сборку поступает новое изделие из этого набора. Если ГСС уже построена (т. е. роботы куплены, «гибкость» системы нельзя изменить) и она должна быть затем приспособлена к выпуску меньших серий продукции, чем первоначально предполагалось (рис. 48), то робот может оказаться в трудном положении, когда потребуется компенсировать неминуемые потери, связанные со слишком высокой долей специализированного оборудования, и поддержать правильное соотношение условно-постоянных и общих затрат.

Подобным образом, если величина партии окажется больше той, на которую первоначально была «настроена» ГСС, поддержание правильного коэффициента жесткости приведет к чрезмерно сложной системе (см. рис. 48).

При фактическом выборе подходящего робота для данной сборочной операции не обязательно следует останавливаться на наименее сложной и наименее дорогой модели, способной выполнять эту операцию. Вместо этого следует выбрать такую модель, которая обла-

дает наименьшим соотношением стоимости и скорости работы.

Другими словами, если более дорогой робот может выполнить сборку намного быстрее более простой и дешевой модели и если объемы выпуска позволяют использовать этот робот на полную мощность, его можно предпочесть менее сложной модели. Ясно, что во многих случаях требуется более одного робота. Для решения этой проблемы есть разные способы.

Простейший подход (хотя редко являющийся наиболее подходящим) состоит в том, чтобы просто применить несколько одинаковых роботов. Это требует увеличения затрат, но уменьшает время цикла обратно пропорционально числу роботов. Снижение издержек производства определяется в этом случае такими факторами, как более короткие циклы сборки, приводящие

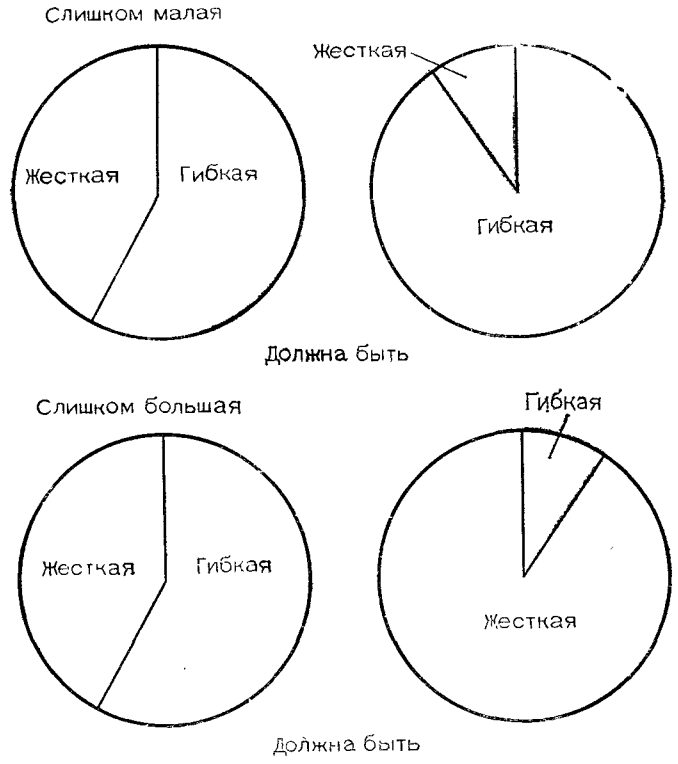

Рис. 48. Иллюстрация принципа оптимизации величины партии

к уменьшению накладных расходов, возможное предоставление скидки при приобретении партии из нескольких одинаковых роботов, отсутствие необходимости проводить дорогостоящие дополнительные исследования и разработки.

Вместо систем, состоящих из нескольких роботов, можно применить один многорукий робот, который разделяет сборку на серии параллельных операций. Поскольку многорукий робот чаще всего дешевле, чем эквивалентное число отдельных одноруких роботов, этот подход обычно предпочтительнее «умножения» систем. Использование усовершенствованных одноруких роботов уменьшает время цикла, но не настолько, насколько предыдущие два подхода. В этом случае издержки на выполнение сборочных операций сокращаются, если более низкая доля накладных расходов при использовании менее сложных роботов компенсирует потери от неполного использования всей системы. При выборе между этими двумя последними системами чувствуется, что решение выбрать многорукую систему должно определяться сложностью сборки, поскольку выбор многорукой системы — функция не от сложности, а от диапазона сложностей в пределах сборки.

Если соблюдать осторожность, применяя такие подходы, то оценку эффективности роботизированной системы сборки можно начинать с оценки эффективности проекта, использующего только один или несколько идентичных одноруких роботов, зная, что любые другие практические проекты будут не менее эффективными. Детальный проект ГСС остается сложным делом, и сейчас финансируется целый ряд исследований, которые упоминаются в гл. 17, нацеленных на то, чтобы улучшить наши знания об очень широком диапазоне факторов процесса сборки, который мы пытаемся роботизировать. Даже до того как такая работа будет завершена, применение многоруких систем будет быстро расти.

Для современного предпринимателя понимание во всех подробностях принципов сборки может показаться чем-то вроде роскоши. Для него создание роботизированной сборочной системы (пусть даже неоптимизированной) представляет собой скорее вопрос выживания в конкурентной борьбе, чем академический интерес.

Глава 12

Научные факты из научной фантастики. Мобильные и другие подобные роботам механизмы

Автономия против дистанционного управления

В этой главе мы рассмотрим то, что для многих представляется настоящими роботами, т. е. роботами, которые могут передвигаться, чувствовать, обладать определенным «интеллектом» и, возможно, даже антропоморфным обликом. Это роботы «звездных войн», роботы (до недавнего времени), действовавшие только в нашем воображении. Конструктивно они оформлены так, как их представляет себе человек с улицы «робота», но есть среди них также и такие роботы, которые, как многие полагают, существуют лишь на страницах научной фантастики. До некоторой степени это так, но в исследовательских лабораториях уже создано немало мобильных роботов (которые рассматриваются в гл. 17), а также несколько образцов бросающихся в глаза механизмов, родственных роботам (и, конечно, робототехнике) и коммерчески вполне доступных.

Как указывалось в гл. 1, не все подобные роботам механизмы на Западе правильно именуются роботами, поскольку вместо автономного управления, присущего настоящему роботу, они управляются на расстоянии человеком. Такие **телеоператоры** (**телегрик-устройства**, или **телегрис** от греческого «дистанционные руки») включают в себя любую манипуляционную систему, которая управляется на расстоянии человеком-оператором на основании информации датчиков, передаваемой из рабочей зоны. Следовательно, этим термином обозначаются и чисто механические манипуляторы, в которых механическая рука копирует движения руки человека. Разработанные во время второй мировой войны, они используются для манипуляций с радиоактивными материалами. Обратная связь в них осуществляется непосредственно с помощью механических рычажных механизмов. Первый электрический сервотелеоператор был разработан в 1947 г., но оператору была недоступна силовая обратная связь. Однако год спустя была создана новая система, в которой данные об усилиях пере-

давались оператору с помощью обратного привода. Мало кто назвал бы чисто механические телеоператоры роботами. Тем не менее, когда механический тип рычажных механизмов был заменен полностью электрическим, многим такое устройство стало казаться очень похожим на робот.

В значительной степени это соответствует истине, так как механическая часть телеоператора может быть идентичной тем, что имеются у современного робота. Действительно, единственное, что нужно сделать, чтобы превратить устройство в робот,— это заменить человека компьютерной управляющей системой. Удаленность такого компьютера от управляемого им механического устройства ни в коей мере не отнимает права у устройства называться роботом (хотя было бы более привычно, чтобы компьютер был фактически размещен вместе с опорой устройства). На практике телеоператорная система может быть удобной промежуточной стадией в разрабатываемом проекте, и хотя достаточно сложные компьютеры во многих случаях все еще могут быть недоступными, несколько областей применения мобильных роботов в идеале требуют по крайней мере некоторого уровня автономного управления из-за ограничений, возникающих в случае обслуживания устройства человеком-оператором.

Это связано не только с постоянным ростом уровня заработной платы квалифицированных рабочих, способных обслуживать телеоператор, но и с ограниченными возможностями самого человека. Одновременно он может эффективно управлять только двумя манипуляторами, у него медленная реакция, он может сосредоточиться на выполнении только одной задачи в данное время, и уровень его способностей, позволяющих ему справляться с несколькими задачами одновременно, сравнительно низок. Кроме того, поскольку роботы все больше используются в чуждых человеку средах, таких, как исследования океана и космоса, фактор человеческой интуиции в процессе управления устройством теряет свое значение. Человек-оператор должен основательно подучиться, прежде чем он сможет удовлетворительно управлять системой в подобных условиях.

В дополнение к таким проблемам существуют также технические ограничения телеоператорных систем. Ограничена скорость, с которой информация может быть успешно передана между двумя заданными позициями. Даже при использовании широкополосных передающих

систем, таких, как СВЧ-отражатели или **световоды**, скорость передачи информации быстро достигает предела, когда между телеоператором и контроллером устанавливается обратная связь с помощью, например, цветных телевизионных изображений с высоким разрешением. В таких системах могут возникать также интерференционные явления, начиная от общего «шума» до полного «затемнения» (если космический робот, например, загораживается космическим телом). Телеоператор «Спейс Шаттл», о котором много публиковалось в печати, используется экипажем, находящимся уже в космосе, но даже и в том случае, как показала проведенная оценка, пребывание человека в космосе в течение года стоит несколько миллионов фунтов стерлингов. Следовательно, управление большинством будущих телеоператоров будет скорее всего осуществляться с Земли (или с эквивалентных станций) на значительном расстоянии. Тем не менее скорость радиопередач, хотя сама по себе «велика», имеет задержку 0,3 с с околоземной орбиты, 2,6 с — с Луны и 10—15 мин — с Марса (зависит от положения планеты). Исследования показывают, что только одна десятая доля секунды является допустимой задержкой сигнала для человека, управляющего телеоператором, в реальном масштабе времени означая, что 15 000 км — та максимальная дистанция, на которой может удовлетворительно использоваться система.

Ясно, что при таких условиях человек-оператор вполне может использовать подход «движение и ожидание», но управление роботом на Марсе и при использовании такой стратегии привело бы к тому, что только 5 % времени пошло бы на полезную работу, остальное время было бы потрачено на ожидание. Очевидно, что это совершенно неприемлемо, хотя бы только потому, что непредвиденные опасности могут потребовать быстрой ответной реакции. Если робот почувствует, что ему угрожает оползень, он должен действовать автономно, чтобы избежать беды. Любой сигнал с Земли придет слишком поздно. Из-за всех вышеназванных недостатков телеоператоры редко рассматриваются как окончательное решение проблемы, таким образом, хотя многие робототехнические системы, рассматриваемые позже в этой главе, фактически еще не имеют полной автономии (из-за технического несовершенства компьютеров), все они вполне могут называться роботами и как таковые достойны обсуждения.

Сухопутные роботы

Сухопутные колесные роботы. На протяжении нескольких лет многие простые автоматически управляемые тележки (АУТ) все с большим успехом используются в промышленности, на складских и распределительных работах. Типовые системы следуют по маршруту над проводом, проложенным в мелком желобе, вырезанном в полу и затем снова заделанном заподлицо с полом. Генератор частоты подает по проводу ток и таким образом создает магнитное поле, которое может улавливать АУТ. Обнаруживая поле двумя датчиками, размещенными по одну и другую сторону колеи, АУТ может почувствовать отклонение от курса благодаря тому, что один из датчиков воспримет более сильный сигнал, чем другой. Следовательно, можно будет провести коррекцию.

Такие простые системы АУТ тем не менее могут включать в себя маршруты с несколькими ветвями, петлями и корнями благодаря использованию различных частот для каждого пути. Программы, определяющие маршрут, по которому будет следовать данная АУТ, можно вводить с клавишного пульта, размещенного на тележке, или посредством передающих станций в полу, или удаленной станции ручного управления, или от центрального управляющего компьютера. Таким образом, подачу сырья и материалов можно осуществить намного более гибким способом, чем с помощью конвейерных систем. Маршрут движения АУТ может включать в себя имеющиеся в наличии дверные проемы, склады и пересечения дорог. При необходимости трайлеры могут быть автоматически спарены. АУТ могут иметь подъемные и другие устройства автоматического перемещения материалов или действовать как своего рода мобильная сборочная платформа с программируемой регулировкой по высоте для удобства сборки.

Различные АУТ применяются в административных зданиях с начала 80-х годов. Такой «почтомобиль» без водителя используется для замены курьера. Он движется по дорожке из флюоресцентного материала по коридорам и останавливается в заранее заданных местах, подавая персоналу сигнал забирать свою почту, прежде чем он продолжит свой путь. Говорят, что его пронзительные сигналы так бесили одного конторского рабочего, что он втолкнул машину в лифт и направил ее на

отдаленный этаж, где нет флюоресцентных дорожек, по которым она будет следовать, наверняка надеясь, что она никогда уже не вернется. Такая же неудача постигла и новинку в Пентагоне, где полагали, что многие километры коридоров будут идеальны для применения «робота-почтальона». Потребовалось три месяца, прежде чем поняли, что в этом случае ничто не останавливает желающих спокойно просмотреть все секретные документы, размещенные на тележке, и «почтомобиль» упразднили.

До разработки роботов, способных взять на себя значительную часть нудной домашней работы, все еще очень далеко: мытье посуды и заправление постели оказались удивительно трудными задачами. Решение задачи пропылесосить пол (не задавив спящую кошку и не разбив вазу) в принципе, вероятно, намного ближе, например, к решению задач, подобным тем, которые возникают при движении через завод или склад. Несмотря на все эти проблемы, различные «домашние» роботы (по крайней мере хотя бы по названию) уже сделаны, а некоторые даже можно купить.

Они охватывают большое число типов — от «домашних персональных роботов», пригодных для обеспечения безопасности жилища, игр и очень простых пылесосных работ, до «образовательных роботов» для обучения, развлечения, экспериментов и рекламы на выставках. Рассказывают, что когда один из последних роботов только что был создан и всего в одном экземпляре, то его создатели должны были взять его с собой в полет, как ручную кладь. Когда таможенные чиновники, проявив понятный интерес к большой коробке, открыли ее, то робот, запрограммированный реагировать на свет, выкатился из контейнера и сказал синтезированным голосом: «Как приятно вылезти из этой коробки».

Управляемое на расстоянии устройство, известное как «тачка», давно используется для осмотра и обезвреживания бомб. Позже с размещенной на ней рукой робота она получила новое название «МР (мобильный робот) Билл» и стала использоваться при исследованиях в области робототехники передвижных средств в Варвикском университете. В конечном счете, вероятно, могут быть созданы настоящие системы обезвреживания бомб, способные двигаться на местности, которые, наконец, вытеснят «тачку». Такие роботы смогут успешно использовать систему предварительно проложенного пути, как первые модели, но для очень неровной мест-

ности такой подход неприемлем. В таких случаях роботы не слишком далекого будущего, вероятно, будут не плавно скользить к объектам своей работы, а пойдут к ним пешком...

Сухопутные шагающие роботы. **Адаптивные шагающие машины** представляют собой средства, которые вытесняют традиционные колеи и колеса с сочлененными системами рычагов. Каждый узел такой системы отдельно снабжается энергией и координируется центральным контроллером. Только недавно благодаря усовершенствованию компьютеров стало возможным автоматически решать сложные задачи управления. Тем не менее требуемые алгоритмы управления очень сложны из-за необходимости обеспечивать изменение походки, зависящей от характера местности и скорости движения. Все это в идеале требует существенной обратной связи. Чтобы лучше понять сложность поставленной задачи, нужно закрыть глаза и попытаться сначала пройти, а затем взбежать по лестнице, не прибегая к тем преимуществам, которые дает использование визуальной обратной связи. Вы сможете ухудшить свою систему равновесия, приняв небольшую дозу алкоголя и тогда попробовать...

На практике уже делались попытки сконструировать двуногие устройства (хотя экспериментальный антропоморфный робот, созданный в университете Васеда (Токио), является заметным исключением). Четырехногие устройства значительно более устойчивы, в то время как шестиногие модели еще лучше, потому что в принципе даже при ходьбе они могут обеспечивать устойчивость по крайней мере тремя ногами. Подобно тому, как у старых табуреток для доения было всегда три ноги, для того чтобы они не качались на неровной земле, так и опора на три точки при перемещении шестиногой модели обычно предпочтительнее опоры на четыре точки, обеспечиваемой при перемещении восьминогого устройства.

Следовательно, в наиболее подходящем проекте будут, по-видимому, использоваться шесть ног. Несмотря на это, в университете Карнеги-Меллон с целью детального изучения проблемы хождения проведена разносторонняя исследовательская работа с использованием одноногого устройства, которое должно постоянно балансировать и передвигаться прыжками. Другая переменная в устройствах с ногами — размер ноги, вероятно, будет представлять собой компромисс между большой ступней, обеспечивающей малое давление на поверхность, и маленькой, обеспечивающей хорошую точку опоры.

Исследования таких истинно робототехнических шагающих устройств проводятся до сих пор, но еще в 1967 г. фирма «Дженерал электрик» демонстрировала такой транспортер. Он обладал четырьмя независимо двигающимися гидравлическими ногами и полностью управлялся оператором, находящимся в кабине. Хотя устройство и демонстрировало существенное увеличение способности передвигаться по неровной местности за счет использования ног, но оказалось, что управлять им вручную исключительно трудно даже в течение коротких интервалов времени.

Недавно фирма «Одетикс» создала управляемое на расстоянии устройство, названное «функционоидом» (не поддавшись соблазну назвать его мобильным роботом), которое передвигается подобно пауку, но может поднимать и перемещать грузы, в несколько раз превышающие его собственную массу. Автономное управление у таких роботов, возможно, появится в середине 80-х годов, так что в дополнение к способности работать в опасной окружающей обстановке шагающие роботы, вероятно, в конце концов смогут начать конкурировать с обычным мулом — животным, которое может пересекать большинство видов местности, делая 25 км в день с поклажей в 200 кг или 50 км — со 100 кг.

Морские роботы

Тем отраслям промышленности, в которых человек должен каким-то образом подвергаться воздействию чужой ему и потому опасной окружающей среды, приходится проявлять активность в создании **дистанционно управляемых аппаратов** (ДУА). С 60-х годов Министерство военно-морских сил США является лидером в создании подводных систем, выпуская такие аппараты, как дистанционно управляемая безлюдная рабочая система (УБРС) и различные управляемые по кабелю подводные аппараты для восстановительных работ. ДУА стали теперь обычным средством для нефтедобывающих компаний, работающих в Северном море, поскольку они в состоянии помочь водолазам, иногда и заменить их.

Подобным образом НАСА использует ДУА для возвращения твердых ракетных ускорителей, сброшенных в море с космических кораблей «Спейс Шаттл», а ядерная промышленность использует их для обследования реакторов (которые иначе должны были бы обследоваться специальными водолазами).

ДУА можно в самом общем виде разделить на три категории. Наименее сложная состоит из устройств, предназначенных только для целей обследования. Системы, способные только к внешнему обследованию объекта, не нуждаются в каком-либо манипуляторе, но те, которым необходимо проводить обследование из мест, которые сама ДУА не может достичь из-за своих слишком крупных размеров, вынуждены использовать некоторую форму маневренной руки с камерой на конце. Для спасательных работ созданы более сложные устройства. Такие работы включают в себя все функции — от сбора небольших предметов до спасения грузов с океанного дна.

Более сложные роботы могут выполнять такие операции, как обвязывание канатами или тросами выбранного объекта, что может потребовать применения двух манипуляторов. Но учитывая, что ДУА первоначально не предназначался для таких механических операций, он все еще классифицируется как устройство для спасательных работ.

Наиболее сложная форма ДУА предназначена для выполнения действительно механических изменений в объекте. Таким системам требуется два и более манипуляторов, может быть, с некоторой формой измерения силовой обратной связи. Когда работа полностью контролируется человеком, такая информация о силовой обратной связи (если считается, что она абсолютно необходима) может быть передана оператору визуально. Для того чтобы выполнить любую полезную подводную работу, обычно необходимо (пока аппарат находится на поверхности океана) каким-то образом привязать аппарат к интересующему объекту так, чтобы его относительное положение оставалось неизменным. Ясно, что создать подходящие манипуляторы для таких аппаратов весьма непросто, так как все датчики и рабочие органы должны быть как-то защищены от воздействия среды с высоким давлением и соленой воды, где они должны работать.

Примером одного из более сложных типов ДУА является 35-тонный дистанционный аппарат фирмы «Шелл» (Великобритания). Размером он с двухэтажный автобус и предназначен для смены клапанов, замены управляющих модулей и выполнения обычного обследования на глубинах, которые слишком велики для традиционных систем. С помощью лебедки он самостоятельно опускается с буя и затем закрепляется за направляющую, которая проходит через требуемую рабочую зону. Затем он перемещает себя вперед вдоль направляющей и выполняет эксплуатационные работы при управлении сверху через кабель.

Управление ДУА все больше автоматизируется. Влияние течений может автоматически компенсироваться. Выполнение операций в определенной последовательности (таких, как смена инструмента) можно поставить под контроль компьютера, а усталость оператора можно снизить, применяя специальные методы. Значительно продвинулись также работы по созданию свободно плавающих аппаратов, не прикрепленных более к маточному кораблю посредством кабеля, использующих воду как среду для передачи и приема информации более низкого уровня. Такие системы по необходимости высоко роботизированы и в связи с успехами в разработке визуальных систем могут приблизиться к рубежу полной автономии.

Космические роботы

В космосе много таких работ, которые робот сделал бы лучше астронавта во время выхода в открытый космос и, конечно же, без риска для человеческой жизни. При глубоком проникновении в космос хотя и не требуется манипуляций, тем не менее может понадобиться пуск устройства в атмосферу планеты в соответствующий момент. Из-за очень продолжительных задержек в радиосвязи с Землей краткосрочные решения должны приниматься непосредственно на самом космическом корабле. Подобным образом сбор таких научных данных, как наблюдение за звездами или планетами в диапазонах различных частот электромагнитного спектра, возможно, в значительной степени потребует автономного управления при необходимости обнаружить кратковременное явление. Если спускаемый зонд должен будет

исследовать пробы, взятые с поверхности планеты, как это было сделано космическим аппаратом «Викинг II», который спустился на Марс в 1976 г., то можно было бы достичь большой экономии времени при роботизации выполнения этих задач.

Главная область применения космических роботов, по-видимому, состоит в обслуживании искусственных спутников, включая их техническое обслуживание, ремонт и возвращение. Телеоператор на «Спейс Шаттл» представляет собой более ранний подход к этой проблеме. Он не только позволяет астронавту, находясь в относительном комфорте корабля, манипулировать тяжелыми предметами в открытом космическом пространстве. Сложные электронные системы обратной связи обеспечивают силовую обратную связь руки «мастера», которой манипулирует астронавт. Даже простой ремонт спутников может быть очень выгодным: в прошлом дорогостоящие системы выходили из строя из-за расплавления предохранителя...

Автономно передвигающиеся по поверхности аппараты (например, робототехнический вариант тележки, которая использовалась при высадке американских астронавтов на Луну) позволяют обследовать большие площади Луны или какой-либо другой планеты. Экспедиция советского лунохода уже позволила обследовать 30 га поверхности Луны с помощью безлюдного телеуправляемого восьмиколесного аппарата. Считается, что главным приложением космических роботов является выполнение строительных работ в космосе, включающее сборку таких конструкций, как космические станции, солнечные энергетические спутники, большие антенны или космическое заводское оборудование. Налаживание производства в космосе дает то преимущество, что предметы там не требуют опор и там нет конвекции газов и жидкостей, что позволяет получать исключительно чистые материалы. Наконец, роботы можно будет использовать для спасения в космосе таких экспедиций, которые потерпели неудачи из-за взрыва на борту корабля или преждевременно стали сходить с заданной орбиты. НАСА проявляет очень большую активность в создании космических роботов, затрачивая на это около 3 млн. долл. в год. НАСА планирует запустить управляемую на расстоянии орбитальную обслуживающую систему в конце 80-х годов. Эта космическая система будет включать в себя два манипулятора с шестью степенями

свободы, управляемых из пилотируемого космического корабля или с Земли с использованием сложной системы телеуправления. Хотя эта система не является истинно робототехнической, НАСА ожидает, что настоящие космические роботы появятся в 90-х годах и будут способны выполнять интеллектные автономные действия, работая в космосе без людей на таких операциях, как ремонт спутников. Роботы будут снабжены инструкциями высокого уровня сложности, при этом перед встроенным интеллектом ставится задача точно сформулировать, как выполнять эту работу.

Бионика

В 1960 г. военно-воздушные силы США провели первую конференцию по бионике. Этот термин был придуман доктором Гансом Эстерайхером для обозначения новых технологических устройств в соответствии с принципами проектирования, наблюдаемыми в биологических организмах. С тех пор термин получил широкое распространение. В действительности, хотя **протезы** (заменяющие отдельные органы человека) и не достигли уровня сложности, изображаемого в научно-фантастических фильмах, тем не менее некоторые из них весьма совершенны.

Все более сложными и похожими на естественные органы становятся, в частности, протезы конечностей, а движения искусственных рук обычно управляются волевым усилием. Электрические сигналы от мышц культи заставляют функционировать соответствующий рабочий орган. Чем сильнее сокращается мышца культи, тем быстрее приходит в движение протез и сильнее его захват. В некоторых из них усилие определяет в обратной связи руки пропорциональный сигнал к срединному нерву, а уровень покалывания, которое чувствует человек, пропорционален сжатию, которое он оказывает. Хотя такие системы никоим образом не относятся к робототехническим, несомненно, что схожесть технологии, используемой как в бионике, так и в робототехнике, делает их очень близкими родственными областями.

Областью, близкой к конструированию протезов, является **ортотика**, буквально «коррекция исправленных частей». Шагающие машины представляют собой аппараты, которые, подобно искусственным конечностям, все

больше становятся «роботоподобными». Созданы экспериментальные аппараты — экзоскелетоны, которые в конечном счете позволяют ходить парализованным. Такие системы работают хуже, чем органы нормального человека. Но в прошлом различные образцы этих аппаратов были сделаны и для того, чтобы попытаться увеличить силу здорового человека. Одним из наиболее известных по печати примеров был «Хардимэн» фирмы «Дженерал электрик». Он был сделан в 1968 г. для выполнения таких задач, как складирование и другие производственные работы, извлечение, погрузка бомб и работа в удаленных зонах. Затянутый ремнями в аппарате человек мог без усилий поднимать несколько сот килограммов. Однако сложность управления не позволила системе получить распространение.

Вероятно, есть одна область бионики, которая, по-видимому, соединится, наконец, с теорией управления роботами,— это работа, выполняемая Джеральдом Петровским в Государственном университете в Дайтоне (штат Огайо). Петровский с успехом экспериментирует, возвращая способность двигаться парализованным конечностям, используя микропроцессоры для искусственного возбуждения двигательных нервов конечностей (попытки непосредственно возбуждать мышцы требуют более высокого электрического напряжения, а помещенные на кожу электроды вызывают жжение и раздражение). Изучение структуры импульсов и работы мышц, вызывающих данное движение тела, позволило переводить эту информацию в программу компьютера, который в свою очередь может возбудить парализованную конечность.

В 1982 г. одному парализованному добровольцу удалось сделать первые шаги с помощью новой техники. Очевидно, для того чтобы действительно ходить свободно, используя этот подход, требуется, чтобы датчики были прикреплены к узлам так же, как это сделано у эквивалентного двуногого робота. Проблемы управления тоже очень похожи. Исследования, проводимые в пограничных областях между чисто биологической и чисто технической системами, показывают, что в действительности таких границ фактически не существует.

ЧАСТЬ IV

СОЦИАЛЬНЫЕ, ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Глава 13

Как насчет моей работы? Роботы и люди

Заботы

Много всякой чепухи говорится о роботах и безработице, и в немалой степени самими специалистами по робототехнике. Дело в том, что те, кто производит роботы, не заинтересованы в том, чтобы акцентировать внимание на возможных проблемах занятости. Менеджеры со своей стороны обеспокоены тем, что рабочие уж слишком хорошо осведомлены об этих проблемах, а исследователи слишком заняты своей непосредственной работой, чтобы много размышлять о ее последствиях. Никому из нас не нравится думать, что работа, которой мы заняты, может причинить вред людям, разрушить их жизнь или причинить страдание ближнему. Поэтому выработалась определенная тенденция преуменьшать ущерб от внедрения роботов и в то же время подчеркивать долгосрочные глобальные выгоды, которые они могут принести.

Такое отношение со стороны тех, кто в состоянии компетентно оценить вероятные последствия роботизации, выглядит не совсем честным. Это даже более предосудительно, чем действия узкой элиты, которая «от имени масс» принимает решения и не оглашает при этом вероятных последствий. Бывает, когда действительно в этом есть необходимость, но внедрение роботов — не тот случай. Маловероятно, что обращенные к

ребенку слова доктора о том, что при уколе «будет совсем не больно», вызовут у него что-либо, кроме недоверия. Это же самое применимо и к робототехнике.

Каковы бы ни были крупномасштабные последствия роботизации для занятости, в любом случае очень большое число конкретных лиц потеряет работу в результате ее осуществления (хотя повышение спроса на более дешевую продукцию может и уменьшить такую безработицу). *Одна из главных задач, для чего выпускаются роботы, заключается в том, чтобы заменить людей.* Тем не менее в вопросе о последствиях роботизации для занятости неизбежны конфликты и различия в восприятии проблемы. Занимаемые позиции зависят от того, является ли человек менеджером или инженером, который отвечает за снижение издержек производства, или же рабочим, которому роботизация угрожает потерей средств к существованию. Однако многие даже не сознают сам факт наличия этих различий в восприятии проблемы. Они не видят, что соображения, относящиеся к экономике, к накоплению и распределению богатства, к политике, неразрывно связаны с вопросом: «Что будет с моей работой?»

Некоторые считают, что замена людей роботами сама по себе не так уж плоха. Они обращают внимание на то, что нужно помнить при этом — почему замена людей роботами вообще желательна, какие будут долгосрочные последствия, если такая замена произойдет, и почему столь ужасно лишение возможности «работать». Многие из тех, кто изучал эти аргументы, неизменно приходили к выводу о жизненной необходимости широкомасштабного применения роботов. Тем не менее, даже если они и правы, фактические выгоды от такого применения будут зависеть от многих факторов, и не в последнюю очередь от политических. Поэтому получение этих выгод ни в коей мере не может быть гарантировано. Кроме того, это, конечно, не означает, что достижение этих целей пройдет безболезненно для всех, имеющих к этому отношение.

Эта глава о надеждах и страхах тех, кого затрагивает робототехника. Некоторые из этих страхов представляются вполне оправданными, и потому сторонники «революции роботов» должны проявить сочувствие, понимание, а самое главное — реализм на всем протяжении переворота, который она вызовет. И самое серьезное внимание должно быть уделено смягчению всех тех

ударов, которые нанесет роботизация. Слишком драматизировать вероятные проблемы безответственно, поскольку это может вызвать неоправданное беспокойство и возмущение. Однако быть благодушным — значит быть неподготовленным и тем самым тоже вызвать ненужные страдания. В идеале все те, кто преследует глобальные цели, не должны забывать про общую цель. И опять-таки чрезмерный идеализм неуместен, когда речь идет о средствах к существованию человека.

Итак, каковы же специфические опасения индивидуума? Более 30 лет назад, в 1952 г. Курт Воннегут написал книгу, названную «Пианист». Действие происходит в будущем, и автор рисует мрачную картину мира, в котором автоматизация достигла таких успехов, что, за исключением небольшого числа управляющих, инженеров, государственных служащих и специалистов, большинство человечества ведет праздную, недостойную или бессмысленную жизнь. В недавнем докладе фирмы «Ингерсол инженирс» в том же духе отмечается, что хотя сферы применения тяжелого труда могут быть существенно сокращены с помощью роботов, но то, что появится на их месте, по-своему может оказаться еще хуже.

