



ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

Повный А. В.

Филиал учреждения образования «Белорусский государственный
технологический университет» Гомельский государственный политехни-
ческий колледж

Telegram: https://t.me/industrial_robot

Гомель, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

- Введение
- Глава 1. Основные понятия и структура промышленного робота
- Глава 2. Кинематика роботов
- Глава 3. Динамика роботов
- Глава 4. Приводы и исполнительные устройства
- Глава 5. Сенсорные системы и техническое зрение
- Глава 6. Управление движением и системами робототехники
- Глава 7. Программирование промышленных роботов
- Глава 8. Планирование траекторий и навигация
- Глава 9. Моделирование и симуляция
- Глоссарий
- Список лучшей литературы по промышленной робототехнике

ВВЕДЕНИЕ

Промышленная робототехника стоит на пороге новой эпохи технологического развития. То, что еще несколько десятилетий назад казалось научной фантастикой, сегодня стало неотъемлемой частью современного производства. Роботы выполняют сварку автомобильных кузовов, собирают электронные компоненты, упаковывают продукцию и даже работают бок о бок с людьми в рамках концепции коллаборативной робототехники.

Мы живем в эпоху Четвертой промышленной революции, когда интеграция цифровых технологий, искусственного интеллекта и робототехники кардинально меняет облик мирового производства. Современная промышленность испытывает беспрецедентные вызовы: необходимость повышения производительности, обеспечения высокого качества продукции, снижения себестоимости и одновременного соблюдения все более строгих требований безопасности труда. Промышленные роботы представляют собой универсальное решение этих задач, обеспечивая точность, повторяемость и надежность производственных процессов.

Рынок промышленной робототехники демонстрирует устойчивый рост: по данным Международной федерации робототехники, ежегодно в мире устанавливается более 400 000 новых промышленных роботов. Автомобильная промышленность, электроника, металлообработка, пищевая промышленность — практически все отрасли активно внедряют робототехнические решения.

Промышленная робототехника находится на пороге революционных изменений. Развитие искусственного интеллекта, машинного обучения, технологий

5G и интернета вещей открывает новые возможности для создания интеллектуальных, адаптивных производственных систем.

Коллаборативные роботы изменяют парадигму взаимодействия человека и машины на производстве. Облачная робототехника позволяет роботам обмениваться опытом и совершенствовать свои навыки. Аддитивные технологии дают возможность создавать роботов с принципиально новыми конструктивными решениями.

Данное учебное пособие призвано обеспечить читателя прочной базой знаний в области промышленной робототехники. В пособии даётся представление о конструктивных элементах промышленных роботов, особенностях их мехатронных компонентов и системах управления. Учебное пособие построено по принципу "от простого к сложному" и состоит из девяти взаимосвязанных глав. Для углубленного изучения отдельных тем в конце пособия приводится список дополнительной литературы. Глоссарий поможет разобраться в специальной терминологии.

Изучение основ промышленной робототехники сегодня — это инвестиция в будущее, в котором роботы станут незаменимыми помощниками человека в создании более совершенного, безопасного и эффективного производства.

Добро пожаловать в увлекательный мир промышленной робототехники!

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И СТРУКТУРА ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

Промышленный робот — это универсальное автоматизированное устройство, способное самостоятельно или с минимальным вмешательством человека выполнять разнообразные производственные операции. Главная его особенность — способность к программируемому, контролируемому движению в пространстве, что позволяет решать сложные задачи, требующие высокой точности и повторяемости. С развитием сетевых технологий и Интернета вещей современные роботы всё чаще интегрируются в единую цифровую экосистему, обмениваясь данными с MES и ERP-системами предприятия, что обеспечивает оперативный мониторинг, защиту от простоев и прогнозное обслуживание.

Любой промышленный робот состоит из четырех основных подсистем, тесно взаимосвязанных и взаимодействующих друг с другом: механической части, системы приводов, сенсорных систем и системы управления.

Механическая подсистема формирует конструктивную основу робота. В зависимости от назначения это могут быть артикулированные манипуляторы с различной степенью свободы, роботы-карусели для высокоскоростных операций, консольные конструкции для точной сборки или мобильные роботы для перемещения грузов. Каждый тип конструкций имеет свои особенности: шестизвенные манипуляторы универсальны для сборки и сварки, SCARA-роботы оптимальны для плоских операций, а мобильные платформы с манипуляторами применяются для транспортировки и укладки деталей по заданному маршруту.

Приводные системы обеспечивают движение звеньев и исполнительных механизмов, преобразуя различные виды энергии в механическую работу. Электродвигатели (серводвигатели, шаговые двигатели), гидро- и пневмоприводы позволяют роботу точно и быстро перемещаться в пространстве. Современные роботы используют преимущественно серводвигатели с обратной связью, что значительно повышает стабильность и качество управления движением. Для обеспечения энергоэффективности и снижения тепловой нагрузки широко применяются высокоточные редукторы с высоким КПД — планетарные, волновые или циклоидальные передачи, обеспечивающие необходимое передаточное отношение при минимальном люфте.

Сенсорные системы играют роль "органов чувств" робота, обеспечивая восприятие окружающей среды и контроль состояния самого механизма. К базовым датчикам относятся энкодеры положения, датчики силы и момента, температурные сенсоры, а также сложные системы технического зрения для компьютерного зрения и распознавания объектов. Современные решения дополнительно включают датчики акустической эмиссии для диагностики состояния инструмента, ультразвуковые и лидарные сканеры для навигации, тактильные сенсоры для деликатных операций сборки. Благодаря этим сенсорам робот может адаптироваться к изменяющимся условиям производства, избегать столкновений и выполнять задачи с микронной точностью.

Система управления служит "мозгом" робота, связывая все элементы в единое целое. Она принимает сигналы с датчиков, обрабатывает их в реальном времени, принимает решения и выдает управляющие команды приводам. Архитектура управления может варьироваться от простейших контроллеров на основе жестко заданных алгоритмов до интеллектуальных систем с применением методов искусственного интеллекта, машинного обучения и нейронных сетей. Передовые

контроллеры поддерживают концепцию безопасных зон и режимы коллаборации, позволяя человеку и роботу работать бок о бок без защитных ограждений, что открывает новые возможности для гибкого производства.

Важнейшей характеристикой промышленного робота является степень свободы — число независимых направлений движения, которые он способен выполнить. Степени свободы определяют размерность конфигурационного пространства робота и влияют на сложность задач, которые он может решать, а также на гибкость и маневренность при выполнении операций.

Роботы с шестью степенями свободы (6-DOF) — наиболее распространённый класс манипуляторов общего назначения. Такие роботы обладают тремя поступательными осями (обычно обозначаемыми X, Y и Z) и тремя вращательными осями (обычно называемыми рысканием, тангажом и креном), что обеспечивает полный охват возможных позиций и ориентаций в трёхмерном пространстве. Благодаря этому 6-DOF-роботы могут выполнять сложные задачи по сварке, сборке, покраске и обработке деталей с высокой точностью и повторяемостью. Их универсальность заключается в том, что они способны двигать инструмент по любой траектории в объёме, а также поворачивать его в любом направлении, что важно при работе с деталями сложной формы.

Для выполнения более простых или специализированных операций используются роботы с четырьмя или пятью степенями свободы. Так, SCARA-роботы (Selective Compliance Assembly Robot Arm) имеют две вращательные оси в горизонтальной плоскости и одну вертикальную ось, что даёт им 4-DOF и делает их идеальными для быстрых плоских сборочных операций, таких как установка компонентов на печатные платы или упаковочные линии. Их преимущество — высокая скорость и точность в плоскости X–Y при ограниченной потребности в ориентации инструмента, что упрощает конструкцию и программирование.

В противоположность этому существуют манипуляторы с семью и более степенями свободы (например, 7-DOF–9-DOF-роботы). Избыточные манипуляторы часто применяются в медицинской робототехнике, углублённых сборочных процессах и коллаборативных роботов, работающих в тесном взаимодействии с человеком, где важна высокая адаптивность и безопасность.

Когда к манипулятору добавляют мобильную платформу, к суставным степеням свободы манипулятора прибавляются три поступательные оси (движение в плоскости X – Y и подъём/опускание Z), а иногда и вращательная ось семьи курсора платформы. Таким образом, мобильный робот-манипулятор становится системой с 9–10 степенями свободы, объединяя возможности маневрирования в большом объёме производственного помещения и выполнение сложных манипуляций. Это расширяет рабочую зону от зоны одного робота-коробки до размеров целого цеха и позволяет автоматизировать не только обработку деталей, но и логистику внутри производственного цеха.

Современные промышленные роботы выступают неотъемлемыми элементами единой автоматизированной инфраструктуры, где каждый робот становится узловой точкой обмена данными и управляющими сигналами. Вместо работы в изоляции они подключаются к высокоскоростным промышленным сетям, таким как EtherNet/IP, PROFINET и EtherCAT, что обеспечивает мгновенную синхронизацию с конвейерными участками, автоматическими транспортировочными системами и периферийным оборудованием. При этом каждое движение робота фиксируется и анализируется в режиме реального времени, что позволяет центральным системам управления производством (MES) и складской логистики (WMS) оперативно переназначать задачи, адаптировать порядок операций и минимизировать время простоя.

Одновременно с этим концепция цифровых двойников развивается в тесной связке с физическими ячейками: виртуальные копии роботов и производственных линий постоянно обновляются данными телеметрии, что позволяет инженерам моделировать изменения конфигурации цеха, тестировать новые алгоритмы управления и оптимизировать энергопотребление без остановки реального производства.

Поддержка стандартизированных API и протоколов OPC UA и MQTT поверх сетей с поддержкой Time Sensitive Networking (TSN) гарантирует детерминированность и безопасность обмена информацией между многочисленными системами, а гибридное сочетание edge- и cloud-вычислений позволяет распределять нагрузку: критичные к задержке функции управления остаются на локальных контроллерах, тогда как ресурсоёмкие задачи анализа больших данных и машинного обучения обрабатываются централизованно.

В результате интеграции промышленный робот не просто выполняет запрограммированные операции, а самостоятельно участвует в динамическом планировании производства, адаптируясь к изменениям требований, прогнозируя возможные сбои и обеспечивая беспрецедентный уровень эффективности и гибкости современных заводов.

Понимание устройства промышленного робота и принципов взаимодействия его компонентов является фундаментом для изучения методов кинематики, динамики, алгоритмов управления и программирования. Освоив эти базовые принципы, специалисты смогут проектировать собственные автоматизированные решения, оптимизировать производственные линии и эффективно внедрять инновационные технологии Индустрии 4.0, включая адаптивное производство, предиктивное обслуживание и интеллектуальное планирование ресурсов.

ГЛАВА 2. КИНЕМАТИКА РОБОТОВ

2.1: Основы кинематики и координатные системы

Кинематика робота изучает движение его звеньев без учета сил, вызывающих это движение. Это фундаментальный раздел робототехники, который позволяет понять, как положения звеньев робота связаны с положением и ориентацией его рабочего органа в пространстве. Знание кинематики необходимо для программирования траекторий движения, планирования задач и управления роботом.

Основой кинематического анализа являются координатные системы. Каждое звено робота имеет свою систему координат, жестко связанную с ним. При движении звена его координатная система также перемещается и поворачивается относительно неподвижной базовой системы координат. Для описания этих преобразований используется математический аппарат однородных координат и матриц преобразований.

