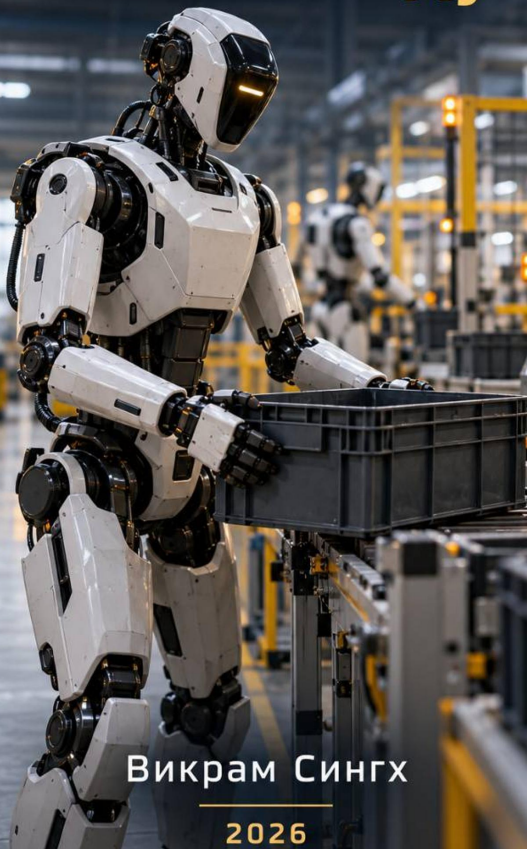


Промышленные роботы-гуманоиды в 2026 году



Викрам Сингх

2026

Викрам Сингх

Промышленные роботы-гуманоиды в 2026 году

<https://litres.ru/74517894>

SelfPub; 2026

Аннотация

Промышленные роботы-гуманоиды появляются на заводах и складах. Но что они действительно умеют сегодня и сколько стоит их работа? Эта книга объясняет, почему машина человеческой формы может быть полезна в пространстве, созданном для людей, как устроены её приводы, датчики и система управления, чему она учится и где уже выполняет задания.

На примерах Digit, Figure, Optimus, Apollo, Atlas и китайских разработок автор отделяет демонстрации от промышленной эксплуатации. Особое внимание уделено экономике: цене машины, затратам на внедрение, производительности, обслуживанию и окупаемости. Почему работа в три смены ещё не означает замену трёх сотрудников? Что меняется, когда робот дешевле и на предприятии работают сотни машин?

Заключительная часть посвящена последствиям для профессий, устройства заводов и размещения производств. Книга рассчитана на читателя, который хочет разобраться в новой

отрасли без сложной терминологии и формул — с пониманием её возможностей, ограничений и перспектив.

Содержание

Глава 1. Почему именно гуманоиды	5
От парового котла к железной руке	6
Мир, построенный для двуногих	8
Проблема «последнего метра» и гонка ловкости	9
Идеальный шторм: почему именно сейчас?	11
Глава 4. От вирусных видео к суровой реальности	13
Глава 2. Как устроен промышленный гуманоид	15
Механическая архитектура	16
Электроприводы и силовая электроника	19
Источники энергии	22
Сенсорная система	25
Управление телом	27
Кисть как главное ограничение	30
Глава 3. Интеллект робота	33
От запрограммированного движения к embodied AI	34
Зрение и понимание рабочего пространства	37
Конец ознакомительного фрагмента.	38

Викрам Сингх

Промышленные роботы-гуманоиды в 2026 году

Глава 1. Почему именно гуманоиды

Долгие десятилетия фантасты обещали нам мир, в котором по улицам шагают металлические андройды, а дома нас встречает услужливый робот-дворецкий. Однако реальность оказалась куда более прозаичной: вместо человекоподобных машин мы получили умные колонки, роботы-пылесосы в виде пластиковых «блинов» и гигантские механические руки на заводах.

Но сегодня все меняется. Индустрия стоит на пороге новой революции — революции гуманоидов. Почему же инженеры решили вернуться к идее создания машины по образу и подобию человека, и почему это стало возможным именно сейчас?

От парового котла к железной руке

Чтобы понять, зачем нам нужны гуманоиды, нужно взглянуть на то, как мы вообще дошли до автоматизации. История промышленных революций — это, по сути, история того, как машины забирали у человека тяжелую физическую работу. Паровой двигатель, первые токарные и ткацкие станки, знаменитый конвейер Генри Форда — все они решали одну задачу: многократно умножить мышечную силу человека.