Но такое беспокойство имеет тенденцию превратиться в долговременную тревогу. Для большинства же индивидуумов непосредственное значение имеет только одно — приведет или не приведет применение роботов к вышвыриванию их в ряды безработных. Естественно, что профсоюзы к новой технике проявляют осторожность, и в Великобритании Клайв Дженкинс отметил, что как профсоюзный лидер он считает, что хотя эта техника и очень гибкая, она не обязательно нейтральная и ее милосердную сущность нельзя принимать как истину, не требующую доказательств. Даже в Японии, где для примерно одной трети рабочей силы политика «пожизненного найма» (распространившаяся в 20-х годах) до сих пор создавала благожелательное отношение рабочих к роботам, растут страхи среди определенной части автомобилестроителей в отношении роботов на сборочных линиях, которые представляют собой угрозу гарантии работы. Люди, которые вначале восхищались тем, что роботы освободили их от монотонных и опасных работ, теперь хотели бы знать, не вытеснят ли их скоро роботы совсем с работы. По-видимому, некоторые из более мелких японских фирм не уверены в

необходимости применения у себя роботов, что может отражать лишь усилившееся внимание общественности к негативным социальным последствиям, которые могут возникнуть от такого применения.

Такое беспокойство о потере людьми рабочих мест, честно говоря, нельзя полностью снять гарантиями со стороны управляющих в том, что уровень занятости будет снижаться только за счет естественного сокращения по мере выхода работников на пенсию.

Такие соглашения фактически только переводят проблему с уровня компании на национальный уровень — те, кто мог бы раньше поступить на фирму на смену ушедшим на пенсию, теперь такой возможности не имеют. Они «теряют» работу, которую могли бы получить.

Почему это делают?

Решая для себя, действительно ли проблемы, которые неизбежно сопровождают широкое применение роботов, тем не менее перевешиваются вероятными выгодами, важно помнить, каковы же эти выгоды, в чем состоят побудительные мотивы для применения роботов и почему роботы сравнительно неожиданно стали привлекательными. Эти темы уже широко обсуждались на страницах этой книги, а экономические обоснования детально рассматриваются в гл. 16. Также, конечно, стоит помнить, что рациональное решение упомянутых выше вопросов, вероятно, будет сильно зависеть от того, кто принимает это решение. Граница, отделяющая «приемлемое» от «неприемлемого», носит условный характер, но должна в определенной степени отражать положение арбитра.

Вероятно, один из главных побудительных мотивов применения роботов возник из-за того, что стоимость рабочей силы сильно возросла в 60-е годы, особенно в США и Западной Европе. В результате стоимость приобретения и эксплуатации одного робота постепенно стала более предпочтительной для управляющих, чьи фирмы стремились сохранить конкурентоспособность. Вторая причина заключается в том, что в некоторых странах, таких, как Япония, происходит постепенный рост дефицита рабочей силы. В Японии население увеличивается в настоящее время примерно на 1,1 % в год, но из-за того, что все больше молодых японцев

стремятся получить высшее образование, численность рабочих увеличивается всего на 0,7 % в год. Даже те молодые рабочие, которые находятся в составе этого контингента, сегодня считают такие работы, как сварка и покраска, «грязной работой», которую они не желают выполнять. Рабочие с более высоким уровнем образования проявляют отвращение даже к изучению работ в заводском цехе, полагая, что их образовательный уровень должен оградить их от выполнения столь низменных работ.

Даже в странах с улучшенной системой массового образования, таких, как Великобритания, рабочие справедливо желают взять от жизни больше, чем может дать им работа в качестве «прославляемых машин». Может показаться парадоксальным, что даже в период высокой безработицы существует нехватка рабочих некоторых профессий, но сам факт существования большого числа людей без работы не означает, что эти люди горят желанием выполнять любую работу. Для многих понятно, почему выпускники школ иногда скорее предпочитают получать пособие по безработице, чем взяться за работу, которую они считают ниже своих способностей. Часто это может быть проявлением не лени, а гордости. Некоторым может показаться менее унизительным быть одним из безработных, чем вдыхать краску в покрасочном цехе, заниматься машинообразным трудом на сборке каких-нибудь деталей или потеть над одними и теми же сварными швами в металлоцехе. Пребывание без работы, конечно, может быть очень унизительно, как мы рассмотрим позже, но это вызывается такими факторами, как выпадение из определенной социальной группы, недостаток денег.

Некоторым нанимателям кажется, что роботы появились как раз вовремя, чтобы заполнить те места, где люди не хотят трудиться. Однако во многих странах наблюдается дефицит квалифицированного ручного труда, и мы далеки от того, чтобы считать, что это вызывается отказом рабочих занять места. Вероятно, причина кроется в нежелании определенной части нанимателей обучать требуемый персонал. Фирмы, конечно, могли бы отразить этот аргумент, указав, что поскольку роботы могут уменьшить объем неквалифицированной работы, выполняемой квалифицированными работниками, эти люди могли бы решать больше задач, требующих всех их способностей.

Считается, что третьей причиной расширения применения роботов является рост числа законодательных документов и осведомленности о здоровье и безопасности на заводах. Роботы могут заменить рабочих на рабочих местах с токсичными испарениями, чрезмерной температурой и физической опасностью. Подобным же образом раздаются (по крайней мере в некоторых странах) требования необходимости получения большего удовлетворения от работы. Роботы могут вполне эффективно использоваться для выполнения наиболее монотонных операций, и при этом они не становятся «отчужденными», не отсутствуют по утрам в понедельник или просто не тупеют. Тем не менее различные исследования, проведенные фирмой «Фольксваген» (ФРГ), университетом Карнеги-Меллон (США), породили сомнения относительно возможности применения роботов для увеличения удовлетворения трудом оставшейся рабочей силы. Установлено, что на практике стресс часто даже увеличивается.

Социальные аспекты

Япония — мировой лидер в использовании роботов, и в то же время уровень безработицы в ней один из самых низких. Тем не менее уже в 1981 г. в редакционной статье «Джапан экономик джорнал» говорилось: «В настоящее время подавляющее большинство населения, по-видимому, поддерживает внедрение роботов, считая, что применение роботов окажет очень малое влияние на масштабы безработицы. Но несмотря на такое благоприятное отношение, проблема заключается в том, сохранится ли навсегда эта благоприятная обстановка для применения роботов. Это зависит от темпов общего экономического роста в будущем, однако можно с уверенностью сказать, что в длительной перспективе японская экономика будет постоянно терять способность поглощать рабочих, вытесненных роботами».

В настоящее время роботы применяются достаточно мало (даже в Японии), поэтому их влияние на безработицу и другие социальные аспекты минимально. Ясно, что долго так продолжаться не может. Объединенный профсоюз рабочих автомобилестроителей США сообщил, что введение 85 покрасочных роботов на 18 заводах

компании «Дженерал Моторс» привело к ликвидации 211 рабочих мест (почти 12 человек на одного робота)! Компания «Форс Увриер» (Франция) подсчитала, что один робот устраняет 3 рабочих места, а финский союз металлистов дает цифру 3—5 рабочих мест. В исследовании, проведенном в штате Мичиган в США, предсказывается, что в США к 1990 г. будет ликвидировано от 100 до 200 тыс. рабочих мест, в основном в автомобильной промышленности: около 40 % рабочих мест «исчезнут» на покраске и 15—20 % — на сварке.

В штате Мичиган, где кризис вызвал резкое сокращение производства в автомобильной промышленности, большие усилия направляются на то, чтобы превратить штат в центр изготовления роботов в США. В отчете штата показано, что даже если учесть все новые рабочие места, которые будут созданы, то при успешном выполнении планов будет потеряно на 50 % больше рабочих мест, чем создано вновь. В дальнейшем исследовании, проведенном под руководством Дональда Смита, директора отделения индустриального развития Мичиганского университета, предполагается, что число рабочих, непосредственно замещенных роботами, к 1990 г. составит 7 %, однако 88 % из них будут вновь трудоустроены в своих компаниях, причем 63 % из них будет заниматься роботами.

В исследовании Коммерческого банка (Западная Германия) утверждается, что к 1990 г. под угрозой ликвидации будет находиться около половины из 1,2 млн. рабочих мест на сборочных линиях в Германии, где каждый робот второго поколения заменит от 5 до 10 рабочих. Роботы, кроме того, будут выполнять более 90 % работ по точечной сварке и покраске. Тем временем согласно оценкам концерна «Фольксваген» роботы второго поколения будут выполнять 60 % всех работ в автомобильной промышленности. Только в одной Западной Германии из-за роботизации производства будет сокращено 200 тыс. рабочих мест.

Эти прогнозы, конечно, не проверялись. Тем не менее они не обнадеживают тех, кто уже сейчас без работы. Мало надежды и на то, что развивающиеся роботизированные заводы снова примут к себе свою старую рабочую силу. Экономический кризис, возможно, ускорил процесс создания безлюдных производств, но многие считают, что характерной особенностью экономического подъема становится отсутствие роста спроса на

рабочую силу. В условиях кризиса подрывается сила профсоюзов, и поэтому существует возможность для администрации проводить изменения в технологии производства без согласования с профсоюзами, в результате чего еще больше уменьшается число членов профсоюзов.

Новая революция!

В Великобритании в 1811 г., в период депрессии, было организовано тайное общество рабочих с целью разрушать новые текстильные станки, получавшие в тот период широкое распространение. Рабочие считали их причиной своих бедствий. Первая вспышка гнева произошла в Ноттингеме и была вдохновлена действиями текстильного рабочего по имени Нед Лудд, который за 30 лет до этого разнес свой станок вдребезги. Возникшее движение стало называться движением луддитов. Впоследствии серьезные луддистские бунты произошли в различных частях страны, особенно в Йоркшире, когда было убито много людей, разрушены фабрики и несколько бунтарей были преданы суду и казнены. Один оппортунист, кузнец по имени Энок Тейлор, делал как станки для фабрик, так и кувалды, которыми бунтари их разбивали! Отсюда и луддистский клич: «Энок сделал их — Энок и разобьет!» Но если промышленная революция, которая началась в Англии приблизительно в 1760 г., могла вылиться в такой драматический мятеж, действительно ли сравнима с ней робототехническая революция?

Промышленная революция оказала поистине удивительное влияние на образ жизни тех, кого она коснулась. Только за 90 лет, к 1850 г. Великобритания из аграрной страны, в которой около 70 % населения проживало в сельской местности, превратилась в промышленную страну, где только 10 % населения (которое к тому времени удвоилось) было занято в сельском хозяйстве, а более половины жило в новых малых и больших городах.

Число городов с населением более 50 тыс. человек увеличилось за тот же период с двух (Лондон и Эдинбург) до 29. Большие мануфактурные города возникли на Севере: Лидстол стал центром суконного производства, Манчестер — центром хлопчатобумажной промышленности, в Бирмингеме производились станки. Ливерпуль стал крупным портом. Британия давала 70 % мировой добычи угля, 70 % производства хлопчатобумажной ткани, 50 % стали и 40 % металлоизделий.

Уже родился новый дух бесчеловечности, движимый «экономической необходимостью». Взаимоотношения между рабочим и нанимателем стали более резкими и обезличенными. Хотя и произошли некоторые улучшения в материальном положении рабочих, они были более чем перекрыты возросшей эксплуатацией и угнетением. Бывшие ремесленники стали обслуживать станки, отнявшие у них радость труда и даже угрожавшие отнять средства к существованию. Поскольку использование энергии пара еще больше увеличило производительность труда, возросло и число вытесненных с рынка ремесленников, занимавшихся ручным трудом. Во многих случаях скорее пылающее чувство несправедливости от невыносимых условий труда, чем иррациональное или близорукое сопротивление прогрессу толкало умиравших с голоду людей к восстанию и попытке замедлить технический прогресс.

Уже к 1840 г. около 50 % рабочей силы Великобритании было занято в так называемых вторичных отраслях производства — в обрабатывающей, горно-добывающей промышленности, строительстве. Спустя почти полтора столетия только около 40 % трудового населения в Великобритании занято во вторичных отраслях производства, несколько процентов — в первичных отраслях: рыболовстве и сельском хозяйстве, в то время как почти 60 % населения работает в сфере услуг, которую иногда называют третичной сферой производства — в ведомствах, магазинах и т. д. Будет ли эта последовательная тенденция перехода рабочей силы с заводов в сферу услуг драматически ускоряться роботами и будет ли влияние этой революции таким же значительным, как влияние первой промышленной революции?

Возможны три ответа. Некоторые считают, что размах и темпы перемен преувеличены. Повышение удельного веса сферы услуг в экономике — не революция, а постепенный эволюционный процесс, еще один этап в развитии общественного производства, сравнимый с другими процессами, происходившими ранее. Этот аргумент вызван ссылкой на широко распространенное в 50-х годах мнение, что автоматизация приведет к быстрым и фундаментальным переменам в обществе, чего еще не произошло.

7 Зак. 611

Вторая (противоположная) позиция заключается в том, что в самом деле происходит переход от стадии индустриального общества к постиндустриальной стадии. Сторонники этой точки зрения считают, что в будущем нам потребуется примерно такая же доля всей рабочей силы для производства товаров, сколько сейчас занято в производстве продуктов питания (около 5 %). Все оставшиеся 95 % будут работать в сфере услуг, многие из них будут заняты хранением, обработкой и распространением информации. Утверждается, что в таком обществе две функции труда — обеспечивать выпуск продукции и давать заработок, вероятно, будут разделены; широкое распространение получит досуг, а работа станет второстепенным и случайным отклонением.

Третья позиция исходит из того, что мы находимся сейчас в середине революции, но предсказывается полный развал общества. Сторонники этой точки зрения утверждают, что обширная безработица вызовет волнения, которые приведут к свержению правительства и появлению какого-либо вида диктатуры, из которой вследствие революции возникнет упомянутое выше постиндустриальное общество. Ясно, что ни одну из трех упомянутых точек зрения нельзя проверить. В действительности события, вероятно, будут развиваться в рамках этих трех крайностей, но отвергать любую из этих точек зрения как совершенно невозможную поистине трудно. С тех пор как роботы были впервые применены, люди интересовались, какую реакцию они вызовут у рабочих, и беспокоились, не приведут ли они в результате к неолуддистской реакции.

В некоторых случаях это и происходило. Численность роботов еще невелика, таким образом, реакция на их внедрение соответственно тоже была слабой, и нужно отметить, что большая часть фактов, дающих повод для беспокойства, носит анекдотичный характер. И все же кое-что происходит... Кое-где роботы ломаются при загадочных обстоятельствах, и никто не беспокоится, чтобы их заменить.

В некоторых случаях на ранних этапах применения роботов в США, например на заводах корпорации «Форд Моторс», рабочие вначале просто саботировали роботы, пока не научились их понимать. Спустя два года, когда роботы ломались, рабочие вешали на них таблички с надписью: «поправляйтесь!» Однако на первых порах на заводах корпорации «Форд Моторс» слово

«робот» воспринималось так негативно, что пришлось заменить его при общении с рабочими термином «универсальное передающее устройство».

Не удивительно, что профсоюзы всего мира очень серьезно воспринимают вопрос автоматизации, хотя фактически не выступают против нее. Согласно официальным данным, в Западной Германии, например, 53 % рабочих опасаются потерять работу из-за внедрения новых технологий, однако профсоюз рабочих-металлистов ФРГ заявил, что нужно перейти от оборонительной стратегии против рационализации к активной стратегии работы с новшествами. Международная федерация профсоюзов рабочих-металлистов заявила, что нет ни одного профсоюза, входящего в федерацию, который бы выступал против введения новой технологии как таковой, но большинство из них внимательно наблюдают за развитием и внедрением новых технологий. Одна из проблем, вызывающих беспокойство, заключается в том, что с внедрением роботов на долю людей могут остаться еще более монотонные виды работ, чем до роботизации, даже если общее число рабочих мест и не сокращается. Эта проблема обсуждается в следующей главе.

История упрощения операций

Разделение труда — чрезвычайно древнее дело, восходящее к тому времени, когда мужчины занимались охотой, а женщины собирали плоды и нянчили детей. В период промышленной революции этот процесс был развит до той степени, которую в 1776 г. подробно осветил Адам Смит в хорошо известном описании изготовления болтов. Изготовлением каждого болта были заняты 10 человек, каждый из которых отвечал только за небольшую часть работы. Такое разделение труда имеет экономический смысл для предпринимателя. Представьте себе соглашение, по которому каждый из 10 рабочих выполняет операцию, не требующую квалификации, но на которую нужно затратить 10 % времени, необходимого для выполнения производственных операций, требующих квалифицированного труда. Если каждый рабочий выполняет все операции от начала и до конца, то он должен обладать достаточно высокой квалификацией и получать соответствующую оплату (скажем, две единицы в час). Если наниматель теперь раздробит работу так, что 9 неквалифицированных рабочих

(получающих только единицу за час) выполняют большинство операций, а та доля работ, которая требует определенной квалификации, выполняется одним квалифицированным рабочим, то это позволяет сэкономить предпринимателю девять единиц в час. Нужно отметить, что если оплата труда была бы сдельной, то тогда осталась бы (в целом) одна сумма выплаченной заработной платы для обоих случаев. Предприниматель получает выгоду не за счет улучшения технического оснащения производства.

Этот подход к организации труда, конечно, сильно упрощает операции, выполняемые средним рабочим. Он достиг вершин своего развития на производственных линиях Генри Форда. На них рабочий часто выполнял практически лишь одно движение: «Человек, который вставляет болт, не надевает на него гайку; человек, который надевает гайку, не затягивает ее».

Даже на современных заводах рабочим часто приходится выполнять совсем бессодержательные операции, хотя некоторые профсоюзы выступают против этого, как, например, профсоюз рабочих-металлистов ФРГ, имеющий соглашение, по которому не разрешаются рабочие операции продолжительностью меньше 90 с. Тем не менее подобные бессодержательные работы, против которых возражают люди, идеальны для роботов. Многие чувствуют, что с приходом экономически эффективных роботов у нас, наконец, появилась благоприятная возможность освободить людей от таких видов работ, которые им никогда бы не следовало выполнять. Поскольку разделение труда приводит к производственным операциям, неприемлемым для человека, они, развивая этот тезис, настаивают на том, чтобы мы ускорили внедрение роботов с конечной целью достичь такого уровня автоматизации производства, когда рабочие были бы совсем не нужны. В этом случае воздействие роботов на рабочую силу было бы, безусловно, благоприятным.

Однако есть контраргументы. Во-первых, роботы действительно лишают людей работы (что будет рассмотрено позже). Во-вторых, как утверждается, совсем не ясно, потребует ли большинство рабочих мест, возникших в результате внедрения роботов, более высокой квалификации, чем те, на которых теперь трудятся роботы.

Часто вся работа людей сводится к тому, чтобы подать детали роботам и взять их у них. Таким образом,

бессодержательные производственные операции действительно передаются роботам, однако подобные рабочие места возникают вновь и рабочие чувствуют себя еще более обособленными, еще более подчиненными ритму машины и еще больше боятся потерять свою работу.

Кроме того, поскольку рабочим все в большей степени требуются навыки, основанные скорее на их аналитических или логических способностях, то всегда существует опасность того, что такая ситуация может привести к поляризации между высоко- и низкоквалифицированным трудом. Это, конечно, проблема, касающаяся всех новых областей автоматизации, таких, как, например, автоматизация конторского труда, а не только робототехники. Система автоматизированного проектирования (САПР), например, сокращает соотношение между младшими и старшими чертежниками (кто в действительности пользуется системами). Такая техника позволяет намного лучше выполнять проект, сократив несколько человек, что хорошо для всех, кроме тех, кого уволили.

Робототехнические системы второго поколения начинают все больше превалировать, и влияние роботов в таких областях, как сборка, может, конечно, вызвать еще более резкое сокращение занятости. А это только второе поколение...

Возвращаясь к проблемам упрощения операций, необходимо все-таки дать ответ на поставленный вопрос: «Имеет ли это значение?» Многие доказывали бы, что имеет. В 1979 г. в журнале «Американ мэшинист» сообщалось, что в механообрабатывающем цехе в Линкольне, штат Небраска, 28-летний Майк Вейли с интеллектом на уровне 12-летнего ребенка стал оператором механообрабатывающего центра с ЧПУ, потому что его ограниченные способности обеспечивали такой уровень терпения и усидчивости, который позволял ему аккуратно следить за работой станка и выпускаемой станком продукцией. Хотя это всего лишь отдельный пример, но он характеризует уровень упрощения операций, который часто присутствует на производстве. Однако появляется все больше свидетельств того, что такие рабочие места пагубны как для работника, так и для компании в целом. В дискуссии о занятости и о безработице некоторые заявляют, что изучение последствий выполнения самых бессодержательных видов

неквалифицированных работ показывает, что многие рабочие на таких рабочих местах образуют в обществе прослойку из деградированных, с сокрушенными надеждами, несчастных, физически нездоровых людей. Недостаточная заинтересованность в выполнении работы накладывает отпечаток на всю их жизнь и не позволяет им соответствующим образом обеспечить семью.

А если это так, то упрощение операций не только расстрачивает человеческие способности вместе с последующими потерями для промышленности, выражающимися в низком уровне мастерства, недостатке мотивации, абсентеизме и текучести кадров. Скука и отчуждение, возникающие в результате усиливающейся примитивизации труда, наносят ущерб рабочему и обществу.

Экономический детерминизм

По-видимому, существует «дилемма робототехники»: или продолжать осуществлять роботизацию тем же путем, как уже начато, и таким образом способствовать упрощению операций и росту безработицы, или же заставить промышленность развиваться преимущественно так, как раньше, в результате чего все больше будет снижаться эффективность производства, пока весь бизнес не потерпит крах, что фактически вызовет еще большую безработицу. Если эта дилемма действительно существует, то единственным выходом из этого положения, по-видимому, может стать роботизация. Делать иначе — значит накликать еще большую беду и несчастье, чем те, которые могут произойти при внедрении роботов.

Для многих этот экономический детерминизм означает, что если мы хотим сохранить конкурентоспособность на мировых рынках, то мы не можем позволить себе роскошь улучшать условия труда. Действительно, говорят, посредством роботизации необходимо еще больше сокращать сферу применения квалифицированного труда в интересах повышения эффективности. Наши действия определяются экономическими законами. Современная ситуация возникла в связи с обострением конкуренции и, следовательно, представляет собой наиболее эффективный подход, так что это объективная необходимость, и любая попытка применить альтернативный подход с целью улучшения использования способностей человека привела бы к экономическим потерям.

Такой аргумент возникает снова и снова в отношении возможных неблагоприятных «побочных эффектов» новой технологии. Так, в 1956 г. Пауль Айнциг, рассказывая об автоматических заводах, писал: «Хотим мы этого или нет, но к автоматизации нам рано или поздно придется приступить. Нам приходится выбирать не между автоматизацией и полной занятостью, а между немедленной автоматизацией, сопровождающейся умеренной временной безработицей, и проведением автоматизации когда-либо в будущем, что неизбежно повлечет за собой угрожающий рост безработицы, продолжающийся до тех пор, пока мы в своем техническом развитии не догоним наших конкурентов».

Спустя четверть века эти слова эхом отозвались в одном из докладов, где было записано: «Иногда доказывают, что Великобритания как нация стоит перед лицом подлинного социального выбора — либо принять новую трудосберегающую технологию и стать страной с высокоэффективной экономикой, в результате чего возможно увеличить число безработных, или отвергнуть такую технологию ради более трудоемких методов производства, использование которых означает и более низкий уровень оплаты труда. Мы не верим в то, что это равноценные варианты. Мы считаем, что величайшая угроза занятости в промышленности Великобритании исходит не от вытеснения рабочих машинами, а от дальнейшего вытеснения наших товаров с мирового рынка, вследствие наших неудач в ценовой конкуренции и низкого качества товаров. Ключевым фактором выравнивания положения является внедрение современных методов производства».

Такие призывы к экономическому детерминизму кажутся неоспоримыми аргументами «холодного реализма»; однако после детального рассмотрения некоторые люди начали подвергать сомнению их обоснованность. Во-первых, существует множество концепций эффективности при одной из интерпретаций этого термина, подчеркивается польза, которую принесет человечеству сокращение затрат труда, необходимых для удовлетворения самых насущных потребностей, когда освобождается время для более приятных занятий. Вторая интерпретация касается роста экономической эффективности производства отдельной фирмы, приводящего к повышению

конкурентоспособности последней. Эта интерпретация отличается от первой, потому что интенсификация труда или его разделение приведут к очевидному увеличению эффективности, хотя в одном случае при увеличении затрат труда, в то время как в другом — при уменьшении заработной платы и сохранении затрат труда на прежнем уровне.

Третья интерпретация термина «эффективность» реализует тот же подход, что и вторая, но на макроэкономическом уровне. В стране можно повысить эффективность производства, одновременно выпуская больше товаров и сохраняя прежнее число работников, получающих прежнюю заработную плату. Однако, если то же самое количество товаров выпускается меньшим числом рабочих, аналогия разрушается, поскольку, если только эти рабочие не являются «иностранцами», которых можно отправить домой, их нельзя выслать из страны и они нуждаются в материальной поддержке. Конкурентные позиции страны на мировых рынках поэтому определяются пределами возможного падения жизненного уровня тех, кого уволили. Таким образом, эффективно использовать роботы страна может только в том случае, если одновременно будет расти выпуск продукции и увеличится доля этой страны на мировых рынках товаров, чего, очевидно, не могут добиться все страны одновременно.

В этих условиях повышение эффективности, которого добивается какая-либо одна фирма, может наносить ущерб эффективности общественного производства в целом и подрывать конкурентоспособность национальной экономики. Таким образом, выясняется, что на этом уровне анализа, как доказывают некоторые, принцип экономического детерминизма, по-видимому, дал трещину, поскольку критерии, используемые для определения «экономических потерь», слишком узки. Обычно эти потери рассматриваются только с точки зрения отдельной фирмы. Более приемлемым было бы пытаться максимизировать суммарный экономический выигрыш отдельных компаний и общества в целом. Это потребовало бы создания такой новой техники, которая не оказывала бы негативного влияния на человеческий фактор, не сковывала бы инициативу и в результате могла бы способствовать еще большему росту эффективности.

Все же даже и без проблем противоречивых интерпретаций понятия эффективности по-прежнему остаются

серьезные проблемы с экономическим детерминизмом. Может показаться очевидным, что из-за того, что конкуренция заставляет принимать технологию, дающую максимум прибыли, любые изменения, например, в сторону улучшения условий труда должны соответственно ослаблять конкурентоспособность фирм или государств, внедряющих такую технологию. Однако в более долгосрочной перспективе это может быть не так. Профессор Говард Розенброк Манчестерского института науки и технологии отметил, что в начале столетия поршневой двигатель зарекомендовал себя как наиболее удачный первичный двигатель в автомобиле. Позднее серьезные усилия были направлены на создание роторного двигателя, который теперь должен участвовать в соревновании с поршневым двигателем, десятилетия создававшимся усилиями инженеров. Даже сейчас разработки роторного двигателя должны конкурировать с разработками поршневого двигателя, на усовершенствование которого тратятся во всем мире многие миллионы фунтов стерлингов. Предыдущий успех поршневого двигателя и его прочное положение наносят ущерб развитию роторного двигателя, даже если он и представляет собой потенциально лучшее устройство.

В свете такой аргументации становится ясно, что в любые времена технология может быть далека от экономического оптимума, *который можно было бы достичь*, если бы более ранние экономические решения, рассчитанные на краткосрочную перспективу, были бы другими. Если разработан ряд краткосрочных оптимальных прогнозов, каждый из которых основан на краткосрочных рыночных соображениях, то вполне вероятно, что долгосрочная ситуация будет намного хуже, чем могла бы быть. Однако из-за того, что нет другого пути развития, с которым можно было бы сравнить избранное направление, в каждый конкретный момент может показаться, что из-за того, что современное состояние лучше предыдущих, серия краткосрочных оптимизаций непременно приведет к оптимальному долгосрочному результату. На практике же другое (как бы «неоптимальное») решение, принятое раньше, могло бы привести к еще более желательному конечному результату. Смысл заключается в том, что сейчас, вероятно, то самое время, когда нужно принять такое решение в робототехнике.

Неверный путь!

Давайте снова рассмотрим «дилемму робототехники». При анализе всех вариантов возможных действий, проводимом до того, как будет принято решение, необходимо показать, что дилемма действительно существует, т. е. что нет третьего пути. Аргументы против подхода на базе экономического детерминизма к решению «дилеммы робототехники» показывают, что в действительности существует третий вариант развития, который его сторонники назвали бы значительно более предпочтительным, чем «находиться между двух огней».

Сделано уже немало различных предложений для выбора альтернативных подходов, но в основном, по-видимому, есть только две стратегии, которые можно принять для автоматизации: либо техника создается для того, чтобы заменить человека, либо для того, чтобы *расширить* его возможности. До настоящего времени техника в основном использовалась для того, чтобы заменить человека, и настолько быстро, насколько это экономически доступно. Поскольку такая замена осуществляется на непривлекательных работах, как и во многих областях применения современной робототехники, то существует сравнительно небольшое расхождение во мнениях относительно желательности проведения этой замены. Однако, так как роботы все в большей степени становятся способными выполнять и такие операции, которые не так уж неприятны для человека, то, как обсуждалось ранее, предмет спора совершенно не становится более ясным, особенно, когда некоторые робототехнические приложения заменяют человека не полностью, а только ставят его в положение, когда ему приходится выполнять немногие операции, с которыми сам робот не в силах справиться.

Сравнительно легко размышлять о том, как заменить человека, и удивительно трудно попытаться расширить пределы его возможностей. Тем не менее такая работа, например, проводится в Великобритании профессором Говардом Розенброком. Его группа пытается усовершенствовать **гибкую производственную систему** (ГПС), в которой станок «подчиняется» оператору. Создана простая **ячейка**, состоящая из токарного станка с ЧПУ, фрезерного станка и робота. Вместо того чтобы программировать оборудование с ЧПУ с помощью специального компьютерного программного устройства или

подходящей системы автоматизированного проектирования, программирование осуществляется путем запоминания действий оператора, когда он делает первую партию деталей.

Этот способ в действительности занимает намного меньше времени, чем два других, когда программирование осуществляется до начала выпуска продуции и не требует проверки, исправлений и новой перепроверки. Кроме того, достигается уменьшение времени программирования почти в два раза, а более быстрая наладка станков (которая при дистанционном программировании тормозит работу) позволяет еще больше сократить фактическое время, затрачиваемое на выпуск продукции. Как только сделана первая деталь из партии, оператор может применить свою квалификацию для составления графиков выпуска продукции. Вероятно, в этом случае драгоценные ресурсы человеческого мастерства и способностей будут лучше использоваться.

Естественно, некоторые могут возразить, что если компьютер, обеспеченный достаточным вводом сенсорных данных, может составить график работы завода лучше, чем человек (что, как многие полагают, уже возможно), то, конечно, человеку нелепо пытаться выполнить эту задачу самому. Если в будущем ГПС будет действительно способна самопрограммироваться быстрее и лучше, чем это может делать опытный рабочий (что некоторые считают вполне возможным), то не является ли нереальной слабая надежда на то, чтобы попытаться поддержать статус человека?

До некоторой степени это так. Однако такие люди, как Розенброк, имеют в виду совсем другое. Конечно, сказали бы они, компьютер, может быть, будет в состоянии составлять графики работы лучше, чем это может делать человек один, но не следует говорить, что не могла бы быть придумана такая система, которая бы включала в себя и компьютер, и человека, которая была бы еще лучше, чем система, использующая только компьютер. Здесь прямая аналогия с компьютерными системами, созданными для оказания помощи врачам в установлении диагноза,— никто не считает, что врач больше не нужен. Действительно, хотя можно предположить, что появится такая диагностическая система, с которой сможет работать простой техник, но без врачей возникли бы серьезные проблемы с углублением познаний в области медицины.