Однородная матрица преобразований размером 4×4 описывает как поворот, так и перенос одной координатной системы относительно другой. Верхний левый блок 3×3 содержит матрицу поворота, правый столбец из трех элементов описывает перенос, а нижняя строка имеет вид $[0 \ 0 \ 0 \ 1]$. Такое представление позволяет объединить поворот и перенос в одной операции матричного умножения.

Для каждого сочленения робота определяются параметры Денавита-Хартенберга: длина звена, угол скручивания звена, расстояние между звеньями и угол поворота в сочленении. Эти четыре параметра полностью описывают геометрию любого сочленения и позволяют построить матрицу преобразования от одного звена к следующему.

Прямая кинематическая задача заключается в определении положения и ориентации рабочего органа робота по заданным углам поворота всех сочленений. Решение получается последовательным перемножением матриц преобразований от базовой системы координат до системы координат рабочего органа. Результирующая матрица содержит всю информацию о положении и ориентации схвата в пространстве.

Геометрический смысл прямой кинематики можно понять на простом примере. Представим двухзвенный манипулятор, работающий в плоскости. Если известны длины звеньев и углы поворота в сочленениях, то координаты конца манипулятора вычисляются через тригонометрические функции. Для пространственных роботов математика усложняется, но принцип остается тем же.

Кинематические особенности различных типов роботов определяют области их применения. Декартовы роботы с линейными сочленениями имеют простую кинематику, но ограниченную рабочую зону. Роботы с вращательными сочленениями обладают большей гибкостью, но более сложной кинематикой. Понимание этих особенностей помогает правильно выбрать тип робота для конкретной задачи.

2.2: Обратная кинематическая задача

Обратная кинематическая задача имеет принципиальное значение для практического управления роботом. Если прямая кинематика отвечает на вопрос "где находится рабочий орган при заданных углах сочленений", то обратная кинематика решает противоположную задачу: "какие углы сочленений необходимы для достижения заданного положения рабочего органа".

Математически обратная задача кинематики значительно сложнее прямой. Вместо простого умножения матриц приходится решать систему нелинейных

уравнений, которая может иметь несколько решений, одно решение или вообще не иметь решений. Количество возможных решений зависит от конструкции робота и его конфигурации в момент решения задачи.

Рассмотрим это на примере плоского двухзвенного манипулятора. Для достижения точки с координатами (x, y) существует, как правило, два возможных решения: одно с "локтем вверх", другое с "локтем вниз". В некоторых случаях, когда точка находится на границе рабочей зоны, решение единственно. Если же точка лежит вне досягаемости манипулятора, решений нет вообще.

Для шестизвенных промышленных роботов ситуация еще сложнее. Типичный робот с вращательными сочленениями может иметь до восьми различных конфигураций для достижения одной и той же точки. Эти конфигурации различаются положением "плеча", "локтя" и "запястья" манипулятора. Выбор конкретной конфигурации зависит от многих факторов: близости к особым положениям, ограничений на углы поворота, оптимальности траектории движения.

Существует несколько подходов к решению обратной кинематической задачи. Аналитический метод основан на геометрическом анализе конструкции робота и позволяет получить точное решение в явном виде. Этот метод применим только для роботов со специальной кинематической структурой, например, когда три последних сочленения пересекаются в одной точке.

Численные методы решения используют итерационные алгоритмы для поиска приближенного решения. Метод Ньютона-Рафсона начинает с начального приближения и последовательно уточняет решение, используя якобиан системы уравнений. Преимущество численных методов в их универсальности, недостаток в том, что они не гарантируют нахождение всех возможных решений.

Критическим испытанием для любого алгоритма служат сингулярности — положения, где робот теряет какую-то степень свободы и любая небольшая поправка положения требует огромного изменения углов. Здесь поведение якобиана становится неустойчивым, что порождает рывки и ошибочные шаги в программном обеспечении. Для сглаживания таких переходов применяют демпфирование и исключение «мягких» направлений, основанные на разложении якобиана и отсечении близких к нулю собственных значений, а в сложных контроллерах дополнительно совмещают готовые аналитические ухищрения с численными уточнениями.

При создании промышленных систем управления стараются объединить достоинства разных подходов. Для типовых положений заранее готовят таблицы решений, чтобы по указанным координатам сразу брать «проверенный» набор углов. При работе в произвольной точке в дело вступают ускоренные демпфированные алгоритмы обратной кинематики, способные в режиме реального времени выдавать новые углы сотни и тысячи раз в секунду. Детальное предварительное изучение особенностей конкретного робота помогает избежать «ловушек» сингулярностей и ограничений сочленений, обеспечивая надёжность и плавность движения даже в самых сложных сценариях.

ГЛАВА 3. ДИНАМИКА РОБОТОВ

3.1: Основы динамического анализа

Динамика робота изучает движение его звеньев с учетом сил и моментов, которые это движение вызывают. В отличие от кинематики, которая рассматривает только геометрические аспекты движения, динамика связывает движение с физическими причинами: силами приводов, инерционными свойствами звеньев, силами трения и внешними нагрузками.

Понимание динамики критически важно для эффективного управления роботом. Знание того, какие моменты должны развивать приводы для выполнения заданного движения, позволяет правильно выбрать двигатели, спроектировать систему управления и обеспечить высокую точность позиционирования. Без учета динамических эффектов невозможно достичь высоких скоростей работы и точности выполнения операций.

Основу динамического анализа составляют уравнения движения Эйлера-Лагранжа. Эти уравнения связывают обобщенные координаты робота (углы поворота сочленений) с обобщенными силами (моментами в сочленениях). Лагранжиан системы представляет разность кинетической и потенциальной энергий всех звеньев робота.

Кинетическая энергия робота складывается из энергий поступательного и вращательного движения всех звеньев. Каждое звено имеет массу и моменты инерции, которые определяют его инерционные свойства. При движении робота эти характеристики влияют на требуемые моменты приводов. Звенья большой массы или с большими моментами инерции требуют больших усилий для разгона и торможения.

Потенциальная энергия связана с работой против силы тяжести. Когда звенья робота поднимаются или опускаются, изменяется их потенциальная энергия, что влияет на нагружение приводов. В некоторых конфигурациях робота гравитационные силы помогают движению, в других противодействуют ему.

Матрица инерции описывает инерционные свойства робота и зависит от его конфигурации. При изменении углов сочленений меняется взаимное расположение звеньев, что влияет на общие инерционные характеристики. Матрица всегда положительно определена и симметрична, что отражает физическую природу инерционных сил.

Центробежные и кориолисовы силы возникают при криволинейном движении звеньев. Когда одно звено поворачивается, оно создает дополнительные нагрузки на другие звенья из-за изменения их скоростей в неинерциальной системе отсчета. Эти силы пропорциональны произведениям угловых скоростей и могут быть значительными при высоких скоростях движения.

Практическое значение динамического анализа особенно проявляется при высокоскоростных операциях. При медленных движениях динамическими эффектами можно пренебречь, но с увеличением скорости их влияние растет квадратично. Современные промышленные роботы работают на пределе динамических возможностей, что требует точного учета всех силовых факторов.

3.2: Прямая и обратная задачи динамики

В динамике роботов, как и в кинематике, существуют две основные задачи. Прямая задача динамики определяет движение робота при известных управляющих моментах в сочленениях. Обратная задача динамики находит управляющие моменты, необходимые для выполнения заданного движения. Каждая из этих задач имеет свою специфику и области применения.

Прямая задача динамики математически представляет собой решение дифференциального уравнения второго порядка относительно обобщенных координат. Зная начальные условия (положения и скорости звеньев) и приложенные моменты, можно предсказать, как будет двигаться робот. Эта задача особенно важна для моделирования поведения робота и анализа его характеристик на стадии проектирования.

Численное решение прямой задачи динамики требует интегрирования системы дифференциальных уравнений. Современные методы интегрирования, такие как методы Рунге-Кутты различных порядков, позволяют получить точные результаты даже для сложных многозвенных роботов. Однако вычислительная сложность растет с увеличением числа степеней свободы, что требует эффективных алгоритмов.

Обратная задача динамики имеет гораздо большее практическое значение. Именно она решается в системах управления роботами в реальном времени. Зная желаемую траекторию движения рабочего органа, необходимо определить моменты, которые должны развивать приводы для точного выполнения этой траектории.

Решение обратной задачи динамики основывается на методе обратной динамики Ньютона-Эйлера. Этот рекурсивный алгоритм эффективно вычисляет требуемые моменты, используя прямой и обратный проходы по кинематической цепи робота. Прямой проход вычисляет скорости и ускорения всех звеньев, обратный проход определяет силы и моменты в сочленениях.

Особенностью обратной задачи динамики является необходимость знания не только желаемых положений звеньев, но и их скоростей и ускорений. Это озна-

чает, что траектория движения должна быть дважды дифференцируемой функцией времени. Разрывы в ускорениях приводят к бесконечно большим моментам, что физически нереализуемо.

Компенсация гравитации представляет важный частный случай обратной задачи динамики. Когда робот находится в статическом равновесии, приводы должны развивать моменты, компенсирующие воздействие силы тяжести. Эти моменты зависят только от конфигурации робота и не зависят от скоростей движения.

Практическая реализация алгоритмов динамики требует точного знания параметров робота: масс звеньев, их центров масс и моментов инерции. Неточность этих параметров приводит к ошибкам в вычислении управляющих моментов и снижению точности позиционирования. Поэтому идентификация динамических параметров является важной задачей при вводе робота в эксплуатацию.

Эффективность алгоритмов динамики критична для систем управления реального времени. Вычисления должны выполняться за время, значительно меньшее периода дискретизации системы управления, который обычно составляет единицы миллисекунд. Это требует оптимизации программного кода и использования специализированных вычислительных средств.

При выборе метода решения обратной кинематической задачи важно учитывать вычислительную сложность и требования к точности. Аналитические методы дают мгновенный ответ, но применимы лишь к роботам со знакомыми кинематическими структурами. Численные алгоритмы универсальны, однако для их работы требуется хорошее начальное приближение и дополнительные механизмы проверки сходимости. Комбинированные подходы, использующие анали-

тическое предварительное приближение и последующую численную корректировку, позволяют существенно снизить время вычислений и гарантировать устойчивость решения.

Для повышения надежности и скорости в реальном времени современные контроллеры часто используют предварительно вычисленные карты решений обратной кинематики — т. н. *lookup*-таблицы или полилинии. В них хранятся множества заранее рассчитанных углов сочленений для типовых положений рабочего органа. При выполнении задачи вместо итераций система мгновенно извлекает ближайший набор углов и при необходимости уточняет их небольшим численным шагом.

Особое внимание уделяется управлению траекториями вблизи сингулярностей. Для безопасной работы часто вводят ограничения на зону допустимых конфигураций и меняют траекторию так, чтобы робот не приближался к сингулярным положениям. В протяженных траекториях возможен переход в другую кинематическую конфигурацию («конфигурационный переход»), когда робот меняет «фазу» своего плеча-локтя-запястья без прерывания движения рабочего органа. Это позволяет сохранить гладкость и непрерывность траектории.

В перспективе активное развитие получают методы машинного обучения для обратной кинематики. Нейронные сети обучаются по большому числу примеров «положение — конфигурация» и обеспечивают мгновенный вывод решения, обходя необходимость сложных итераций. Такие модели особенно эффективны для роботов с высокой степенью свободы и сложными геометриями, где традиционные методы работают медленно или нестабильно.

ГЛАВА 4. ПРИВОДЫ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

4.1: Классификация и принципы работы приводов

Приводы являются силовыми элементами робота, преобразующими различные виды энергии в механическую работу. Выбор типа привода определяет основные характеристики робота: быстродействие, точность, грузоподъемность, надежность и стоимость эксплуатации. Современная промышленная робототехника использует три основных типа приводов: электрические, гидравлические и пневматические.