Но у всех этих потрясающих механизмов был один фундаментальный изъян — они были невероятно узкоспециализированными. Ткацкий станок умел только ткать, а конвейер — только перемещать деталь по прямой. Они были во много раз сильнее и выносливее человека, но абсолютно беспомощны в мире людей.

В середине XX века на сцену вышли промышленные роботы. Классический фабричный манипулятор (представьте себе огромную желтую или оранжевую механическую руку, собирающую кузов автомобиля) стал настоящим прорывом. Он получил жесткую кинематику, невероятную точность, огромную грузоподъемность и способность работать 24/7 без перекуров. На автозаводах им поручили сварку, покраску и тяжелую сборку.

Но тут возникло непреодолимое ограничение: такой робот эффективен лишь там, где мир искусственно перестроен

под него.

Обычный промышленный манипулятор слеп и глуп в неструктурированной среде. Ему нужны жестко зафиксированные позиции деталей, специальные крепления, идеальное освещение и строгие ограждения (чтобы не убить случайно зашедшего человека). Классический робот не приходит на уже существующий завод — завод буквально строится вокруг робота.

Мир, построенный для двуногих

В чем же главное промышленное преимущество человека перед самой современной машиной? Человек — это универсальный интерфейс.

Подумайте сами: мы можем открыть любую дверь, подняться по крутой лестнице, взять в руки хрупкое яйцо или тяжелую кувалду, использовать стандартную отвертку и мгновенно адаптироваться, если нужная деталь вдруг упала на пол.

Наш мир — фабрики, склады, больницы, офисы и дома — в значительной степени антропоцентричен. Он спроектирован под человеческую анатомию. Высота столов, ширина дверных проемов, форма ручек, расположение кнопок на станках — всё это создано для существа ростом от полутора до двух метров, с двумя ногами, двумя руками и пальцами.

Создать сверхэффективного колесного робота-манипулятора можно. Но перестроить под него весь мир — снести лестницы, расширить проходы, заменить все ручные инструменты на цифровые аналоги — обойдется в триллионы долларов.

Идея гуманоидного робота изящна в своей простоте: не нужно менять окружающую среду, нужно сделать машину, совместимую с ней.

Если у робота есть две ноги, чтобы ходить по нашим сту-

пеням, две руки, чтобы держать наш инструмент, и «зрение», чтобы ориентироваться в нашем пространстве, он мгновенно получает доступ к глобальной инфраструктуре, которая строилась веками. Гуманоид — это не просто дань научной фантастике. Это попытка создать идеальный универсальный инструмент, “plug-and-play” работника для уже существующих предприятий.

Проблема «последнего метра» и гонка ловкости

На современных заводах многое уже автоматизировано. Автономные тележки развозят грузы, конвейеры транспортируют детали. Но остаются миллионы мелких, нестандартных операций: достать деталь из помятой коробки, перенести ее через порог, установить в паз сложной формы, визуально проверить на брак. В логистике это называют проблемой «последнего метра» — и именно здесь традиционная автоматизация пасует.

Часто в новостях нам показывают, как роботы-гуманоиды делают сальто или танцуют. Это впечатляет, но промышленная революция произойдет не благодаря ногам. Настоящая битва разворачивается за руки. Производству нужен точный захват, ювелирное регулирование усилия (чтобы не раздавить пластиковую деталь, но крепко удержат стальную), умение пользоваться дрелью или молотком. Гонка гу-

маноидов — это не гонка походки, а гонка мелкой моторики и тактильности.

Идеальный шторм: почему именно сейчас?

Скептик скажет: «Идее робота-человека уже сто лет, почему мы заговорили об этом только сейчас?».

Дело не в том, что инженерам не хватало фантазии. Им не хватало технологий. Создание гуманоида десятилетиями упиралось в физические и вычислительные барьеры. Но сегодня сошлись воедино несколько технологических трендов, создав тот самый “идеальный шторм”.

Революция компонентов. Механика и электроника шагнули далеко вперед. Появились невероятно компактные и мощные электроприводы (актуаторы), волновые редукторы с очень малым люфтом, легкие композитные материалы и энергоемкие аккумуляторы. Роботам больше не нужно быть привязанными кабелем к розетке.

Зрение и сенсорика. Датчики пространственного положения, лидары и миниатюрные камеры стали дешевыми и массовыми (спасибо индустрии смартфонов и беспилотных авто).