Другие варианты

Хотя многие считают, что современная концепция «труда» будет оставаться до следующего столетия, есть крепкое убеждение, что «труд», как мы его понимаем, в значительной степени исчезнет в течение 20 лет. Этот аргумент состоит в том, что из-за более высокой производительности и качества продукции, обеспечиваемых роботехническими системами, те, кто работают с ними, смогут работать меньше часов за ту же самую плату. Действительно, в Великобритании Терри Даффи, президент профсоюза, заявил, что он считает, что 10 %-ное сокращение рабочего времени каждые пять лет к 2000 г. привело бы к 26-часовой рабочей неделе.

За последние 100 лет во многих странах реальная заработная плата увеличилась в четыре раза, а численность населения и продолжительность жизни удвоились, тем не менее та доля времени бодрствования в течение суток, которую люди посвящают оплачиваемой производственной деятельности, уменьшилась всего с 40 до 20 %. Предполагается, что скоро можно будет значительно увеличить число рабочих мест на роботизированных заводах путем «удвоения» численности работающих так, что каждая группа будет работать, вероятно, только три дня в неделю и получать хорошую заработную плату. Дополнительные рабочие места могут быть созданы за счет увеличения продолжительности отпуска, более раннего выхода на пенсию и повышения уровня образования, что приводит к более короткому общему трудовому стажу. Дополнительные доходы требуют и дополнительных возможностей расходования заработанных средств. Таким образом, большое число новых рабочих мест будет создано для удовлетворения увеличенного спроса на услуги, особенно в индустрии досуга.

Некоторые считают, что мы приближаемся к такому этапу развития общества, когда образ жизни человека может в принципе не определяться той работой, которой он занят. Однако многие, может быть, все же захотят выбрать такую работу, которая была бы более продолжительной, но более высоко оплачиваемой, и захотят платить за услуги, которые они не будут иметь времени оказать себе сами. С другой стороны, можно выбрать менее продолжительную работу, способствующую ведению гибкого стиля жизни, и соответственно предпочесть доставить себе удовольствие сделать что-нибудь

самому, чем платить другим за это. Заявляют, что намного больше времени будет тратиться на учебу, и не только ради повышения квалификации, но и на освоение новой техники на каком-либо виде работ.

Техника меняется так быстро, что идея обучения только один раз в начале карьеры является уже в значительной степени изжившей себя. Действительно, многие люди смогут фактически сменить две или три профессии в течение срока трудовой деятельности и еще большее число людей, вероятно, предпочтут заняться самостоятельным предпринимательством. По мере растущей доступности коммуникаций вполне возможно, что большинство людей двинутся из больших городов в малые и будут работать близко к дому (или даже на дому).

Тем не менее и здесь есть некоторые проблемы. Существовали такие цивилизации, как Древняя Греция, где не очень высоко ценился труд. Традиции современного общества имеют тенденцию поставить работу на центральное место, без чего многие посчитали бы трудным обходиться. Производственная деятельность имеет особенность усиливать структуру организации времени — когда этого нет, отсутствие ее представляет значительную нагрузку для большинства людей. Кроме того, производственная деятельность в современных условиях сопряжена с социальными контактами, создает определенную социальную среду, дает статус и престиж. Все это в противном случае потребовалось бы заменить.

Конечно, многие виды производственной деятельности требуют знаний и практического опыта, которые просто нельзя было бы получить, если работать в течение всего нескольких часов в неделю. Людям на таких работах требовалось бы работать дольше и, по-видимому, соответственно получать более высокое вознаграждение, может быть, вызывая негодование тех, для которых такие работы не доступны. Связанная с этим проблема распределения «богатства» в общем такова: если связь между трудом и благосостоянием полностью бы разрушилась, то возможные последствия этого трудно было бы предвидеть.

Дорога в будущее

В США объединенный профсоюз рабочих автомобильной промышленности договорился с предпринимателями о программах переподготовки, которые оплачи-

ваются компаниями и открыты для всех временно уволенных рабочих. Специальные соглашения были заключены с такими фирмами, как «Форд», «Интернейшнл Харвестер», «Мэк Тракс». Компания «Дженерал Моторс» организовала программу обучения стоимостью 10 млн. долл., оплачиваемую совместно со штатом Калифорния для 8400 рабочих, уволенных в связи с закрытием предприятий. Беспрецедентное соглашение было заключено компанией «Ниссан мотор компани» в Японии, согласно которому ни один работник не будет уволен с работы вследствие технических нововведений с гарантиями против понижения в должности или уменьшения зарплаты там, где необходим перевод на другую работу.

Как показывают приведенные примеры, между рабочими и предпринимателями возможны соглашения о взаимоудовлетворяющих гарантиях, с тем чтобы цели компании могли бы быть достигнуты без увольнений и сокращения заработной платы. Однако единственной очевидной дороги в робототехническое будущее не существует.

Глава 14

Управление роботизированными производствами. Робототехника и фирмы

Успехи и неудачи

Девиз «Автоматизировать или закрыть предприятия» не следует относить к двум взаимоисключающим возможностям. Почему в одних случаях применение роботов приводит к неудаче, а в других — приносит успех? Почему одни фирмы могут внедрять у себя роботы при поддержке рабочих, в то время как в других этот процесс сопровождается ожесточенным сопротивлением? Почему одни страны (такие, как Великобритания) вначале значительно отставали от других в роботизации производства? В этой главе попытаемся разобраться в этих и других подобных вопросах, но вкратце ответ на

каждый из них заключается в одном слове — «управление».

Поскольку широко применять роботы стали недавно, то сравнительно мал и опыт, которым можно было бы воспользоваться. К тому же и специальных работ по этому вопросу опубликовано очень мало. Тем не менее совершенно ясно, что само по себе решение применить роботы автоматически не приводит к успеху. Действительно, когда Совет по технической политике Астонского университета (Великобритания) провел анализ причин успеха и неудач в 40 фирмах, использовавших роботы, то обнаружилось, что лишь 56 % из тех 32 компаний, где действительно были применены роботы, сразу получили реальный эффект при изготовлении продукции. В 44 % случаев фирмы вначале преследовали неудачи, а половина из них и вовсе отказалась от роботов. Для тех же, кто «прикипел» к этому делу, осуществить роботизацию было в конечном счете значительно проще, чем предполагалось вначале.

Несомненно, что многие фирмы испытывают значительные трудности при внедрении роботов. При этом нелегко даже выявить общие для всех них проблемы. Технические трудности, по-видимому, встречаются как при успешном, так и при неудачном применении роботов.

Время их освоения обычно довольно велико и достигает двух лет. Отсутствие предшествующего опыта автоматизации, по всей видимости, представляет большую помеху для фирм, предполагающих осуществить роботизацию, и во многих случаях может привести к преждевременному «поднятию белого флага», когда первоначальный энтузиазм не вознаграждается так быстро, как хотелось бы.

83 % удачливых фирм, как следует из астонского анализа, уже имели свой опыт автоматизации, в то время как среди фирм-неудачниц этот показатель составляет 25 %.

Не только имеющаяся на предприятиях автоматизация облегчает применение роботов, но, вероятно, и предыдущий опыт позволяет управленцам и инженерам более правильно оценивать возможности роботов, а это означает также наличие там достаточно компетентных людей. Как и следовало ожидать, значительные усилия управленцев требуются лишь в период внедрения роботов. С окончанием этого этапа все снова входит в

обычное русло. Другими словами, при внедрении роботов действительно вся организация учится.

Как указывалось в предыдущей главе, рабочие не всегда оказывают сопротивление роботизации, и если такое случается, то, по-видимому, часто приводит к неудаче всего проекта роботизации. Как показывает практика, роботы у рабочих нередко вызывают интерес и любопытство, особенно если у рабочих есть гарантии сохранения занятости. Как бы то ни было, менеджмент кажется чрезмерно обеспокоенным возможностью отрицательного отношения рабочих к роботизации, и эти опасения в действительности могут стать значительно более важным сдерживающим фактором, чем собственно сама реакция рабочих. Тем не менее имеются и другие факторы, препятствующие роботизации, включая внутрифирменные организационные барьеры, например между подразделениями, ведущими НИОКР, и собственно производственными подразделениями, когда ежедневные текущие дела компании оттесняют на задний план проблемы долгосрочной программы роботизации. Можно отметить также и приверженность руководства к уже действующим системам и, что самое важное, отсутствие технических экспертов среди менеджмента. Некоторые аналитики рассматривают эту проблему как главный недостаток в таких странах, как Великобритания, проявляющийся в нереалистических запросах относительно характеристик роботов и их внедрения.

Некоторые фирмы с недоверием относятся к сложным методам оценки экономической эффективности внедрения нововведения и его последующей эксплуатации. Тем не менее, когда такие методы использовались, как показало астонское исследование, они почти всегда приводили к успеху. Таким образом, пренебрежение достаточно глубоким анализом экономической эффективности следует рассматривать как неблагоприятное обстоятельство. Другая часто встречающаяся трудность связана с отсутствием соответствующим образом подготовленного персонала, обладающего необходимыми знаниями механики, электроники и программирования. Поэтому обслуживание роботов может стать проблемой (несмотря на специальные меры по обучению), особенно когда вследствие нехватки специалистов хорошо подготовленным специалистам предлагают где-нибудь лучше оплачиваемую работу.

Существенной проблемой, способствующей вялой реакции крупных промышленных компаний, является структура самих компаний. По градиции в таких компаниях управление основано на многоуровневой иерархии управленческого персонала с конечным контролем, возложенным на главного руководителя компании и проходящим через несколько звеньев управления до самого цеха. Хотя такая структура не позволяет высшему руководству контролировать работу всей компании, хорошо известно, что необходимая дистанция между ним и нижними уровнями управления очень сильно затрудняет возможность соприкасаться с повседневными цеховыми проблемами. Этот процесс часто широко обсуждается.

К тому же связь между различными функциональными элементами иерархии (например, различными отделами) может быть довольно слабой. Возникающее в результате трение может послужить помехой для деятельности организации в целом. Таким образом, в то время как новая и динамичная компания (обычно с немногими уровнями управления) способна быстро реагировать на конъюнктуру рынка и быстро внедрять у себя роботы, более же крупной компании с большим числом уровней по вертикали намного труднее продемонстрировать такую же гибкость. Тем не менее в астонском исследовании огромным преимуществом роботизации считают усиление управленческого и технического контроля. Улучшение процесса контроля отмечено в 52 % успешных случаев роботизации. Кроме того, улучшилось качество и стабилизировался выпуск продукции. Эти улучшения связаны с исключением из производственного процесса фактора непостоянства работника, а также уменьшением зависимости от рабочих и уязвимости от возможных забастовок.

Необходимо отметить, что в исследованиях университета Кейз Вестерн Резерв указано на недостатки существующих методов оценок ожидаемого технологического эффекта нововведений в целом. Наиболее общим источником таких ошибок являются недооценка (часто значительная) времени, требуемого для достижения эффективной работы нового оборудования, переоценка среднего коэффициента полезного времени его использования и недооценка частоты необходимых его наладок в предшествующем и последующем этапах интегрированного производственного процесса.

Вы готовы к применению роботов!

Менеджмент все яснее осознает, что роботы могут повысить производительность труда и эффективность производства в целом, улучшить качество продукции, исключить опасную или непривлекательную работу и преодолеть нехватку рабочей силы. Однако, хотя некоторые первые примеры внедрения можно оправдать просто желанием приобрести опыт в робототехнике, роботы следует обычно применять только там, где они эффективны экономически. Выбор подходящих сфер применения, однако, не всегда очевиден, и бывают также периоды, когда несмотря на желание применнть роботы, компания в действительности должна подождать, пока не наступит более подходящее время для такого применения. Отдельно применяемые роботы редко экономически жизнеспособны, поскольку они могут потребовать таких же затрат на обучение, обеспечение эксплуатации и т. д., как и группа роботов. Кроме того, они способны обеспечивать *намного меньше* «скрытых выгод», чем несколько объединенных роботов. В таких случаях для компании, может быть, лучше подождать, пока появится подходящая возможность для применения *более* чем одного робота.

Современные роботы все больше будут находить применение для выполнения трудоемких и монотонных работ. Предпочтение будет отдаваться непривлекательным и опасным работам. Примеры многих таких приложений уже освещались в гл. 9 и 10. При рассмотрении конкретной сферы применения следует проанализировать специальные характерные признаки современных роботов: их способность точно манипулировать тяжелыми предметами (загружать печь топливом), следовать заданной траектории (окраска распылением или дуговая сварка), устанавливать детали в точные позиции (палетизация), быть легко перепрограммируемыми (малосерийная продукция) и т. д. Возможные задачи для робота должны быть вначале простыми, требовать небольшой модификации существующего оборудования и минимального дополнительного оснащения. По крайней мере в течение следующих двух лет не удастся осуществить эффективную комплексную робототехническую сборку в качестве первой области использования при условии, если компания не сможет «закупить» опытных специалистов.

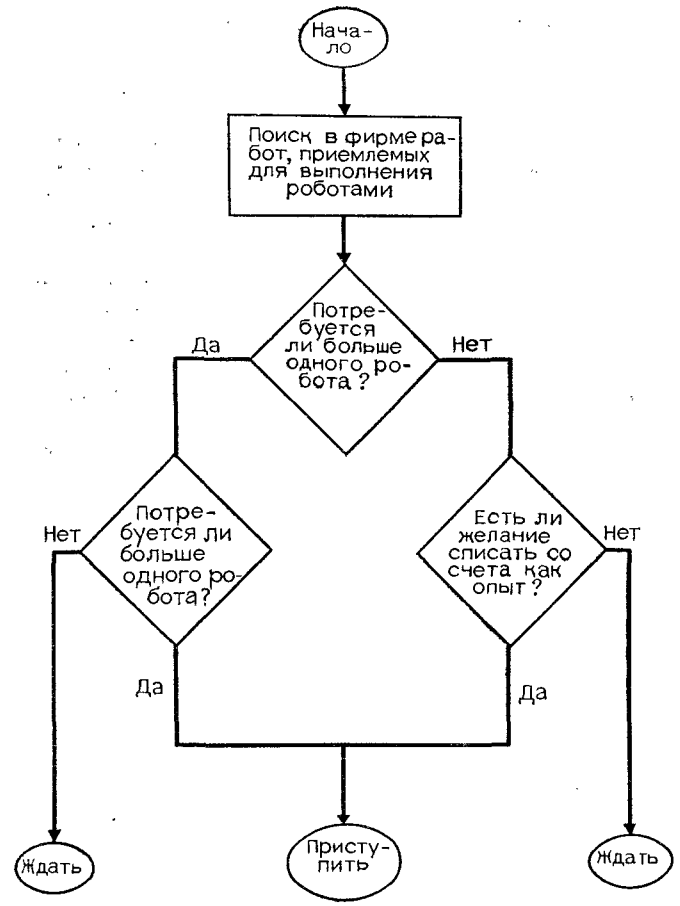

Рис. 49. Алгоритм принятия решения о роботизации

По-прежнему будет неэффективным использовать робот только в одну смену. Поэтому компания должна быть уверена в том, что она действительно сможет использовать роботы, которые она собирается закупить, по крайней мере в две смены в сутки (идеально в три). В действительности это редко стоит значительно дороже, чем использовать их в одну смену, но, конечно, должен существовать рынок сбыта для возрастающего в этом случае объема выпускаемой продукции, иначе вся эта затея становится бессмысленной. Ответив честно на все поставленные выше вопросы (здесь не следует

поддаваться чрезмерному энтузиазму), компания, изучающая возможность роботизации своего производства, наконец, может решить, действительно ли она вполне готова к внедрению роботов (рис. 49). С одной стороны, приступать фирме к роботизации без анализа — значит иметь шанс испытать разочарование в будущем. Не исключено, что все предприятие может обернуться дорогостоящей ошибкой, которая может сильно задержать будущую роботизацию компании, когда она, наконец, станет оправданной. С другой стороны, принять сверхконсервативные направления и не приступить к роботизации, когда это было бы благоразумно сделать,— значит дать соперникам определенное преимущество.

Вперед марш!

Как различается каждая компания, так различается и каждое робототехническое приложение. Тем не менее, конечно, можно предложить широкую всеобъемлющую стратегию, которой могло бы следовать руководство настолько, насколько оно посчитало бы подходящим для себя, при рассмотрении возможности роботизации.

Последовательность этапов, которую следовало бы пройти руководству, обычно остается постоянной для различных вариантов использования роботов, хотя значение различных этапов для различных компаний, вероятно, будет меняться.

Подход к применению. Этот этап *жизненно* важен, потому что идет *первым.* Момент, когда компания приступает к *рассмотрению возможностей* роботизации,— это время, которое характеризуется тем, что каждый, кого могла бы затронуть роботизация, должен принять участие в обсуждении. Не имеет значения, что руководство не желает вызывать суету из-за того, что мы рассматриваем идею только в экспериментальном порядке,— если имеется малейшая возможность внедрения роботов (и, конечно, есть, иначе зачем тогда тратить попусту время), то сейчас самое время начать унимать страхи. Тот, кто читал предыдущую главу, не может не знать о понятном интересе, который может вызвать раскрытие планов внедрения роботов. Интерес ведет к сопротивлению. Чтобы избежать такого сопротивления, нужно доверить рабочим свои тайны на самом раннем этапе. Если роботы в конце концов и не удастся внедрить, то кое-что все же будет достигнуто, рабочие оценят откровенность, которая была проявлена.

Как только каждый кто мог бы внести нечто хоть сколько-нибудь ценное в обсуждение, подключен к работе (и все согласны, что больше нет никого, кого следовало бы включить), тогда должен быть определен общий подход, который будет принят для оценки экономического эффекта и возможных областей внедрения роботов (рис. 50). Как и в любом крупном проекте, очень важно на этом этапе попытаться удостовериться в том, что существует твердое единое мнение о процедурах принятия решений, согласован бюджет, шкала оценок и т. д. Как только эти сложные вопросы будут сглажены (детали которых будут, естественно, специфичны для данной фирмы), то не только все будут понимать, каково значение каждого вопроса, но и общий подход, по которому принято решение, может, конечно, выступать как точка отсчета, относительно которой можно определять действительный прогресс.

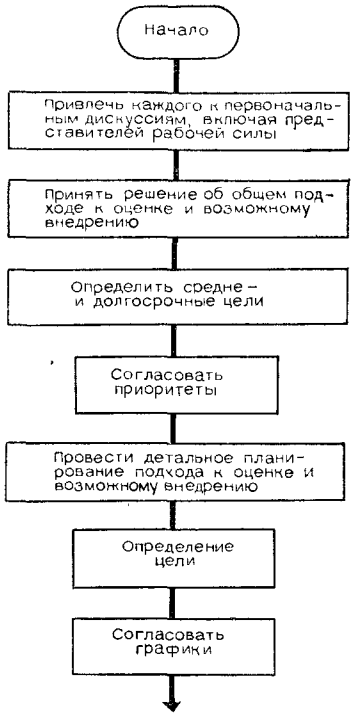

Рис. 50. Процедура роботизации

Интересно отметить, что японский процесс принятия решений включает единодушие большого числа людей, участвующих в дискуссиях. Автоматически это проявляется в ощущении обязательства к выполнению решения группы, таким образом исключаются многие возможные возражения, возникающие при выполнении. Кроме того, при большом числе участников меньше вероятности того, что ряд факторов останется незамеченным. Таким образом, создается атмосфера доверия, в которой могут быть выполнены главные решения.

Долгосрочные цели. Рассматривая вопрос о применении роботов, компания должна иметь ясное представ-

ление о своих средне- и долгосрочных целях, которые должны быть достигнуты. Робототехника не может всегда гарантировать обеспечение краткосрочных выгод, таким образом, следует рассматривать цели, не менее чем среднесрочные. В качестве таких целей может быть выдвинуто повышение производительности труда и эффективности, достигаемое в результате более высокой производительности отдельных установок, лучшего использования оборудования или уменьшения потребностей в рабочей силе. Иначе говоря, роботы можно рассматривать, как способ преодоления нехватки рабочей силы, улучшения качества продукции или сокращения числа трудовых инцидентов или случаев неудовлетворенности трудом путем исключения опасных и непривлекательных условий работы. Главная цель может состоять и в том, чтобы приобрести опыт применения роботов. Какие бы ни были цели, они должны быть согласованы всеми теми уровнями организации, которые участвуют в проекте. Иначе различные группы могли бы иметь различающиеся и, возможно, противоречивые приоритеты в роботизации.

Планирование. В этом пункте, в свете долгосрочных целей и согласованной процедуры внедрения роботов, есть смысл составить детальный план того, как будут выполняться оценки экономического эффекта внедрения. В частности, должны быть установлены плановая экономия труда и цели автоматизации, относительно которых может быть оценена последующая система отбора и конечной проверки. В то же время должен быть составлен детальный график, включающий в себя не только плановые сроки, но также и отобранный персонал, которому будет поручено провести роботизацию.

Понимание. Сейчас представляется важным систематизировать знания по робототехнике. Это включает в себя проверку различных характеристик роботов (особенно по сравнению с более привычными видами автоматизации), сфер применения, к которым они подходят лучше всего, и тех из них, которые уже «испытывались и проверялись». Никогда ни одна книга не сможет дать потенциальному пользователю достаточного представления о самых последних достижениях в технологии, полученных к той минуте, когда он взял в руки книгу. Поэтому он, конечно, должен посещать выставки, просматривать периодику по робототехнике и непосредственно получать литературу изготовителей.

При возможности потенциальному роботопользователю следует также попытаться воспользоваться опытом компаний, подобных его собственной, которые уже проследовали по дороге внедрения роботов. Существует много организаций, созданных для того, чтобы служить банком знаний и для новых, и для старых роботопользователей,— такие, как БАР и Американский институт по робототехнике. Подключение к такой организации откроет доступ к сокровищам практического опыта, полученного его членами, а также позволит быть в курсе информации о потенциально полезных семинарах, лекциях и выставках. Следует также помнить, что хотя непосредственный конкурент может быть практически даже и не заинтересован в передаче своего опыта, много можно получить просто из того материала, который эта компания опубликовала.

Приложения. Теперь можно подробно рассмотреть наиболее подходящие для компании приложения робототехники. Ясно, что делать это до того, как о них получены исчерпывающие сведения, было бы рискованно в связи с опасностью выбрать неподходящие. Следует подчеркнуть, что это положение остается верным даже и в том случае, когда приглашена консультационная фирма. Такая фирма может быть вполне независимой, но все больше промышленных компаний, в которых уже сформировались специалисты по робототехнике, благодаря установке роботосистем на предприятиях компании открывают доступ к своему опыту посредством консультаций. Кроме того, многие из более крупных поставщиков роботов могут сделать обзор бесплатно. Конечно, поставщики будут склоняться к своему собственному оборудованию, но на практике даже «объективные» консультационные фирмы отдадут предпочтение тем роботам, с которыми у них больше опыта работы.

Тем не менее никто не может знать больше подробностей о функционировании конкретного завода, чем компания, владеющая заводом. Таким образом, преимущество компании состоит в ее уверенности в том, что ни одна относящаяся к делу деталь не будет пропущена при выборе для нее областей применения роботов консультантами. *Не всегда* есть возможность воспользоваться услугами консультационной фирмы. Поэтому следует как можно быстрее начать узнавать о роботах. Есть подходящая поговорка на этот счет: «Поймать рыбу для голодного — значит накормить его на день;

научить его ловить рыбу — значит накормить на всю жизнь».

Потенциальные приложения следует рассматривать в свете того эффекта, который они могут дать в результате сокращения рабочей силы или улучшения качества продукции, усовершенствования технологии производства или рабочего оборудования, и учитывать, предопределяют ли они рост коэффициента сменности. Следует также рассмотреть и альтернативные варианты, такие, как применение людей-операторов, комплексная жесткая автоматизация или повторно используемые (но не робототехнические) устройства, действующие по принципу «взять-положить». Для широкомасштабной роботизации следует принимать решения, какой завод или заводы нужно автоматизировать, необходимо ли строить новый завод или можно реорганизовать существующие. Во всех случаях также будет необходимо рассмотреть, не могут ли изменения в проектах изделий, выпускаемых в выбранных приложениях, существенно облегчить проведение роботизации.

Потребности. Выбрав небольшое число подходящих приложений, необходимо определить потребности каждого варианта в отношении подходящего робота (или роботов) и дополнительного вспомогательного оборудования и человеческого труда. Сначала следует проанализировать технические требования к робототехническому оборудованию, включая точность, повторяемость, конфигурацию, число степеней свободы, рабочую зону, скорость, максимальную полезную нагрузку, тип рабочего органа, гибкость, легкость программирования, сложность управляющей системы, объем памяти, сенсорную обратную связь, систему интерфейса, бесшумность, защиту от неприятных воздействий и любые другие требования, такие, как пригодность для взрывоопасной окружающей среды.

Потом следует рассмотреть потребность в любых других станках и оборудовании, таких, как станки с ЧПУ, конвейеры, ручной мелкий инструмент и другие приспособления, необходимые в дополнение к роботу. В некоторых приложениях (загрузка существующих станков) потребность в дополнительном оборудовании будет очень мала, в других (сборка роботами) она может составлять главную долю расходов. Наконец, должна быть оценена потребность в рабочей силе. Применение роботов может потребовать обслуживающего персонала, сведущего в механике, электронике, гидравлике и пневматике, и решение должно приниматься в соответствии с техническим уровнем предприятия. Использование роботов потребует также программистов и операторов, и если процесс полностью не автоматизирован, ручной труд все еще будет нужен для работы бок о бок с роботами.

Возможный эффект. Получив точную картину, какой из себя будет потенциальная робототехническая система, есть смысл рассмотреть, что подразумевается под роботизацией. Требования к повышению точности, надежности и непрерывности на предшествующих этапах производства могут создать определенные трудности и, вероятно, в этом случае должны быть обеспечены специальные буферы. Те же самые черты могут иметь огромное преимущество в дальнейшем производственном процессе. Чтобы удовлетворять требования предложенной робототехнической системы, может быть, придется полностью перепроектировать продукцию, стандартизировать ее или просто сделать более совместимой. Кроме того, применение робототехнической системы для производства может позволить соединить ее и с другими производственными системами и также с САПР, возможно, ускоряя создание полной системы КАД-КАМ (САПР-АСУТП).

Конечно, при внедрении роботов возникают и другие явления. Многие компании используют роботизацию в рамках стратегии маркетинга, надеясь таким образом создать образ прогрессивной компании с наукоемкой технологией. Подобным образом изменения в проекте и улучшенная надежность продукции могут существенно повлиять на конкурентоспособность фирмы и ее способность к сбыту продукции. Вполне вероятно, что внедрение роботов внутри компании может привести к перемещениям рабочей силы и даже сокращению штатов. Реакция профсоюзов будет в значительной степени зависеть от методов, которые будут применяться для этой цели как в местном, так и в национальном масштабе.

Поставщики. В принципе существуют три различных подхода к приобретению современных роботосистем, которые все больше различаются между собой в связи с увеличением их сложности. В соответствии с первым способом пользователь приобретает всю систему по единому контракту. В этом случае требуется лишь небольшая бригада специалистов, но полное доверие к

поставщику при дополнительных неудобствах, заключающихся в том, что пользователь склонен отказываться от ответственности в то время, когда для него жизненно важно, чтобы он был более чем когда-либо сведущ в том, что делается.

В другом случае можно закупить отдельные части системы (робот, визуальную систему и т. д.), после чего большая внутризаводская бригада их скомплектует.

Такой подход становится все больше непопулярным, потому что немногие компании держат у себя необходимый дополнительный штат. Может оказаться, что очень трудно выдержать сроки выполнения проекта. Управление крупномасштабным проектом с непривычной техникой может оказаться тяжелым предприятием, и к тому же в конце концов пользователь должен взять на себя полную ответственность за каждую ошибку, сделанную системой.

Получающий все большую популярность компромисс между двумя рассмотренными выше случаями состоит в том, чтобы создать небольшую бригаду, которая составит подробную спецификацию требуемой роботосистемы, а затем разместить небольшие самостоятельные контракты на различные модули системы, оставив за собой общее управление. В таких случаях при выборе поставщиков очень важно соблюдать осторожность, так как они должны не только не недооценивать сложность задачи, но также и строго придерживаться принятой спецификации (сопротивляясь соблазну произвести изменения, чтобы «было полегче»), если их работа заключается в том, чтобы успешно объединить модули, поставляемые другими поставщиками. На практике же часто лучше просто дать потенциальным поставщикам только жесткую спецификацию требований к производственным показателям будущей системы, чем заставлять поставщика выполнять замыслы пользователя, касающиеся того, как реализовать эти требования. Это позволяет поставщикам проявлять изобретательность, полученную из опыта в конкретной области с тем, чтобы даже прийти к новым решениям проблем.

Стоимостный анализ затрат и эффективности. Провести детальный анализ экономической эффективности предстоящей роботизации можно только тогда, когда представлены на рассмотрение заявки на подряд. Это такой важный этап, что в этой книге ему посвящена целая 16-я глава. Метод, используемый для оценки экономической эффективности, будет очень сильно зависеть от того, какие методы бухгалтеры компании сочтут наиболее подходящими для начисления амортизации роботов (со сроками службы, вероятно, более десятилетия) и оставшегося специального дополнительного оборудования, которое может быстро морально устареть.

Кроме того, было бы неразумно не принять в расчет некоторые косвенные выгоды роботизации, такие, как присущая роботам гибкость за их долгий срок эксплуатации. В общем только высшее руководство будет в состоянии оценить перспективный эффект роботизации в рамках общей стратегии компании и, таким образом, высшее руководство должно не просто ознакомиться с представленными ему оценками эффективности капиталовложений, а активно участвовать в их составлении. Это подразумевает необходимость вхождения в состав высшего руководства нескольких высококвалифицированных специалистов. В издании «ФМС Рипорт»[1], выпускаемом компанией «Ингерсол инженирс», констатируется, что нельзя больше мириться с тем, чтобы спецификация и экономическое обоснование для разработки нового оборудования делались на низших уровнях, оставляя старшему руководству решение соглашаться или отвергать их. Руководство должно участвовать в процессе анализа и обеспечивать управление этим процессом. Следует отметить, что крупные японские фирмы направляют большие капиталовложения в соответствующее образование и обучение кадров на всех уровнях управления.

Также нужно отметить, что финансовая поддержка от правительства (в форме субсидий) помогает уменьшить экономический риск фирмы. Действительно, в исследовании, проведенном Стратклайдским университетом (Великобритания), установлено, что некоторые управленцы считают, что гибкие производственные системы без правительственных субсидий представляли бы неэффективное предприятие из-за требуемых высоких капитальных вложений.

Детальное планирование. Проблемы, касающиеся совместимости модулей систем, особенно часто встречаются в сферах управления и программного обеспечения. Визуальная система сама по себе может хорошо работать,

[1] FMS (Flexible Manufacturing System) — гибкая производственная система.

но она бесполезна, если недостаточно хорошо стыкуется с программой, управляющей роботом. При работе с поставщиками нужно тщательно следить, чтобы они не интерпретировали неправильно спецификации. Так как любой отдельный поставщик может быть способен разрушить всю программу, не стоит жалеть времени и затрат, чтобы попытаться предотвратить такую ситуацию посредством наблюдения. Это может вылиться в сильно сокращенные конечные сроки подготовки системы к работе. Еще больше времени можно сэкономить, если все важное оборудование и программное обеспечение будут проверяться и утверждаться у поставщика перед отправкой пользователю. Необходимо подчеркнуть, что общий успех будет во многом определяться качеством и количеством работы по планированию, тем не менее требуемое время почти всегда в основном недооценивается.

Обучение. Как упоминалось выше, подготовка и обучение основам робототехники руководства становятся все более необходимым, хотя и чрезвычайно дорогим требованием успешного проведения крупной роботизации. Как заявил один руководитель: «Если вы считаете, что оборудование дорого — спросите цену невежества!»