Электрические приводы заняли господствующее положение в современной промышленной робототехнике не случайно, а благодаря своему исключительному сочетанию технических характеристик, которые делают их идеальным решением для большинства задач автоматизации производственных процессов. Превосходство электрических приводов проявляется прежде всего в их способности обеспечивать микронную точность позиционирования, что критически важно в высокоточных операциях сборки, сварки или обработки деталей. Современные электрические приводы способны позиционировать рабочий орган робота с погрешностью менее одной сотой миллиметра, что недостижимо для других типов приводов при сопоставимых размерах и массе.

Простота управления электрическими приводами кардинально отличает их от гидравлических и пневматических систем, поскольку для изменения скорости или положения требуется лишь изменить параметры электрического сигнала, подаваемого на двигатель. Такой подход исключает необходимость в сложных гидравлических распределителях, дросселях и компрессорах, что значительно упро-

щает как конструкцию робота, так и алгоритмы управления им. Отсутствие механических промежуточных звеньев между системой управления и исполнительным органом позволяет реализовать сложные законы движения с высокой повторяемостью и стабильностью характеристик.

Минимальные требования к техническому обслуживанию делают электрические приводы особенно привлекательными с точки зрения эксплуатационных расходов и надежности производственных процессов. В отличие от гидравлических систем, требующих регулярной замены рабочей жидкости, контроля герметичности соединений и очистки фильтров, электрические приводы не нуждаются в расходных материалах и могут работать тысячи часов без какого-либо вмешательства обслуживающего персонала. Единственным элементом, требующим периодической замены, являются подшипники качения, срок службы которых измеряется десятками тысяч часов работы.

Основу современных электрических приводов робототехнических систем составляют высокоточные серводвигатели постоянного или переменного тока, интегрированные с многоконтурными системами обратной связи по положению, скорости и моменту. Эти системы обратной связи построены на базе прецизионных энкодеров, способных регистрировать угловое положение ротора с разрешением до нескольких угловых секунд, что в сочетании с современными цифровыми регуляторами обеспечивает исключительно высокое качество переходных процессов и точность отработки заданных траекторий движения.

Серводвигатели постоянного тока с постоянными магнитами представляют собой технически совершенное решение, демонстрирующее выдающиеся динамические характеристики в сочетании с относительной простотой схем управления. Их превосходные динамические свойства обусловлены отсутствием потерь

на перемангничивание ротора и минимальной электрической постоянной времени, что позволяет развивать высокие угловые ускорения при быстром отклике на управляющие сигналы. Простота управления достигается благодаря линейной зависимости между током якоря и развиваемым моментом, что упрощает синтез регуляторов и повышает предсказуемость поведения привода в различных режимах работы.

Прямая пропорциональность между током якоря и моментом, развиваемым двигателем, создает идеальные условия для реализации точного управления моментом, что особенно важно при выполнении операций, требующих контролируемого усилия. Эта линейность сохраняется во всем рабочем диапазоне скоростей и нагрузок, обеспечивая стабильность характеристик привода и высокое качество регулирования независимо от внешних условий. Отсутствие нелинейных эффектов, характерных для других типов двигателей, значительно упрощает настройку системы управления и повышает ее робастность к изменению параметров нагрузки.

Современные бесколлекторные двигатели постоянного тока устранили основные недостатки коллекторных машин, связанные с механическим коммутатором. Износ угольных щеток, который ограничивал ресурс коллекторных двигателей несколькими тысячами часов работы, полностью исключен благодаря электронной коммутации, основанной на сигналах датчиков положения ротора. Искрение на коллекторе, создававшее электромагнитные помехи и представлявшее взрывоопасность в определенных условиях, также устранено, что позволяет использовать такие двигатели в самых требовательных с точки зрения безопасности приложениях. Современные бесколлекторные серводвигатели способны работать 50-100 тысяч часов без снижения характеристик, что делает их идеальным решением для непрерывных производственных процессов с высокими требованиями к надежности.

Синхронные серводвигатели переменного тока с постоянными магнитами представляют собой наиболее перспективное направление развития приводной техники для высокопроизводительных роботов следующего поколения. Их растущая популярность в сегменте высокоточных и быстродействующих манипуляторов обусловлена уникальным сочетанием высокой удельной мощности, превосходной динамики и способности развивать максимальный момент практически во всем диапазоне рабочих скоростей. Использование мощных неодимовых магнитов позволяет создавать компактные двигатели с удельным моментом, в несколько раз превышающим показатели традиционных асинхронных машин.

Способность синхронных серводвигателей переменного тока обеспечивать высокий момент при минимальных габаритных размерах открывает новые возможности для конструирования легких и компактных роботов с улучшенными массогабаритными характеристиками. Высокая удельная мощность таких двигателей позволяет создавать роботы с увеличенной грузоподъемностью без соответствующего увеличения собственной массы манипулятора, что особенно важно для мобильных роботических систем и коллаборативных роботов, работающих в непосредственной близости от человека.

Отличная динамика синхронных серводвигателей переменного тока проявляется в их способности развивать высокие угловые ускорения и точно отрабатывать сложные траектории движения с минимальными динамическими погрешностями. Возможность работы на высоких скоростях без существенного снижения момента расширяет функциональные возможности роботов и позволяет повысить производительность технологических операций, особенно в задачах, требующих быстрых перемещений между точками.

Управление синхронными серводвигателями переменного тока действительно требует применения сложной силовой электроники и микропроцессорных систем управления, способных в реальном времени вычислять оптимальные значения токов статора и осуществлять векторное управление магнитным потоком. Однако стремительное развитие микроэлектроники и снижение стоимости высокопроизводительных цифровых сигнальных процессоров делает такие решения экономически оправданными даже для относительно простых роботических применений, где ранее использовались более простые типы приводов.

Гидравлические приводы находят своё применение в тех робототехнических системах, где на первое место выходит потребность в огромных усилиях при сравнительно компактных габаритах. В таких приводах основным рабочим телом выступает жидкость, что позволяет передавать высокие нагрузки через тонкие магистрали и небольшие компоненты. Когда робот выполняет тяжёлые подъёмы, прессование, точные штамповочные операции или манипуляции с массивными заготовками, гидросистема демонстрирует впечатляющее соотношение мощности к весу. При этом регулирование скорости происходит плавно: изменение подачи масла через пропорциональные клапаны обеспечивает удержание требуемой скорости в самом широком диапазоне, от почти нулевой до нескольких метров в секунду траектории исполнительного органа. Однако такая гибкость и мощность достигаются ценой усложнённого технического обвеса. Необходимость в мощных насосах, ёмких резервуарах, множестве фильтров для очистки рабочей жидкости и системах активного охлаждения превращает гидравлическую установку в сложный комплекс, требующий тщательного проектирования и регулярного обслуживания.

Точность позиционирования остаётся слабым местом гидроприводов. Даже при использовании высококачественных насосов и тончайших регулирующих

клапанов неизбежная сжимаемость масла приводит к тому, что моментальные изменения нагрузки отражаются в виде упругих «проседаний» или микроколебаний исполнительного органа. Поддержание рабочих жидкостей в идеально чистом состоянии требует постоянного мониторинга и замены фильтров, а герметичность всех соединений — регулярного контроля и ремонта, иначе мельчайшие утечки становятся причиной как потери эффективности, так и загрязнения окружающей среды. В современных производственных условиях всё более жёсткие экологические нормы ограничивают применение гидросистем, поскольку риск проливки масла и необходимость утилизации отработанной жидкости создают дополнительные трудности и расходы.

Пневматические приводы, напротив, стоят на другом полюсе требований и возможностей. Во многих технологических циклах, где не требуется сверхвысокая точность позиционирования и допускается шаговое, «открыто-закрыто» управление, пневматические цилиндры и моторы остаются самым простым и надёжным решением. Сжатый воздух, циркулирующий по трубопроводам, безопасен, не представляет угрозы пожароопасности и при утечках не наносит ущерба экологии. Простота устройства и доступность компонентов — компрессоров, ресиверов, быстродействующих клапанов и воздушных цилиндров — гарантируют низкую стоимость владения и высокую ремонтпригодность: при необходимости замены полосового уплотнения или переключающего клапана достаточно минимального набора инструментов и базовых навыков.

Однако свойства самого воздуха накладывают твёрдые ограничения на точность и стабильность работы. Воздух, будучи сжимаемым, ведёт себя подобно упругой пружине: при резком изменении нагрузки или команды на движение исполнительный орган пневмопривода неизбежно проскальзывает, и цикл «взрыв-отскок» становится нормой в системах с быстрым циклом. Задачи непрерывного

плавного регулирования положения цилиндра в пневматике традиционно считаются проблематичными, поскольку добиться сопоставимой с электрическими или гидравлическими приводами повторяемости невозможно без сложных вспомогательных контуров и тщательной настройки. В ответ на эти ограничения в последние годы получили развитие пропорциональные пневмосистемы, где сжатый воздух управляется электронно и дозируется через специализированные пропорциональные регулирующие клапаны. Такие системы частично сглаживают эффект сжатия и обеспечивают приемлемую градуировку перемещений, однако по-прежнему уступают другим приводам в точности и динамике, оставаясь главным образом инструментом для нетребовательных позиционных задач.

Выбор типа привода зависит от специфики применения робота. Электроприводы оптимальны для большинства задач промышленной автоматизации. Гидроприводы незаменимы в тяжелых роботах и машинах, работающих в экстремальных условиях. Пневмоприводы находят применение в быстродействующих позиционных системах и во взрывоопасных средах.

4.2: Системы передач и редукторы

Между двигателем и исполнительным механизмом робота обычно устанавливается механическая передача, которая согласует характеристики привода с требованиями нагрузки. Основная задача передачи состоит в преобразовании скорости и момента: двигатели развивают высокие скорости при относительно небольших моментах, тогда как звенья робота требуют больших моментов при умеренных скоростях.

Редукторы являются наиболее распространенным типом передач в робототехнике. Они уменьшают скорость вращения и пропорционально увеличивают крутящий момент. Передаточное отношение редуктора определяет, во сколько раз изменяются эти параметры. Правильный выбор передаточного отношения

критически важен для обеспечения требуемых динамических характеристик робота.

Планетарные редукторы широко применяются в современных роботах благодаря своим компактным размерам, высокой несущей способности и соосности входного и выходного валов. Планетарная передача состоит из центральной шестерни (солнца), нескольких сателлитов, вращающихся вокруг солнца, и внешнего зубчатого венца. Такая конструкция обеспечивает равномерное распределение нагрузки между несколькими парами зубьев.

Волновые передачи представляют особый интерес для робототехники из-за возможности получения больших передаточных отношений в одной ступени. Принцип работы основан на деформации гибкого зубчатого колеса под действием эллиптического генератора волн. Волновые передачи обеспечивают высокую точность, отсутствие зазоров и компактность, но требуют высококачественных материалов и точной сборки.

Циклоидальные редукторы также находят применение в робототехнике, особенно в задачах, требующих высокой точности и жесткости. Принцип работы основан на качении циклоидального диска по внутренней поверхности статорного кольца. Такие передачи имеют очень высокую несущую способность и практически полное отсутствие люфта, но сложны в изготовлении.

Ременные и цепные передачи используются для передачи движения между удаленными осями. Зубчатые ремни обеспечивают точность передачи и отсутствие проскальзывания, что важно для систем позиционирования. Недостатком таких передач является ограниченная жесткость, что может привести к колебаниям в системе управления.