Embodied AI (Воплощенный искусственный интеллект). Это, пожалуй, самый важный прорыв. До недавнего времени искусственный интеллект жил в бестелесном мире текстов, кода и картинок. Но реальный мир подчиняется законам физики. Роботу нужно не просто распознать стул, ему нужно

понять, сколько он весит, как распределен его центр тяжести и какое усилие нужно применить, чтобы его сдвинуть. Сегодня нейросети учатся понимать физику, пространство и последствия своих действий. ИИ получает физическое тело (Embodied AI), превращаясь из собеседника в активного физического агента.

Облачный разум. Роботам больше не нужно учиться всему с нуля поодиночке. Если один гуманоид научится правильно брать нестандартную деталь, в перспективе после проверки и настройки для конкретных рабочих мест этот навык можно будет передать всему парку совместимых роботов.

Глава 4. От вирусных видео к суровой реальности

Интернет полон красивых роликов, где роботы собирают конструкторы или подают кофе. Но важно понимать: видео с демонстрацией ничего не доказывает.

На сцене робот может эффектно поднять ящик, выполнив заранее записанную последовательность движений (хард-код). На реальном заводе этот же ящик может стоять криво, быть надорванным или испачканным в масле. Производство — это не шоу талантов. Это тысячи монотонных повторений без права на ошибку.

Когда гуманоиды придут на реальные заводы, инженеров перестанут волновать сальто. На первый план выйдут суровые промышленные метрики:

Производительность: сколько полезных операций робот делает за час?

Надежность (MTBF): сколько часов он проработает до того, как сломается сервопривод?

Автономность: как долго он может работать, прежде чем позовет на помощь человека-оператора?

В конечном итоге, главным показателем новой эпохи роботизации станет не количество шарниров и не сложность нейросети. Это будет сухая экономическая цифра: стоимость одного робото-часа полезной работы.

Сможет ли гуманоид заменить человеко-часы так, чтобы это было экономически выгодно? Именно этот показатель станет мостом между высокой инженерией и реальным бизнесом. И судя по темпам развития технологий, этот момент наступит гораздо раньше, чем мы ожидаем.

Глава 2. Как устроен промышленный гуманоид

На фотографии гуманоид кажется знакомой конструкцией: корпус, голова, две руки и две ноги. Но сходство с человеком скрывает трудную инженерную задачу. Машине нужно не просто принять человеческую форму. Она должна переносить собственный вес, удерживать груз, видеть рабочее место, чувствовать контакт, расходовать энергию с разумной скоростью и безопасно завершать действие, когда что-то пошло не по плану. Причём все необходимые механизмы, вычислители и источник питания приходится нести на себе.

Удобно представить гуманоида как связанную систему ограничений. Более мощный привод позволяет поднять тяжёлую коробку, но увеличивает массу и потребление энергии. Большая батарея удлиняет работу, однако ноги должны постоянно переносить добавленный вес. Более сложная кисть расширяет набор операций, но требует места для приводов, защиты от пыли и настройки десятков контактов. Поэтому проектирование начинается не с вопроса «насколько робот похож на человека», а с описания будущей работы: что ему надо брать, куда доставать, по какой поверхности ходить и сколько операций выполнять за смену.

Механическая архитектура

Скелет гуманоида состоит из жёстких звеньев, соединённых подвижными суставами. Под «степенью свободы» понимают независимое движение, которое конструкция допускает и которым система управления может воспользоваться. Колено, сгибающееся в одном направлении, даёт одну вращательную степень свободы. Плечо, способное менять направление руки в пространстве, требует нескольких. Сумма этих движений определяет, какие положения тела вообще доступны роботу.

Типичная двуногая схема предусматривает по три управляемых вращения в тазобедренных суставах, одно в колене и два в голеностопе каждой ноги. Шесть степеней свободы на ногу дают возможность выбирать место постановки стопы, менять её ориентацию и поддерживать корпус. Для руки часто предусматривают несколько вращений в плече, сгибание локтя и движения запястья. Поясница добавляет наклон и поворот корпуса. Это не обязательный анатомический стандарт: разработчик может исключить сустав, добавить другой или заменить часть движений особой геометрией звеньев. Например, в опубликованных характеристиках Unitree G1 указаны 23 степени свободы для базовой комплектации и от 23 до 43 для вариантов G1 EDU. Цифры описывают разные конфигурации, а не автоматическое превосходство одного

варианта в реальной работе.[^unitree]

Количество суставов — лишь первый уровень описания. Не менее важны диапазон поворота, скорость, допустимая нагрузка и расположение осей. Если плечо не позволяет подвести кисть к полке сбоку, дополнительные движения пальцев здесь не помогут. Если запястье не может повернуть инструмент в нужной плоскости, робот вынужден разворачивать весь корпус или переставлять ноги. Поэтому полезнее спросить, может ли машина взять конкретную деталь с конкретного стеллажа и установить её в конкретное место, чем просто сравнить общее число степеней свободы.