Подразделение университета Сассекс (Великобритания) заявило, что высшее руководство испытывает потребность в овладении инженерными навыками, необходимыми для взаимодействия с руководством проектировщиков и производственников, а также с инженерами с целью разработки скоординированной стратегии автоматизации.

Однако на более низком уровне — для многих небольших и средних компаний — задача найти достаточное число квалифицированных специалистов по робототехнике может представлять определенные трудности. Тем не менее когда поставщик роботов перестает обслуживать гибкую систему изо дня в день, компания должна найти таких людей, если есть необходимость в том, чтобы поддержать свою систему на оптимальном уровне. Единственный выход компании — обучить свой собственный персонал, в идеальном случае планы подготовки специалистов по робототехнике должны составляться одновременно с планами роботизации.

Подготовку кадров по робототехнике следует осуществлять, используя заводской персонал, но в действительности часто необходимо для этой цели пользоваться

услугами поставщика роботов, так как он обладает уникальной информацией, опытом и возможностями. В этом случае очень важно, чтобы был подготовлен согласованный документ по «детальным целям обучения». Это соглашение должно точно и подробно определять, что ожидается в данный период времени как от обучаемых, так и от преподавателей. Обучение следует строить, используя предварительно подготовленную систему целей, так, чтобы была уверенность в том, что если специалист успешно прошел курс обучения, значит, он действительно соответствует требуемому уровню квалификации.

Такие планы успешно использовались филиалом «Форд мотор компани» в Дагенхеме (Великобритания), которая отмечает выгоду как для пользователя, так и для поставщика, так как если в последующем произойдет сбой в работе обученного персонала, те и другие знают, что подготовка была хорошая и, таким образом, пользователь роботов должен искать причину в чем-то другом. Иначе при каких-либо неполадках очень легко всю вину свалить на недостаток знаний или навыков. Конечно, уровень требуемой подготовки будет зависеть от отношения к ней рабочих. Часто бывает непрактично полагаться на контракт по обслуживанию с поставщиком роботов. Поэтому многие компании попытаются полностью самостоятельно подготавливать заводскую бригаду обслуживающих рабочих. Тем не менее даже когда такой уровень подготовки не нужен, существует потребность в том, чтобы каждый рабочий, который, вероятно, войдет в контакт с роботом, по крайней мере знал, как его выключить и предпринять другие экстренные меры. Охрана труда может быть существенно улучшена благодаря хорошей подготовке.

Глава 15

Опасно — робот работает (не работает). Охрана труда и надежность

Проблемы охраны труда

Ничего не подозревающая жертва (рабочий) беззаботно приблизилась к сварочному роботу. Когда он стал объяснять, как работает робот, двум своим друзьям, он

не мог почувствовать приближение робота-оператора к отдаленному пульту управления, не осознал, что никто не удостоверился, находится ли кто-нибудь в рабочей зоне. Ничего не почувствовал и робот, когда он сокрушил грудь и верхнюю часть брюшной полости жертвы.

Где-нибудь в другом месте потенциальная жертва — рабочий обнаружил неисправность в одном из фрезерных станков, обслуживаемых роботом, и сам решил ее устранить. Он аккуратно отключил робот от станка, осторожно вошел в опасную зону и затем стал быстро работать на станке вручную. Робот стоял неподвижно. Наконец, станок заработал как надо. Еще одна работа сделана хорошо. Теперь все должно отлично работать. Все ли? Он снова подсоединил робота к станку. В тот же момент ожидающий робот раздавил жертву, стоявшую между его рукой и фрезерным станком.

Эти два случая действительно имели место. Сами роботы, конечно, не представляли собой машин, зловеще терзающих свои жертвы. Но трагедии могло бы и не быть, если бы рабочие помнили об их существовании. Следует культивировать здоровое уважение к машине, которая может поворачиваться кругом с полезной нагрузкой в несколько сотен килограммов со скоростью свыше одного метра в секунду. К началу 80-х годов в действительности только два человека были убиты промышленными роботами, но в 1983 г. в США суд вынес решение о выплате компенсации семье рабочего, убитого АУТ, в размере 10 млн. долл. (6 750 000 фунтов стерлингов). Число несмертельных несчастных случаев, происходящих по «вине» роботов, в точности неизвестно, так как часто они специально нигде не фиксируются.

Хотя ранее и отмечался вклад роботов в дело выведения людей из опасных рабочих зон, всегда нужно помнить, что они являются хотя и могущественными, но пока еще глупыми помощниками человека. Они могут бессмысленно выполнять последовательность команд, не отдавая себе отчет, что они устраивают беспорядок. Подобным образом они могут «взбеситься» из-за неисправности в электронике или механике или несоответствия программного обеспечения. Конечно, это представляет не только физическую опасность для рабочих, что наиболее важно, но роботы также несут угрозу продукции и оборудованию, с которыми они работают, и самим себе.

Роботы обладают особыми характерными особенностями, которые делают их опасными. Для начала, робот может непредсказуемо двигаться во всей трехмерной рабочей зоне, значительно превышающей его собственный объем, в отличие от других машин, которые обычно работают в предсказуемом режиме в пределах пространства, ограниченного самой машиной. Движения роботов могут быть столь сложны (особенно, если используется сенсорная обратная связь), что даже оператор робота не может сказать, каким будет следующее его движение. Особенно непредсказуемыми движения бывают, когда робот двигается от конца цикла к началу или же переходит к новому циклу или же, теряя мощность, двигается к своему начальному положению.

Робот может показаться «отключенным», хотя в действительности он лишь ожидает сигнала датчика. Сварочные роботы могут внезапно зажечь дугу без сигнала предупреждения, который дает сварщик, когда он опускает на глаза щиток.

В программе обучения фирмы «Крайслер» особо подчеркивается опасность, которую может представлять кажущийся отключенным робот: инструктор предварительно программирует задержку в несколько минут, после чего робот должен начать выполнять заданную работу. Во время обучения инструктор ходит по всей рабочей зоне (посматривая, однако, на свои часы!) и таким образом вызывает у обучаемых ложное ощущение безопасности. Сразу после того, как он будет в безопасности, робот внезапно начинает интенсивную деятельность, этим наглядным примером подчеркивается важность рассматриваемого вопроса.

В дополнение ко всем вышеназванным проблемам охраны труда хотя и делаются многочисленные попытки отделить роботов от людей, возникают такие обстоятельства, как программирование, обслуживание, установка заготовки и замена инструмента, когда человек должен войти в рабочую зону робота, хотя в некоторых случаях даже невозможно отключить от робота энергию! Тем не менее в дополнение к любым моральным обязательствам обеспечить защиту своих рабочих в различных странах вводятся соответствующие законы. Интерпретация юридических положений может быть весьма спорной, потому что такие понятия, как «надежное ограждение» и «опасность», могут по-разному толковаться. На практике проверка на опасность часто

включает в себя рассмотрение того, что резонно можно предвидеть в смысле человеческого и машинного поведения. Обычно невозможно полностью исключить любую вероятность опасности, но следует сделать «разумную» попытку сбалансировать возможность и серьезность несчастного случая с временем и затратами на его предотвращение. Одним словом, требуется сочетание безопасности и эффективности.

Решения по охране труда

На ранних этапах роботизации пользователи редко принимали в расчет опыт безопасной работы с роботами, полученный вне их организации. Кроме того, заводские инспекторы в значительной степени были не на высоте положения, в одних случаях настаивая на чрезмерно сложных мерах безопасности (таким образом рискуя экономической обоснованностью), в других — требуя слишком мало. Поскольку сейчас имеется в распоряжении больше практического опыта, возможно рассмотреть некоторые направления, которые действительно могут лучше всего подходить для минимизации риска.

Ограждения. Один из наиболее привычных подходов к обеспечению безопасности в робототехнике заключается в использовании **замкнутого ограждения.** Такие системы окружают рабочую зону робота оградой, в которой есть входная дверь. Ограда обычно достаточно высока, чтобы люди не смогли через нее перелезть, а дверь, как правило, можно открыть только после того, как от робота отключена энергия и робот не сможет возобновить работу до тех пор, пока дверь снова не будет заперта. Если при эксплуатации возникает необходимость провести какую-то работу, то кто-либо может войти в рабочую зону и взять с собой ключ от двери, существующий в единственном экземпляре, не опасаясь, что робот начнет случайно действовать. Такие простые мероприятия, вероятно, позволили бы предотвратить два несчастных случая, упомянутых в начале этой главы. Тем не менее можно привести различные примеры того, когда возведение ограды вокруг объектов, считавшихся опасными (практика, мало изменившаяся со средних веков), оказывалось неэффективным. В одном случае детали покидали рабочее место робота на

палетах, поэтому для их выхода был оставлен большой проем в ограждении, а во время функционирования робота оператор регулярно заходил в рабочую зону именно через него, предпочитая его двери в ограждении.

Программирование. Однако не следует забывать, что бывают обстоятельства, когда человек должен работать в непосредственной близости от движущегося робота. Программирование представляет собой наибольшую опасность из всех возможных операций при работе с роботом. И действительно, в ряде обзоров программирование определялось как деятельность, в результате которой получение увечий, нанесенных роботом, наиболее вероятно. Безопасность программистов тогда зависит как от правильной работы робота, так и от соблюдаемых мер предосторожности.

Пока операция обучения робота посредством **дистанционного управления** остается наиболее обычной формой программирования, главный вклад в обеспечение безопасности в робототехнике можно получить за счет тщательного проектирования размещения устройств управления. Тщательное применение принципов эргономики может уменьшить число ошибок оператора, а также ограничить влияние тех ошибок, которые неминуемо произойдут. Очень важно, чтобы оператор никогда не путался, в каком направлении будет двигаться рука робота, когда действует управляющее устройство, какой бы ни была позиция руки. Предпочтительно, чтобы для непрерывной работы всех управляющих устройств требовалось постоянное давление пальца, так, чтобы без него машина намертво останавливалась.

Максимальная скорость, с которой робот может двигаться во время программирования, должна быть существенно ниже нормального значения (вероятно, только 10 %), и в идеальном случае такое снижение скорости должно происходить автоматически. Однако правильная скорость обучения в действительности зависит от конкретного рабочего места робота. Когда управление роботом передается от главного пульта управления к обучающему устройству, важно, чтобы передача была полной, так, чтобы никто на главном пульте не смог воздействовать на робот во время работы программиста. Таким же образом предпочтительно, чтобы для передачи управления использовались некоторые формы блокировки (такие, как одновременное нажатие кнопок как на пульте, так и на обучающем устройстве), так,

чтобы не могла произойти передача управления при случайном ударе по переключателю.

Дополнительную защиту можно обеспечить, ограничивая сектор, в котором может двигаться робот, и таким образом исключая вынос его руки из желаемой рабочей зоны. Лучшим способом для этой цели в настоящее время является использование физических конечных упоров, но только как последнее средство ограничения после того, как окажутся недостаточными другие защитные меры, например постоянная проверка, заложенная в программу и осуществляемая контроллером так, чтобы положение робота оставалось в определенных границах, а его рука не выходила бы из заданной зоны. Кроме того, в многоруких системах часто имеет смысл устроить так, чтобы при программировании могла двигаться только одна рука.

Размещение оборудования. Размещение оборудования может драматически повлиять на степень риска. Хотя во многих приложениях робототехники нет необходимости в совершенно новой планировке, поскольку роботы устанавливаются для обслуживания станков, которые уже размещены, тем не менее этот вопрос следует подробно рассмотреть. Максимальный вынос руки робота не должен быть слишком близким к периметру ограждения, стен и колонн, поскольку оператор может попасть в ловушку или быть раздавленным, всегда должно быть пространство, чтобы в худшем случае быть отброшенным (рис. 51). Подобным образом все точки захвата деталей должны рассматриваться как точки потенциальных ловушек. Действительно, можно устроить так, чтобы программист стоял на максимальной досягаемости руки робота, минимизируя, таким образом, риск несчастного случая.

Такие простые меры, как вывешивание предупреждающих знаков и разметка на полу зоны действия робота, могут заставить оператора обратить внимание на потенциальную опасность, так же как это сделают перила. Вспыхивающий свет должен показывать, что неподвижный робот тем не менее не отключен, ожидает, чтобы выполнить заданную серию команд. Можно также заставить звучать звуковой сигнал в начале каждой операции, но на практике в скором времени привыкают к шуму и не реагируют на него.

Очувствление. Все более усложняющееся очувствление роботов может использоваться для целей охраны

труда, хотя адекватность таких систем должна быть высокого порядка. Из-за того что обычно невозможно обеспечить, чтобы такие системы были действительно **безопасны** при отказах, при их использовании необходимо проявлять осторожность. Хотя «коврики давления», которые останавливают робот, когда кто-нибудь на них наступил, могут представлять дополнительные меры предосторожности, их нельзя использовать вместо физического барьера. Подобно этому, ультразвуковую и телевизионную аппаратуру можно использовать только в качестве добавочной защиты, особенно для тех, кто должен работать в непосредственной близости от робота, но не как «основную оборону» от рабочих, случайно входящих в рабочую зону роботов. Различные устройства очувствления становятся экономически доступными для целей охраны труда, включая устройство, огораживающее рабочую зону робота «занавесом» инфракрасного света, при перенесении которого робот останавливается. Компания «Дженерал Моторс» разрабатывает

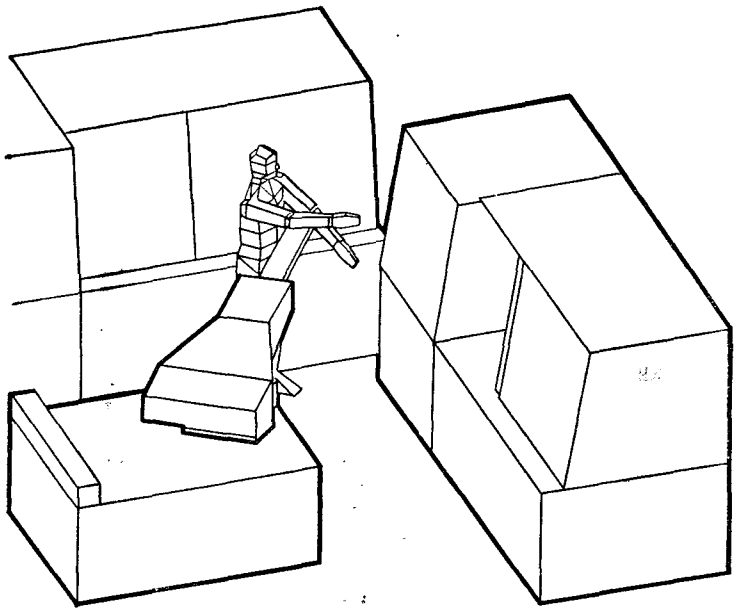

Рис. 51. Схема, вычерченная компьютером по программе, разработанной в Ноттингемском университете (Великобритания), с целью избежать столкновения

новую систему, которая обнаруживает изменения в электрической емкости, вызываемые близкими объектами, и таким образом останавливает робот, если он приближается к рабочему или другому препятствию на расстояние в несколько сантиметров. Однако такие мероприятия можно применять только в относительно «чистой» окружающей среде — иначе летающие частицы могут вывести систему из строя.

Управление. Элементы управления робототехнической системой должны быть надежными благодаря использованию только полностью испытанного программного обеспечения и надежных, высококачественных технических средств. Робот может начать странно себя вести просто из-за резкого подъема напряжения в электросети или из-за попавшей в компьютер пыли. Таким образом, при проектировании управляющего устройства большое внимание нужно уделить защите против влияний окружающей среды, таких, как пыль, высокая температура, вибрация и электрические помехи. Эксплуатация робота на заводе с высокой температурой окружающего воздуха, вероятно, вызовет неустойчивую работу робота из-за перегрева управляющего устройства, если не будет применено соответствующее охлаждение.

Особая проблема возникает тогда, когда шкаф управления открыт для обслуживания, так что обычная охлаждающая система оказывается недостаточной. Радиопомехи также могут превратиться в проблему (особенно когда открыт шкаф), так что радиопереговорные устройства и информационные звуковые системы не должны работать рядом с роботом. В дополнение ко всему микропроцессор, память и системы интерфейса должны в идеальном случае постоянно автоматически обследоваться на предмет неисправности, вся электронная система должна соответственно обслуживаться и, самое главное, тщательно оберегаться от неразрешенного применения.

Во время движения робота управляющее устройство должно постоянно следить за рукой, определяя отклонения от нормального режима в отношении положения и, возможно, также скорости. В результате будут обнаружены ошибки, вызванные неправильными электронными сигналами, неисправностями внутренних датчиков или же отказами системы привода, возникшими из-за неисправности сервоклапанов, насоса или перерыва в подаче энергии.

Даже простые контроллеры, действующие «от точки к точке», могут отслеживать движения посредством измерения интервалов времени, необходимых для выполнения каждого движения, и последующего сравнения с теми, которые фактически получаются.

Персонал. Все рабочие, которые будут связаны с внедрением роботов, должны в дополнение к своей основной подготовке быть полностью информированы об опасностях работы и соответствующих мерах предосторожности, которые они должны принимать. Должны быть определены способы энергичных действий в аварийных условиях, обеспечивающие безопасность системы, эксплуатацию, осмотр и последующий ее запуск. Рабочие должны быть проинструктированы о недопустимости нарушения правил охраны труда (например, пролезание в дыру в ограждении, а не использование менее удобной блокировочной двери). Подобным же образом не должно быть самовольного доступа к работе, а сам доступ должен определяться скорее необходимостью, чем удобством. Кроме того, жизненно необходимы «освежающие память» курсы для того, чтобы напомнить персоналу о тех приемах, которые они забыли, и подготовить новый персонал, который пропустил первоначальный курс. Поскольку основное техобслуживание роботов проводится редко, не удивительно, что некоторые из мер безопасности между периодами обслуживания будут забыты.

Проектирование. Сами роботы не должны проектироваться с острыми гранями, а если они имеются, то их следует обложить чем-либо мягким. Другие источники опасности содержат в себе выступающие рычажные механизмы, не закрытые ограждениями моторы и трансмиссии и свободные кабели трубопровода. Захваты должны быть так спроектированы, чтобы в случае отключения энергии они не выпустили бы предмет — никто не хочет, чтобы 100-килограммовая болванка свалилась на него в темноте! Подобным же образом должно быть сделано так, чтобы во время внезапного резкого ускорения предмет не выскользнул из захвата. Пульты управления должны быть так спроектированы, чтобы были легко доступны только те органы управления, которые обычно требуются для работы с роботом; другие должны быть спрятаны под прозрачными чехлами с тем, чтобы предотвратить случайное пользование ими.

Наконец, большие красные кнопки «аварийной остановки» должны быть размещены по крайней мере на пульте и на обучающем устройстве и должны быть совершенно надежны. Было бы хорошо, чтобы такой механизм остановки не был в действительности выключателем энергии, а был бы способным как бы «замораживать» систему. В некоторых случаях отключение всей энергии от робота могло бы действительно привести к несчастному случаю. Например, рабочий, просто попавший в ловушку робота, мог бы быть раздавленным, если бы отключение всей энергии вызвало опускание руки под действием массы полезной нагрузки.

Предпочтительно, чтобы был некоторый очень очевидный механизм аварийной остановки по всей рабочей зоне робота (вероятно, подобно «проводу связи» в некоторых поездах), который можно было бы привести в действие из любой позиции, даже если нет под рукой обучающего устройства. Как раз важно, чтобы рабочие, находящиеся вне ограждения робота, тем не менее могли бы отключить робот, если они увидят своего коллегу в беде.

Трагедия одного из несчастных случаев с роботами заключалась в том, что система управления была такой, что находящиеся поблизости рабочие не были в состоянии остановить робота, наносившего увечья их коллеге.

Надежность

Несмотря на опасения, роботы продемонстрировали, что они действительно могут быть надежными даже во враждебной для них окружающей среде и что даже, когда они выходят из строя, диагностическая техника позволяет быстро определить дефект и затем устранить его. При проектировании высоконадежных роботов возникают проблемы, связанные с тем, что окружающие среды, в которых должны работать идентичные модели роботов, могут очень сильно различаться. Тем не менее за два десятилетия определены различные параметры, которые предлагают соответствующее направление для проектирования роботов.

Многие роботы вынуждены работать в окружающих средах, потенциально вредных для них, таких, как пары алкоголя-аммония при литье, которые могут привести к осложнениям, разрушающе воздействуя на контакты включателей, зубчатые передачи и подшипники. Таким же образом термообработка часто приводит к раскаленной, влажной, насыщенной солями атмосфере, создающей благоприятные условия для коррозии. При точечной сварке разлетаются в стороны частицы расплавленного металла, некоторые из которых могут попасть на поверхности робота, точно так же может вылетать металлическая окалина из формы при литье.

Другая группа проблем окружающей среды связана с увеличением опасности, вызываемой присутствием самого робота. Они включают в себя работы, выполняемые рядом с открытым пламенем (которое может вызвать большой пожар, если из гидравлического робота просочится воспламеняемое сервомасло), и покрасочные работы (в которых искра, вызванная роботом, может воспламенить летучий растворитель красок).

Дополнительные проблемы для надежной работы могут возникнуть из-за ударов или вибрации (например, от кузнечного молота), электрического шума и помех (от электросварки и запуска тяжелых станков) и нагрева (от печи и подобных устройств).

Чтобы при таких условиях поддерживать надежность роботов на высоком уровне, приняты различные стратегии проектирования. Из-за высоких температур, которые могут встречаться, серво- и электрические устройства часто убираются с концов рук робота. Таким же образом узел управления роботом лучше всего размещать подальше от самой руки, избегая излишней вибрации, электрического «шума» и коррозионной атмосферы. Он должен быть полностью защищен от любых колебаний напряжения в энергосети.

Если атмосфера сильно насыщена пылевыми частицами, то вместо воздушного лучше использовать водяное охлаждение, но весь воздух должен быть очищен и внутри робототехнических систем должно поддерживаться положительное давление, с тем чтобы воспрепятствовать вторжению пылевых частиц. Все открытые сочленения должны быть закрыты оболочкой, с тем чтобы защитить их от абразивной пыли, так как немного пыли обязательно все же проникает внутрь. Для предотвращения возгорания все покрытия робота должны быть невоспламеняемыми. То же самое относится к применяемой смазке и гидравлике. Использование воспламеняемых жидкостей карается денежным штрафом, с тем чтобы применение их не стало нормой.

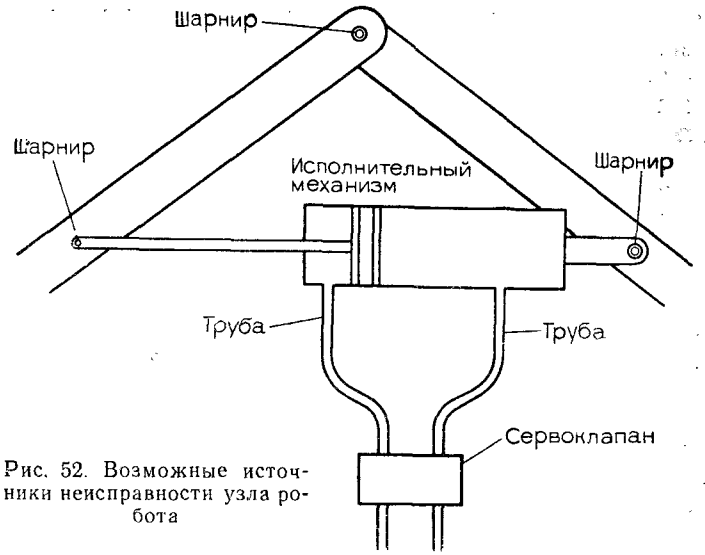

Рис. 52. Возможные источники неисправности узла робота

Показатели фактической надежности обычно представляют собой **среднее время между отказами** (СВМО) и **среднее время, требуемое для ремонта** (СВТР). Оба эти показателя важны, так как нет смысла указывать (в рекламных проспектах, например) очень длительное СВМО при неприемлемо большом СВТР, если действительно случится повреждение. На практике промышленность заинтересована в определенном соотношении между фактическим временем работы робота и временем его простоя. Опыт показывает, что относительное время работы робота, которое может удовлетворить большинство покупателей, должно по крайней мере равняться 97 %. Так, фирма «Юнимейшн» стремилась к 400-часовому СВМО для своих 2000 серий, допуская время простоя из-за отказа 8 ч (что соответствует 98 % относительного времени работы).

Изготовители роботов могут оценить надежность своих машин с помощью такой, например, методики, как разрабатываемая сейчас в Государственном колледже в Лондоне. Используя данные о степени повреждений отдельных частей, составляющих робототехническую систему, и зная, как взаимосвязаны различные дефекты, можно определить общую вероятность отказа всего робота. Так, например, схематически представленный на рисунке узел робота (рис. 52) может выйти из строя

из-за поломки либо исполнительного механизма, либо одного из шарниров. Поломка шарнира является основным дефектом, которому можно приписать независимую вероятность. Поломка исполнительного механизма в свою очередь может быть вызвана выходом из строя шланга гидро- или пневмопривода (основной дефект), или поломкой в конструкции исполнительного механизма, или неисправностью клапана. Хотя оба эти фактора могут быть отслежены и дальше, на практике им можно непосредственно приписать независимые вероятности отказов. Часть дерева типовых ошибок для робота (разработанного в Государственном колледже) показана на рис. 53 (символ «*OR*» означает, что неисправность выше него может быть вызвана любой из неисправностей, показанных ниже него).

Конечно, отказы могут быть связаны как с программным обеспечением, так и с самими техническими средствами. Поэтому в расчетах надежности все больше следует учитывать адекватность используемого программного обеспечения. Поскольку с усложнением аппаратуры повысилась, к счастью, и ее надежность, то используемые теперь управляющие устройства роботов повышенной сложности не вызывают больше тех опасений за надежность, которых можно было бы ожидать. Тем не менее, хотя способы **исключения отказов** как в электронной, так и в механической составляющей (за счет высоконадежных элементов и конструкций с целью минимизировать вероятность отказа) пригодны для большинства работ, выполняемых роботами, будущие сферы применения, такие, как работа в космосе, потребуют дополнительных подходов, поскольку никакая методика повышения надежности не может полностью исключить отказы.

Такие системы должны допускать возможность частичных повреждений, но таким образом, чтобы система работала даже при повреждениях. Необходимо использование датчиков для слежения за состоянием робота (включая и его основные датчики) в таком подходе. Обеспечение устойчивости функционирования при частичных отказах включает в себя обнаружение повреждений, локализацию повреждений (с тем чтобы ограничить ущерб до минимума), за которыми следует восстановление повреждений. Обычно восстановление осуществляется за счет предусмотренного запаса прочности системы, что позволяет отключать поврежденный

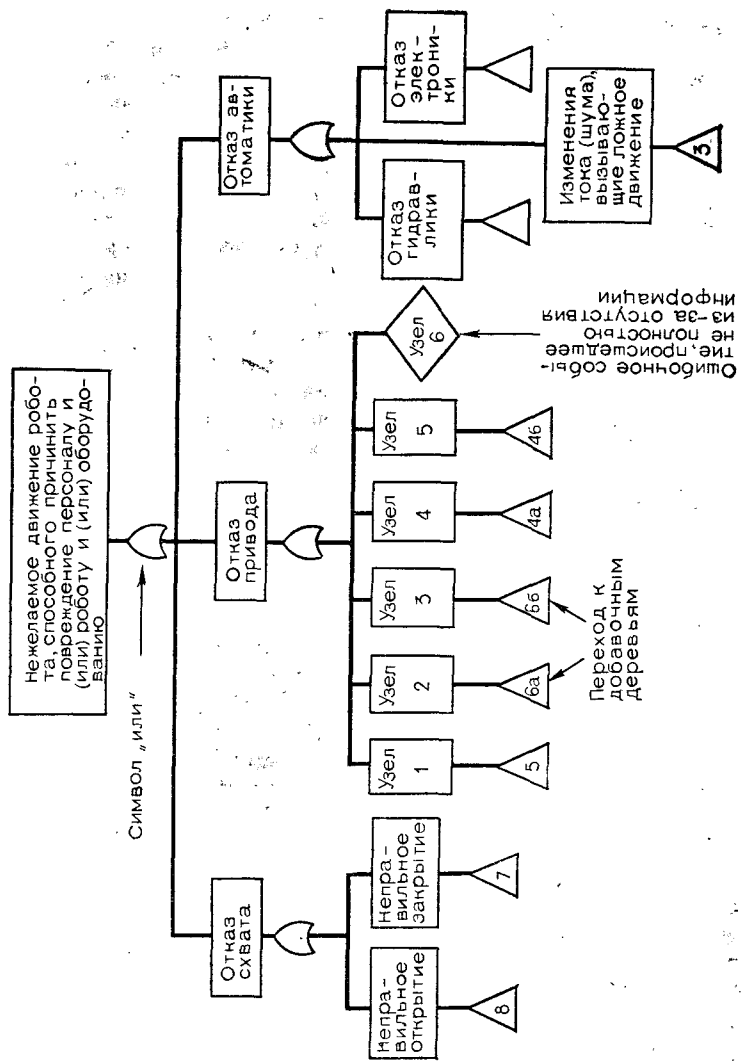

Рис. 53. Пример схемы возможных неисправностей робота

элемент, подсистему или всю систему и заменять их запасным экземпляром. Для фактического ремонта поврежденного модуля, конечно, со временем будет использоваться другой робот. Это, вероятно, будет в конечном счете значительно более практично (по крайней мере для механических частей робота), чем предусматривать большой запас прочности.

Обслуживание

Слежение за СВМО данной робототехнической системы может показать необходимость капитального ремонта, если будет обнаружено заметное снижение СВМО. На практике такой износ может произойти в довольно широких временных интервалах, зависящих от приложений робота, но порядок величины интервала равен 10 000 ч, соответствуя пяти годам сменной работы. Все больше, однако, в робототехнических системах делается акцент на минимизацию времени простоя всей системы, включая как роботы, так и периферийные устройства при максимизации коэффициента сменности. В итоге подходящая стратегия обслуживания становится ближе к той, которая принята скорее для массового, чем для серийного, производства.

Проблемы обслуживания возникают, когда на предприятии установлено всего несколько роботов. Поставщики обычно считают, что обученный ремонтник или наладчик не будет эффективно использоваться до тех пор, пока он не станет присматривать по крайней мере за тремя роботами, а при меньшем числе обслуживание следует полностью возложить на ремонтную службу поставщика роботов.

Обычно считают, что роботы должен обслуживать специалист, который может определять и устранять неисправности в гидравлической, электронной, электрической, пневматической и механической системах. Хотя автоматическая диагностика может и облегчить ему задачу, но даже использование этих возможностей потребует специальных навыков. Итак, рабочий, занимающийся ремонтом и наладкой роботов, должен быть специально подготовлен, обладать многочисленными навыками. Вероятно, такой подход привел бы к улучшению удовлетворенности работой и мотивации, но введение такой должности может оказаться спорным. В таких

странах, как Великобритания, где система обучения на производстве все еще позволяет готовить квалифицированных рабочих и техников, необходимо было бы провести существенную реорганизацию и многие более старые рабочие не захотели бы или не смогли осваивать новые для них специальности. Тем не менее имеются современные примеры, в частности на филиале фирмы «Форд» в Дагенхэме (Великобритания), где попытки подобного всестороннего обучения столкнулись с меньшим числом препятствий, чем ожидалось.

Другой вопрос связан с централизованным обслуживанием в противовес децентрализованному. Обычно если есть желание составить подробное представление о работнике и взаимосвязях данной группы роботов и другого оборудования, то предпочтительно использовать централизованную бригаду рабочих-специалистов по обслуживанию, которые заняты только с данными видами оборудования. Если главное соображение состоит в том, чтобы уменьшить общую стоимость обслуживания для всего предприятия, то обычно оптимальным решением является высокоцентрализованная обслуживающая бригада.