Винтовые передачи преобразуют вращательное движение в поступательное и широко используются в линейных приводах роботов. Шарико-винтовые пары обеспечивают высокий КПД и точность, но требуют защиты от загрязнений. Трапецеидальные винты проще и дешевле, но имеют больше трение и износ.

Важной характеристикой любой передачи является люфт — зазор между зубьями или другими контактирующими элементами. Люфт приводит к потере точности позиционирования и может вызывать автоколебания в системе управления. Современные прецизионные редукторы имеют люфт менее одной угловой минуты.

КПД передачи определяет, какая часть энергии двигателя передается к нагрузке. Потери в передаче приводят к нагреву и снижают общую эффективность робота. Планетарные и волновые передачи имеют высокий КПД (до 95%), тогда как червячные передачи могут иметь КПД всего 60-70%.

Динамические свойства передачи, такие как жесткость и демпфирование, существенно влияют на характеристики системы управления. Низкая жесткость передачи может привести к резонансным колебаниям, а недостаточное демпфирование усложняет стабилизацию системы. При проектировании робота необходимо учитывать эти факторы для обеспечения устойчивой работы.

Для повышения надёжности системы передачи следует учитывать вибрационные характеристики и долговечность материалов. Для этого проводят испытания на усталостную прочность и проводят анализ тепловых потерь. Кроме того, в современных роботах активно применяют гибридные многосвязники, сочетающие несколько типов передач в одном узле, что позволяет оптимизировать рабочие характеристики под конкретные задачи.

ГЛАВА 5. СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ

5.1: Основы сенсорных систем в робототехнике

Сенсорные системы являются органами чувств робота, обеспечивающими его взаимодействие с окружающим миром. Без надежной сенсорной информации даже самый совершенный робот остается "слепым" исполнителем заранее запрограммированных движений. Современная промышленная робототехника требует интеллектуального поведения, адаптации к изменяющимся условиям и безопасной работы рядом с людьми, что невозможно без развитых сенсорных систем.

Классификация датчиков в робототехнике основывается на различных принципах. По физическому принципу действия различают механические, оптические, магнитные, ультразвуковые и другие типы датчиков. По назначению выделяют датчики положения, скорости, ускорения, силы, температуры, освещенности. По расположению датчики делятся на внутренние, измеряющие параметры самого робота, и внешние, воспринимающие информацию об окружающей среде.

Датчики положения составляют основу системы управления любого робота. Энкодеры измеряют угловое или линейное перемещение с высокой точностью и используются для определения положения звеньев робота. Инкрементные энкодеры выдают импульсы при повороте, а абсолютные энкодеры сразу показывают текущее положение. Разрешение современных энкодеров достигает миллионов импульсов на оборот, что обеспечивает исключительную точность измерений.

Потенциометрические датчики положения просты и недороги, но имеют ограниченный срок службы из-за механического контакта. Индуктивные и емкостные датчики бесконтактны и надежны, но менее точны. Магнитные датчики на

основе эффекта Холла устойчивы к внешним воздействиям и находят широкое применение в промышленных роботах.

Датчики скорости обычно реализуются программно на основе дифференцирования сигналов датчиков положения. Однако такой подход усиливает шумы, поэтому применяются специальные алгоритмы фильтрации. Тахогенераторы обеспечивают непосредственное измерение скорости, но требуют дополнительного места и усложняют конструкцию.

Силовой моментные датчики расширяют возможности робота, позволяя ему "чувствовать" контакт с объектами. Тензометрические датчики основаны на изменении сопротивления материала при деформации. Они размещаются в захватах робота или между последним звеном и рабочим органом. Информация о силах и моментах используется для точного позиционирования, контроля усилий при сборке и обеспечения безопасности.

Тактильные датчики имитируют осязание и позволяют роботу определять форму, твердость и текстуру поверхности объектов. Матричные тактильные датчики состоят из множества чувствительных элементов и формируют "отпечаток" контактирующего объекта. Такие системы особенно полезны для захвата хрупких или деформируемых предметов.

Датчики близости обнаруживают присутствие объектов без физического контакта. Индуктивные датчики реагируют на металлические предметы, емкостные на любые материалы с диэлектрической проницаемостью, отличной от воздуха. Ультразвуковые датчики измеряют расстояние по времени прохождения звукового импульса. Лазерные дальномеры обеспечивают высокую точность измерения расстояний в широком диапазоне.

Интеграция множественных датчиков в единую сенсорную систему требует решения задач синхронизации, калибровки и слияния данных. Различные датчики могут иметь разные частоты опроса, задержки и точность. Алгоритмы слияния данных объединяют информацию от различных источников для получения более полной и надежной картины состояния робота и окружающей среды.

5.2: Системы технического зрения

Техническое зрение представляет собой наиболее информативную и универсальную сенсорную систему современных роботов. Подобно человеческому зрению, оно позволяет роботу воспринимать окружающий мир, распознавать объекты, определять их положение и ориентацию, оценивать качество продукции и принимать решения на основе визуальной информации. Развитие цифровых камер, мощных процессоров и алгоритмов обработки изображений сделало техническое зрение доступным и эффективным инструментом промышленной автоматизации.

Основу системы технического зрения составляет видеокамера, преобразующая оптическое изображение в цифровой формат. ПЗС и КМОП матрицы являются основными типами фотоприемников в промышленных камерах. ПЗС матрицы обеспечивают высокое качество изображения и низкий уровень шумов, но потребляют больше энергии. КМОП матрицы более экономичны, имеют высокую скорость считывания и интегрированную обработку сигнала.

Разрешение камеры определяет детальность получаемого изображения и измеряется в мегапикселях. Для промышленных применений важен не только общий размер изображения, но и размер пикселя, который влияет на чувствительность и динамический диапазон. Малые пиксели обеспечивают высокое разрешение, но имеют меньшую светочувствительность. Выбор камеры требует компромисса между разрешением, скоростью и чувствительностью.

Освещение играет критическую роль в системах технического зрения. Правильно спроектированная система освещения может упростить алгоритмы обработки изображений и повысить надежность распознавания. Светодиодное освещение стало стандартом благодаря долговечности, стабильности и возможности точного управления интенсивностью. Различные схемы освещения позволяют выделить нужные характеристики объектов: контурное освещение для определения границ, направленное для выявления текстуры, диффузное для равномерного освещения.

Калибровка камеры является обязательным этапом настройки системы технического зрения. Внутренние параметры камеры включают фокусное расстояние, положение главной точки и коэффициенты дисторсии объектива. Внешние параметры определяют положение и ориентацию камеры в пространстве. Точная калибровка необходима для преобразования координат изображения в мировые координаты и обеспечения точности измерений.

Предварительная обработка изображений подготавливает данные для дальнейшего анализа. Фильтрация шумов устраняет случайные искажения, коррекция освещенности компенсирует неравномерность подсветки, повышение контраста улучшает различимость деталей. Морфологические операции позволяют удалить мелкие дефекты изображения и выделить области интереса.

Сегментация изображения разделяет его на области, соответствующие различным объектам или их частям. Пороговая сегментация выделяет объекты по яркости или цвету. Методы на основе границ находят контуры объектов по резким изменениям яркости. Региональные методы объединяют пиксели со схожими характеристиками в однородные области.

Выделение признаков извлекает характерные свойства объектов для их последующего распознавания. Геометрические признаки включают площадь, периметр, моменты инерции, коэффициенты формы. Текстурные признаки описывают повторяющиеся паттерны поверхности. Частотные признаки получаются с помощью преобразования Фурье или вейвлет-анализа. Выбор подходящих признаков критически важен для успешного распознавания.

Распознавание объектов сравнивает выделенные признаки с эталонными образцами и принимает решение о принадлежности объекта к определенному классу. Статистические методы используют функции плотности вероятности для классификации. Нейронные сети обучаются на примерах и способны обобщать знания на новые ситуации. Современные методы глубокого обучения достигают высокой точности распознавания в сложных условиях.

Стереозрение и 3D-сканирование расширяют возможности традиционного плоского зрения, позволяя роботам воспринимать глубину и форму объектов. Стереоскопические системы используют две или более камеры для триангуляции и вычисления расстояний. Время пролета (ToF) камеры измеряют расстояние по времени возврата инфракрасного сигнала. Структурированное освещение проецирует известные паттерны на объекты и анализирует их деформацию для восстановления 3D-геометрии.

Интеграция систем технического зрения с искусственным интеллектом и облачными вычислениями открывает новые горизонты автоматизации. Сверточные нейронные сети (CNN) обеспечивают высокую точность распознавания даже при изменении освещения, угла обзора и частичном заслонении объектов. Трансформерные архитектуры позволяют анализировать пространственные связи в изображениях на уровне, недоступном классическим методам.

Облачная обработка изображений дает доступ к мощным вычислительным ресурсам и обширным базам данных для обучения моделей распознавания. Edge-вычисления обеспечивают баланс между скоростью обработки и качеством анализа, выполняя критически важные операции локально, а сложные задачи передавая в облако.

Современные системы технического зрения все чаще включают функции самообучения и адаптации. Активное обучение позволяет системе автоматически выбирать наиболее информативные примеры для доучивания модели. Федеративное обучение дает возможность роботам в сети обмениваться знаниями без передачи чувствительных данных.

Особое внимание уделяется обеспечению надежности и безопасности систем зрения в критически важных применениях. Методы верификации нейронных сетей позволяют гарантировать корректное поведение в заданных условиях. Объяснимый искусственный интеллект (ХАИ) делает процесс принятия решений прозрачным для операторов.

Перспективы развития технического зрения связаны с интеграцией мультимодальных данных — комбинированием изображений с информацией от других датчиков, таких как лидары, радары и тактильные сенсоры. Это создает комплексное понимание окружающей среды и повышает устойчивость системы к различным помехам и изменениям условий работы.

ГЛАВА 6. УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ И СИСТЕМАМИ РОБОТОТЕХНИКИ

6.1: Основы теории управления в робототехнике

Система управления является "мозгом" промышленного робота, координирующим работу всех его компонентов для выполнения заданных задач. Теория управления в робототехнике объединяет классические методы автоматического регулирования с современными подходами, учитывающими многосвязность, нелинейность и неопределенность робототехнических систем. Понимание принципов управления необходимо для проектирования эффективных и надежных роботов.

Структура системы управления робота имеет иерархический характер. На нижнем уровне работают контуры управления отдельными приводами, обеспечивающие точное позиционирование каждого сочленения. Средний уровень координирует движения всех звеньев для выполнения траектории рабочего органа. Верхний уровень планирует задачи, обрабатывает сенсорную информацию и взаимодействует с оператором или внешними системами.

Математическая модель объекта управления описывает динамические свойства робота и служит основой для синтеза регуляторов. Линейные модели применимы для малых отклонений от номинального режима и позволяют использовать хорошо развитый аппарат линейной теории управления. Нелинейные модели более точно отражают реальное поведение робота, но требуют сложных методов анализа и синтеза.

Обратная связь является фундаментальным принципом управления роботами. Информация с датчиков положения, скорости, силы и других параметров

используется для коррекции управляющих воздействий. Без обратной связи робот работал бы по программе разомкнутого управления, что неприемлемо для точных операций из-за неизбежных возмущений и неточностей модели.

ПИД-регулятор остается основным типом регулятора в промышленной робототехнике благодаря простоте реализации и хорошим практическим свойствам. Пропорциональная составляющая обеспечивает быстроту реакции, интегральная устраняет статическую ошибку, дифференциальная улучшает переходные процессы. Настройка параметров ПИД-регулятора требует компромисса между быстрым действием и устойчивостью.