Ноги и руки предъявляют к конструкции разные требования. Нога несёт значительную часть веса машины и воспринимает удары при постановке стопы. Рука должна перемещать груз на вытяжении, сохраняя точность. При массе груза 10 кг и расстоянии 0,5 м от сустава только статический момент от этого груза составляет приблизительно 49 Н·м: $10 \times 9,81 \times 0,5$. К нему добавляются вес самой руки, ускорения и запас для управления. Поэтому надпись «грузоподъёмность 10 кг» без указания позы, длительности удержания и способа захвата мало говорит о пригодности к операции.

Размещение тяжёлых компонентов влияет на всю кинематику. Батарею и вычислители выгодно располагать ближе к корпусу: так меньше инерция конечностей и проще удерживать равновесие. Но слишком тяжёлый корпус увеличивает нагрузку на ноги и риск повреждений при падении. Компакт-

ная кисть требует миниатюрных приводов, а такие приводы ограничены моментом и отводом тепла. Поэтому инженеры иногда ставят моторы ближе к предплечью и передают усилие к пальцам тягами или тросами. Это облегчает пальцы, но усложняет передачу усилия, настройку и ремонт.

Промышленный гуманоид вовсе не обязан повторять человека во всех деталях. Для переноски стандартных контейнеров надёжный захват может оказаться полезнее пяти пальцев. Для конкретного цеха колёсная база с двумя руками может быть выгоднее двуногой машины, если там нет лестниц и препятствий. Человеческая форма оправдана тогда, когда её подвижность действительно открывает доступ к существующим рабочим местам и инструментам. Это инженерная гипотеза, которую проверяют на конкретной операции.

Электроприводы и силовая электроника

Движение в суставе создаёт привод. В современных электрических гуманоидах широко применяются бесщёточные двигатели, в том числе синхронные двигатели с постоянными магнитами — PMSM. Электронный инвертор формирует токи в обмотках, датчики сообщают положение ротора, а контроллер регулирует момент. Если упростить, двигатель создаёт вращение, редуктор преобразует его в более медленное и более сильное движение сустава, а система обратной связи следит, чтобы получился нужный результат.

Понятие «сервопривод» относится не к особому типу мотора, а к приводу с управлением по обратной связи. Один и тот же сустав можно заставить удерживать заданный угол, поддерживать скорость или развивать заданный момент. Для движения ног и безопасного контакта с предметами особенно важно не просто точно попасть в положение, но и управлять усилием. Жёстко удерживаемая рука может сломать деталь или создать опасное усилие при столкновении; податливая рука допускает контролируемое отклонение. Однако податливость также надо согласовать с массой звеньев, скоростью и требованиями операции.

Между быстро вращающимся мотором и сравнительно медленным суставом обычно стоит редуктор. Планетарная

передача распределяет нагрузку между несколькими шестернями; волновая передача позволяет получить большое передаточное число в компактном узле; циклоидная схема привлекает высокой нагрузочной способностью в подходящем исполнении. У каждого решения есть свои ограничения по массе, люфту, трению, ударной нагрузке, ресурсу и стоимости. Ни один тип передачи нельзя объявить лучшим для всех суставов: требования к колену, плечу и пальцу различаются.

В первом приближении момент на выходе равен моменту двигателя, умноженному на передаточное число и КПД редуктора. Например, $0,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$ на валу двигателя при передаточном числе 100 и КПД 80 % дадут около $64 \text{ Н}\cdot\text{м}$ на суставе. Одновременно выходная скорость станет примерно в сто раз ниже скорости мотора. Потери не исчезнут: они превратятся в тепло. Кроме того, большое передаточное число может затруднить обратное вращение передачи внешним усилием, а это важно при ударах и физическом контакте.

В паспортных данных следует различать **пиковый** и **длительный** момент. Пиковый момент позволяет на короткое время поднять нагрузку или восстановить равновесие. Длительный ограничен нагревом обмоток, силовой электроники и передачи. Если робот несколько секунд держит тяжёлую коробку на вытянутых руках, этого ещё недостаточно, чтобы считать такую позу рабочей на протяжении смены. Для предприятия важна повторяемая нагрузка при заданной темпе-

ратуре и скорости цикла.