На фирмах Форда (США) стремятся установить робот временно в подразделении обслуживания *перед тем*, как установить его на окончательном рабочем месте на производстве, чтобы квалифицированный обслуживающий персонал мог «набить руку» на опыте работы с данным оборудованием. Все больше исследований проводится по использованию компьютерного моделирования с целью оценки относительных достоинств различных стратегий обслуживания.

Наконец, предусматривается само текущее календарное планирование обслуживания. Растет понимание того, что регулярное рутинное обслуживание может создать проблемы надежности, которые иначе не имели бы места.

Все больше возможностей появляется для использования автоматического диагностического и следящего за условиями работы оборудования с тем, чтобы выявлять, когда планово-предупредительное обслуживание, дата которого не фиксирована жестко, действительно должно быть выполнено, а когда лучше оставить робот в покое.

Глава 16

Деньги приводят мир в движение. Экономические оценки

Роботы различны!

В некотором смысле это самая важная глава книги. Как бы далеко ни продвинулось усложнение робототехнической системы, какой бы революционной ни была ее конструкция, какой бы прогрессивной ни была фирма, для которой она предназначена, единственная цель, для которой создан робот, заключается в том, чтобы выполнять работу более экономично, чем прежде. Фирме нет смысла применять роботы, если по крайней мере по прошествии длительного времени они не приведут к улучшению экономического положения. Конечно, освобождение людей от непривлекательных и опасных работ можно рассматривать как наиболее важное обоснование для использования роботов (какова могла бы быть стоимость человеческой жизни), но есть фирмы, которые не могут позволить себе роскошь взять на себя слишком тяжелые обязательства по улучшению условий труда, если это либо не увеличивает, либо по крайней мере не уменьшает прибыли компании.

Поэтому жизненно важно понять некоторые соображения, включенные в экономическую оценку потенциального использования робототехники. Это нужно не только бухгалтерам, но особенно руководителям. Узкий и ограниченный взгляд может привести к тому, что роботы не будут применены, когда в этом будет необходимость. Если такие ошибки, как эти, должны быть исключены, тогда те, кто принимает решение, должны оценить, сколько они еще смогут продолжать применять свой «обычный подход» к экономическим оценкам и насколько радикально отличная форма робототехнической технологии требует пересмотра этой методики.

Роботы обладают тем свойством, что их можно использовать на различных работах. Они не похожи на традиционную автоматику, которая привязана к какому-либо конкретному виду производства и которая выходит из употребления всего через несколько лет. По общему признанию, в некоторых областях быстрого развития техники (таких, как сборка с помощью роботов), действительно, составные части системы начинают

морально стареть спустя короткое время, но во многих областях, таких, как обслуживание станков и даже покраска и точечная сварка, «более старые» роботы могут оставаться абсолютно пригодными в течение более десяти лет, требуя лишь перепрограммирования для перехода к выполнению других работ. Ясно, что подходы к экономической оценке эффективности, которые не предусматривают учета таких факторов, могут привести к грубым ошибкам в экономическом обосновании целесообразности применения роботов.

Поскольку покупательский спрос все больше ускоряет темпы обновления продукции (многие типы товаров, такие, как телевизоры, которые в 70-х годах могли продаваться в течение пяти лет, в 80-х требовали обновления уже спустя два года), преимущества повторного использования робототехнических систем становятся более привлекательными. Роботы не используются для тех же нужд, что и жесткая автоматизация, а позволяют придать гибкость, в которой раньше не было необходимости. Оценивая их пригодность, важно не просто сравнить экономическую отдачу роботов, если они использованы при медленно меняющемся разнообразии выпускаемой фирмой продукции, а нужно провести сравнение между затратами, связанными с применением либо роботов, либо традиционных систем оборудования в условиях конкуренции на рынках с быстро меняющейся номенклатурой товаров. А именно таковы товарные рынки ближайшего будущего.

В прошлом многие робототехнические приложения были отклонены из-за чрезмерно упрощенной методологии оценок экономической эффективности и сверхжесткой приверженности к «политике компании» в отношении капитальных вложений (которая была ориентирована на жесткую автоматизацию и, следовательно, в значительной степени является неподходящей). Особенно неприемлемым является положение, когда те, кто может оказывать влияние на принятие решения о внедрении робототехники, не склонны попытаться даже понять специфику требований к методам оценки ее эффективности. Те, например, кто отклоняет применение роботов из-за того, что оно не попадает в период окупаемости, традиционно принятый фирмой, могут наносить себе и своей компании большой вред.

Для того чтобы прояснить некоторые из этих положений, оставшаяся часть главы касается различных экономических факторов, которые следует учитывать при оценке эффективности робототехнических приложений с объяснениями обычно используемой при этом методики. В этой главе больше экономики, чем в других работах о робототехнике. Но ее следует рассматривать как «абсолютный минимум», требуемый любому добросовестному руководителю для понимания значения тех оценок эффективности, которые приводит его компания. Обсуждение таких методов оценок, как «дисконтирование», может на первый взгляд показаться очень общим, однако на практике эти подходы особенно пригодны для руководства по робототехнике, поскольку позволяют учесть продолжительность срока полезной службы роботов, связанного с их уникальным свойством повторного использования.

Практически невозможно убедить компании опубликовать подробные данные о том, во сколько обошлась им в целом программа роботизации — во многих случаях это связано с тем, что таких данных просто нет! Однако чаще всего компании все-таки по понятным причинам затрудняются раскрыть подробности неудачных проектов, даже более того, желают утаить эти подробности и от конкурентов.

Кроме того, согласно исследованию в области принятия технологических нововведений в промышленности, произведенному университетом Кейз Вестерн Резерв (США), оценки, «основанные на плановом учете» или «периодической проверке расходов», бывают настолько пристрастны, что представляют во всяком случае чрезвычайно сомнительную ценность. Из-за такого недостатка в опубликованных данных особенно важно отметить общие методы, которые на практике оказались наиболее пригодными.

Прямые факторы

Традиционный подход к оценке эффективности капитальных вложений, как правило, ориентирован на очевидные результаты инвестиций. Хотя на практике другие факторы часто оказывают очень существенное влияние на эффективность роботизации, «традиционные» прямые факторы имеют основное значение. Они включают в себя следующие показатели (некоторые из которых перекрывают друг друга).

Затраты. *Покупная цена системы.* Стоимость самой робототехнической системы является важным фактором. Ее фактическая величина будет зависеть от стоимости не только примененного робота или роботов, но также и от всего вспомогательного оборудования. Комплект такого оборудования будет определяться сферой применения робота и в то время, как больше половины стоимости системы роботизированной сборки может приходиться на бункеры, конвейеры и т. п., для манипулирования материалами может вовсе не потребоваться дополнительного оборудования.

Стоимость самого робота очень различна и зависит от сложности как механической его части, так и управляющего устройства. Новые сборочные роботы типа «СКАРА» с четырьмя степенями свободы и с очень ограниченным управляющим устройством стоят всего несколько тысяч фунтов стерлингов, но большинство роботов стоят несколько десятков тысяч фунтов стерлингов, а многие мощные или высокосложные устройства имеют стоимость более ста тысяч фунтов. Вообще считается, что более дорогостоящие роботы дешевле установить, легче программировать. Из-за своей большей универсальности они требуют менее специализированного инструмента. Как следует из практики, на покупную цену собственно робота приходится 30—60 % стоимости установленной робототехнической системы, на стоимость периферийного оборудования — 30—50 %. Остальные затраты приходятся на организацию работ, установку и обучение.

Стоимость специального инструмента. Стоимость компонентов собираемой системы, таких, как конвейеры и загрузочные устройства, может быть весьма существенной. Подобным образом цена захватов очень редко включается в стоимость робота, и, как объяснено в гл. 8, вероятно, подходящая их конструкция тем не менее должна быть сделана по заказу для тех деталей, которыми роботы фактически будут манипулировать. Из-за неопределенности величины всех этих дополнительных расходов многие поставщики предлагают системы «под ключ», готовые к немедленному использованию сразу после покупки, где за согласованную цену они поставляют действующую интегрированную систему. По общему мнению, термин «под ключ» появился в 70-х годах, когда все больше богатых клиентов, пользующихся услугами агентов по продаже недвижимости, взяли привычку покупать дома, не осматривая их и ожидая, что дом будет отделан и обставлен к их приезду. Таким образом, все, что им оставалось сделать — это только «повернуть ключ». Затраты на инжиниринг составляют, как правило, 30—50 % общей стоимости установленной системы.

Затраты на установку. Хотя затраты на установку иногда напрямую добавляются к стоимости самого робота, во многих случаях так или иначе требуется менять заводскую планировку при изменении продукции. Таким образом, пришлось бы назначать непомерно высокую цену на установку, превышающую разницу в затратах на это изменение планировки и на внедрение роботов.

Разовые затраты. При предварительном определении стоимости робототехнической системы часто забывают, что многие рабочие должны быть обучены различным аспектам работы с роботом. Курсы, которые должны быть организованы поставщиком, требуются не только для тех, кто будет работать с роботами, но также и для программистов и обслуживающего персонала. Но обычно должно оплачиваться не только это обучение (ограниченная сумма иногда включается в покупную цену робота). Следует учитывать, что те, кто посещает курсы (как правило, в течение одной недели), не будут в это время работать. Опыт показывает, что «неформальное» обучение, когда поставщик посылает кого-нибудь «показать, как работает робот», не дает тех результатов, которые можно получить при должным образом организованных курсах. Установка и обучение могут составлять, как правило, 10—15 % общей стоимости системы.

Затраты на обслуживание. В зависимости от конструкции робота и условий его работы потребуются различной степени профилактический ремонт, регулярный капитальный ремонт и мелкий ремонт. Современные конструкции, содержащие изолированные узлы привода, как правило, меньше требуют регулярного ремонта, чем более старые модели, но при двухсменной работе затраты на обслуживание могут достигать 10 % в год от первоначальной покупной цены.

Затраты на эксплуатацию. Основные эксплуатационные затраты обычно складываются из стоимости энергии, требуемой для работы робота, и стоимости

управляющего устройства и дополнительного оборудования. Несмотря на неэффективность робота (по сравнению с человеческой рукой), его энергетические затраты обычно сравнительно низки; в крайнем случае сборочные роботы можно отключить, используя для этого электророзетку домашнего типа.

Затраты на программирование. Прежде чем робот сможет выполнить заданные ему работы, его нужно запрограммировать. А поскольку он будет выполнять эти операции повторно, нужно быть уверенным, что используемая программа оптимальная — небольшая экономия времени на каждом цикле будет постепенно нарастать. Текстуальное программирование требует высокой квалификации. Такую работу обычно следует поручать человеку, обладающему особым чутьем на нее, а также способностью работать в сотрудничестве с теми, кто полностью понимает операцию, которую нужно роботизировать. Обучение показом свяжет лучшего «ручного» оператора и из-за необычности робота и возникающих трудностей редактирования программы ему, может быть, придется заниматься этим делом намного дольше, чем можно было бы ожидать.

Амортизация. Амортизация в сущности есть признание того факта, что потенциальная стоимость машины при перепродаже становится меньше по мере старения (как это происходит с автомобилем). Следовательно, необходимо показать эту «амортизацию» на счетах компании, если они должны отражать точную картину фирмы. Умозрительная скидка на износ и выход из употребления не включает никаких денежных операций или **движений денежной наличности** (платежей в или из компании). Существуют различные методы, которые могут быть выбраны бухгалтерами для начисления амортизации машин. Чаще всего это прямолинейная амортизация, в которой разрешенная норма амортизации в каждом году всего срока службы устройства одна и та же. Тем не менее это только одна из серии равносильных, но произвольных стратегий, которую может выбрать данная компания. И хотя в некоторых случаях амортизация может вполне реально представлять уменьшение цены при перепродаже машины, в других — эта зависимость часто проявляется очень слабо.

Машину следует амортизировать в течение всего срока ее полезной службы Для робота в «малосложном» приложении это может быть свыше 10 лет (некоторые существующие роботы все еще работают после десятилетнего постоянного применения). Хотя роботы в более технически сложных приложениях могут физически сохраняться более десятилетия, вполне возможно, что морально они устаревают раньше. Во многих странах системы налогообложения поощряют ускоренную амортизацию, и таким образом налоговая экономия (которая разрешается в отношении амортизации машин) может быть получена максимально быстро.

Процентные платежи. Может случиться так, что для финансирования закупки робототехнической системы фирма должна занять деньги. Существуют различные источники, но в каждом случае будет назначен процент на заемный капитал, который будет увеличивать для фирмы стоимость покупки. Кроме того, как объяснялось в последних параграфах, при оценке экономической эффективности проектов имеет значение процентная ставка, так как у фирмы всегда есть возможность оставить свои деньги в банке и таким образом получить проценты на эту сумму.

Экономия

Продажа старого оборудования. Старое оборудование, которое заменяет робототехническая система (если оно есть), вероятно, можно продать.

Правительственные субсидии. Правительства все больше осознают преимущества капитальных вложений в робототехнику и предлагают стимулы для поощрения промышленности в автоматизации с использованием роботов. В Великобритании 50 % стоимости проводимых исследований в робототехнике возмещаются правительством, а субсидия на внедрение может покрывать до одной трети стоимости робота, дополнительного оборудования и затрат на освоение.

Экономия труда. Как отмечалось раньше, хотя фирма и может проявлять некоторую заинтересованность в освобождении своих рабочих от непривлекательной и монотонной работы, главным побуждением для внедрения роботов обычно является потенциальная экономия, которая может быть получена от того, что не нужно платить заработную плату и пособия уволенным рабочим. Эта экономия труда пропорционально возрастает с увеличением коэффициента сменности роботов.

Число людей, замещаемых одним роботом, различно и зависит от того, какая сфера применения робота рассматривается, поскольку роботизация редко приводит к полностью безлюдному производству. Так, хотя точечная сварка вряд ли может потребовать какого-либо вмешательства человека, робот для дуговой сварки может в среднем заменить только 75 или 50 % затрат времени рабочего в смену. Сборка представляет собой такую широкую область применения роботов, что трудно оценить, сколько человек может заменить робот (в некоторых случаях робот может полностью заменить человека, в других — только половину занятых).

Тем не менее эти случаи относятся только к прямым увольнениям людей при односменной работе. Как отмечалось в гл. 13, введение всеобъемлющей робототехнической автоматизации может иметь наиболее важное отражение в трудовых потребностях завода — приводит к явным увольнениям нескольких человек на робот, введенный согласно общей схеме перестройки производства. В исследовании Астонского университета, упомянутом в гл. 14, показано, что в среднем освобождалось примерно 2,5 человека на робот, хотя в других оценках этот показатель колеблется от 0,8 до 6,2 рабочего места, теряемого в результате введения одного робота. В противовес этому создается 0,8 рабочего места в отраслях по производству и обслуживанию робототехники.

Рост производительности оборудования. В некоторых случаях робот может превзойти производительность человека-оператора. Тогда возникающее в результате улучшение использования другого оборудования может также принести большую выгоду. При оценке производительности время простоя вследствие остановки часто переоценивается. В то время как поломка передающей конвейерной поточной линии может привести к остановке производства, на роботизированной линии присущая роботам гибкость может быть использована не только для перехода с выпуска одной продукции на выпуск другой, но также и для того, чтобы действующий робот мог взять на себя функции другого временно неработающего на линии робота. Если это неосуществимо, то работу в течение короткого времени может продолжить вручную человек, заступивший на это место, в то время как робот ремонтируется или заменяется другим роботом с той же программой, что и удаленный.

Следовательно, в то время как относительное время простоя автоматической линии могло бы достигать 25 %, в производстве, где используются заменяемые роботы, которые могут быть быстро перепрограммированы, с тем чтобы продолжать работу (такую, как сварка или покраска), относительное время простоя при использовании робототехнических систем может составлять всего лишь несколько процентов. Следовательно, номинальная производительность установленной робототехнической системы может быть меньше эквивалентной ей системы жесткой автоматизации, поскольку у роботизированной системы фактическая производительность ближе подходит к номинальной производительности.

Интеграционный эффект

Помимо вышеназванных прямых источников в экономии может быть много и других, которыми часто пренебрегают при обосновании экономической эффективности применения роботов. Хотя эти источники экономии труднее выявить и определить, они могут быть чрезвычайно значительны. Поскольку компьютеры все больше и больше объединяют заводское оборудование, то и отдельные до этого производственные процессы таким же образом оказываются взаимосвязанными. Так как в прошлом было принято рассматривать каждый производственный процесс как самостоятельный «центр получения прибыли», который можно было бы заменить на другой производственный процесс, в значительной степени независимо от других, то теперь с увеличением интеграции становится значительно труднее улучшать одну часть всей производственной системы, не оказывая при этом влияния на остальные.

Так, единственный робот, используемый в качестве прямого заменителя человека, при отсутствии каких-либо других изменений на заводе может оказать лишь ничтожное «скрытое» влияние на организацию производства в целом (и, следовательно, может быть чрезвычайно неэффективным). Однако в случае объединения нескольких роботов их влияние немедленно сказывается на возможностях прогнозирования, календарном планировании, что может привести к существенным прибылям где-нибудь в другом месте на заводе, если эти возможности используются полностью. Связь

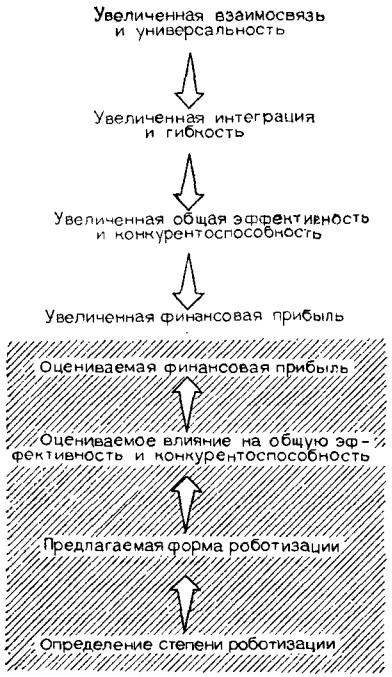

Рис. 54. Эффект интеграции

приводит к интеграции других производственных процессов, что позволяет еще больше повысить эффективность и конкурентоспособность предприятия в целом. Таким образом, недостаточно проводить экономическую оценку эффективности с учетом только прямой экономии от применения робототехнической системы, так как увеличивается уровень интеграции роботизированного участка с остальной частью завода и, следовательно, его влияния на все предприятие в целом. Таким же образом возрастает и значение непрямых факторов в любом экономическом обосновании. При любой оценке экономической эффективности роботосистемы этот интеграционный эффект также заставляет в первую очередь рассматривать стратегические факторы в противовес отдельным тактическим. Это предполагает необходимость полного понимания возможных последствий интенсивной технологии теми, кто больше всех способен оценить ее возможное стратегическое значение, а именно высшим руководством (как указывалось в гл. 14).

Аналогом интеграционного эффекта может служить древняя история о Вавилонской башне. В этой истории строительство огромной башни, в котором участвовало огромное число людей, идет невероятно хорошо, пока внезапно все не начинают говорить на разных языках. Прогресс останавливается. Современное движение к заводской интеграции представляет собой процесс, противоположный тому, о котором шла речь в истории. Как показано на рис. 54, дополнительные преимущества роботизации заключаются в увеличении универсальности (обеспечивающей гибкость для повторного использования на различных роботах) и взаимосвязи (приводящей к интеграции с другими системами). Оба эти фактора должны приводить к более высокой общей эффективности производства и конкурентоспособности предприятия, и отсюда к росту прибыли.

Это выглядит так, как если бы Вавилон нанял новых рабочих, каждый из которых мог бы выполнять несколько разных работ и говорить на одном и том же языке. При решении, сколько их труд мог бы стоить, было бы неправильно считать только то, как хорошо они могли бы делать ту или иную работу, в которую они были бы одновременно вовлечены. Их величайший вклад состоял бы в получении «скрытых» выгод за счет большей интеграции (которая заключается в том, что они могли бы работать вместе более эффективно, чем другие) и их способностей браться за меняющиеся задачи (что позволяет им справляться с несколькими работами). Решение нанять таких рабочих — более чем тактический ход. (Эффективны ли будут затраты на них, если они будут делать ту или иную специфическую работу?) Помимо всего прочего, это стратегический ход — нанять достаточно рабочих и башня будет в конце концов построена!

Точно так же оценка выгод роботизации требует исследования скрытых выгод. Следует обратить внимание, что это нужно делать не только из-за того, что роботизация может быть отвергнута при анализе эффективности на основе традиционных критериев и поэтому где-нибудь в другом месте должны быть найдены дополнительные источники потенциальной экономии, но и из-за того, что роботизация меняет уровень интеграции и вследствие этого «распределение» выгод. Прослеживание этих скрытых источников экономии является просто признанием факта увеличения сферы влияния робототехнической системы по сравнению с традиционной системой оборудования, что ведет к появлению большого числа источников экономии, связанных с интеграционным эффектом.

Косвенные факторы

В некоторых случаях, может быть, есть смысл использовать «усовершенствованные методы оценки» косвенных источников экономии, что оставляет использующего их работника открытым для критики и встречает

сопротивление остальных на фирме. Тем не менее, если эти соображения будут отвергнуты, будут рассматривать эти источники как незначительные (которыми они на самом деле не являются). Иногда оценка экономической эффективности, вероятно, будет намного менее точной. Некоторые подобные источники экономии рассмотрены ниже.

Размеры незавершенного производства. Если использование роботов приводит к более эффективному процессу, то быстрее и стабильнее, чем прежде, будут изготавливаться детали, возможно, даже с использованием сокращенного числа отдельных операций. Так как детали более быстро, чем прежде, проходят через весь производственный процесс завода (вызывая таким образом сокращение накладных расходов), меньше деталей фактически находится в работе одновременно. В результате детали, проходящие процесс обработки и образующие незавершенное производство, будут стоить меньше. Таким образом, сократятся размеры необходимых оборотных средств компании. Это в действительности может явиться очень важным фактором.

Запасы сырья и материалов. Более устойчивые циклы механообработки сокращают потребность больших резервных запасов сырья. Случается также, что использование робота позволяет применять более дешевые склады, что снова уменьшает величину оборотного капитала, воплощенного в запасах сырья.

Запасы готовой продукции. Более эффективные процессы обработки приводят к более низким удельным издержкам, к уменьшению стоимости запасов. Кроме того, время, необходимое для перехода к новой продукции с использованием гибкой робототехнической системы, и фактическое время изготовления может быть также короче, чем прежде. Это означает, что фирма может получить экономию от сокращения затрат на хранение необходимых запасов в качестве резерва для неожиданных заказов, так как при поступлении большого заказа завод может быстро отреагировать и изготовить требуемую продукцию. Экономия, вызываемая уменьшением (или даже исключением) этого «неприкосновенного запаса», может быть значительной, особенно тогда, когда постоянно растет диверсификация спроса. Так же: чем больше роботизирован процесс изготовления, тем эффективнее становится выпуск очень малых партий продукции.

Отходы и исправление брака. Программированная операция в случае, если первый прогон продемонстрировал действенность программы, исключает возможность ошибки оператора. Поскольку средства контроля обычно включаются каким-то образом в роботосистему, то в тот момент, когда деталь изготавливается бракованная, для исправления ошибки может быть вызван человек-контролер. В этом случае только одна деталь может нуждаться в переделке или, что еще хуже, в отправлении на металлолом, а вся партия будет в порядке. Затраты на контроль легко компенсируются за счет уменьшения числа бракованных деталей. В некоторых случаях такая экономия может быть существенна. Естественно, что уменьшение объема работ по исправлению брака также повышает производительность труда.

Контроль. Как объяснялось выше, часто экономически выгодно автоматизировать контроль как составную часть робототехнической системы и таким образом исключается потребность в ручном контроле деталей (а это трудоемкая, непоследовательная работа).

Обучение операторов. Вследствие текучести кадров обучение персонала требует непрерывных затрат. Так как оператор робота в значительной степени выступает в роли контролера, то обучение может быть менее сложным, чем если бы ему приходилось самому выполнять работу. Таким образом, сокращается время на обучение. Кроме того, за работой нескольких роботов может наблюдать один человек. В любом случае текучесть кадров (требующая обучения нового персонала) может быть сокращена, если первоначально непривлекательная работа будет улучшена с помощью роботизации.

Манипуляция заготовками. Стоимость эксплуатации автопогрузчика вместе с оплатой труда водителя высока, но многие исследования показали, что до 95 % времени производственного цикла уходит либо на транспортировку деталей от операции к операции, либо на ожидание очереди на обработку и что в среднем на фактическую обработку детали на заводе уходит только 5—15 % общего времени. Робототехнические системы могут объединять или исключать некоторые производственные операции, уменьшая таким образом затраты на манипуляцию заготовками. Так как эта экономия получена в результате применения роботов, то ее следует учитывать при оценке эффективности их применения.

Размеры производственных площадей. Во многих случаях внедрение роботов требует меньших производственных площадей, чем использование других методов автоматизации, благодаря более плотному размещению машин, меньшим резервным запасам заготовок между рабочими местами, меньшей потребности в пунктах производственного контроля и пр. Если сэкономленная производственная площадь используется целесообразно, то эту экономию можно рассматривать как экономию от внедрения робототехнической системы.

Качество. Хотя это трудно выразить количественно, улучшение качества может привести и к источникам экономии, не только получаемым вследствие сокращения объема исправления брака и отправки на металлолом. Это может привести к уменьшению убытков при возмещении претензий (и таким образом ведет к сокращению резерва наличных денег, необходимых для покрытия этих расходов), к меньшим потерям времени на линии после контроля, к «доброй воле» заказчиков и к увеличению повторных заказов. Помимо улучшения качества внедрение роботов может также привести к более высокой *стабильности* качества, позволяя больше полагаться на прогнозы качества.

Изменение номенклатуры продукции. Присущая роботосистемам гибкость поможет намного быстрее осваивать новые виды продукции, позволяя фирме проникать на новый рынок быстрее, чем ее конкурентам, таким образом давая ей рыночную инициативу. Это соображение стратегического характера может оказаться решающим фактором при решении вопроса роботизации.

Некоторые виды накладных расходов. Широкомасштабное введение робототехнических систем может позволить фирме сократить такие расходы, относящиеся к человеческому комфорту: на отопление, освещение и вентиляцию. В таких приложениях, как окраска распылением, экономия от демонтажа принудительной вентиляции может быть значительной.

Охрана труда. Хотя, как отмечалось в предыдущей главе, роботы сами являются источником опасности, они могут также и замещать людей в опасных зонах. В некоторых случаях, видимо, нужно рассматривать экономию в связи с вероятными исками персонала в связи с полученными увечьями, затратами на оплаченное, но неотработанное время, связанное с увечьями, временной нетрудоспособностью и даже смертью.

Трудовые конфликты. Вполне возможно, что исключением неприятных или небезопасных работ можно улучшить отношение рабочих к предпринимателям, выражающееся в уменьшении числа забастовок и всякого рода трудовых конфликтов. Удаление людей с завода позволяет избежать проблем, связанных с вырыванием с корнем семей с занимаемых мест в случае необходимости перемещения завода, а также затрат по новому найму рабочей силы. Тем не менее количественно определить такие выгоды только лишь в денежном выражении заведомо трудно и, проводя оценку таких факторов, вероятно, лучше просто иметь их в виду (если они кажутся особенно уместными), чем стараться действительно включать их в экономический анализ эффективности. Даже попытки количественно выразить подобные выгоды от такого фактора, как увеличенная гибкость, могут представлять чрезвычайные трудности, однако такие подсчеты, конечно, весьма существенны для полной оценки экономической эффективности.

Сроки окупаемости

Из всех различных методов оценки эффективности капитальных вложений оценка сроков **окупаемости** наиболее популярна в основном из-за своей простоты для понимания и приложения. К несчастью, нет универсального согласованного метода определения таких сроков, но в принципе это время, за которое все различные поступления от проекта в сумме сравняются (т. е. окупятся) с первоначальными дополнительными затратами. Следовательно, при оценке вопроса с позиции безубыточности окупаемость, действительно, скорее характеризует больше меру **ликвидности** (способности фирмы сразу найти свободные средства при деловой необходимости), чем экономическую эффективность. Где может действительно цениться быстрота окупаемости, так это в областях быстрой смены технологий (как, например, с некоторыми, но не со всеми приложениями роботов), где она может обозначать период, в течение которого капиталовложения находятся в состоянии риска. Если роботы в данном приложении должны быть заменены из-за морального устарения задолго до их физического износа, то полезно иметь какой-то указатель, который мог бы показать, окупятся ли первоначальные капиталовложения.

Таблица 2

Три проекта, ранжированных по окупаемости

Проект	Начальный денежный платеж	Ежегодные денежные платежи			Период окупаемости в годах	Ранг
A	—27 500	25 000	2500	15 000	2	1 =
B	—27 500	2500	25 000	15 000	2	1 =
C	—27 500	22 500	—	20 000	$2^1/_4$	3

Это, однако, *не означает,* что оценка сроков окупаемости — полезный и даже веский критерий для *отбора* проектов. Если мы, например, посмотрим на три проекта, отраженных в табл. 2 (где условимся, что затраты представляют капитал, вложенный в проект, а отдача означает поступления от проекта), то ориентация только на сроки окупаемости показала бы, что два первых проекта равноценны и лучше проекта *C*, несмотря на то, что *C* покрывает все свои издержки к концу первого года. А что, если проект будет связан с существенными денежными платежами после периода окупаемости? Оценка сроков окупаемости просто не принимает в расчет затраты в течение полного срока службы оборудования.

При сравнении возможных проектов роботизации с использованием ручного труда, неспособность оценки сроков окупаемости учесть все затраты в течение вероятного срока службы проекта, вероятно, должна благоприятствовать ручным подходам, так как эффект от автоматизации имеет тенденцию проявляться в более поздние годы, чем при использовании технологии, основанной на ручном труде. Если ожидается постоянно растущий спрос на продукцию, оценка эффективности на базе сроков окупаемости окажется неблагоприятной для роботизации, потому что затраты при ручных методах возрастали бы постепенно, тогда как робототехническая система требует крупных разовых вложений. Подобным образом, отсутствие включения как срока службы проекта, так и плана выпуска вряд ли позволит вскрыть существенные преимущества присущей робототехническим системам гибкости в удовлетворении потребности за счет частой смены выпускаемой продукции. Кроме того, некоторые типы проектов требуют существенных дополнительных вложений капитала в более поздние сроки их службы, многократной оценки сроков окупаемости, таким образом путая весь процесс использования методов оценки окупаемости как средства отбора.

Таким образом, как видно, оценка сроков окупаемости не только полностью игнорирует величину текущих затрат проектов, которые «созревают» за пределами срока окупаемости, но также оказывается не в состоянии выбирать между экономическими достоинствами конкурирующих проектов. Кроме того, недостаток этого метода заключается еще и в том, что он не может учесть тот факт, что фирма всегда может поместить свободные наличные деньги на депозит. Чем дольше деньги находились в банке, тем выше сумма процентов по вкладу. Таким образом, с точки зрения фирмы сумма денег, полученная теперь, потенциально стоит больше, чем та же сумма, полученная через год (потому что в этот год первая сумма «заработала» фирме некоторые дополнительные деньги в форме процентов).

Некоторые сторонники критерия окупаемости считают, что поскольку прогноз является в лучшем случае неточным, то, используя окупаемость, достаточно только взглянуть на немного лет вперед (обычно между одним и тремя). Другими словами, они пытаются использовать окупаемость для борьбы с риском. Чем больше риск, тем короче допустимые сроки окупаемости. В действительности оценка сроков окупаемости — слишком грубый инструмент для анализа проблем риска (более приемлемый подход рассматривается в следующем параграфе), особенно поскольку этот метод никоим образом не отражает существования риска вплоть до срока окупаемости! Другие допускают, что окупаемость действительно является показателем ликвидности, но вводят в заблуждение, утверждая, что это фактически делает его главным инструментом анализа, потому что именно проблемы ликвидности часто не позволяют компании вкладывать деньги в кажущиеся выгодными проекты. Хотя соображения по вопросам ликвидности, очевидно, важны для фирмы, существуют намного более подходящие методы решения таких проблем, чем за счет приношения в жертву потенциально выгодных проектов посредством несоответствующего использования метода оценки сроков окупаемости.