Каскадное управление широко применяется в приводах роботов. Внутренний контур тока обеспечивает быстрое и точное регулирование момента двигателя. Контур скорости формирует заданное значение тока для достижения требуемой скорости. Внешний контур положения определяет задание по скорости для точного позиционирования. Такая структура обеспечивает хорошие динамические свойства и помехозащищенность.

Компенсация нелинейностей повышает качество управления роботом. Гравитационная компенсация устраняет влияние силы тяжести на точность позиционирования. Компенсация трения уменьшает статические и динамические ошибки. Упреждающее управление по модели нейтрализует предсказуемые возмущения и улучшает отслеживание траекторий.

Адаптивное управление позволяет роботу приспосабливаться к изменяющимся условиям работы. Параметры регулятора автоматически настраиваются при изменении нагрузки, износе механизмов или других факторах. Алгоритмы самонастройки основаны на анализе качества переходных процессов или идентификации параметров объекта управления.

Робастное управление обеспечивает стабильную работу системы при неопределенности параметров и наличии возмущений. Методы H^∞ -управления и μ -синтеза позволяют спроектировать регуляторы, гарантирующие устойчивость и требуемое качество в заданном диапазоне изменения параметров. Такие подходы особенно важны для роботов, работающих в различных режимах нагрузки.

Цифровая реализация систем управления стала стандартом в современной робототехнике. Микропроцессорные контроллеры обеспечивают гибкость программирования, возможность реализации сложных алгоритмов и интеграцию с системами верхнего уровня. Дискретность управления требует учета эффектов квантования по времени и уровню, выбора подходящего периода дискретизации.

6.2: Координированное управление многозвенными системами

Координированное управление решает задачу согласованного движения всех звеньев робота для обеспечения требуемой траектории рабочего органа. В отличие от независимого управления отдельными сочленениями, координированное управление учитывает динамические взаимосвязи между звеньями и обеспечивает оптимальное распределение нагрузок между приводами. Это критически важно для высокоскоростных и высокоточных операций.

Метод вычисленного момента представляет классический подход к координированному управлению роботами. Алгоритм использует полную динамическую модель робота для вычисления управляющих моментов, необходимых для точного отслеживания заданной траектории. При известных желаемых положениях, скоростях и ускорениях звеньев система решает обратную задачу динамики в реальном времени.

Математическая основа метода вычисленного момента заключается в линеаризации нелинейной динамической системы робота.

Адаптивное управление расширяет возможности метода вычисленного момента, позволяя системе автоматически настраиваться на неизвестные параметры нагрузки. Алгоритмы адаптации изменяют оценки масс, моментов инерции и других динамических параметров на основе наблюдаемых ошибок слежения. Это особенно важно для роботов, работающих с различными деталями или инструментами.

Скользящее управление обеспечивает робастность к неточностям модели и внешним возмущениям. Метод основан на принуждении траектории системы к движению по специально выбранной поверхности в пространстве состояний. В режиме скольжения система становится нечувствительной к параметрическим неопределенностям и ограниченным возмущениям.

Импедансное управление позволяет роботу безопасно взаимодействовать с внешними объектами. Вместо жесткого отслеживания траектории робот ведет себя как механическая система с заданными инерционными, диссипативными и упругими свойствами. При контакте с препятствием траектория автоматически изменяется, предотвращая повреждение робота или окружающих объектов.

Управление силой дополняет позиционное управление в задачах, требующих контроля контактных усилий. Гибридное управление разделяет пространство задач на подпространства позиционного и силового управления. В направлениях, где робот не ограничен препятствиями, работает позиционное управление. В направлениях контакта активно управление силой.

Декомпозиционные методы управления упрощают задачу координации путем разделения ее на подзадачи меньшей размерности. Метод сингулярного возмущения разделяет быструю и медленную динамику системы. Быстрая подсистема

отвечает за стабилизацию отдельных контуров, медленная за координацию движений. Такой подход снижает вычислительную сложность и улучшает устойчивость.

Прогнозирующее управление использует модель робота для предсказания будущего поведения системы и оптимизации управляющих воздействий на горизонте прогнозирования. Алгоритм решает задачу оптимизации с ограничениями на управления, состояния и выходы системы. Рекуррентное решение обеспечивает адаптацию к изменяющимся условиям и возмущениям.

Современные подходы к координированному управлению все чаще используют методы машинного обучения. Нейронные сети способны аппроксимировать сложные нелинейные зависимости в динамике робота, а алгоритмы обучения с подкреплением позволяют роботу самостоятельно развивать навыки управления через взаимодействие с окружающей средой. Эти методы особенно перспективны для сложных задач в неструктурированной среде.

ГЛАВА 7. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

7.1: Основы и методы программирования роботов

Программирование является ключевым этапом внедрения промышленного робота, определяющим его поведение и эффективность выполнения поставленных задач. В отличие от программирования обычных компьютеров, программирование роботов требует учета физических законов движения, взаимодействия с реальными объектами и обеспечения безопасности. Современные подходы к программированию роботов сочетают простоту использования для оператора с мощными возможностями для решения сложных задач автоматизации.

Программирование обучением представляет наиболее интуитивный метод создания программ для роботов. Оператор физически направляет робота через последовательность движений, при этом система автоматически записывает траекторию, включая координаты ключевых точек, скорости перемещения и состояния рабочих органов. Такой подход не требует глубоких знаний программирования и позволяет быстро создавать программы для повторяющихся операций.

Существуют два основных варианта программирования обучением. При непрерывном обучении записывается вся траектория движения с высокой частотой дискретизации. Этот метод подходит для задач, требующих точного воспроизведения сложных криволинейных траекторий, таких как окрашивание или сварка. При точечном обучении записываются только ключевые позиции, а система управления самостоятельно генерирует траектории между ними.

Текстовое программирование обеспечивает максимальную гибкость и возможности для создания сложных программ. Специализированные языки программирования роботов, такие как VAL, RAPID или KRL, содержат команды для управления движением, взаимодействия с датчиками, логической обработки и коммуникации с внешними системами. Эти языки адаптированы к специфике робототехнических задач и включают функции для работы с координатными системами, траекториями и силовым взаимодействием.

Структура программы робота обычно включает инициализацию системы, определение рабочих координат и инструментов, основной цикл выполнения операций и процедуры обработки исключительных ситуаций. Модульный подход к программированию позволяет создавать библиотеки стандартных процедур, которые могут использоваться в различных программах. Это повышает надежность кода и ускоряет разработку новых приложений.

Система координат играет фундаментальную роль в программировании роботов. Базовая система координат фиксирована относительно основания робота. Рабочая система координат привязана к детали или рабочему месту и позволяет легко переносить программы при изменении расположения объектов. Инструментальная система координат связана с рабочим органом робота и упрощает программирование операций захвата и обработки.

Интерполяция движений определяет характер перемещения робота между заданными точками. Линейная интерполяция обеспечивает прямолинейное движение рабочего органа в декартовом пространстве, что важно для операций обработки и сборки. Интерполяция в суставном пространстве осуществляет движение по кратчайшему пути в конфигурационном пространстве робота, обеспечивая максимальную скорость при перемещениях без контакта.

Управление скоростью и ускорением критично для обеспечения плавности движений и предотвращения механических повреждений. Системы управления автоматически ограничивают динамические параметры в соответствии с возможностями приводов и требованиями точности. Программист может задавать относительные значения скорости, а система пересчитывает их в абсолютные значения с учетом текущей конфигурации робота.

Обработка сенсорной информации расширяет возможности программирования за пределы простого воспроизведения заученных движений. Условные операторы позволяют роботу принимать решения на основе показаний датчиков. Циклы обеспечивают повторение операций до достижения определенных условий. Прерывания позволяют реагировать на внешние события, такие как сигналы безопасности или команды от внешних систем.

Отладка и диагностика программ роботов требует специальных инструментов, учитывающих физическую природу выполняемых операций. Режим пошагового выполнения позволяет проверить правильность каждого движения. Симуляторы дают возможность тестировать программы без риска повреждения оборудования. Системы мониторинга отслеживают выполнение программы в реальном времени и сигнализируют о возникновении проблем.

7.2: Современные среды разработки и интеграция систем

Современное программирование промышленных роботов все больше опирается на развитые интегрированные среды разработки, которые объединяют инструменты моделирования, программирования, отладки и мониторинга в единой платформе. Эти среды значительно упрощают процесс создания робототехнических приложений и позволяют разработчикам сосредоточиться на логике решения задач, а не на технических деталях низкого уровня.

Система ROS (Robot Operating System) стала де-факто стандартом для разработки программного обеспечения роботов в исследовательской среде и все активнее проникает в промышленность. ROS представляет собой не операционную систему в традиционном понимании, а набор библиотек, инструментов и соглашений, облегчающих создание сложного робототехнического программного обеспечения. Модульная архитектура ROS позволяет разрабатывать переносимые и многократно используемые компоненты.

Узловая архитектура ROS основана на концепции независимых процессов (узлов), обменивающихся данными через систему сообщений. Каждый узел выполняет определенную функцию: управление приводом, обработка изображений, планирование траекторий. Такой подход обеспечивает модульность системы, упрощает отладку и позволяет распределять вычислительную нагрузку между несколькими компьютерами.

Система топики в ROS обеспечивает асинхронную передачу данных между узлами. Узлы могут публиковать сообщения в именованных топиках или подписываться на них для получения информации. Стандартные типы сообщений покрывают большинство потребностей робототехники: геометрические данные, изображения, информация о датчиках. Возможность создания пользовательских типов сообщений позволяет адаптировать систему к специфическим требованиям.

Сервисы ROS предназначены для синхронного взаимодействия по принципу запрос-ответ. Они используются для вызова функций, которые должны выполняться немедленно и вернуть результат. Примерами могут служить вычисление кинематики, калибровка датчиков или запрос текущего состояния системы. Сервисы дополняют топики и обеспечивают полноценное взаимодействие между компонентами системы.

Пакет MoveIt! представляет мощную платформу для планирования движений роботов в ROS. Он интегрирует современные алгоритмы планирования траекторий, обнаружения столкновений и кинематического решения. MoveIt! поддерживает различные типы роботов и позволяет легко интегрировать новые модели через унифицированный интерфейс описания роботов URDF.

Визуализация и мониторинг критически важны для разработки и отладки робототехнических систем. Инструмент RViz позволяет в реальном времени визуализировать данные с датчиков, планируемые траектории, состояние робота и окружающую среду. Gazebo предоставляет возможности физического моделирования для тестирования алгоритмов в реалистичной виртуальной среде без риска повреждения реального оборудования.

Промышленная версия ROS Industrial расширяет возможности базовой системы для промышленного применения. Она включает драйверы для популярных промышленных роботов, инструменты калибровки, интеграцию с системами технического зрения и планирования производства. ROS Industrial обеспечивает мост между академическими исследованиями и промышленными применениями.

Интеграция роботов с производственными системами требует поддержки промышленных протоколов связи. Современные роботы поддерживают Ethernet/IP, PROFINET, EtherCAT и другие стандарты промышленной автоматизации. Это позволяет включать роботов в существующие системы управления производством и обеспечивать координацию с другим оборудованием.

Облачная робототехника открывает новые возможности для программирования и управления роботами. Вычислительно сложные задачи, такие как распознавание образов или планирование в сложной среде, могут выполняться в облаке с использованием мощных серверов. Роботы получают доступ к обширным базам данных, моделям машинного обучения и коллективному опыту других роботов.