Силовая электроника решает и задачу торможения. При замедлении движения двигатель может работать генератором; часть энергии возвращается в электрическую систему, если её архитектура и состояние батареи это допускают. Но энергия удара или остановки не всегда пригодна для возврата: иногда её приходится рассеивать, а иногда ограничивать движение механически. Поэтому эффективность сустава измеряют на рабочем цикле — с подъёмом, опусканием, ожиданием и удержанием груза, — а не по одному красивому значению КПД мотора.

В конце концов привод оценивают по тому, сколько полезных циклов он выполнит между обслуживанием. Подшипники, уплотнения, кабели, проходящие через сустав, и тепловой режим зачастую столь же существенны, как номинальный момент. Машина с выдающимися разовыми движениями ещё не обязательно рассчитана на тысячи одинаковых движений каждый день.

Источники энергии

У автономного гуманоида батарея одновременно служит топливным баком и частью переносимого груза. Её ёмкость обычно выражают в ватт-часах или киловатт-часах. Если батарея располагает 1,5 кВт·ч доступной энергии, а робот в среднем потребляет 0,6 кВт, идеализированное время работы равно $1,5 / 0,6 = 2,5$ часа. Реальный результат зависит от допустимой глубины разряда, температуры, старения элементов, мощности вычислителей и, главное, от выполняемой задачи. Стоять, ходить по ровному полу и многократно поднимать контейнеры — разные режимы потребления.

Электричество расходуют не только ноги. Его требуют руки, охлаждение приводов, камеры, вычислители, связь и устройства безопасности. Когда робот держит груз неподвижно, механическая работа почти не совершается, но электроприводу может потребоваться ток для удержания момента. У некоторых конструкций вес можно передать через геометрию механизма или тормоз и снизить постоянное потребление. Выбор такой конструкции меняет и поведение при отключении питания, поэтому экономия энергии здесь связана с безопасностью.

Конструктор не может просто поставить батарею вдвое больше. Дополнительная масса увеличивает затраты энергии на перенос самой батареи, нагрузки на суставы и послед-

ствия падения. При этом быстрый заряд предъявляет повышенные требования к батарее, охлаждению и зарядной инфраструктуре. Инженерная задача состоит не в максимальном числе ватт-часов любой ценой, а в выгодном сочетании массы, длительности работы, времени восстановления заряда и срока службы.

Подходы производителей уже различаются. Для Atlas Boston Dynamics указывает около четырёх часов работы при типичном использовании и самостоятельную замену батареи; это характеристика указанного режима и системы обслуживания, а не обещание четырёх часов непрерывной работы с максимальным грузом.[^atlas] Agility Robotics в описании представленного в сентябре 2026 года Digit 5 заявляет другой вариант: 90 минут работы и девять минут зарядки, то есть соотношение времени работы и зарядки 10:1 в заявленном режиме. На момент написания этой главы модель ещё находилась в разработке, и характеристики могли измениться.[^digit] Такие числа нельзя непосредственно сравнить между машинами, пока не известны одинаковые нагрузка, скорость, температура и доля времени, занятая полезной операцией.

Для цеха важен весь цикл использования. Робот может потратить две минуты на переход к зарядной станции, девять минут на зарядку и ещё время на возвращение к месту работы. Если автономный интервал составляет 90 минут, а все связанные остановки вместе — 15 минут, верхняя граница

доли времени вне этих остановок равна 90 / 105, или примерно 86 %. Из оставшегося времени надо вычесть перемещения без груза, ожидание деталей, ошибки захвата и помощь оператора. Позже, при расчёте окупаемости, именно **полезные часы выполнения операции**, а не часы включённого питания, должны войти в числитель производительности.

Сменная батарея сокращает простой отдельного робота, но требует запасных блоков, безопасного механизма замены и места для зарядки. Быстрая зарядка уменьшает число запасных блоков, зато предъявляет требования к доступной мощности и тепловому режиму. Для небольшого парка обе стратегии могут работать иначе, чем для сотни роботов в три смены. Энергетическая архитектура становится частью организации производства.

Сенсорная система

У робота есть два различных вопроса к окружающему миру: «где находятся предметы?» и «что происходит с моим телом?». Камеры и датчики глубины помогают увидеть проход, полку и коробку. Энкодеры в суставах сообщают углы и скорости. Инерциальный измерительный блок, или IMU, регистрирует ускорения и угловое движение корпуса. Датчики усилия и момента позволяют судить о нагрузке; тактильные элементы в кисти показывают, где и как пальцы прижались к предмету. Рабочее движение получается только тогда, когда контроллер связывает эти наблюдения друг с другом.