Норма прибыли на капиталовложения

Норма прибыли на капиталовложения — один из нескольких показателей «нормы прибыли», которые страдают одними и теми же крупными недостатками. Обычно считают, что норма прибыли на капиталовложения представляет собой процентное отношение величины годовой прибыли от проекта и величины капитала. Однако нет ни одного определения, что такое прибыль и стоимость. Различные фирмы используют различные комбинации налога, платежей проектов и амортизации, с тем чтобы выйти на определенную величину прибыли, и, конечно, сама амортизация может быть начислена различными равноценными способами. Подобным образом одни чувствуют, что следует использовать только прибыль, полученную за первый год, в то время как другие используют среднегодовую величину и прибыль. Ясно, что вся эта процедура в некоторой степени произвольна.

Эти показатели не только не отражают срока службы системы или не принимают в расчет определение во времени денежных платежей (таким образом, терпя неудачу в отражении преимуществ ближайших по срокам платежей по сравнению с отдаленными платежами), полученные «магические» процентные цифры могут быть кардинально изменены просто изменением стратегии амортизации (которая во всяком случае произвольна). В действительности, понятие прибыли на капиталовложения для принятия финансовых решений и контроля впервые было предложено Дю Понтом скорее в качестве приближения к проблеме управления на высшем уровне руководства, чем в качестве магической формулы для решения этих проблем.

Приведенная чистая стоимость

Ни один из двух вышеназванных методов не учитывает «ценность» денег с учетом фактора времени, которая возникает из-за того, что данная сумма стоит с точки зрения фирмы сейчас больше, чем если бы она поступила к ней в любое время в будущем, так как в промежуточный период деньги могут быть вложены в выгодное дело (хотя бы только путем получения процентов в банке). Например, если банковский процент

составляет 10 %, то полученные через год 110 фунтов стерлингов эквивалентны 100 фунтам, полученным сейчас (и затем положенным в банк). В более общем случае допустим, что сумма денег может возрасти на r процентов в год. Если фирма помещает P фунтов на счет в банке, тогда можно показать, что за время в n лет счет возрастет до

$$P(1+r)^n.$$

Иначе это можно переписать так, чтобы показать, что «современная стоимость» P суммы денег S, возрастающая за n лет, выражается формулой

$$P = S \cdot \frac{1}{(1+r)^n}.$$

Другими словами, любое денежное поступление, которое поступит в будущем, может быть дисконтировано (используя соответствующий коэффициент дисконтирования $1/(1+r)^n$ для рассматриваемого года), с тем чтобы получить современную эквивалентную стоимость. Используя такой метод дисконтирования для всех денежных поступлений по проекту, можно рассматривать приведенные затраты на осуществление проекта. Это означает, что, наконец, мы сравниваем сопоставимые величины. Таким способом можно сравнить денежные поступления, которые должны поступать в течение пяти лет, с денежными поступлениями, поступающими сейчас, потому что все они приведены в их эквивалентные «сегодняшние стоимости».

Если все различные денежные поступления дисконтируются (суммируются с отрицательными значениями, соответствующими расходам, и положительными — поступлениям), то тогда в итоге мы получим чистую накопленную стоимость дисконтированных поступлений или приведенную чистую стоимость всего проекта. Эта стоимость будет показывать, есть ли смысл рассматривать этот проект или нет, потому что, если приведенная чистая стоимость равна нулю, тогда с учетом приведенных затрат (в противоположность фактическим недисконтированным величинам) проект просто самоокупается и фирма, не выигрывающая и не теряющая на капиталовложениях в проект, охотнее предпочтет оставить деньги на счету в банке и получать с них проценты. Если приведенная чистая стоимость больше нуля, то фирма получит чистый доход, если вложит капитал в

Таблица 3

Три проекта, ранжированных по чистой стоимости

Проект	Начальный денежный платеж	Ежегодные денежные платежи			Современная чистая стоимость ($r=10$ %)	Ранг
A	—27 500	25 000	2500	15 000	12 170	1
B	—27 500	2500	25 000	15 000	10 125	3
C	—27 500	22 500		20 000	11 530	2

проект. Если приведенная чистая стоимость отрицательна, то фирма выиграет больше, если положит деньги в банк. Приведенная чистая стоимость различных взаимоисключающих возможных проектов может быть использована как показатель достоинств каждого: согласно прогнозу проект с наибольшей положительной приведенной чистой стоимостью будет наиболее прибыльным. Если мы используем метод приведения затрат для пересмотра полученной ранее оценки эффективности трех проектов, то из табл. 3 видно, что проект *C* теперь оценивается как намного более выгодный, чем проект *B*, и только немного хуже, чем проект *A*.

Наконец, учитывается относительное распределение по времени денежных платежей. Кроме того, сам принцип дисконтирования предполагает, что поступления, далеко отстоящие во времени от настоящего момента, будут оказывать относительно малое влияние на эффективность проекта. Таким образом, по-видимому, прогнозы отдаленных событий (которые во всяком случае «подозреваются») будут меньше учитываться, чем прогнозы более точно предсказываемых событий.

Имеются лица, которые подозрительно относятся к возможности использования приведенной чистой стоимости для оценки эффективности роботов, потому что этот метод отдает предпочтение проектам, способным дать эффект относительно быстро, что нетипично для робототехнических систем. Но эти люди, однако, упускают главное. В идеале лучше получить быструю отдачу, потому что она больше стоит! Это не означает, что при использовании метода приведенной чистой стоимости совершенствование существующего оборудования, которое предлагает очень быструю отдачу, будет всегда казаться предпочтительным по сравнению с введением новой роботизированной технологии, предоставляющей более позднюю отдачу. Напротив, с позиции долгосрочного подхода конкурентные преимущества роботизации могут намного перевесить краткосрочные преимущества варианта, который представляет собой просто «улучшенное» использование традиционного оборудования. Если что и требуется, так это то, чтобы полностью включались в расчет упомянутые выше косвенные факторы (такие, как гибкость при обновлении продукции), с тем чтобы оценивались более широкие выгоды проекта. Итак, поскольку справедливо, что процедуры приведения затрат, используемые сами по себе, могут не подойти для экономической оценки эффективности ресурсов, они идеальны, когда применяется всеобъемлющий подход путем включения как прямых, так и косвенных факторов за длительный срок.

Рекомендации

При проведении экономического анализа эффективности потенциального использования роботов роботизация прежде всего должна рассматриваться скорее стратегически (включая долгосрочное конкурирующее преимущество), чем только тактически (краткосрочная способность получения прибыли). Таким образом, как указывалось в гл. 14, поддержка проекта должна исходить от старшего руководства со стороны тех, кто действительно может оценить для компании глобальные выгоды роботизации. Однако в дополнение к этому решающему соображению существуют различные рекомендации, которые также могут быть приняты. Во-первых, аренду основных фондов всегда следует рассматривать как вариант, противоположный фактической закупке оборудования. Не только ряд производителей роботов фактически уже сдают роботы в аренду, но и в большинстве банков и ведущих финансовых институтов теперь организованы отделения сдачи в аренду. При сдаче в аренду съемщик (пользователь) регулярно платит сумму, установленную с учетом амортизационных отчислений, которую сдающий в аренду (владелец) вправе требовать в уплату за сданное оборудование. Кроме того, не требуется никакого задатка или первоначального платежа, а размер платежей может часто изменяться, чтобы соответствовать экономическому состоянию предприятия. В конце первоначального периода аренды

съемщик обыкновенно наделяется правом продолжать арендовать оборудование только за арендную плату (без амортизации).

Естественно, когда дело касается аренды, процесс оценки эффективности значительно упрощается, так как сдающий фактически имеет дело с износом, величиной процента и т. д. Как правило, арендуют на 5—7 лет, а робот может быть изношен за период значительно короче, чем этот. Тем не менее, если роботы должны заменить ручной труд, то форма оплаты при двух конкурирующих подходах очень сходна, что снова упрощает оценку. Наконец, сдача в аренду может означать, что можно избегать необходимости обращаться в комитет по ассигнованиям на капиталовложения, таким образом упрощая весь процесс приобретения оборудования, избегая неизбежной в противном случае бюрократии. В астонском исследовании, упомянутом в гл. 14, показано, что неудачи при попытках роботизации почти не были связаны с проблемами финансирования капиталовложений и ограничения на получение средств заставляли проводить более тщательное рассмотрение проектов, приводя в свою очередь к лучшим конечным предложениям.

Когда компания впервые собирается внедрить роботы, можно не слишком беспокоиться об их экономической эффективности. Для начала всегда дешевле эксплуатировать несколько роботов вместо одного, потому что все равно требуются независимо от их числа такие работники, как обслуживающий оператор, и его зарплата может быть распределена на все роботы, когда их больше, чем один. Подобным образом, всегда существует кривая освоения такой радикально новой технологии, которую компания так или иначе должна пройти.

Часто компаниям было бы разумно рассматривать первые немногочисленные приложения роботов как нечто похожее на эксперимент, не слишком заботясь о том, смогут ли роботы поднять эффективность (что уже показывалось), а больше о том, чтобы приобрести некоторый опыт в этой области. Лучше пройти по этой кривой освоения тогда, когда перед фирмой еще не стоит вопрос экономического выживания. Таким образом, при выборе таких первых приложений важно проявлять осторожность. Есть задачи, для решения которых роботы подходят идеально, и лучше всего задачи выбирать среди подобных.

Позже могут появиться и более рискованные и амбиционные проекты, но человеческая натура всегда останется такой, какая она есть,— если ранние проекты не показали себя с хорошей стороны, то, возможно, никогда больше не появится благоприятной возможности для любых других.

Там, где в действительности не удается использовать роботы больше одной смены, следует сделать так, чтобы они работали без рабочих во время обеденных перерывов и использовались «сверхурочно» настолько, насколько возможно. При таких обстоятельствах будет намного труднее сделать системы экономически эффективными.

Естественно, что многие читатели, действительно обдумывающие, установить ли роботы, могут почувствовать себя отчасти подавленными всеми проблемами экономической оценки эффективности их внедрения. То, что вначале казалось относительно простой задачей, теперь может обрести черты чрезмерной сложности! Однако это стоит беспокойства. Если же ваша компания принимает решение применить роботы лишь на основании соображений сроков их окупаемости, пусть будет так (хотя при таком выборе экономической стратегии для вашей фирмы вам, вероятно, лучше поискать себе другую работу, прежде чем быстроменяющийся рынок не заставит звонить в колокола).

Если простая оценка потенциального эффекта не удовлетворяет требованиям компании, объясните, что означает эффект интеграции, и исследуйте потенциальные скрытые преимущества, получаемые за счет введения предлагаемой системы. Попытайтесь также показать (при необходимости) преимущества применения оценки приведенных затрат для получения истинной картины денежных платежей и затрат на осуществление проекта. Тяжелая борьба, безусловно, будет стоить затраченного времени, если в конечном счете фирма введет стратегически выгодные робототехнические системы, которые иначе считались бы экономически невыгодными.

Применяемые роботы должны быть тщательно спроектированы, оптимизированы и усовершенствованы поставщиками роботов. Только нужно, чтобы и покупатель затратил определенные усилия для того, чтобы использовать робот в наиболее экономически выгодном приложении.

ЧАСТЬ V

ПЕРСПЕКТИВЫ

Глава 17

Что-то стряпается... Современные исследования

Робототехника вместе с такими направлениями, как биотехнология и информатика, представляет собой одну из новых «восходящих отраслей промышленности», которые, вероятно, способны оказать наибольшее влияние на развитие человечества и которые сегодня показали лишь первые проблески.

Понятно, что исследования в таких областях захватывают дух, и робототехника — не исключение. Эта глава специально посвящена такой работе, тем не менее было бы невозможно воздать должное всем направлениям, по которым проводятся ныне исследования по робототехнике. Их все трудно было бы даже охватить.

Поэтому в этой главе делается попытка познакомить лишь с наиболее захватывающими исследованиями, которые проводятся во всем мире. Многое неизбежно оказалось пропущенным, но темы, которые здесь освещаются, дадут достаточное представление как о научных, так и о прикладных исследованиях. Некоторые темы, действительно, представляют собой обширные области исследований, другие — практически совсем изолированные их аспекты.

Ряд фундаментальных исследований относится непосредственно к робототехнике, некоторые же не менее важные находят более общее применение, как в случае с вычислительной техникой. Что касается работ, проводимых в рамках исследования робототехники, то одни из них развивают совершенно новые направления при-

менения роботов, другие — движутся по проторенным дорогам. Но те, кто проводит эту работу независимо от области исследований в робототехнике, неизменно чувствуют волнение от сознания того, что им приходится «раздвигать границы», работая на самом гребне человеческих знаний.

Несмотря на неизбежную ежедневную рутину, иногда во время перерыва их на миг охватывает сильнейшее волнение и неожиданно снова приходит мысль, что своей работой они помогают превратить научную фантастику в реальность.

Конструкция руки

Возможности для более «очевидных» конструкций руки представляют собой потенциальный источник значительных улучшений ее эксплуатационных качеств и гибкости. Недавно созданные руки типа «СКАРА» для сборки являются примером такого переосмысливания. В университетском колледже в Лондоне исследуются возможности руки с большим числом независимо управляемых степеней свободы, в то время как в университете Чалмерс (Швеция) в течение нескольких лет работают над созданием покрасочного робота, основанного на принципах действия человеческого позвоночника.

Этот «позвоночный робот» довольно похож на хобот слона, и его рабочая зона представляет собой почти точную полусферу высотой 4 м и диаметром 3 м. Рука действительно сделана из двух позвонков (последовательно соединенных), состоящих из 100 яйцевидных дисков, лицевые поверхности которых, связанные четырьмя стальными тросами, катаются друг по другу. Рука приводится в движение натяжением тросов с помощью гидравлических исполнительных механизмов. Это позволяет осуществлять перемещения с семью степенями свободы, например рабочий инструмент удерживается в неподвижном состоянии, в то время как сама рука движется.

Другие возможности для создания руки кроются в использовании легких материалов для конструкции, так же как и в использовании техники оптического наведения для точного позиционирования рабочего органа независимо от любого осевого шифратора. Такие подходы могут позволить конструировать руки со значительно

более высокой очевидной жесткостью, чем прежде. В Стенфорде (США) исследования проводятся с использованием руки, спроектированной так, что она имеет исключительно большую гибкость по одной горизонтальной оси, оставаясь жесткой по другим. Ободряющие попытки сделаны для перемещения ее подобно тому, как рыбак точно насаживает муху на крючок одним движением кисти. В будущем потребуются также высокие скорости руки, и МИТ (США) намеревается достичь ускорений, в три раза превышающих ускорение силы тяжести, и скоростей 5 м/с с полезной нагрузкой, может быть, равной 10 кг.

Искусственный интеллект

После периода недооценки теперь, наконец, начинают осознавать, что **искусственный интеллект** (ИИ), действительно, внесет, вероятно, наиболее важный вклад в создание роботов будущего и представляет собой, кроме того, основу проекта создания ЭВМ пятого поколения (рассматриваемого в последней части этой главы).

ИИ вызывал непонимание. «Машина, конечно, не может быть разумной». Вероятно, одно из наиболее удобных определений заключается в том, что ИИ якобы есть наука, как заставить машины делать в общем такие вещи, которые, если бы они делались людьми, можно было бы отнести к интеллекту. Не надо впадать в паранойю, если слово «интеллект» применяется в отношении компьютеров так же, как слово «полет» применяется в отношении самолетов и птиц.

Поскольку некоторые системы ИИ уже могут обладать способностью к адаптации, можно, например, заставить их учиться на своих собственных ошибках. В итоге старую поговорку: «Компьютеры всегда смогут делать только то, на что они запрограммированы» нельзя, строго говоря, применить к такого рода системе. Компьютер, например, может совершенствовать свою собственную программу, дойдя до такого уровня, которого ни один человек не смог бы достичь. Нельзя считать научной фантастикой то, что в обозримом будущем может быть создана вычислительная система, которая, по-видимому, будет состязаться с человеческим мозгом — по крайней мере в отдельных областях. Такая

машина будет испытана на так называемый Тьюринг-тест, предложенный в 1950 г. английским математиком Алэном Тьюрингом, пионером в вычислительной технике, в качестве критерия для суждения о механическом интеллекте. Текст представляет собой гипотетическую процедуру, основанную на опросе, в котором человек, ставящий вопросы, может общаться с другим человеком и компьютером через терминал. Он не знает, кто есть кто, и должен решить это на основе даваемых ему ответов. Если невозможно установить такое различие, то можно сказать, что компьютер действует «разумно». В результате тест заключает в себе концепцию, согласно которой, если на практике имитация совершенно убедительна, то нет смысла пытаться отличить ее от оригинала, «вдаваясь в тонкости».

Как уже отмечалось, даже утверждение о том, что «ни один компьютер никогда не сможет принимать решения на основе интуиции», представляет собой не более как попытку успокоить встревоженную общественность относительно компьютеров. Хотя интуицию, конечно, можно рассматривать как чисто человеческое свойство, но напрашивается вопрос: «Может ли компьютер принимать решения, которые, будучи отнесены к человеку, означали бы использование интуиции?» Ответ на него был бы: «А почему бы и нет?» Слишком мало специалистов по ИИ верят в возможность воспрепятствовать компьютерам вести себя подобным образом, хотя это, конечно, в высшей степени спорный вопрос. Тем не менее исследования продолжаются повсюду в мире. Возможное влияние таких работ на робототехнику рассматривается в следующей главе.

Однако уже сейчас существует довольно много практических приложений исследований по ИИ, таких, как, например, недавно появившиеся **экспертные системы.** В таких системах знания экспертов в какой-либо определенной области сведены к набору правил, включающих в себя и такие менее точные формы знаний, как знания, полученные из опыта. Компьютер тогда может использовать эту **базу знаний**, применяя средство (для выводов и заключений) для выработки логических последовательностей какого-либо набора правил. Одной из первых экспертных систем была «Мицин», разработанная для облегчения постановки диагноза такой инфекционной болезни, как менингит. С тех пор появилось много удачных систем, включая «Проспектор», спроек-

тированный в Стенфордском исследовательском институте для обнаружения залежей полезных ископаемых. С его помощью действительно удалось обнаружить в горах Тоулмэн (штат Вашингтон, США) месторождение молибдена, оцениваемое в 100 млн. долл., которое эксперты не сумели найти. Экспертные системы, интенсивно разрабатываемые в рамках создания ЭВМ пятого поколения, вероятно, будут иметь исключительно важное значение и в робототехнике как средство, которое позволит роботам обрести более высокую квалификацию.

Сборка

Поскольку сборка с помощью роботов выделилась как одна из наиболее важных сфер применения роботов второго поколения, то не удивительно, что исследования в этой области проводятся почти в каждом крупном центре робототехники. Однако существует так много аспектов сборки с помощью роботов, что диапазон таких исследований, вероятно, будет сильно расширяться. Исследования в области специальных разработок компонентов и систем, необходимых для роботизации сборки, проводятся в таких университетах, как Сэлфорд (Великобритания), Массачусетс (США), в то время как соответствующая методология решения технических задач разрабатывается в Пердью (США).

Особенно энергично проводятся работы по соединению деталей и их технологичности в лаборатории Чарльза Старка Драпера (США), в то время как многорукие системы изучаются в нескольких исследовательских институтах. Вопросы подачи деталей интенсивно изучаются в Шведском институте исследования технологических процессов и университете Сэлфорд (Великобритания), в которых сконструировано линейное загрузочное устройство для сравнительно медленного темпа сборки роботами. Тем временем методология создания экономически эффективных робототехнических систем сборки разрабатывается в Государственном колледже в Лондоне.

Многие компании, несомненно, ведут интенсивные исследования по сборочным роботам, включая несколько японских фирм, таких, как «Хитати», а также корпорацию «ИБМ», которая, по-видимому, особый интерес проявляет к автоматической сборке легких деталей. Более

необычное приложение роботов изучается фирмой «Юнимейшн» совместно с фирмой «Лэнсинг-Бэгнэл» (Великобритания) и «Хьюз Эйркрафт» — монтаж проводки с помощью роботов. Задача связана с продеванием проводов между различными точками «монтажа проводки». Это широко распространенная операция при сборке различных электротехнических устройств.

В конце 70-х годов фирма «Вестингхауз» разработала широкомасштабную экспериментальную ГСС, известную как АПСС (адаптивная программируемая сборочная система), для сборки электромоторов.

Автоматически управляемые тележки

В целях устранения негибкости традиционных систем, управляемых по проволочной связи, сейчас успешно проводятся работы по созданию свободно движущихся мобильных роботов с использованием внутренних навигационных систем для фиксации положения и применения простейших карт их рабочих зон. Разработка таких мобильных устройств включает в себя исследования в области сенсоров, навигации, техники управления и связи, создание новых средств программного обеспечения. Большая работа по созданию мобильных колесных и рельсовых роботов проводится во Франции, включая те, что разрабатываются Французским национальным институтом прикладных наук, и по созданию автономного робота «Хиларе», сделанного в Национальном центре научных исследований. Кроме того, конечно, следует упомянуть работы по созданию шагающих систем, которые, правда, пока менее эффективны рассматриваемых в гл. 12.

Стенфордский исследовательский институт имеет опыт в создании мобильных исследовательских роботов (таких, как «Шейки»). Под руководством доктора Микки Лэркомба (Варвикский университет) институт разработал свободно двигающиеся автоматические платформы, предназначенные для промышленного применения на заводах и скотопрогонных дворах (упомянутые в гл. 12).

Такие системы обладают совершенной сенсорикой, позволяющей им перемещаться в такой окружающей обстановке, как складские помещения.

Уже проводятся испытания в большом пустом цехе на заводе «Бритиш Лейланд» в Ковентри, близ Варвик-

ского университета — так, что действительно роботизированные АУТ можно будет вскоре купить. Исследовательские работы по таким системам также ведутся в Государственном колледже (Лондон).

Будущие системы смогут часть пути совершать по скрытому (в полу) проводу, затем оставлять его для выполнения частных заданий, возвращаясь к проводу для связи или с целью получения управляющих команд. Сенсорные устройства обеспечат данными о стенах и предметах. В дальнейшем нужно будет применить направленный вверх фотодатчик для использования заводского освещения с целью определения местоположения. Для постоянной связи с центральным управляющим компьютером, по-видимому, будет использоваться инфракрасное излучение (используя тот же принцип, что и при дистанционном управлении домашними телевизорами). Варвикские АУТ содержат компьютеризованную «карту» зоны, которая проверяется по фактическим данным, поступающим от набора датчиков. Таким образом, платформе не требуется полностью полагаться только на какой-либо один источник информации и она не будет сбита с толку недостающими или противоречивыми командами вызова подпрограмм. Имеется в виду, что ограниченный речевой синтез будет использоваться тележками для обеспечения подстрочного комментария, например объяснения, что они не вышли из-под контроля, а просто выполняют многоточечные повороты.

Автоматические заводы

В начале 70-х годов японское правительство инициировало разработку проекта **методологии создания безлюдных производств** (МБП) с целью финансирования развития в значительной степени безлюдных заводов. Хотя масштабы проекта с тех пор несколько уменьшились, все же считают, что небольшой завод будет введен в действие для выпуска 15 различных типов деталей, таких, как шестерни и валы для коробок скоростей. Насколько возможно будут использоваться модульные конструкции, наряду с традиционными станками с ЧПУ найдет применение более современное оборудование, например лазерное. Роботы будут применяться для погрузки и разгрузки станков и конвейеров. Система будет также способна обращаться с сырьем, металлической стружкой и комплектующими деталями.

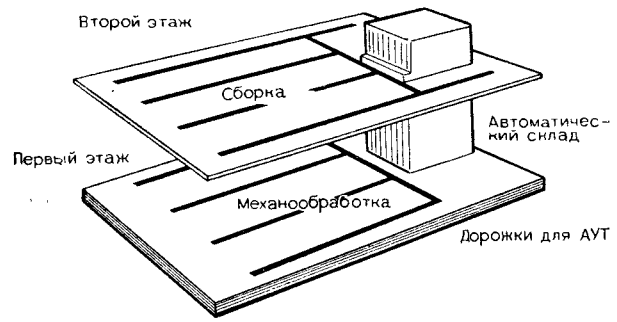

Рис. 55. Схема автоматизированного завода фирмы «Фанук»

«Фузитцу Фанук», крупнейший в мире производитель систем с ЧПУ, уже построил в значительной степени автоматизированный завод стоимостью 18 млн. фунтов стерлингов для производства и сборки шпиндельных моторов и сервомоторов постоянного и переменного тока. Завод состоит из двух этажей (рис. 55). На первом этаже находится механообрабатывающий цех с 60 станками с ЧПУ (обслуживаемыми 32 роботами), а на втором — сборочный цех с 49 роботами, объединенными в 25 роботизированных комплексов, хотя 35 % сборки попрежнему выполняется вручную. Два этажа завода связаны автоматическим складом. «Фанук» утверждает, что ввод в действие этого завода сократил общезаводские накладные расходы на 30 %.

Большое число долгосрочных исследований проводится в области создания автоматических заводов. Примером может служить «КИДМАК»[1], проект, выполненный в Пердьюйском университете (США), являющемся одной из главных ударных сил в исследовании автоматизации производства. Цель проекта — добиться действительной интеграции различных направлений развития техники, которые способствуют повышению эффективности. Ожидается, что в период до конца нынешнего десятилетия на автоматизацию производства будет потрачено в общей сложности более 100 млрд. долл. Некоторые считают, что все это, по-видимому, приведет к положению, когда безлюдные заводы будут состоять из

[1] CIDMAC (Computer Integrated Design, Manufacturing and Automation Centre) — компьютерный интегрированный проектный, производственный и автоматический центр.

роботов, обслуживающих станки в безоконных, неотапливаемых и невентилируемых помещениях. Действительно, если заводы будут и в самом деле безлюдными, потолки там могут быть метровыми или примерно такой высоты от пола! Некоторые из главных компонентов автоматических заводов, такие, как КАД-КАМ и ГПС, автоматические склады и т. д., рассматриваются в последующих частях этой главы.

КАД-КАМ

В связи с падением стоимости вычислительной техники в 70-х годах и появлением графических дисплеев с высоким разрешением и развитым программным обеспечением стало возможным использовать компьютеры в проектных бюро для выполнения чертежных работ. Такие системы автоматизированного проектирования способны увеличить производительность труда чертежника в три раза и более. Хотя эти системы в основном используются пока только крупными компаниями, их характеристики постоянно улучшаются. При этом возрастают возможности систем автоматически передавать инженерные данные внешним управляющим и информационным системам. Благодаря высокой надежности и прочности современной микроэлектроники становится возможным разместить основную вычислительную технику фактически в цехе, так, чтобы система КАД (САПР) могла бы быть непосредственно связанной с оборудованием, управляемым системой КАМ (автоматизированной системой управления технологическими процессами) на заводе. Такое оборудование могло бы включать в себя станки с ЧПУ (токарные и фрезерные), загружающие и разгружающие их роботы, а также роботы, выполняющие производственные операции по обработке деталей.

Широкие исследования проводятся в промышленности с целью развития сложного программного обеспечения, которое позволит связать друг с другом системы **КАД** и **КАМ** с тем, чтобы получить единую систему **КАД-КАМ.** Кроме того, благодаря растущему использованию в робототехнических системах сенсорной обратной связи становится возможным наладить автоматический контроль выпущенной продукции. Когда такое направление включает систему **КАД-КАМ** в качестве

составной ее части, то образовавшееся в результате общее направление иногда называют системой **КАД-МАТ**[1], включающей в себя системы автоматизированного проектирования, изготовления и контроля.

Сельскохозяйственные работы

По мере усложнения роботов становится возможным использовать их вне заводского оборудования. Многие сельскохозяйственные работы требуют больших затрат труда, в этой связи большое внимание уделяется роботизации процессов доения. Помимо доения, в связи с совершенствованием свободно движущихся тележек становится возможным создать тракторы, управляемые без водителей. Их можно было бы применять для сева, вспашки, внесения удобрений, опрыскивания посевов и т. д., освобождая фермера от нетворческой части работ, связанных с уходом за растениями и домашним скотом.

В программе Национального института сельскохозяйственного машиностроения (Великобритания) изучались проекты управляемых без водителей пропашных тракторов, где не применяются какие-либо уложенные в грунт кабели, маяки с сигнальными огнями и другие устройства. Для точного следования по линии последней борозды успешно использовался оптоэлектронный метод, хотя проблема разворота трактора в конце поля оказалась намного труднее для решения. Она включает в себя маркировку границы поля отражателями, а также использование ультразвуковых сигналов для поиска последней борозды. Такую технику полезно использовать не только для пахоты, но также и для других упомянутых выше работ, особенно для опрыскивания посевов, где важно, чтобы каждый проход машины примыкал к предыдущему с тем, чтобы предотвратить пропуски и двойное опрыскивание, поскольку и то и другое может принести вред.

Помимо сельского хозяйства, потенциальными пользователями робототехники могут стать также рыбоводство и лесоводство. В частности, Япония занята сейчас поисками соответствующих путей для таких приложений.

---

[1] МАТ (Manufacturing and Testing) — изготовление и контроль.

Компьютеры пятого поколения

В начале 80-х годов японцы начали работу над проектом компьютеров пятого поколения с целью создания до конца десятилетия принципиально новых компьютерных систем, включающих и использующих концепции искусственного интеллекта. В заявлении, опубликованном в 1980 г. Японским центром обработки информации, об отличии их от современных компьютеров сказано, что требуются компьютеры, наделенные «здравым смыслом». Идеально такая система могла бы извлекать из своей базы знаний необходимую информацию при формировании выводов относительно предметов, о которых ей не дана какая-либо прямая инструкция.

Помимо программного обеспечения ИИ такие системы также требуют специальных форм компьютерной архитектуры. Европа и США включились в гонку по созданию таких компьютеров пятого поколения, и результаты их работы, по-видимому, сообщат развитию робототехники невероятный по силе импульс. Первые три года работы над проектом пошли на создание «инструментов», с помощью которых в оставшиеся 7 лет удастся достичь запланированных целей.

Технические цели проекта включают в себя достижение компьютерами такого уровня интеллекта, который позволил бы общаться с ними на естественном языке, использовать основанные на базах знаний экспертные системы для практического применения заложенных в памяти ЭВМ знаний и реально продемонстрировать функции обучения, общения и способности делать логические выводы. Разработка программного обеспечения будет значительно проще, и современные компьютеры будут представлять собой легкие, компактные и высокоскоростные машины с большим объемом памяти. Достичь эти цели можно, используя новые подходы к компьютерному аппаратному и программному обеспечению. Традиционная **фон-неймановского типа архитектура** достигает предела своего совершенства, поскольку такие компьютеры выполняют вычисления последовательно.

Такой «последовательный» подход ставит теоретический потолок для максимальной скорости вычислений, зависимой от скорости распространения электрических сигналов. Современные «суперкомпьютеры» должны быть построены так, чтобы в них не было связи длиннее нескольких десятых сантиметра — иначе сигналы по

ним будут слишком долго распространяться. Единственный практический способ преодолеть это теоретическое ограничение — выполнять одновременно несколько процессов, используя форму параллельной архитектуры вместо традиционной последовательной. Конечно, в такой работе нужно не просто обеспечить прохождение вычислительных процессов в одно и то же время и надеяться как-то разделить задачу между ними. Один из подходов к решению этой задачи представляет собой концепция такой архитектуры, когда операции с данными выполняются немедленно по мере их поступления вместо ожидания, пока единственная управляющая последовательность не подойдет к каждой операции. МТИ (США) создает «машину связи», содержащую миллион процессоров с памятью каждого около 100 бит. Процессоры создаются на изготовленных по заказу чипах, 64 на чип, таким образом, в готовой машине будет 16 000 чипов.