Безопасность программного обеспечения роботов становится критически важной с ростом их автономности и сложности. Современные среды разработки включают инструменты статического анализа кода, формальной верификации алгоритмов управления и тестирования безопасности. Особое внимание уделяется защите от кибератак и обеспечению функциональной безопасности в соответствии с международными стандартами.

Важнейшим элементом безопасности является регулярное обновление программного обеспечения и прошивок контроллеров для устранения выявленных уязвимостей. Интеграция механизмов аппаратного корня доверия и защищённой загрузки позволяет предотвратить запуск неавторизованного или поддельного кода. Для защиты коммуникаций между узлами и периферийными устройствами применяют шифрование данных и аутентификацию на уровне протоколов (TLS, OPC UA). Наконец, внедрение механизмов разграничения прав доступа и журналирования событий обеспечивает прозрачность действий системы и облегчает расследование инцидентов, что полностью соответствует требованиям стандартов IEC 61508 (функциональная безопасность) и IEC 62443 (кибербезопасность).

Кроме разработки и отладки, современные среды предоставляют возможности CI/CD для роботов, позволяя автоматизировать сборку, тестирование и развертывание кода на контроллерах. Контейнеризация приложений с помощью Docker и Kubernetes облегчает управление зависимостями и масштабирование распределенных систем. Инструменты DevSecOps интегрируют проверки безопасности на каждом этапе разработки, обеспечивая соответствие стандартам защиты данных и промышленным нормам.

ГЛАВА 8. ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ И НАВИГАЦИЯ

8.1: Алгоритмы планирования движений

Планирование траекторий является одной из фундаментальных задач робототехники, определяющей способность робота эффективно перемещаться в рабочем пространстве для достижения поставленных целей. В промышленной робототехнике планирование траекторий должно обеспечивать не только достижение целевых позиций, но и оптимизацию по времени, энергопотреблению, плавности движений и безопасности взаимодействия с окружающими объектами.

Конфигурационное пространство служит математической основой для планирования движений роботов. Каждая конфигурация робота представляется точкой в многомерном пространстве, размерность которого равна числу степеней свободы. Препятствия в рабочем пространстве отображаются в запрещенные области конфигурационного пространства. Задача планирования сводится к поиску пути между начальной и целевой конфигурациями через свободные области этого пространства.

Геометрическое планирование пути решает задачу нахождения последовательности конфигураций робота, соединяющих начальное и целевое положения без учета динамических ограничений. Полученный путь представляет собой кривую в конфигурационном пространстве, которая может быть параметризована любым монотонно возрастающим параметром. На этом этапе основное внимание уделяется избеганию столкновений и удовлетворению кинематических ограничений.

Алгоритм A^* является одним из классических методов поиска оптимального пути в дискретном пространстве состояний. Он использует эвристическую функцию для направления поиска к цели и гарантирует нахождение оптимального решения при условии, что эвристика не переоценивает истинное расстояние до цели. В робототехнике A^* часто применяется после дискретизации конфигурационного пространства на равномерную сетку.

Вероятностные методы планирования, такие как RRT (Rapidly-exploring Random Tree) и PRM (Probabilistic Roadmap Method), эффективно работают в многомерных конфигурационных пространствах. RRT строит дерево путем случайной выборки точек в пространстве и попыток соединения их с ближайшими узлами существующего дерева. Алгоритм обладает свойством полноты по вероятности: при достаточном времени выполнения он найдет решение, если таковое существует.

PRM предварительно строит граф возможных движений в свободном конфигурационном пространстве. На этапе обучения алгоритм случайно выбирает конфигурации и пытается соединить их с близлежащими узлами локальными планировщиками. Полученный граф используется для быстрого планирования путей между различными парами начальных и целевых конфигураций.

Оптимизирующие версии вероятностных алгоритмов, такие как RRT* и PRM*, асимптотически сходятся к оптимальному решению. Они включают процедуры переподключения узлов для улучшения качества найденного пути. Хотя эти алгоритмы требуют больше вычислительного времени, они находят более качественные решения, что важно для промышленных применений.

Планирование траекторий учитывает динамические ограничения робота: максимальные скорости, ускорения и рывки в сочленениях. Геометрический путь должен быть параметризован временем таким образом, чтобы все динамические

ограничения были соблюдены. Это более сложная задача, чем геометрическое планирование, поскольку пространство состояний включает не только позиции, но и скорости.

Полиномиальные траектории широко используются для интерполяции между ключевыми точками. Кубические полиномы обеспечивают непрерывность положений, скоростей и ускорений, что важно для плавного движения робота. Сплайны высших порядков позволяют дополнительно контролировать рывки и высшие производные. Параметры полиномов выбираются для удовлетворения граничных условий и оптимизации выбранного критерия качества.

Трапецеидальные профили скорости представляют простой и эффективный способ генерации временных траекторий. Движение разделяется на фазы разгона, постоянной скорости и торможения. Максимальная скорость и ускорение выбираются с учетом ограничений приводов. Такие профили легко реализуются в системах управления реального времени и обеспечивают предсказуемое поведение робота.

Онлайн планирование траекторий позволяет роботу адаптироваться к изменяющимся условиям в реальном времени. Алгоритмы должны быстро реагировать на появление новых препятствий, изменение целей или отклонения от запланированной траектории. Для этого используются методы локального планирования, модифицирующие траекторию в окрестности текущего положения робота без полного перепланирования.

8.2: Обход препятствий и навигация в реальном времени

Обход препятствий представляет критически важную функцию промышленных роботов, особенно тех, которые работают в динамичной среде с движущимися объектами.

щимися объектами или в условиях неполной информации об окружении. В отличие от статического планирования траекторий, алгоритмы обхода препятствий должны работать в реальном времени, быстро реагируя на изменения в рабочем пространстве и обеспечивая безопасность движения.

Метод искусственных потенциальных полей создает виртуальную силовую среду вокруг робота, где цель притягивает его, а препятствия отталкивают. Потенциальная функция конструируется таким образом, что ее минимум соответствует целевому положению, а максимумы расположены на препятствиях. Градиент потенциальной функции определяет направление движения робота в каждой точке пространства.

Притягивающий потенциал обычно имеет квадратичную или коническую форму, создавая силу, направленную к цели и растущую с увеличением расстояния. Отталкивающий потенциал препятствий обычно обратно пропорционален расстоянию до препятствия и действует только в пределах заданной области влияния. Комбинация этих потенциалов создает результирующее поле, направляющее робота к цели через свободное пространство.

Основной проблемой метода потенциальных полей является возможность попадания в локальные минимумы, где робот застревает в положении, отличном от цели. Это происходит, когда притягивающие и отталкивающие силы уравниваются друг друга. Для решения этой проблемы разработаны модификации метода, включающие случайные возмущения, навигационные функции и гибридные подходы.

Алгоритм Bug представляет простой и надежный метод обхода препятствий для роботов с ограниченными сенсорными возможностями. Робот движется прямо к цели до встречи с препятствием, затем следует по его контуру до тех пор, пока не найдет точку, из которой можно продолжить движение к цели. Различные

варианты Bug-алгоритмов отличаются стратегиями выбора точки покидания препятствия.

Bug1 обходит препятствие полностью, запоминая точку с минимальным расстоянием до цели, и возвращается к этой точке для продолжения движения. Bug2 покидает препятствие, когда траектория пересекает прямую линию от начальной точки к цели. Эти алгоритмы гарантируют достижение цели в связном пространстве, но могут быть неэффективными по длине пути.

Векторное поле гистограмм (VFH) использует полярную гистограмму для представления локального окружения робота. Пространство вокруг робота делится на угловые секторы, и для каждого сектора вычисляется плотность препятствий на основе данных дальномерных датчиков. Алгоритм выбирает направление движения в секторе с наименьшей плотностью препятствий, одновременно стремясь к цели.

Динамическое окно (DWA) рассматривает ограниченное множество возможных скоростей робота, достижимых за короткий интервал времени с учетом кинематических и динамических ограничений. Для каждой пары линейной и угловой скоростей вычисляется траектория на фиксированный период времени и оценивается ее качество по нескольким критериям: близость к цели, удаление от препятствий и соответствие желаемой скорости.

Эластичные полосы (Elastic Bands) представляют траекторию как последовательность точек, соединенных виртуальными пружинами. Внутренние силы пружин стремятся сократить длину траектории, делая ее более прямой, в то время как внешние силы от препятствий отталкивают траекторию от опасных областей. Итерационная оптимизация приводит к плавной траектории, огибающей препятствия с минимальной длиной.

Временная логика линейного времени (LTL) позволяет формализовать сложные требования к поведению робота при навигации. Можно задавать условия типа "посетить точку А, затем точку В, избегая области С". Специальные алгоритмы синтеза автоматически генерируют контроллеры, гарантирующие выполнение заданных спецификаций.

Совместное планирование пути и времени необходимо для роботов, работающих в среде с движущимися препятствиями. Пространство состояний расширяется включением временной координаты, и препятствия представляются как трубки в пространстве-времени. Планирование в таком расширенном пространстве позволяет найти траектории, избегающие столкновений с движущимися объектами.

Предиктивное управление использует модель динамики робота и окружающей среды для прогнозирования будущих состояний системы. На каждом шаге решается оптимизационная задача поиска управляющих воздействий, минимизирующих функцию стоимости на горизонте прогнозирования. Этот подход позволяет заблаговременно планировать маневры обхода препятствий и оптимизировать траектории по различным критериям.

ГЛАВА 9. МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИМУЛЯЦИЯ

Моделирование и симуляция являются неотъемлемой частью современного процесса разработки и внедрения промышленных роботов. Они позволяют инженерам исследовать поведение робототехнических систем, оптимизировать их параметры, проверять алгоритмы управления и обучать персонал без использования дорогостоящего реального оборудования. Качественная модель робота служит основой для всех последующих этапов проектирования и эксплуатации.

Уровни моделирования в робототехнике варьируются от простых кинематических схем до сложных многофизических моделей, учитывающих механические, электрические, тепловые и другие явления. Выбор уровня детализации зависит от целей моделирования, доступных вычислительных ресурсов и требований к точности результатов. Иерархический подход позволяет использовать модели различной сложности на разных этапах разработки.

Кинематические модели описывают геометрические свойства робота и связь между углами в сочленениях и положением рабочего органа. Эти модели не учитывают массы звеньев, силы и моменты, но позволяют анализировать рабочее пространство, особые положения, точность позиционирования. Кинематические модели вычислительно эффективны и широко используются для планирования траекторий и программирования роботов.

Динамические модели включают инерционные свойства звеньев робота и позволяют анализировать силы и моменты, возникающие при движении. Такие модели необходимы для синтеза систем управления, выбора приводов, анализа

энергопотребления и исследования вибрационных характеристик. Сложность динамических моделей существенно выше кинематических, что требует более мощных вычислительных средств.

Конечно-элементное моделирование применяется для детального анализа напряженно-деформированного состояния элементов конструкции робота. Метод конечных элементов позволяет учесть распределение масс, упругие деформации, температурные воздействия и другие факторы, влияющие на точность позиционирования. Такие модели особенно важны для высокоточных роботов и роботов большой грузоподъемности.

Многотельная динамика представляет робота как систему твердых тел, соединенных кинематическими парами. Современные программные пакеты автоматически формируют уравнения движения на основе описания топологии системы и свойств ее элементов. Этот подход обеспечивает баланс между точностью модели и вычислительной эффективностью.