Камера хорошо распознаёт предмет до касания, но после захвата собственная ладонь может закрыть его от обзора. Энкодер точно сообщает положение сустава, однако не доказывает, что коробка действительно находится в руке: пальцы могли сомкнуться в воздухе или проскользнуть по поверхности. Датчик тока может косвенно подсказать величину усилия привода, но между двигателем и объектом есть трение и упругость передачи. Именно поэтому разные датчики дополняют, а не заменяют друг друга.

Для устойчивой ходьбы нужно оценивать положение корпуса и контакт стоп с поверхностью. IMU даёт быстрый отклик на наклон, однако её измерения при длительном интегрировании накапливают ошибку. Зрение или лидар помо-

гают привязать движение к окружающему пространству, но страдают от перекрытий, бликов, пыли и недостатка характерных деталей. Контактные и силовые измерения показывают, опирается ли стопа на пол, но на скользкой поверхности даже уверенный контакт не гарантирует сцепления. Поэтому оценка состояния объединяет несколько источников и постоянно проверяет их согласованность.

Схема датчиков должна соответствовать месту работы. На складе камера может уверенно узнавать одинаковые контейнеры и их метки; в мастерской блестящие детали сложной формы могут создавать ошибки измерения глубины. Узкие проходы ограничивают обзор. Пыль и удары требуют защиты, а чистка объективов превращается в регулярную операцию обслуживания. Опытный работник почти не замечает таких условий; для робота они определяют надёжность каждого цикла.

Полезен пример кисти Unitree Dex3-1: изготовитель указывает семь степеней свободы и 33 тактильных чувствительных элемента в одной трёхпалой руке.[^dex] Эти числа показывают, что к движению пальцев добавляется измерение контакта. Они сами по себе не говорят, насколько быстро и надёжно робот справится с промышленной деталью. Это проверяют испытанием на нужных предметах: сухих и загрязнённых, правильно лежащих и смещённых, новых и изношенных.

Управление телом

Человек поддерживает равновесие почти незаметно. Гуманоиду приходится непрерывно вычислять, куда перенести стопу, как изменить положение корпуса и какое усилие развить в каждом суставе. Особенно трудны моменты смены опоры: одна стопа отрывается, другая принимает вес, а нагрузка на руки может одновременно сместить общий центр масс. Простая команда «иди к стеллажу» на нижнем уровне распадается на последовательность проверяемых контактов с полом.

Если робот стоит неподвижно, проекция центра масс в пределах площади опоры служит понятной первой оценкой устойчивости. Но при ходьбе этого правила недостаточно: машина движется за счёт изменения импульса, а иногда специально начинает падать в направлении следующего шага и успевает поставить стопу. Контроллер должен учитывать инерцию звеньев, доступные места контакта, трение пола и момент, который могут развить приводы. В курсах по управлению двуногими роботами эту задачу описывают через динамику всего тела, центр давления и ограничения контактных сил.[^mit]

Управление организовано по уровням. Высокий уровень выбирает задачу и маршрут. Следующий строит траекторию корпуса, рук и стоп с учётом препятствий и будущих контак-

тов. Более быстрые контуры регулируют положение и усилие отдельных суставов по показаниям датчиков. Если коробка оказалась тяжелее ожидаемого, контроллеру недостаточно «сильнее сжать пальцы»: нужно изменить нагрузку на плечи, положение корпуса и распределение давления между стопами.

При переноске ящика это особенно наглядно. На вытянутых руках ящик создаёт момент, который стремится наклонить робота вперёд. Контроллер может приблизить груз к корпусу, отклонить корпус назад или переставить стопы. Если рядом конвейер и свободного пространства нет, возможные движения резко сокращаются. Грузоподъёмность, измеренная в свободной лаборатории, потому не равна грузоподъёмности на тесном рабочем месте.

Внешнее воздействие меняет задачу мгновенно. Кто-то задел корпус, стопа попала на гладкий участок, груз сместился внутри коробки. Система должна распознать отклонение, попытаться восстановить равновесие, при необходимости сделать защитный шаг или остановить операцию. Возможность восстановиться ограничена физикой: если подходящего места для шага нет или не хватает сцепления, никакой алгоритм не создаст опору из воздуха. Поэтому безопасность рабочего места начинается также с выбора поверхности, проходов и допустимых нагрузок.

Сложность координации тела нельзя свести к зрелищности движений. Для промышленности ценнее робот, который

спокойно повторяет простую операцию с низким процентом ошибок, чем робот, способный один раз выполнить акробатический трюк. Его движение нужно измерять в конкретных условиях: цикл, точность, отклонения, вмешательства человека и число успешных повторений.