В Великобритании в Государственном колледже создана машина, известная как «Алиса», работающая целиком по принципу параллельности. Машина сделана только из трех видов изготовленных на заказ базовых элементов, повторяемых снова и снова. Большинство современных микрокомпьютеров могут обрабатывать в секунду только около 250 000 команд, но даже настольный прототип «Алисы» может работать со скоростью 5 млн. и более команд в секунду. Так же как современные архитектуры не подходят для компьютеров пятого поколения, так и традиционные машинные языки не могут быть использованы в новых машинах, так что оцениваются такие методы, как программирование в форме **логики предикатов.**

Это резко контрастирует с традиционным программированием, в котором компьютеру задается последовательность шагов, действий специальных операторов и вопросов в форме, очень похожей на классическую логику. Наиболее удачной формой логического программирования является сегодня язык «Пролог», сочиненный Робертом Ковальским из Государственного колледжа в Лондоне.

Широко распространено мнение, что цели проекта создания машин пятого поколения в основном достижимы и, конечно, как только такие компьютеры появятся в продаже, они станут компонентами сложных робототехнических систем.

Гибкие производственные системы

Ранние предшественники ГПС впервые начали появляться в 60-х годах, когда английская компания «Молинс» создала новый станок, названный «Система-24», пытаясь повысить эффективность выпуска малосерийной продукции до уровня, сравнимого с уровнем эффективности массового производства. Этот станок стал предвестником последующих ГПС. К несчастью, стоимость разработки «Системы-24» была столь высока, что «Молинс» в 1973 г. в конце концов была вынуждена прекратить работы по всему проекту с убытком в 5 млн. фунтов стерлингов.

Другим странам, таким, как Япония и США, была предоставлена возможность приобрести опыт в проектировании ГПС, и теперь все больше роботизированный обрабатывающий центр, состоящий из робота, обслуживающего один или более станков с ЧПУ, и вспомогательного оборудования, становится одним из «строительных блоков» современных заводов.

Нормальная ГПС состоит из нескольких таких обрабатывающих центров, связанных друг с другом физически или компьютером. Способность обрабатывающих центров в таких системах «делиться» друг с другом получаемой информацией, находясь под общим управлением центрального компьютера, и позволяет ГПС выдерживать общую стратегию производства, реализующуюся в действительно интегрированной системе. Такое направление все больше становится известным как **компьютерное интегрированное производство** (КИП). Конечно, чем большей гибкостью будут обладать ГПС, тем больше потребуется разнообразных инструментов для механической обработки. Таким образом, очень высокая гибкость порождает проблему надежности в отношении операций складирования и транспортировки инструментов.

ГПС фирмы «Ситроен» в Медоне, близ Парижа, имеет склад для 700 инструментов — 50 в каждой обрабатывающей ячейке и 600 — на специальном вспомогательном складе. Этот четырехметровой высоты склад содержит манипулятор, который автоматически отбирает требуемые инструменты и размещает их в количестве до 24 шт. на портативную карусель, расположенную на тележке, которая в свою очередь доставляет их в специализированный обрабатывающий центр. Если

вспомнить, что на складе должны храниться не только запасные инструменты (в случае поломки), но что требуются целые резервные склады (так как поломка склада инструментов может привести к остановке всей ГПС), то становится ясно, что система манипулирования инструментом для ГПС высокой гибкости представляет собой один из важнейших компонентов всей системы. Число ГПС в мире уже выражается трехзначными цифрами и, вероятно, будет удваиваться каждые три года. Одной из главных движущих сил внедрения ГПС является их способность сокращать продолжительность производственного процесса при улучшении коэффициента полезного использования станков. Подсчитано, что около 75 % всей металлообрабатывающей продукции состоит из серий менее 50 шт. Однако традиционно при таком малосерийном производстве деталь может находиться на станке только 5 % времени и только 30 % этого времени идет непосредственно на обработку. Наряду с часто простаивающими станками все это, вместе взятое, приводит к омертвлению крупного капитала.

Действительно, компания «Бритиш Юнайтед Шу Мэшинери компани» в Лейчестере подсчитала, что изготовление типовой детали, выпускаемой на отдельных станках с ЧПУ, стоило на 2,5 % больше, чем на ГПС. Объем незавершенного производства был на 66 % больше. На 34 % больше был объем запасов (при 17-часовом рабочем дне на станках с ЧПУ и 24-часовом на ГПС). Подобным образом ожидается, что ГПС стоимостью 6 млн. фунтов стерлингов на фирме «Андерсон Стречклайд» (Глазго) сэкономит 1 млн. фунтов стерлингов на запасах, а время, затрачиваемое в механообрабатывающем цехе, сократится с четырех месяцев до четырех недель. Почти каждый изготовитель робототехнических центров определенным образом вовлечен в исследования ГПС.

Одной из наиболее амбициозных схем является программа создания интегрированной производственной автоматизированной системы американских военно-воздушных сил, долгосрочная цель которой состоит в том, чтобы создать автоматизированный аэрокосмический завод. В Великобритании фирма «600 групп» в Колчестере уже разработала (с помощью правительственной субсидии) интегрированные ГПС механообрабатывающих систем для малосерийной продукции (деталей общей обработки). Эта система называется «СКАМП». Она

10 Зак 611

состоит из девяти станков с восемью обслуживающими их роботами и использует сложную оптическую систему для ориентации деталей. Малые серии цилиндрических компонентов обрабатываются без прикосновения руки человека за три дня, в то время как в прошлом решение такой задачи потребовало бы двух месяцев и 50 манипуляций! Средняя стоимость проектов ГПС, субсидируемых правительством Великобритании, составит около 3 млн. фунтов стерлингов каждый, и компании всех размеров начали внедрять их, включая несколько фирм с численностью работников менее 200.

Программное обеспечение ГПС

Существует много задач для компьютера в системе ГПС, но одной из наиболее важных является та, которая позволяет управляющему точно установить регламент и составить режим для системы согласно различным приоритетам так, чтобы достичь наилучшего использования станков, когда заданы сроки поступления деталей и задана вероятность выхода из строя по какой-либо причине любого из станков. Кроме того, операторы, если они используются, должны быть проинструктированы о загрузке новой серии заготовок и снятии готовой продукции, а палеты должны быть направлены к складу или из него к соответствующим местам с использованием либо конвейерной системы, либо автоматически управляемых тележек.

Программы обработки для устройств с ЧПУ, так же как и программы для роботов, должны храниться централизованно, а затем распределяться в соответствующий компьютер, целенаправленно управляющий тем станком с ЧПУ, который должен обрабатывать заданную деталь. Программное обеспечение должно дополнительно управлять складированием и поддерживать на необходимом уровне запасы, так же как и определять путь каждой детали. Наконец, вся система должна находиться под постоянным контролем, с тем чтобы любую неисправность можно было быстро заметить и устранить.

Для составления требуемого сложного программного обеспечения предлагалось много подходов, и исследования в этой области продолжаются во всем мире и по сей день, особенно в США, Великобритании и Японии. Большинство подходов включают в себя некоторые формы иерархического управления, но из-за сложности программного обеспечения необходимо попытаться провести его дальнейшее разделение, каким-то образом формируя модули из целого пакета программ. Это означает, что создание различных модулей может проходить параллельно. При этом их изменение и совершенствование носят лишь локальный характер, система оказывается более устойчивой к отказам в работе. Некоторые модули во многих странах можно сдваивать, если, например, к системе добавляется станок. Тогда весь пакет программ значительно легче составить и отладить. Тем не менее фактический выбор границ модулей зависит от того, какая будет выбрана стратегия программного обеспечения роботов (в области развития вычислительной техники).

Несмотря на такие подходы, составление программного обеспечения для ГПС остается чрезвычайно трудным делом. Для новых ГПС составление программного обеспечения вручную обошлось бы в 1 млн. фунтов стерлингов (более 40 человеко-лет работы). Однако из-за того, что на это потребовалось бы около трех лет, в то время как механическое оборудование могло бы быть установлено и подготовлено к работе всего за 15 месяцев, было решено использовать намного более простое программное обеспечение, чем требуемое в идеале. Из опыта известно, что система компьютерного управления ГПС может составлять 30 % ее общей стоимости, в том числе одно только программное обеспечение — 20 % общей стоимости. В дальнейшем компания «Ингерсол инженирс» подсчитала, что около 10 % ГПС, созданных в Европе и США, оказались полностью удачными, в то время как успехи большинства остальных довольно спорны из-за недостатков программного обеспечения.

Забавы

Большинство исследований по робототехнике преследует цель дать немедленную практическую пользу за счет улучшения конструкции робота или решения какой-либо прикладной задачи. И только небольшое число исследований (такие, как пятипальцевый робот из университета Васеда, играющий университетский гимн на органе), в которых участвуют специалисты с опытом работы в робототехнике, вероятно, косвенно решая ряд

также потенциально полезных задач, прежде всего ставят перед собой цель создания какого-либо робототехнического устройства, в котором нет никакой нужды! Результаты, однако, могут оказаться весьма забавными.

Вероятно, одной из наиболее великолепных ненужностей таких устройств является самостоятельный робот, созданный Бэттлом, Пасифик Нортвест Лабораторис, для игры в кубик Рубика! Кубик может быть помещен в руки робота (названного Куботом), после чего система переходит к чтению цветных граней кубика. Определив, в каком состоянии находятся грани куба, робот использует специальный алгоритм для определения последовательности движений, необходимых для возвращения каждой грани куба к одному цвету, а затем, используя манипуляторы, выполняет каждое из определенных движений, пока головоломка не будет решена. Хотя время, необходимое для решения задачи, зависит от сложности, с какой собран куб, даже на самый запутанный вариант требуется менее трех минут. Для человека, имеющего все, это, конечно, будет любимой игрушкой, которая победит любого, пожелавшего состязаться.

Будущее поколение компьютерных элементов

Как указывалось в гл. 2, с середины 60-х годов плотность памяти компьютеров каждый год практически удваивается при быстро снижающихся энергетических потребностях (рис. 56). Подсчитано, что если такие темпы сохранятся, то только за 20 лет память компьютеров станет такой же плотной, как нейроны в человеческом мозгу. В действительности каждый нейрон может быть эквивалентен нескольким тысячам составных элементов, но даже и этот дополнительный фактор мог бы быть поглощен всего лишь последующим 5—10-летним развитием при современных темпах. Конечно, объем памяти ни в коей мере не является мерилом человеческого интеллекта, но представляет собой хороший показатель потенциального «интеллекта», если только будет разработано достаточно умное программное обеспечение.

Если плотность компонентов в интегральных схемах увеличится, то станет уже и ширина между связующими бороздками на каждой интегральной схеме. Некоторые интегральные схемы уже делаются с бороздками, высекаемыми электронными пучками, ширина которых равна всего 1 мкм, что составляет, как уже говорилось, одну сотую толщины человеческого волоса. Иллюстрацией того, насколько тонки такие бороздки, может служить такой пример. Тепло руки, держащей микросхему, заставляет кремний расширяться на величину, превышающую ширину одной бороздки! Возникают сомнения, стоит ли продолжать и дальше уменьшать размеры бороздки в погоне за увеличением производительности и скорости. Тем не менее есть смысл вспомнить, как успешно функционируют в человеческом мозгу сравнительно медленные «элементы» благодаря присущей им высокой параллельности действия. Современные высокоскоростные микроэлектронные устройства могли бы посылать сигналы вдоль компьютера, может быть, длиной в полмили за то время, которое потребовалось бы сигналу для того, чтобы пересечь человеческий мозг от одной стороны до другой!

Итак, какие же технические средства будут использованы в новых компьютерах? Очень интенсивные исследования проводятся с целью замены применяемых сегодня интегральных схем на кремниевой основе и даже самих элементов транзисторов. Предполагаемой альтернативой кремнию могло бы стать создание нового вида интегральной схемы, основанной на арсениде галлия.

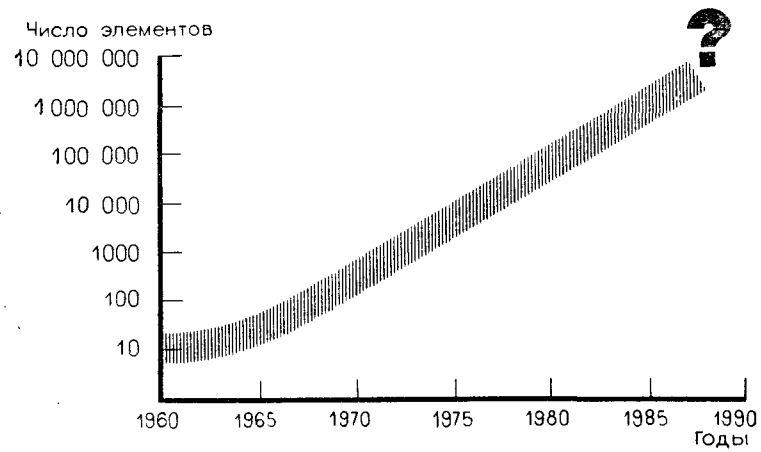

Рис. 56. Увеличение числа дискретных элементов в интегральных схемах

Преимущество ее могло бы состоять в увеличении скорости в 2—3 раза. Другими словами, микросхемы могли бы быть сделаны в 2—3 раза большими (но упакованными с той же плотностью, что и раньше), но не потеряли бы в технических характеристиках.

Тем временем группа в университете Хериот Ватт (Великобритания) создает **оптический транзистор**, или **трансфазор**, который чрезвычайно быстро может включать и выключать лучи света. **Оптические компьютеры**, создаваемые с такими устройствами (использующие для передачи информации свет вместо электричества), потенциально будут способны работать с чрезвычайно высокими скоростями. Однако нельзя даже предсказать, когда появятся такие устройства.

Еще более сложные исследования проводятся в области **молекулярной электроники** такими компаниями, как «ЕМВ Ассошиэйтс», где делаются попытки создания биологических компьютеров, в которых информация могла бы храниться на молекулярном уровне. Такая работа, действительно, может привести к радикально новым концепциям в вычислительной и робототехнике, но до этого еще слишком далеко.

Помощь инвалидам

Вероятно, одним из наиболее привлекательных из всех приложений робототехники является оказание помощи тем, кто из-за своего физического недостатка не в состоянии жить полнокровной жизнью. Есть инвалиды, кому посчастливилось иметь кого-нибудь, кто выполняет то, что они сами не могут делать, но в лучшем случае это дорого в смысле затрат времени и усилий. Однако даже при самых лучших намерениях между больным и помощником может возникнуть психологическая напряженность. По мере усложнения роботов у инвалидов постепенно будет появляться возможность (по доступной цене) иметь своего собственного «раба», который под их руководством сможет выполнять по крайней мере хоть некоторые из требуемых задач.

Примером таких исследований может служить работа, выполняемая в университете Джонса Гопкинса (США) над созданием робототехнической руки и системы рабочего стола. Способная к обучению рука связана с письменным столом, оснащенным печатной машинкой,

телефоном, подставкой для чтения, персональным компьютером и посудой. Рука может помогать в выполнении таких задач, как еда или переворачивание страниц. Управление осуществляется специально спроектированными средствами, способными приспосабливаться к разнообразным помехам.

Подобная работа проводится и в Токийском университете, где создают двурукого робота-няню, способного выполнить целый набор задач — от снятия телефонной трубки до накрывания стола. Другой японский проект «Мелдог» ставит цель заменить роботом собаку-поводыря для слепого. Движущийся робот спроектирован так, чтобы передвигаться между выбранными пунктами, используя для этого выученную наизусть карту со специальными ориентирами, позволяющими избежать столкновения со встречающимися на пути препятствиями.

Хотя проект и интересен по замыслу, возникает вопрос, будет ли металлический электронный робот столь же приятен для слепого, как ласковая и дружелюбная собака.

Лабораторные работы

Роботы можно использовать в химических лабораториях для таких работ, как отбор проб и проведение экспериментов. Роботы обладают значительными преимуществами в смысле многосторонности по сравнению с узкоспециализированными аппаратами для смены образцов, например, на газовых хроматографах, поскольку робот может быть запрограммирован для использования на разных рутинных операциях или выполнения в определенной последовательности отдельных процессов. Кроме того, микропроцессор, управляющий роботом, можно также использовать для восприятия, хранения и интерпретации экспериментальных данных.

Японское научное и технологическое агентство использует химический робот, специально спроектированный и изготовленный фирмой «Дайн Сейкоша» для выполнения одного этапа так называемого «процесса Мексема-Гильберта» — для отсекания части образца ДНК в определенной точке. Таким образом, робот может видоизменить работы, связанные с анализом и опознаванием генов. Его можно также запрограммировать для выполнения около 200 других работ, таких, как добавле-

ние реагента в дозах порядка 0,0001 мл или центрифугирование проб. В Великобритании исследовательская группа из Манчестерского университета создала коммерчески доступный «Вунэн» — робот, особенно подходящий для химических приложений и манипуляций или передачи как крупных, так и мелких проб. В исследовательском центре «Филип Моррис» (США) робот «ПУМА» используется для погрузки и разгрузки весов с разрешением 0,1 мг.

Морские работы

Хотя управляемые на расстоянии подводные аппараты, связанные с судном-маткой и кабелем-пуповиной, стали вполне обычны, все больше требуется безлюдных подводных устройств, которые могли бы действовать независимо от судна, находящегося на плаву, и таким образом, например, двигаться под нефтяными платформами, не цепляясь за них кабелем. **Передачи телевизионного изображения** сегодня недоступны из-за того, что необходимая информация не может пройти сквозь толщу воды. Такие **автоматические подводные роботы** уже разрабатываются различными организациями. Нью Хемпширский университет (США) создал похожее на осьминога устройство для проведения сложных подводных работ, таких, как обследование и составление карт морского дна. Американский центр «Нейвэл Оушен системз» спроектировал прочное действующее на дальних расстояниях акулоподобное устройство для поиска и обследования, а фирма «Бритиш Телеком» имеет систему «Сидог», пригодную для строительных, спасательных и ремонтных работ.

Разделывание мяса

Хотя на первый взгляд это может показаться неправдоподобным, но роботы серьезно исследуются с целью применения их для разделывания мяса. По заказу мясоразделывающей компании Государственный колледж в Лондоне разрабатывает методы отделения от кости копченой свиной грудинки с помощью роботов. В настоящее время это делается вручную умелым рабочим, который вырезает ребро и другие кости из грудинки с помощью разнообразных острых ножей, пригодных для этой цели, перед тем как бекон будет, наконец, порезан на тонкие куски. Труд утомительный и напряженный, и компании испытывают растущие трудности при наборе персонала на освобождающиеся места в этом виде работ.

Робот, заменяющий здесь человека, должен прежде всего уметь определять местоположение различных костей в данном куске мяса путем прикосновения к мясу специального сенсора, состоящего из серий спиц. Сделав разметку костей, специальный инструмент затем начинает резать вокруг конца каждой кости, и режущая петля, расположенная на конце руки робота, помещается в этот надрез вокруг кости. Когда рука робота оттягивается назад, петля отделяет кость от мяса.

Медицина

Специалисты по робототехнике все серьезнее рассматривают приложение робототехнической технологии к различным областям медицины, особенно связанным с уходом за больными и хирургии. Исследования касаются методов использования роботов для помощи прикованным к постели больным, вплоть до помощи больному встать с постели и снова лечь в нее. В области хирургии роботы уже оцениваются с позиции использования в микрохирургии, где высокоточный робот с сильной обратной связью мог бы оперировать с гораздо более высокой скоростью и точностью, чем хирург. Кроме того, в Токийском технологическом институте разрабатывается тонкая, гибкая, змееподобная рука, которая через нижний отдел кишечника сможет пробраться внутрь больного для обследования. Сегменты прибора составляют всего около 15 мм в диаметре. Применены специальные исполнительные механизмы из обладающего памятью металла, который при нагревании принимает заданную форму. Фактически предполагается использовать устройство для доставки лекарств в нужное место и для малой внутренней хирургии.

Военные работы

К несчастью, как думают многие специалисты по робототехнике, существует несколько потенциальных военных приложений для роботов, особенно когда

системы искусственного интеллекта становятся все более доступными. Роботы уже используются для манипулирования взрывчатыми веществами, например на заводе компании «Вэллоп индастриз», расположенном в крошечной деревушке Мидл Вэллоп (Хэмпшир). Американская лаборатория «Арми хьюмен инжениринг лаборатори» разработала робототехническую систему, которую может перевозить трайлер для манипулирования тяжелыми снарядами в полевых условиях. Естественно, поскольку эта способность роботов действовать в опасной обстановке распространяется на само поле боя, серьезные исследования проводятся также с целью создания новых роботов, которые смогут действовать вместо солдат или в качестве дополнительной силы, сохраняя таким образом человеческие жизни в очень опасных ситуациях.

В 1983 г. США объявили о своем намерении создать в космосе систему стоимостью во много миллиардов долларов для перехвата и уничтожения вражеских ракет. Такая система должна быть сильно оснащена робототехническими средствами, поскольку ей придется самостоятельно приспосабливаться к новым ситуациям в периоды потери связи. Все такие «оборонные» исследования, конечно, очень интенсивно финансируются и держатся обычно под большим секретом. Тем не менее известно, что американское министерство обороны, например, намерено в ближайшем будущем создать полностью безлюдный танк, который мог бы передвигаться со скоростью до 60 км/ч, огибать препятствия, находить цели и атаковать. Единственно, что успокаивает, так это панорама завтрашнего боя (если нам не удастся совсем его избежать), которая будет представлять собой сражение только роботов с роботами. Не будет видно людей и ни одной капли крови не прольется, так как человеческая жизнь будет считаться слишком ценной. Проигравшей будет та сторона, которая первой потеряет свои роботы и поймет бессмысленность посылать людей туда, где роботы потерпели поражение. Все это очень похоже на игру.

Горное дело

Применение роботов (или по крайней мере телеоператоров) на опасных горных разработках давно обсуждается. Недавно в Стенфордском университете в Калифорнии создан роботизированный бур, который может бурить в горных породах под углом к вертикали более 60°, захватывая края скважины, высверливая новое пространство и затем входя в него. Таким образом, он может сверлить за углами, двигаться по кривой, сверлить вкось и даже вверх, получая доступ к месторождениям, которые непрактично бурить с поверхности прямо вниз. Сперва бур следовало бы использовать при добыче нефти на заброшенных нефтяных скважинах, до которых нельзя добраться с помощью роторного бурения, но в конце концов его можно было бы использовать при бурении в открытом море, добыче угля, разработке геотермальных скважин и даже проводке трубопроводов под дорогами. В Советском Союзе также оценивают возможности применения роботов для бурения в скальных породах: слежение за процессом бурения и за геологическими условиями, с тем чтобы предотвратить поломку бура вследствие перегрузки.

Работы в ядерной энергетике

Электричество все больше получают от ядерных электростанций, и новое поколение проектов, известных как **проекты ядерных реакторов-размножителей,** скоро станут предметом коммерческих сделок. Окружающая такие реакторы среда столь радиоактивно «накалена», что обслуживающий их работник всего за один день получил бы годовую допустимую норму радиации. Чтобы это компенсировать, необходимо использовать чрезвычайно сложные телеоператоры или даже полностью независимые роботы для проведения обследования, обслуживания и ремонта вышедшего из строя оборудования в зонах интенсивной радиации. Последняя роль жизненно важна, так как хотя и достаточно трудно вначале построить реактор, намного труднее разобрать его на части при загрязнении радиацией. Различные исследования проводятся по роботам и относящейся к ним технологии, пригодной для ядерной энергетики. Это включает в себя автоматическое обеззараживание во время выхода из строя оборудования, подводный робот-чистильщик, созданный фирмой «Мицубиси Нэви Индастрид» совместно с фирмой «Токио Электрик Пауэр» для очистки стен и днища каналов водоохлаждения, и двухметровой длины руки робота для обследования

(фирма «Тосиба»). Эта рука состоит из восьми универсальных узлов и значительного числа тактильных датчиков и может пролезать в суженные отверстия для осмотра скрытых деталей видеокамерой.

Обеспечение охраны

Несколько компаний, например «Деннинг Системз» со штаб-квартирой в Вашингтоне, уже исследуют возможность создания свободно движущихся роботов для охраны. Возможны различные проекты для такой системы. Например, один или несколько роботов могли бы патрулировать (при необходимости беспорядочно), постоянно проводя проверку на огонь, воду, газ, незваных гостей или какие-либо признаки появления незваных гостей, такие, как лампы, зажигающиеся там, где никого не было во время последнего обхода. Робот мог бы быть сравнительно молчаливым, не требовал бы освещения (и его обход нельзя было бы обнаружить снаружи здания), не скучал бы и не требовал отдыха, не мог бы быть подкупленным и был бы полностью замкнут на своей патрульной зоне. Он мог бы регулярно посылать сообщения координирующему его компьютеру, находящемуся где-нибудь в другом месте, и отсутствие сообщения или сообщение о чем-либо случившемся могло бы поднять тревогу.

Такие роботы имеют преимущества перед статическими системами сигнализации. Их особенно трудно (если не невозможно) нейтрализовать, поскольку они снабжены значительно более сложными датчиками, чем те, которые можно размещать по всему зданию, и обладают способностью проверять сигналы тревоги от статических систем сигнализации. Если робот почувствует пришельцев, он может их немедленно сфотографировать для последующего анализа. Таким образом, обнаружив огонь и подняв по тревоге охрану, робот может немедленно применить находящийся у него огнетушитель или при чрезвычайных обстоятельствах пожертвовать собой, пытаясь достичь центра огня перед применением огнетушителя. Ожидается, что менее сложный — робот часовой фирмы «Деннинг» высотой около метра — будет стоить 25 тыс. долл. В конструкции использованы сонарные и инфракрасные датчики для управления и обнаружения пришельцев.

Стрижка овец

Шерстяная промышленность подвергается все более растущей конкуренции со стороны синтетических волокон. Чтобы выжить, Австралийская шерстяная корпорация приняла долгосрочную программу поиска менее дорогих и более эффективных средств стрижки шерсти овец и после основательного изучения решила, что в среднесрочной перспективе наиболее многообещающим является применение роботов. Стричь овец — нелегкая задача, часто ее приходится выполнять на жаре в отдаленных местах. Поэтому так или иначе молодежь все меньше проявляет желание овладеть этой профессией.

Исследования по программе **автоматизированной механической стрижки** ведутся сразу в нескольких местах. Мельбурнский университет разработал технику для автоматического отлова овец, размещения и удерживания их в люльке, подачи в робототехническую машину для стрижки, а университет Западной Австралии создал автоматический манипулятор, определяющий необходимые положения для стрижки овец. Современная стрижка живых животных требует сложной сенсорной обратной связи, и университеты Аделаиды разрабатывают ультразвуковой дистанционный сканнер для определения контуров кожи под мощным слоем шерсти. Сухая шерсть создает мало проблем, однако мокрая шерсть может прекратить действие датчиков. Тем не менее растущие цены на шерстяную продукцию делают автоматическую стрижку 135 млн. австралийских овец все более привлекательной.

Моделирование

При проектировании ГПС, состоящей из нескольких роботизированных модулей, очень скоро стало ясно, что любые попытки оптимизировать проект вручную, по-видимому, обречены на неудачу. В проекте так много переменных, что человеку не под силу их все сбалансировать между собой. Для того чтобы максимизировать потенциальную продукцию, необходимо как-то оценить относительную выгоду использования всех возможных комбинаций различных рабочих мест, инструментов, палет, конвейеров, тележек, маршрутов, операций, типов деталей и сочетаний машин. Идеальным инструментом для решения этой задачи является моделирование на

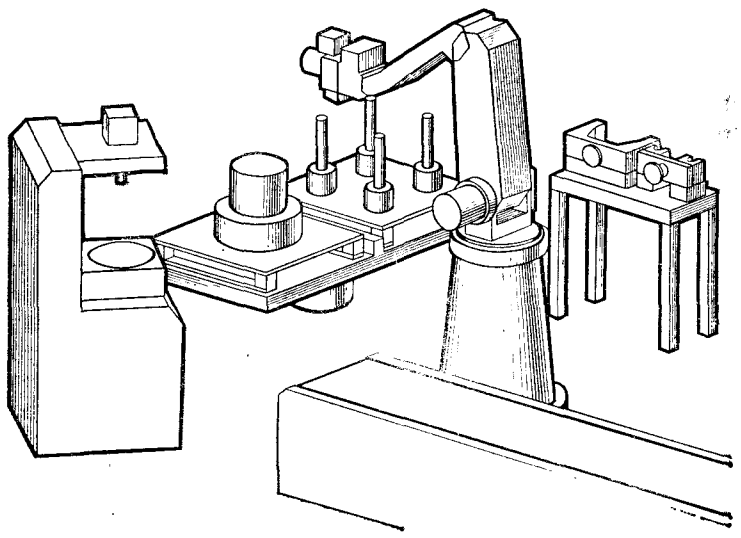

Рис. 57. Пример рисунка, выполненного автоматизированной системой моделирования «ГРАСП»

компьютере с помощью появляющихся в продаже все более усложняющихся пакетов программ.

Тем не менее проблема очень трудна, и любая попытка оценить непосредственно каждую возможную комбинацию не приведет к успеху даже на наиболее совершенных компьютерах. Даже сравнительно простая задача проектирования отдельного модуля (например, для сборки) имеет слишком много переменных, чтобы быть решенной даже на ЭВМ, хотя имеются различные пакеты программ для моделирования, которые графически представляют предложенную планировку, позволяя устранять противоречия и проводить другие проверки. Примером такой системы служит «ГРАСП»[1], созданная в Ноттингемском университете в Великобритании. Эта система программного обеспечения может помочь в планировке рабочих мест, оценке позиций и скоростей, определении противоречий и координации. Пример выполненной графики показан на рис. 57.

Системы моделирования появились совсем недавно. Они используются для проверки предложенного проекта без реального его воплощения. Так, например, можно было бы проверить, не развалится ли в полете крыло самолета новой конструкции. Хотя такие системы могли бы, вероятно, найти применение для проектирования роботов, разработка полных ГПС требует намного более широкомасштабного моделирования — подобно тому, как если бы при проектировании авиационного крыла у нас не было бы реальной идеи по оптимальному числу, планировке или детальной конструкции крыльев!

Однако, если ГПС все же спроектирована, число переменных существенно сокращается и становится возможным полностью моделировать на компьютере работу системы. Это позволяет с помощью моделирования, используемого в действующем программном обеспечении, составлять графики обработки изделий на линии и контроля продукции, необходимых для оптимизации поминутной работы системы. Таким образом, выход из строя одного из модулей ГПС в системе может быть немедленно компенсирован переадресацией потока материалов на другой производственный участок на заводе, так чтобы общая производительность новой (уменьшенной) системы была бы как можно ближе к первоначальной.

[1] GRASP (Graphical Robot Application Simulation Package) — пакет программ для графического моделирования работ с помощью робота.

Складирование

Все больше работ выполняется по проектированию улучшенных автоматических складов для удовлетворения потребности автоматических заводов. Уже построено несколько тысяч таких складов, но проекты становятся все более и более сложными по мере создания действительно автономных свободно движущихся автопогрузчиков и совершенствования систем распознавания. По-видимому, управляемые автоматические тележки будут становиться особенно популярными на предприятиях со средним объемом производства и многообразием производимой продукции.

Автоматическая идентификация обычно выполняется с использованием машиносчитываемых кодов либо на самих объектах, либо на палетах, которые переносят объекты, но никогда не покидают склад. Общее управление складом осуществляется компьютером, отвечающим обычно не только за хранение и возвращение объектов, но также и за возобновление запасов, когда они опускаются ниже некоторого уровня.