Моделирование приводов включает характеристики двигателей, редукторов, систем управления и обратной связи. Электрические модели двигателей учитывают индуктивность, сопротивление обмоток, насыщение магнитной цепи. Модели редукторов включают потери, люфты, упругость зубчатых зацеплений. Комплексные модели приводов позволяют анализировать энергетические характеристики и оптимизировать параметры систем управления.

Стохастические модели учитывают случайные факторы: производственные допуски, шумы датчиков, возмущения нагрузки. Метод Монте-Карло позволяет исследовать влияние случайных параметров на характеристики робота. Стохастическое моделирование особенно важно для анализа точности позиционирования, надежности и робастности систем управления.

Модели контактного взаимодействия описывают силы, возникающие при столкновении робота с объектами окружающей среды. Различают модели упругого, неупругого и фрикционного контакта. Точное моделирование контактных явлений критично для задач сборки, обработки материалов и обеспечения безопасности.

Верификация и валидация моделей обеспечивают соответствие результатов моделирования реальному поведению робота. Верификация проверяет правильность реализации математической модели в программе. Валидация сравнивает результаты моделирования с экспериментальными данными. Систематический подход к верификации и валидации повышает достоверность результатов моделирования и снижает риски при внедрении роботов.

Для обеспечения актуальности моделей важным этапом является автоматизированная интеграция результатов симуляции с системами управления реального времени. Это позволяет осуществлять сквозную проверку «от виртуального прототипа до реального робота» (digital twin), обеспечивая быстрый цикл обратной связи и снижая риски ошибок при внедрении.

Кроме того, современные инструменты симуляции поддерживают параллельную интеграцию с системами планирования производства и MES, что позволяет оптимизировать расписание операций с учётом загрузки оборудования и пропускной способности линии. Автоматическая генерация отчётов по результатам моделирования облегчает процесс принятия решений и служит основой для непрерывного улучшения качества и эффективности производства.

ГЛОССАРИЙ

А

Автоматизация — процесс внедрения автоматических устройств и систем для выполнения производственных операций без непосредственного участия человека.

Адаптивное управление — метод управления робототехническими системами, при котором параметры регулятора автоматически настраиваются в зависимости от изменяющихся условий работы.

Актуатор — исполнительный механизм, преобразующий управляющий сигнал в механическое движение или силу.

Аналоговый сигнал — непрерывный электрический сигнал, представляющий физическую величину (напряжение или ток) в сенсорах и приводах.

API (Application Programming Interface) — интерфейс программирования приложений, набор функций и протоколов для взаимодействия между программными компонентами робота.

Алгоритм A^* — метод поиска оптимального пути в графе с использованием эвристической функции для направления поиска к цели.

Артикуляция — подвижность сочленений робота, обеспечивающая возможность изменения конфигурации системы звеньев.

Б

Базовая система координат — неподвижная система координат, связанная с основанием робота и служащая для описания положения всех его элементов.

Бесколлекторный двигатель — синхронный электродвигатель с постоянными магнитами, не имеющий щеточно-коллекторного узла и управляемый электронным коммутатором.

Блок питания — устройство, преобразующее внешний источник энергии в стабильное напряжение и ток для питания электронных компонентов робота.

Буферизация данных — временное хранение входящих или исходящих сообщений в программной системе для обеспечения согласованности и предотвращения потерь в асинхронных коммуникациях.

Бесконтактный датчик — сенсор, измеряющий параметры без физического контакта с объектом (например, ультразвуковой или инфракрасный датчик).

В

Вибрация — колебательное движение элементов робота, возникающее из-за неуравновешенности масс или внешних воздействий; влияет на точность и ресурс механизма.

Время цикла — интервал между началом и окончанием выполнения одной операции робота; характеризует производительность системы.

Вектор угловых скоростей — набор скоростей вращения каждого сочленения, представленный в виде вектора в суставном пространстве.

Векторное поле гистограмм (VFH) — алгоритм локального планирования пути, использующий полярную гистограмму для представления препятствий в окружающей среде.

Верификация модели — процесс проверки правильности реализации математической модели в программном коде симулятора.

Внутреннее демпфирование — способность материала или конструкции поглощать энергию колебаний, снижая амплитуду вибраций.

Волновая передача — механическая передача, основанная на деформации гибкого зубчатого колеса эллиптическим генератором волн.

Г

Гидропривод — система привода, использующая энергию сжатой жидкости для создания движения исполнительных органов.

Гистограмма частот — распределение значений измеряемого параметра (например, интенсивности пикселей) для анализа характеристик изображения или данных сенсора.

Глубинная карта — представление трёхмерной формы окружающей среды в виде массива значений расстояний до поверхности объектов, используемое в стереозрении и ToF-камере.

Гравитационная компенсация — алгоритм управления, устраняющий влияние силы тяжести на точность позиционирования робота.

Д

Датчик положения — устройство, измеряющее угловое или линейное перемещение элементов робота с высокой точностью.

Датчик ускорения — сенсор, измеряющий линейное ускорение звеньев робота, необходимое для компенсации динамических эффектов и обеспечения плавности движения.

Динамика робота — раздел механики, изучающий движение звеньев робота с учетом сил и моментов, вызывающих это движение.

Дискретизация — процесс преобразования непрерывного сигнала или траектории в последовательность дискретных значений или точек для цифровой обработки.

Дискретный датчик — сенсор, выдающий дискретные (включено/выключено) сигналы при достижении определённого порога или события (например, концевой выключатель), используется для надёжного обнаружения положения, присутствия или пересечения границ движения.

Дифференциал — математическая операция определения мгновенного изменения функции (например, производная положения по времени даёт скорость).

Дифференцирование — операция вычисления производной, используемая в алгоритмах ПИД-регулирования и предсказания траекторий.

Е

Емкостной датчик — датчик, принцип действия которого основан на изменении емкости конденсатора при приближении объекта.

Ж

Жесткость системы — способность робота сопротивляться деформации под действием внешних сил, критически важная для точности позиционирования.

З

Задание траектории — указание путей движения рабочего органа робота, определяющих последовательность точек и скоростей для выполнения конкретной задачи.

Захватное устройство — рабочий орган робота, предназначенный для удержания и манипулирования объектами различной формы и размеров.

Звено робота — твердое тело, являющееся элементом кинематической цепи манипулятора и соединенное с другими звеньями через сочленения.

И

Импедансное управление — метод управления, при котором робот ведет себя как механическая система с заданными параметрами инерции, демпфирования и жесткости.

Инерциальные параметры — физические характеристики звеньев робота: масса, положение центра масс, моменты и произведения инерции.

Интерполяция движений — процесс вычисления промежуточных точек траектории между заданными опорными позициями.

Искусственный интеллект — совокупность методов и технологий, позволяющих машинам выполнять задачи, требующие интеллектуальных способностей.

К

Калибровка — процесс определения и коррекции параметров робота для обеспечения точности позиционирования и выполнения операций.

Каскадное управление — структура системы управления с несколькими контурами обратной связи, включенными последовательно.

Кинематика робота — раздел механики, изучающий движение звеньев робота без учета сил, вызывающих это движение.

КМОП-матрица — тип фотоприемника в цифровых камерах, изготовленный по технологии комплементарных металло-оксидных полупроводников.

Коботы — коллаборативные роботы, предназначенные для безопасной совместной работы с людьми в едином рабочем пространстве.

Компенсация трения — алгоритм управления, уменьшающий влияние сил трения на точность движений робота.

Конфигурационное пространство — многомерное пространство, где каждая точка соответствует определенной конфигурации всех звеньев робота.

Координированное управление — метод управления многозвенным роботом, обеспечивающий согласованное движение всех звеньев для достижения цели.

Л

Лагранжиан — функция, равная разности кинетической и потенциальной энергий системы, используемая для составления уравнений движения.

Линейная интерполяция — метод генерации траектории, обеспечивающий прямолинейное движение рабочего органа в декартовом пространстве.

Локальный планировщик — алгоритм, модифицирующий траекторию в окрестности текущего положения робота без полного перепланирования пути.

Люфт — зазор между контактирующими элементами передачи, приводящий к потере точности позиционирования.

М

Манипулятор — механическая система, состоящая из последовательно соединенных звеньев и предназначенная для перемещения объектов в пространстве.

Матрица инерции — симметричная положительно определенная матрица, описывающая инерционные свойства робота в обобщенных координатах.

Машинное зрение — область техники, изучающая методы автоматического извлечения информации из цифровых изображений.

Мехатроника — междисциплинарная область, объединяющая механику, электронику и информатику для создания интеллектуальных систем.

Многотельная динамика — метод моделирования робота как системы твердых тел, соединенных кинематическими парами.

MoveIt! — программная платформа для планирования движений роботов в среде ROS, интегрирующая современные алгоритмы планирования.

Н

Навигационная функция — специальный тип потенциальной функции, гарантирующий отсутствие локальных минимумов при планировании пути.

Нейронная сеть — вычислительная модель, имитирующая работу биологических нейронных сетей и способная к обучению на примерах.

Нелинейная система — система, поведение которой не подчиняется принципу суперпозиции и требует специальных методов анализа.

О

Обратная кинематика — задача определения углов поворота сочленений робота для достижения заданного положения рабочего органа.

Обратная связь — принцип управления, при котором информация о состоянии системы используется для коррекции управляющих воздействий.

Обход препятствий — задача нахождения безопасного пути движения робота в среде с статическими или динамическими препятствиями.

Ограничение движения — предельное значение перемещения или угла сочленения, задаваемое конструкцией или безопасными условиями эксплуатации.

Оптимизация траектории — процесс поиска траектории движения, минимизирующей заданный критерий качества.

Ось — направление движения или вращения в системе координат робота; каждая ось соответствует одной степени свободы.

П

Параметры Денавита-Хартенберга — четыре параметра, полностью описывающих геометрию любого сочленения робота.

ПИД-регулятор — линейный регулятор, формирующий управляющий сигнал на основе пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ошибки.

Планетарный редуктор — тип механической передачи с высокой несущей способностью и компактными размерами.

Планирование траекторий — задача нахождения последовательности движений робота для достижения цели с учетом ограничений.

Пневмопривод — система привода, использующая энергию сжатого воздуха для создания движения исполнительных органов.

Позиционирование — процесс точного перемещения рабочего органа робота в заданную точку пространства.

Потенциальные поля — метод планирования пути, создающий виртуальную силовую среду, где цель притягивает робота, а препятствия отталкивают.

Прогнозирующее управление — метод управления, использующий модель системы для предсказания будущих состояний и оптимизации управляющих воздействий.

Программирование обучением — метод создания программ робота путем физического направления его через последовательность движений.

Промышленный робот — автоматически управляемый, перепрограммируемый многоцелевой манипулятор, имеющий три или более программируемых оси.

Прямая кинематика — задача определения положения и ориентации рабочего органа робота по заданным углам поворота в сочленениях.

Р

Рабочее пространство — множество всех точек в трехмерном пространстве, которых может достичь рабочий орган робота.

Радиус действия — максимальное расстояние от основания робота, на котором может находиться рабочий орган при любом положении сочленений.

Распознавание объектов — процесс автоматического определения и классификации объектов на изображении с использованием алгоритмов обработки признаков, статистических методов или нейронных сетей.

Рейка-шестерня — механическая передача, преобразующая вращательное движение шестерни в поступательное движение зубчатой рейки; обеспечивает высокую точность линейного позиционирования.

Реальное время — режим работы системы, при котором задержка между поступлением входных данных и выдачей управляющих команд не превышает строго заданного предела, необходимого для безопасного и точного управления роботом.

Робастное управление — метод синтеза систем управления, обеспечивающих устойчивость и качество при неопределенности параметров.