Кисть как главное ограничение

Передвинуть коробку можно относительно простым захватом. Взять из россыпи небольшой винт, точно совместить его с отверстием и завернуть — задача другого уровня. Робот должен сначала увидеть винт, выбрать точки касания, удержать его с нужной силой, подвести к отверстию и почувствовать начало резьбы. На каждом этапе возможны скольжение, перекося или потеря контакта. Для одной и той же детали её покрытие, загрязнение и положение могут менять необходимое движение.

Стопа взаимодействует в основном с опорной поверхностью; кисть встречает множество предметов разной формы и жёсткости. Поэтому для **широкого набора ручных производственных операций** кисть часто оказывается более серьёзным ограничением, чем сама способность робота пройти по ровному полу. Это не универсальное правило: передвижение по сложному рельефу тоже может быть исключительно трудным. Но на типовом рабочем месте ходьба демонстрирует, что машина добралась до станка; успешная работа начинается тогда, когда она надёжно взяла и обработала предмет.

Существует несколько путей. Параллельный двухпальцевый захват хорошо подходит для предсказуемых коробок и деталей с доступными плоскими гранями. Трёхпа-

лая кисть расширяет возможности ориентации и удержания. Пять пальцев дают больше вариантов контакта, но добавляют маленькие приводы, проводку, датчики, уязвимые оболочки и алгоритмическую сложность. Сменный рабочий орган позволяет использовать отдельные инструменты под разные задачи. Выбор зависит от номенклатуры предметов: у предприятия нет обязанности оплачивать универсальность, которой оно не пользуется.

При захвате недостаточно знать положение пальцев. Важно измерять силу нормального прижатия и замечать начало скольжения. Слишком слабый захват уронит деталь; чрезмерный повредит её, особенно если это тонкий пластик или мягкая упаковка. При сборке возникает ещё одна проблема: деталь может войти в отверстие под небольшим углом, и жёсткое движение вместо исправления перекоса заклинит механизм. Здесь помогают управление усилием, податливость кисти и возможность немного изменить траекторию по фактическому контакту.

Ручной инструмент делает задачу труднее. Кисти нужно удерживать рукоятку, воспринимать реактивный момент, сохранять ориентацию рабочей части и не терять устойчивость всего тела. Один вариант — дать роботу человеческий инструмент без переделки рабочего места; другой — установить специализированный рабочий орган или изменить подачу деталей. Оба варианта имеют цену. Иногда небольшая адаптация рабочего места позволяет обойтись простой и на-

дѐжной кистью вместо дорогой и хрупкой универсальной руки.

Сравнивая конструкции, следует считать не пальцы, а завершенные операции. Проверка для выбранной кисти может выглядеть так: из ста попыток взять деталь в допустимых положениях сколько закончились правильной установкой, сколько потребовали повторного захвата, сколько повредили изделие и как часто потребовался оператор? К этому добавляются время цикла, стоимость сменных накладок, очистки и ремонта. Такой протокол гораздо ближе к нуждам завода, чем видео с отдельным удачным движением.

Механика, питание, датчики и управление сходятся именно в момент контакта кисти с реальным предметом. Достаточно потерять одну из составляющих — точность положения, запас момента, сцепление пальцев, обратную связь или устойчивость ног, — и операция сорвѐтся. Поэтому технический прогресс гуманоидов лучше оценивать не по одной выдающейся характеристике, а по тому, как вся система выполняет повседневную работу. В следующей главе можно будет перейти от этого «тела» к интеллекту, который учится им пользоваться.

Глава 3. Интеллект робота

В предыдущей главе мы разобрали тело гуманоида: приводы, батарею, датчики и кисть. Всё это необходимо, но само по себе не объясняет, как машина выполняет работу. Камера выдаёт поток изображений, энкодеры сообщают углы суставов, а датчик силы регистрирует прикосновение. Между этими измерениями и действием должен появиться ответ на практический вопрос: **что делать сейчас, чтобы получить нужный результат через несколько секунд, не потеряв устойчивость и не повредив предмет?**

Для человека перенос коробки кажется единым действием. Роботу приходится определить, какая коробка нужна, где она стоит, с какой стороны её взять, хватит ли сцепления, куда поставить ноги, свободен ли путь и действительно ли коробка оказалась в требуемом месте. Интеллект промышленного гуманоида нужен не для разговора о коробках, а для согласования восприятия, движения и проверки результата. Его качество обнаруживается там, где рабочее место немного отличается от образца.