Тенденция производства, управляемого компьютером, к обеспечению материалами «точно в срок» (в которой запасы и время нахождения изделий в цикле производства удерживаются на абсолютном минимуме) вызывает большое напряжение при управлении складом. Тогда как общий объем деталей, находящихся на складе, существенно уменьшается, увеличивается число складских операций, которые требуется выполнить для обеспечения такого же выпуска продукции. Это требует большей гибкости, чем при традиционном складировании.

Побудительные мотивы внедрения автоматических складов заключаются в превосходном обслуживании клиентуры, уменьшении запасов путем оптимизации их объемов, увеличении эффективности, выражающейся в уменьшении конторской и управленческой работы, сокращении численности занятой на складе рабочей силы, более эффективном использовании дорогостоящих земельных участков и улучшении условий труда. Среди более свежих примеров совместной автоматизации завода и склада можно привести большой автоматический склад на автоматическом заводе фирмы «Фанук», разместившийся на двух этажах и использующийся для хранения необработанной, частично обработанной и готовой продукции вместе с комплектующими изделиями. Детали часто совершают челночные рейсы между складом и приемными устройствами различных обрабатывающих центров и сборочных модулей, используя АУТ. Менее традиционная форма автоматического склада используется в библиотеке Каназавского промышленного университета в Японии, где студенты в просмотровых будках (кабинах) могут выбрать любую из 2000 видео- и 1000 звукозаписей, которые затем автоматически доставляются со склада и ставятся в воспроизводящие аппараты с помощью челноков «Интелибот».

Глава 18

«О, прекрасный новый мир...» Будущие возможности

Проблемы прогнозирования

Куда мы идем? Куда поведут нас роботы? В этой заключительной главе мы рассмотрим возможные направления *робототехнической революции*, в которой мог

бы произойти прогресс. Редко, если когда-либо вообще бывало, чтобы такие прогнозы оправдывались. А распределение прогнозов по времени — совсем безнадежное дело.

Например, кто предполагал, что к 80-м годам каждый ребенок на экзамены будет брать калькулятор, а ответы свои все еще медленно писать от руки на бумаге, используя для этого вариант гусиного пера?!

Подобным же образом развитие в какой-либо другой области часто делает прогнозы бессмысленными — мог ли часовщик предположить, что всего за десятилетие его искусство станет ненужным благодаря достижениям в электронике? 30 лет назад Ален Тьюринг, великий пионер в математике и вычислительной технике (ставший случайно первым человеком, составившим для компьютера программу игры в шахматы), предсказывал, что во всей Великобритании никогда не будет больше двух или трех компьютеров, потому что для составления для них программ не хватит математиков. Теперь в стране несколько миллионов микрокомпьютеров, многие из которых программируются школьниками.

Тем не менее попытки дать долгосрочный прогноз стоят затраченного времени хотя бы только потому, что они показывают, что *может* произойти. Способность какого-либо человека предвидеть достижения вне той области знаний, в которой он непосредственно работает, хотя и оказывающая влияние на эту область, вероятно, не намного лучше, чем кого-либо другого, так как прогнозы более, чем что-либо иное, характеризуют рассмотренный *потенциал* состояния предмета: не столько то, что произойдет, сколько во что *может* вылиться развитие, если бы оно действительно шло независимо от других дисциплин.

Для такого фундаментального многодисциплинарного предмета, как робототехника, значение проблем, связанных с отсутствием такой независимости, особенно велико. Несмотря на это, главная область, которая будет оказывать влияние на робототехнику в обозримом будущем,— это развитие электронно-вычислительной техники и программного обеспечения. По крайней мере электронно-вычислительная техника за последние два десятилетия развивалась в довольно точном соответствии с прогнозами. Вероятно, поэтому трудность в предсказании будущего развития робототехники состоит не столько в предвидении того, что может быть технически

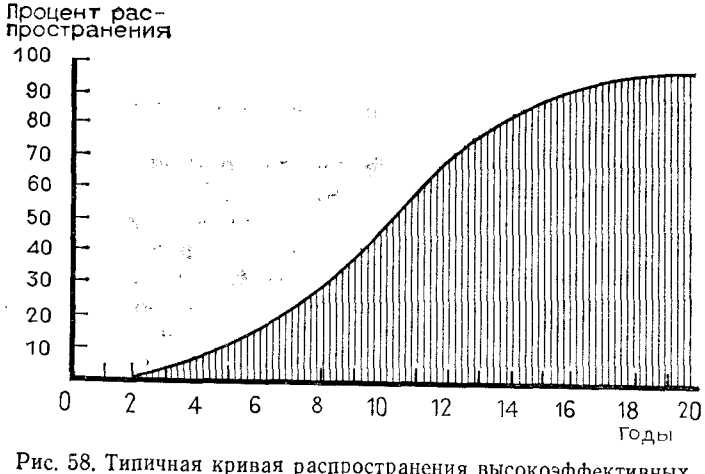

Рис. 58. Типичная кривая распространения высокоэффективных технических новинок

осуществимо, сколько в том, как эта технология будет в действительности применена.

Довольно много исследований проведено по «диффузии нововведений». В результате установлено, что в целом распространение любой новинки за некоторый период времени можно, как правило, представить *S*-образной кривой, как на рис. 58. Вначале скорость распространения мала, затем увеличивается, падая при достижении насыщения. Это означает, что процесс распространения редко бывает таким, каким его можно было бы ожидать. Действительно, на практике даже высокоприбыльные новинки редко требуют менее 8—10 лет, для того чтобы продвинуться с 10- до 90 %-ного распространения. Начало и конец процесса часто не укладываются в одно десятилетие. Таким образом, при рассмотрении «быстрого» распространения различных видов робототехнической технологии следует помнить, что имеется в виду сравнительно плавный переход. Путь от успеха в исследовательской лаборатории к широкому применению в промышленности или где-либо еще весьма долог.

1984—1990

Итак, держа в уме эти соображения, начнем с чего-нибудь полегче: как насчет достижений в робототехнике в 80-е годы? Похоже, что многие результаты исследований, рассмотренных в предыдущей главе, станут доступны промышленности.

Руки типа «СКАРА», получат очень широкое распространение на сборочных работах. При этом, вероятно, будет создано еще несколько новых конструкций. По-видимому, многие традиционные конструкции будут усовершенствованы благодаря использованию различных новых материалов, например армированных углеродом. В среднем робот будет обладать значительно большей вычислительной мощностью, чем более ранние модели этого десятилетия, и вместо обучения лишь методом прохождения, когда оператор водит рукой робота все больше будет применяться текстуальное программирование.

При огромном числе людей, изучающих «БЭЙСИК» в качестве своего первого машинного языка (в связи со «взрывом» персональных компьютеров), многие текстуальные языки для роботов останутся недостроенными, несмотря на поддержку более совершенных языков такими компаниями, как «ИБМ». Язык «ВАЛ» компании «Юнимейшн» вполне мог бы стать стандартом *де-факто* для этого уровня.

Однако по мере усложнения задач для роботов новые языки, такие, как «АМЛ», будут становиться все более необходимыми и под давлением «ИБМ» вполне могут стать чем-то вроде стандарта.

Не исключено, что, может быть, начнет появляться новая «порода» программистов для роботов (в отличие от персонала с другими функциями, которые тем не менее способны программировать). Тем не менее достижения в вычислительной технике, стимулированные упомянутым в последней главе проектом создания ЭВМ пятого поколения, вероятно, в конечном счете должны будут привести к значительному упрощению задачи программирования, таким образом позволяя менее подготовленному персоналу удовлетворительно справляться с большинством таких работ.

Одной из главных областей, которая, по-видимому, потребует такого программирования, будет сборка. Но хотя роль роботизации сборки и возрастет, вероятно, даже к концу десятилетия лишь немногие из крупных компаний начнут ее действительно применять, тогда как большинство фирм останутся приверженными традиционным формам сборки, не решаясь использовать наукоемкую технику.

Существенные экономические преимущества использования роботов для выполнения сборки могут к тому времени только начать заставлять компании заниматься роботизацией, но только постепенно.

Этот процесс ускорится благодаря доступности сравнительно недорогих визуальных систем, стоимость которых составит лишь малую долю общей стоимости робота (в противоположность положению в настоящее время). Это будут системы, как правило, черно-белого видения, а цветное изображение и восприятие трехмерности пространства будут применяться только для специальных приложений. Все больше будут применяться тактильные датчики (так же как и датчики простого касания), но трудности их разработки вместе с первоначально малым рынком сбыта, вероятно, сделают их относительно дорогими по сравнению с визуальными системами очувствления.

Помимо обработки, связанной с таким распознаванием образов, увеличение вычислительной мощности, вероятно, заставит себя почувствовать такими путями, как применяемый голосовой вывод, так же как ограниченный (но пригодный) голосовой ввод, используемый при программировании или в аварийной ситуации. Подобным же образом большое число датчиков будет годиться для роботов второго поколения, уже установленных в заводских цехах (хотя намного более простые роботы все еще будут использоваться для решения тех задач, для которых они предназначены). Увеличение вычислительной мощности позволит добиться намного большей интеграции роботов во всю заводскую систему вместе со значительно более высоким уровнем автоматизации в целом.

Тем не менее в основном безлюдные заводы, по-видимому, останутся чем-то вроде редкости, пока не ускорится развитие методов оптимизации таких систем и пока то, что подразумевается под эффектом интеграции, объясненным в гл. 16, не станет широко понятым специалистам по управлению. Прогноз Мичиганского университета в США утверждает, что в настоящее время прямая экономия труда представляет около 60 % общей экономии от использования роботов, но предсказывает, что к 1990 г. она будет составлять только около трети, в то время как экономия от улучшения использования производственных запасов и другие факторы окажут большое влияние.

К концу десятилетия в исследовательских лабораториях только начнут появляться интеллектные роботы третьего поколения, и компоненты вычислительной техники в них могут стоить только около одной тридцатой стоимости равнозначных компонентов пятилетней давности. Но в заводском цехе это, по-видимому, приведет не к более дешевым управляющим устройствам, а к более мощным. Механические части руки робота будут в основном так же дороги, как и прежде, хотя увеличившаяся вычислительная мощность может позволить удовлетворительно компенсировать недостатки более простых механических конструкций, а также эффективно управлять конструкциями руки со значительно меньшей надежностью.

В целом цены на робототехнические системы (в реальные сроки) вряд ли существенно изменятся, хотя при той же цене робот будет обладать намного большей вычислительной мощностью. Подобным образом, их общая спецификация будет лучше, так как, например, новые контроллеры позволяют выполнять точные движения со значительно большей скоростью, чем раньше. Интересно, что Мичиганский университет предсказывает увеличение на 6—11 % сбыта роботов, манипулирующих с предметами массой более 50 кг. Увеличение сбыта прогнозируется и в отношении роботов, выполняющих сборку очень легких деталей. Они будут, вероятно, теми рыночными «нишами», которые потребуется заполнить.

Роботы, вероятно, уже будут широко использоваться в различных аспектах приготовления пищи, а также для решения таких задач, как выполнение рутинной лабораторной работы. Возможно, к 1990 г. роботы могут серьезно применяться в таких непромышленных сферах, как столовые экспресс-обслуживания. Но здесь нужно предостеречь. Говорят, что это уже было испытано! Один американский бизнесмен намеревался создать полностью роботизированный ресторан экспресс-обслуживания и настолько преуспел, что даже построил его на Лонг Айленде (Нью-Йорк). Замысел заключался в том, чтобы посетители заказывали блюда нажатием кнопки, а роботы на кухнях брали бы потом из холодильников нужную пищу или готовили бы ее. В конце процесса единственный человек раскладывал бы приготовленную еду, доставленную ему по желобу в нужной комбинации. При демонстрации образца, казалось,

что система показывает себя с самой хорошей стороны. Однако потом человек уронил молочный коктейль. Поскольку ему требовалась замена, он протянул руку вдоль одного из желобов и искал там, пока не нашел нужного коктейля (из другого заказа), и разбил что-то еще. Через час он уже стоял по колено в мусоре.

1990—2000

В начале 90-х годов роботы могут начать использовать для манипулирования гибкими материалами, такими, как текстиль и резина, обращение с которыми требует очень сложного программного обеспечения. В некоторых случаях специальные роботы будут применяться при определенных хирургических операциях. Что же касается подводных или космических работ, так же как и сельскохозяйственных, горно-добывающих и ядерных работ, то маловероятно, чтобы роботы стали достаточно совершенны для работы в автономном режиме в таких областях применения. Значительно более вероятно (на этом этапе) применение телеоператорных устройств, управляемых скорее человеком, чем компьютером. Тем не менее для решения таких задач будут интенсивно развиваться и исследования по автономным роботам. Маловероятно, чтобы исследования в других областях, таких, как оказание роботами помощи престарелым и инвалидам, достаточно субсидировались (за исключением, возможно, Японии), так как имеются веские основания для проведения такой работы вне стен организованного для этой цели исследовательского центра.

В этот же период роботизированные автоматические тележки (от простых «буксиров» до больших автопогрузочных платформ) для перемещения материалов будут в экспериментальном порядке внедряться на выбранных для этой цели складах и заводах со средними масштабами производства, но широкой номенклатурой изделий. Тем не менее в целом будут еще преобладать разнообразные АУТ, двигающиеся по направляющим проводам. Конечно, существуют также возможности и потребности в разработке роботизированных тележек для охраны, но будут ли такие устройства действительно доступными, во многом зависит от предусмотрительности (или ее отсутствия) фирм по охране.

Уже в 1984 г. в Ленинграде стали использовать специальный сварочный робот, изготовленный на Петрозаводском судостроительном заводе, для работы в любой позиции внутри корабельного корпуса. Для выполнения некоторых (никогда всех) производственных задач роботам все больше будет требоваться мобильность — особенно когда робот необходим с перерывами в нескольких отдельных местах, как, например, при обслуживании нескольких станков с продолжительными периодами обработки детали. Впоследствии будут созданы подходящие мобильные роботы, в том числе перемещающиеся по длинным «рельсам», предназначенные для более структурированных окружающих сред.

Несмотря на увеличение сложности «игрушек», настоящие домашние роботы в 90-х годах еще не появятся, хотя многие верят, что это может произойти в самое ближайшее время — по крайней мере в некоторых областях применения. Пылесосить, полировать, накрывать на стол, загружать посудомойки, подстригать лужайки — все это, вероятно, можно будет осуществить с помощью дорогостоящих роботов. Зная, с каким восторгом большинство из нас поклоняется таким «штукам», вероятно, не так уже долго ждать до того времени, когда такие домашние роботы средних способностей можно будет купить как великолепные дорогостоящие предметы роскоши. Некоторые простые роботы для натирки полов, может быть, даже окажется экономически выгодно использовать в административных зданиях.

Тем не менее ответом на вопрос, который, вероятно, будет задаваться специалистам по робототехнике чаще, чем любой другой: «Есть ли у вас робот, который может гладить белье и убирать постель?», очень похоже, будет выразительное «нет». Действительно, Кэвин Доулинг, специалист из Карнеги-Меллонского университета (США), заявил, что робот, который сможет делать всю домашнюю работу, не появится по крайней мере в ближайшие 20 лет. Многие могли бы воскликнуть, что даже такой прогноз можно рассматривать как оптимистический. Кроме того, как отметил Игорь Александер из Государственного колледжа в Лондоне, очень похоже, что благодаря успехам фабричного производства потребность в глаженьи чего бы то ни было исчезнет раньше, чем кто-нибудь сделает робота, которому можно было бы доверить паровой утюг и еще недельную стирку!

Так много пришлось на 90-е годы, а что же осталось на конец века и дальше? Смущает то, что некоторые из сегодняшних молодых специалистов по робототехнике доживут и до 2050 г. Это очень большой промежуток времени в масштабах робототехники. По аналогии многие живущие сегодня люди были детьми, когда умерла королева Виктория. Они помнят жизнь без автомобилей и аэропланов, без пришедшего сначала радио, а потом телевидения. Их жизнь охватила промежуток времени от того момента, когда, может быть, им говорили, что Луна сделана из сыра, до того момента, когда они наблюдали и слышали людей, действительно ступавших по ней. Естественно, возникает вопрос, не станут ли перемены, которые будут переживать современные поколения, еще более невероятными.

Многие верят, что перемены будут невероятными, а робототехника может стать одной из величайших движущих сил развития техники. Рассмотренные направления перемен являются, конечно, только предположительными, но кажется вполне вероятным, что по мере того, как компьютеры становятся все более и более мощными, будет естественно ко многим из них добавить датчики и исполнительные механизмы. В конце концов, чисто механические аспекты робота станут не более чем одним из специальных периферийных устройств компьютеров — как дисплей или печатающее устройство. Поскольку сами компьютеры становятся меньше по габаритам, может быть, действительно, будет удобно разместить некоторые из них внутри мобильного робота (хотя компьютер, управляющий на расстоянии дистанционной тележкой, также причисляется к робототехнической системе). На этой стадии традиционная конфигурация научно-фантастического робота может оказаться почти реальностью.

Во многих сферах применения робототехники не требуется сложных мобильных роботов, как, например, для большинства производственных операций в промышленности. Таким образом, как роботы второго поколения в целом не вытеснят более старых роботов, а будут вместо этого использоваться в новых сферах применения, так и роботы третьего, четвертого и десятого поколений могут сосуществовать вместе со всеми остальными, постепенно создавая широкий спектр типов роботов,

каждый из которых пригоден для решения задач различной сложности. Однако один из выводов растущего усложнения роботов состоит в том, что люди начинают думать о роботах второго поколения (способных гибко реагировать на изменения вокруг них) как о первых настоящих роботах, относя современные машины первого поколения к «программируемым манипуляторам».

Когда-то, никогда

Каким может стать мир с таким большим числом очень сложных роботов? На перспективу социальные аспекты этого вопроса рассматривались уже в гл. 13. Однако представляет интерес сравнить их с двумя классическими предсказаниями будущего, опубликованными в фантастической литературе: «*1984 г.*» и «*Прекрасный новый мир*». Ни в одной из этих книг нет каких-либо механических роботов. В этом и не было нужды — самих людей заставили вести себя, как робот. Наша книга опубликована в 1984 г., а сейчас мы все больше предпочитаем использовать на наших заводах роботы, чем роботизированных людей. У нас появился новый источник «рабской силы», приемлемый для наших современных чувств. Но, как однажды заметил Норберт Винер, существует парадокс, воплощенный в двух качествах раба — разуме и раболепстве.

Вероятно, не следует в книге такого объема слишком глубоко обсуждать спорные вопросы искусственного интеллекта. Однако стоит заметить, что то, во что верят многие исследователи, может, в конце концов, осуществиться, хотя, и это следует подчеркнуть, остается еще много таких, кто не согласен с ними. Вместе с большинством своих коллег Марвин Минский, сооснователь лаборатории ИИ Массачусетского технологического института и бывший президент Американской ассоциации по искусственному интеллекту, очень верит в то, что компьютеры в конце концов станут «разумнее» любого человека. Он говорит: «Мы даже не знаем, как вплести ткань наших знаний в наши новые машины. Я рассматриваю это как наиболее волнующую исследовательскую проблему нашего времени: как гармонично соединить достаточно механизмов, чтобы образовать разум растущей компетентности и широты кругозора. Многие люди все еще считают, что такие вещи невозможно понять. Я думаю, что это лишь очень сложно».

В своем учебнике по искусственному интеллекту Патрик Генри Уинстон из Массачусетсского технологического института отмечает существование нескольких «мифов о мышлении». Например, некоторые заявляют, что компьютеры никогда не смогут стать разумными, потому что они не умеют писать, как Шекспир, сочинять музыку, как Бетховен, или мыслить, как Ньютон. Даже если бы это было и верно (что многие могли бы оспаривать), тот же критерий, конечно, означал бы, что большинство людей также не разумны!

Подобным же образом те, кто заявляет, что даже «разумные» компьютеры, если когда-нибудь и могли бы что-либо делать, то только то, что им задано основной программой, забывают, что способность человека к обучению тоже вначале обусловлена программой генетического кода.

Ясно, что появление таких «сверхразумных» роботов, которые выдерживают тест Тьюринга (объясненного в предыдущей главе), если это действительно когда-нибудь и случится, для человечества неоценимо.

Теоретически, если бы люди могли создавать такие машины, то потенциально одна или несколько таких машин сами были бы способны делать то же самое, а затем улучшать свои конструкции.

Очень скоро появятся отдельные роботы, у которых интеллект будет больше, чем у любого живущего человека. Некоторые специалисты искренне верят в то, что они доживут до того времени, когда смогут увидеть такие компьютеры собственными глазами.

Уинстон клеймит тех, кто заявляет, что такие суперинтеллектные машины неосуществимы, такими словами: «Конечно, верить в превосходство человека — это традиция. Однажды наша Земля была центром Вселенной, сейчас она ничем непримечательная планета. Однажды наше сотворение было прямым и божественным, теперь некоторые люди верят, что это счастливый случай, выпавший на долю приматов. Однажды наш интеллект был неоспорим, но когда-нибудь компьютеры, может быть, будут смеяться над нами и интересоваться, способны ли биологические процессоры быть действительно проворными. Остерегайтесь тех, кто думает, что этого никогда не случится. Их предки преследовали Галилея и осмеивали Дарвина».

Ясно, что даже если эксперты и окажутся правы, вид таких роботов, их роль и роль человека — все это ужасно неясно. Человечеству следовало бы привыкнуть к мысли поделить «свою» планету с превосходящим интеллектом, созданным по его собственному (начальному) замыслу. Конечно, многие могли бы возразить, что нет ничего нового в том, что человек делит планету с «превосходящими» его видами: ни один человек не может обладать силой льва или скоростью гепарда. Никто не может жить под водой, как рыба, или летать по воздуху, как самая скромная из птиц или летающих насекомых. Но искусственный интеллект обладает особым превосходством, в чем человечество ясно отдает себе отчет.

Некоторые, включая Минского, верят в то, что «суперроботы» можно было бы рассматривать как новую эволюционную ступень развития самого человека. Он приводит такие доводы: «Как долго нам придется еще терять скудные годы, отпущенные нам природой? Наша смерть, по-видимому, предопределена обменными процессами; клетки нашего тела, «управляемые» запрограммированными процессами гибели и борьбы, дегенерируют и умирают, когда иммунные системы ослабевают, и дезинформируют нас разрушать себя. Я просто заболеваю, когда слышу, как до небес превозносят эволюцию. Ни один уважающий себя программист не похоронит созданную им программу такими ужасными способами. Держу пари, что мы могли бы по крайней мере с таким же успехом начать все сызнова (без того миллиардлетнего накопления беспорядка) и попытаться передать все, что мы действительно хотим от тех обширных символ-процесс-структурных тканей, которые мы называем нашими собственными персонами, в более надежные и точные бессмертные коды». У многих такие мысли идут гораздо дальше и являются чересчур упрощенными — что, например, случится с «простыми» людьми при таком раскладе? Конечно, можно было бы надеяться, что какими бы разумными ни стали роботы, они все равно предназначены для обслуживания человека, хотя некоторые и заявляют, что это еще вопрос, допустимо ли (или даже позволительно ли), чтобы робот когда-нибудь стал, скажем, в 1000 раз умнее человека. К счастью, до таких проблем еще очень далеко, а некоторые доказывают, что подобное никогда не осуществится! Вероятно, важнее знать, сможет ли человечество действительно как-то сосуществовать с робототехнической технологией, как доказывают сторонники

подхода профессора Розенброка (рассмотренного в гл. 13).

Такие люди, как Алек Робертсон, консультант по проектированию и новой технике, предлагают, чтобы перед ответственными проектировщиками была поставлена задача превратить человека в супермена, усилив его физические и умственные способности. Робертсон спрашивает: «Должны ли люди развивать себя или мы отдадим наши обязанности машинам, а человеческое мастерство и способности исчезнут или будут применяться для саморазвлечения при безработице?»

Если развитие пойдет по пути «усиленного человека», как считают, то тогда, вероятно, для человечества и роботов предпочтительнее остаться на одной и той же эволюционной ветви, чем наблюдать, как отколются роботы. Некоторые верят, что, двигаясь в этом направлении, человечество однажды будет способно полностью заменить свои слишком уязвимые тела более постоянными механизмами и использовать суперкомпьютеры в качестве «интеллектуальных усилителей». Они утверждают, что это будет представлять следующий шаг эволюции, который предоставит свободу вырваться во Вселенную, избежав в конце концов жестокой судьбы (заранее *предопределенной* для эволюции) разума, обреченного на неминуемую гибель из-за того, что он попал в ловушку неадекватного биологического корпуса.

Это слишком далеко от накопителей, роботизации, точечной сварки, проблем экономической эффективности и кинематики. Размышлять о невероятном будущем, может быть, очень приятно, но сейчас не время об этом беспокоиться — оно может никогда не наступить. Сейчас, вероятно, не время даже пробовать готовиться к нему. Но если однажды это все-таки и произойдет, пусть никто не скажет, что специалисты по робототехнике в 80-х годах не предостерегали, что революция в робототехнике действительно только началась.

Оглавление

Предисловие 5

ЧАСТЬ I. БИОГРАФИЯ РОБОТОТЕХНИКИ 18

Глава 1. О чем вся эта суета. Основы робототехники . . 18

Робототехника, не роботы 18
Истоки робототехники 19
Что такое робот? 20
Рука робота 23
Различные конфигурации руки 24
Классификация роботов 30
Что могут делать современные роботы 33

Глава 2. От Древней Греции до фабричной смазки. Эволюция робототехники 34

Развитие современной робототехники 34
Развитие промышленной робототехники 40
Робототехника в мире 43

ЧАСТЬ II. ТЕХНОЛОГИЯ РОБОТОТЕХНИКИ 46

Глава 3. Тактика сильной руки. Механика робота I. Конструкция и методы описания 46

Анатомия манипулятора 46
Преобразования 49
Углы Эйлера 52
Кинематика 55
Динамика 58
Мобильные платформы 59

Глава 4. Как приложить усилие к локтю. Механика робота II. Приводные системы 62

Гидравлические приводы 62
Электрические приводы 69
Другие приводы 74
Несколько слов о мобильности 76
Трансмиссии 78
Технические характеристики функционирования роботов 81

Глава 5. Паровые машины и компьютеры. Управляющие системы I. Кибернетика 85

Роботы и управление 85
Обратная связь 86
Позиционное управление 92
Контурное управление 93
Дополнительные усовершенствования 94

Глава 6. **Делайте, как вам говорят. Управляющие системы II. Программирование и программное обеспечение** . . . 95
Виды аппаратуры . . . 95
Виды программирования . . . 97
Виды программного обеспечения . . . 99
Программирование пользователями с помощью программного обеспечения . . . 102
Текстуальное программирование . . . 106
Будущее программного обеспечения . . . 108

Глава 7. **Чувства и чувствительность. Сенсорные устройства внешнего состояния** . . . 110
Принципы очувствления . . . 110
Осязание . . . 114
Бесконтактное очувствление . . . 116

Глава 8. **Рука об руку. Рабочие органы и подача деталей** 126
Рабочие органы. Типы захватов . . . 126
Гибкость . . . 129
Податливость . . . 131
Инструменты и датчики . . . 134
Подача деталей . . . 134

ЧАСТЬ III. **РОБОТОТЕХНИКА В ДЕЙСТВИИ** . . . 139

Глава 9. **Роботы с руками** . . . 139
Удаление заусенцев . . . 139
Литье в металлические матрицы . . . 140
Обрубка отливок . . . 140
Обработка давлением . . . 141
Термическая обработка . . . 142
Точное литье по выплавляемым моделям . . . 143
Загрузка-разгрузка станков . . . 144
Упаковка, укладка в палеты и штабеля . . . 144
Формовка пластмасс . . . 145
Прессовочные работы . . . 146

Глава 10. **Технологические роботы. Инструменты для роботов** . . . 147
Клеевые и изоляционные работы . . . 148
Дуговая сварка . . . 148
Лазеры . . . 152
Механические инструменты . . . 154
Точечная сварка . . . 155
Покраска и покрытие распылением . . . 156
Водометные устройства . . . 157

Глава 11. **Перспективный рынок сбыта. Роботизированная сборка** . . . 158
Проектирование изделий . . . 159
Последовательность сборки . . . 164
Размещение, расчет и оценка . . . 166
Оптимизация систем роботизированной сборки . . . 168

Глава 12. **Научные факты из научной фантастики. Мобильные и другие подобные роботам механизмы** . . . 173
Автономия против дистанционного управления . . . 173
Сухопутные роботы . . . 176
Морские роботы . . . 179
Космические роботы . . . 181
Бионика . . . 183

ЧАСТЬ IV. **СОЦИАЛЬНЫЕ, ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ СООБРАЖЕНИЯ** . . . 185

Глава 13. **Как насчет моей работы? Роботы и люди** 185
Заботы . . . 185
Почему это делают? . . . 188
Социальные аспекты . . . 190
Новая революция? . . . 192
История упрощения операций . . . 195
Экономический детерминизм . . . 198
Неверный путь? . . . 202
Другие варианты . . . 204
Дорога в будущее . . . 205

Глава 14. **Управление роботизированными производствами. Робототехника и фирмы** . . . 206
Успехи и неудачи . . . 206
Вы готовы к применению роботов? . . . 210
Вперед марш! . . . 212

Глава 15. **Опасно — робот работает (не работает). Охрана труда и надежность** . . . 221
Проблемы охраны труда . . . 221
Решения по охране труда . . . 224
Надежность . . . 230
Обслуживание . . . 235

Глава 16. **Деньги приводят мир в движение. Экономические оценки** . . . 237
Роботы различны! . . . 237
Прямые факторы . . . 239
Экономия . . . 243
Интеграционный эффект . . . 245
Косвенные факторы . . . 247
Сроки окупаемости . . . 251
Норма прибыли на капиталовложения . . . 254
Приведенная чистая стоимость . . . 254
Рекомендации . . . 257

ЧАСТЬ V. **ПЕРСПЕКТИВЫ** . . . 260

Глава 17. **Что-то стряпается... Современные исследования** . . . 260
Конструкция руки . . . 261
Искусственный интеллект . . . 262

Сборка 264
Автоматически управляемые тележки 265
Автоматические заводы 266
КАД-КАМ 268
Сельскохозяйственные работы 269
Компьютеры пятого поколения 270
Гибкие производственные системы 272
Программное обеспечение ГПС 274
Забавы 275
Будущее поколение компьютерных элементов 276
Помощь инвалидам 278
Лабораторные работы 279
Морские работы 280
Разделывание мяса 280
Медицина 281
Военные работы 281
Горное дело 282
Работы в ядерной энергетике 283
Обеспечение охраны 284
Стрижка овец 285
Моделирование 285
Складирование 287

Глава 18. **«О, прекрасный новый мир...» Будущие возможности** 288

Проблемы прогнозирования 288
1984—1990 290
1990—2000 294
2000—2050 296
Когда-то, никогда 297

Производственная

Питер Скотт

ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ – ПЕРЕВОРОТ В ПРОИЗВОДСТВЕ

Редакторы **Л. И. КУЗНЕЦОВА, Т. М. ГРАХОВСКАЯ**
Мл. редактор **А. И. ФИЛИМОНОВА**
Техн. редактор **Г. В. ПРИВЕЗЕНЦЕВА**
Худож. редактор **А. М. ПАВЛОВ**
Корректор **Л. М. ФИЛЬКОВА**

ИБ № 2949

Сдано в набор 03.06.87. Подписано в печать 28.10.87. Формат 84×108 1/32. Бумага кн.-журн. Литературная гарнитура. Высокая печать. Усл. печ. л. 15,96/15,96 усл. кр.-отт. Уч.-изд. л. 16,76. Тираж 40 000 экз. Заказ 611. Цена 1 р. 20 к. Изд. 6218.

Издательство «Экономика», 121864, Г-59, Бережковская наб., 6

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 198052, г. Ленинград, Л-52. Измайловский проспект, 29.

Отпечатано с матриц в Ленинградской типографии № 6 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 193144, г. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

Зак. 291.