От запрограммированного движения к embodied AI

Классический промышленный робот хорошо работает с заранее известной геометрией. Инженер задаёт точки траектории, параметры захвата, допустимые скорости и условия перехода к следующей операции. Если деталь каждый раз приходит в одной оснастке, этот способ может обеспечить высокую точность и предсказуемое время цикла. Программа знает, куда переместить инструмент, потому что предприятие позаботилось о повторяемости входных условий.

В существующем цехе условия часто менее аккуратны. Контейнер чуть смещён, пластиковая упаковка деформирована, тележка остановилась не у метки, на пути появился человек. Можно заранее запрограммировать десятки поправок, однако число возможных ситуаций быстро растёт. Задача интеллектуального управления — выбирать действия по текущим наблюдениям и корректировать их по мере движения. Такую зависимость действия от наблюдаемого состояния называют **политикой управления**. Она может состоять из обычных алгоритмов, обученной модели или их сочетания.

Термин *embodied AI*, «воплощённый искусственный интеллект», описывает обучение и принятие решений в системе, у которой есть физическое тело. Тело имеет массу, пре-

дела усилия, инерцию, конечный запас энергии и конкретные датчики. Картинка коробки в памяти компьютера и реальная коробка весом 15 кг — разные задачи. Роботу нужно установить контакт, почувствовать изменение нагрузки и при необходимости отступить. Знание слова «коробка» ещё не даёт навыка её переноса.

Есть несколько способов получить такой навык. При обучении на демонстрациях оператор показывает действие, а модель учится связывать наблюдения с выполненными движениями. При обучении с подкреплением робот или его виртуальная копия многократно пробует действия и получает оценку результата: удалось ли встать, взять предмет, сохранить равновесие, уложиться в ограничения. Современные модели зрения, языка и действия — VLA — получают изображения и текстовую задачу и выдают команды движения или их последовательности. В работе RT-2 исследователи Google DeepMind показали, как модель, обучавшаяся также на зрительных и языковых данных, может использовать эти знания в роботизированных действиях. Результат демонстрирует возможный путь переноса знаний, но не означает, что модель умеет выполнять любую физическую работу по голосовой просьбе.

Эти подходы не заменяют всю прежнюю робототехнику. Даже если обученная система предложила взять предмет справа, исполнительный контроллер должен ограничить момент в суставе, проверить допустимость движения и обес-

печить устойчивость. Для повторяемого движения в тесной ячейке заранее рассчитанная траектория может оставаться лучшим решением. Для вариаций положения деталей пригодится зрительная коррекция. Для неизвестной конфигурации объектов — обученная политика и проверка её результата. Практическая архитектура нередко соединяет все три уровня.

У такого разделения есть ещё одна причина — время реакции. Распознать задачу и спланировать последовательность можно сравнительно медленно. Реакция на потерю равновесия или превышение силы должна происходить в гораздо более быстром контуре управления. Если связь с внешним сервером пропала, робот не должен зависеть от удалённого ответа, чтобы остановить движение. Поэтому «мозг робота» не является одной программой или одной нейросетью: разные решения принимаются на разных временных масштабах и проверяются разными механизмами.

Для предприятия наиболее полезен интеллект, который не только выполняет удачную попытку, но и распознаёт предел собственных возможностей. Если предмет не найден, захват не подтверждён или путь оказался закрыт, система должна выбрать допустимое восстановление, безопасно прекратить операцию либо передать её оператору. Ошибка может быть приемлемой в учебной среде; на работающей линии цена ошибки включает повреждённую продукцию, задержку следующей операции и риск для людей.

Зрение и понимание рабочего пространства

Робот видит рабочее место иначе, чем человек. Для камеры изображение — массив пикселей. Чтобы взять деталь, системе сначала требуется выделить объект на фоне, отличить его от соседних деталей и оценить положение относительно кисти. Даже правильное название предмета не решает задачу: важно знать его координаты и ориентацию. Шесть параметров пространственной позы — три координаты положения и три параметра поворота — показывают, с какой стороны подвести захват и куда направить деталь при установке.

Возьмём контейнер с одинаковыми металлическими заготовками. Система обнаружила, что внутри лежит нужная заготовка. Но одни детали перекрывают другие, поверхность блестит, а подход к удобной точке захвата закрыт краем ящика. Роботу надо выбрать доступную деталь, оценить её позу и проверить, поместится ли кисть между соседними предметами. Иногда выгоднее сначала слегка сдвинуть верхнюю деталь или поменять положение камеры. Таким образом, зрение связано с действием: новое движение может дать лучший обзор, а новый ракурс — изменить план движения.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.