Робот — автоматическое устройство, способное воспринимать информацию об окружающей среде, принимать решения и выполнять действия в реальном мире.

ROS (Robot Operating System) — набор библиотек и инструментов для разработки робототехнического программного обеспечения.

RRT (Rapidly-exploring Random Tree) — вероятностный алгоритм планирования пути, строящий дерево случайной выборкой точек в конфигурационном пространстве.

С

Сегментация изображения — процесс разделения цифрового изображения на области, соответствующие различным объектам.

Сенсорная система — совокупность датчиков и алгоритмов обработки, обеспечивающих роботу информацию о состоянии системы и окружающей среде.

Серводвигатель — электродвигатель с системой обратной связи по положению, обеспечивающий точное позиционирование.

Симуляция — процесс имитации поведения робототехнической системы с помощью математических моделей и программных средств.

Сингулярность — особое положение робота, в котором он теряет одну или несколько степеней свободы движения.

Система управления — комплекс технических средств и алгоритмов, обеспечивающих автоматическое управление роботом.

Скользящее управление — метод нелинейного управления, принуждающий траекторию системы к движению по специально выбранной поверхности.

Сочленение — подвижное соединение между двумя звеньями робота, обеспечивающее одну степень свободы движения.

Степень свободы — количество независимых параметров, необходимых для полного описания положения робота в пространстве.

Т

Тактильный датчик — сенсор, определяющий характеристики объекта при физическом контакте с ним.

Техническое зрение — область техники, занимающаяся автоматическим анализом и интерпретацией визуальной информации.

Траектория — закон изменения положения рабочего органа робота во времени при движении между двумя точками.

Трапецеидальный профиль скорости — способ генерации временной траектории с фазами разгона, постоянной скорости и торможения.

У

Управление силой — метод управления роботом, при котором контролируются контактные усилия взаимодействия с объектами.

Устойчивость — свойство системы возвращаться к равновесному состоянию после воздействия возмущений.

Ф

Фильтрация — процесс обработки сигналов датчиков для устранения шумов и выделения полезной информации.

Фрикционный контакт — тип взаимодействия между объектами, при котором возникают силы трения, препятствующие скольжению.

Х

Характеристическое уравнение — алгебраическое уравнение, корни которого определяют динамические свойства системы управления.

Ц

Центробежные силы — силы инерции, возникающие при вращательном движении звеньев робота и влияющие на его динамику.

Циклоидальный редуктор — тип механической передачи, основанный на качении циклоидального диска по внутренней поверхности статорного кольца.

Цифровое управление — система управления, в которой сигналы обрабатываются в дискретном времени с помощью цифровых процессоров.

Цифровой датчик — сенсор, выдающий дискретные цифровые сигналы (обычно в виде битовых значений или пакетов данных по интерфейсам SPI, I²C или CAN), позволяющий передавать измеренные параметры без дополнительного аналого-цифрового преобразования.

Ш

Шарико-винтовая передача — механизм преобразования вращательного движения в поступательное с высоким КПД и точностью.

Шаговый двигатель — электродвигатель, поворачивающийся на фиксированный угол при подаче управляющего импульса.

Э

Энкодер — датчик для измерения углового или линейного перемещения с высокой точностью.

СПИСОК ЛУЧШЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ПРОМЫШЛЕННОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ

СОВРЕМЕННЫЕ БАЗОВЫЕ УЧЕБНИКИ И СПРАВОЧНИКИ

1. Международные издания

1. World Robotics 2024 – Industrial Robots. International Federation of Robotics (IFR), 2024.

Ежегодный аналитический отчет IFR по промышленным роботам: глобальная статистика, анализ рынков по регионам и отраслям, прогнозы развития и практические кейсы.

2. Introduction to Robotics: Mechanics and Control (4th ed., 2022). John J. Craig. Pearson, 2022.

Классический учебник по кинематике, динамике и управлению манипуляторами с примерами на MATLAB.

3. Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control. Kevin M. Lynch, Frank C. Park. Cambridge University Press, 2017.

Современный подход к описанию динамики, планирования движений и систем управления роботами; доступна бесплатная электронная версия.

4. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems (4th ed., 2014). Jorge Angeles. Springer, 2014.

Глубокое изложение теории механических систем роботов: кинематика, динамика, проектирование актуаторов и сенсорных систем.

5. Springer Handbook of Robotics (2nd ed., 2008). Bruno Siciliano, Oussama Khatib (eds.). Springer, 2008.

Комплексный справочник по всем аспектам робототехники: от истории дисциплины до современных приложений; включает многочисленные иллюстрации и онлайн-ресурсы.

6. Handbook of Industrial Robotics (2nd ed., 1999). Shimon Y. Nof (ed.). Wiley, 1999.

Энциклопедическое руководство по технологиям, архитектуре и применению промышленных роботов в автоматизированных системах.

7. Industrial Robotics: Technology, Programming and Applications (3rd ed., 2018). Mikell P. Groover. McGraw-Hill, 2018.

Практическое руководство по аппаратным и программным аспектам промышленных роботов, включая языки управления и интеграцию в производственные линии.

8. Robotics: Modelling, Planning and Control (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, 2016) Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani, Giuseppe Oriolo. Springer, 2016.

Научно-методическое изложение моделей динамики роботов, алгоритмов планирования траекторий и систем управления.

9. Industrial Robotics: Fundamentals, Design and Applications (2021) Sam Palanivel, John Thomas (eds.). Elsevier, 2021.

Сборник статей и обзоров новейших разработок в области коллаборативных роботов, встроенных систем и промышленных сенсорных сетей.

10. AI-Driven Collaborative Robots: Principles and Practice (2023). Ivan Karabegović, Lejla Banjanović-Mehmedović. Nova Science Publishers, 2023.

Рассматривает интеграцию алгоритмов машинного обучения и безопасного взаимодействия человек–робот в промышленных условиях.

3. Российские учебники и монографии

Основы робототехники (4-е изд., 2017) - Е.И. Юревич

- Классический российский учебник по робототехнике
- Широкий охват: от истории до применения и социально-экономических аспектов
- Подходит как для студентов, так и для практикующих инженеров

Промышленные роботы: управление манипуляционными роботами (2-е изд., 2020) - М.В. Архипов, М.В. Вартанов, Р.С. Мищенко

- Современное учебное пособие для СПО и ВУЗов
- Практико-ориентированный подход
- Соответствует актуальным ФГОС

Промышленные роботы: кинематика, динамика, контроль и управление - А.Г. Булгаков, В.А. Воробьев

- Детальное изложение теоретических основ
- Алгоритмы и практические рекомендации
- Библиотека инженера

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

4. Техническое зрение и сенсорные системы

Machine Vision and Industrial Robotics in Manufacturing: AI and IoT Integration (2024) - A. Khang, V.A. Hajimahmud, A. Misra, E. Litvinova

- Интеграция машинного зрения с ИИ и IoT
- Применение в умном производстве и Индустрии 4.0
- Современные алгоритмы обработки изображений

Сенсорные системы в робототехнике (2013) - Е.И. Юревич†

- Комплексный обзор сенсорных систем
- Техническое зрение и силомоментное ощущение
- Многосенсорные системы интеграции

5. Компоненты и исполнительные устройства

Компоненты исполнительных устройств мехатронных систем - В.П. Умнов

- Приводные компоненты робототехнических систем
- Механизмы преобразования движения
- Датчики и исполнительные механизмы

6. Программирование и управление

Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB (3rd Edition, 2023) - P. Corke

- Основные алгоритмы управления роботами
- Реализация в MATLAB с примерами кода

- Системы стереозрения и планирование траекторий

Probabilistic Robotics (2nd Edition, 2024) - S. Thrun, W. Burgard, D. Fox

- Вероятностные методы в робототехнике
- Статистические подходы к управлению
- Локализация, картографирование, планирование

7. Мобильная робототехника

Introduction to Autonomous Mobile Robots (3rd Edition, 2024) - R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, D. Scaramuzza

- Классика мобильной робототехники
- Локомоция, сенсорика, локализация
- Планирование движения и картографирование

8. Прикладные руководства

Применение промышленных роботов - Ю.Г. Козырев

- Практическое применение в различных отраслях
- Экономическая эффективность внедрения
- Гибкие производственные системы

Развитие инновационной техники для повышения эффективности и безопасности труда (2016) - А.В. Титенок

- Оптимизация производственных процессов
- Классификации, управление, приводы
- Захватные устройства

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ

Для начинающих

Юревич Е.И. – «Основы робототехники». Учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2018 (4-е изд.).

Общая история, классификация и устройство роботов, основы программного и интеллектуального управления.

Титенок А.В. – «Основы робототехники». Учебное пособие. Москва: Академия, 2021.

Изложение базовых понятий робототехники, схемотехника и основы программирования промышленных и мобильных роботов.

Craig J.J. – Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 4-е изд. New York: Pearson, 2022.

Классический курс по кинематике, динамике и управлению манипуляторами с примерами в MATLAB.

Архипов М.В., Вартанов М.В., Мищенко Р.С. – Промышленные роботы: управление манипуляционными роботами. 2-е изд., испр. и доп. Москва: Юрайт, 2020.

Учебное пособие с практическими задачами по программированию и наладке роботов.

Schilling R.J. – Fundamentals of Robotics: Analysis and Control. 2-е изд. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2008.

Пошаговое изложение основ кинематики, динамики и управления роботами с акцентом на математический аппарат и практические примеры.

Niku S.B. – Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Applications. 2-е изд. Hoboken: Wiley, 2010.

Всеобъемлющее введение в робототехнику: архитектуры роботов, программирование, системы восприятия и реальные приложения.

Для углубленного изучения

Springer Handbook of Robotics 2-е изд. Berlin/Heidelberg: Springer, 2008.

Всеобъемлющий справочник по теории и практике робототехники, включая мехатронику и сервисных роботов.

Lynch K.M., Park F.C. – Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

Современный подход к планированию движений, анализу динамики и управлению роботами.

Craig J.J. – Robot Programming: A Practical Guide to Behavior-Based Robotics. 2-е изд. New York: Wiley, 2009.

Глубокое погружение в методики построения поведения роботов, архитектуры управления и отладку систем на практике.

Spong M.W., Hutchinson S., Vidyasagar M. – Robot Modeling and Control. 1-е изд. Hoboken: Wiley, 2006.

Теоретический курс по моделированию кинематики и динамики манипуляторов, проектированию систем управления и разработке алгоритмов стабилизации.

World Robotics 2024 – Industrial Robots International Federation of Robotics, 2024.

Ежегодный статистический отчет по глобальному рынку промышленных роботов.

Для практиков

Козырев Ю.Г. – Применение промышленных роботов. Учебное пособие. Москва: КноРус, 2016.

Описание технологий, оборудования и экономической оценки внедрения роботов в машиностроении.

Corke P. – Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB 2-е изд. London: Springer, 2017.

Практические алгоритмы компьютерного зрения и управления для внедрения в реальных системах.

Groover M.P. – Industrial Robotics: Technology, Programming and Applications. 3-е изд. New York: McGraw-Hill, 2018.

Глубокий обзор аппаратного и программного обеспечения промышленных роботов, методы интеграции и отладки.

Quigley M., Gerkey B., Smart W.D. – Programming Robots with ROS: A Practical Introduction to the Robot Operating System. 1-е изд. Sebastopol: O'Reilly Media, 2015.

Пошаговое руководство по разработке и развертыванию приложений на базе ROS для промышленных и сервисных роботов.

Отраслевые дайджесты Университета «Иннополис». Сборники аналитических обзоров и кейсов по внедрению робототехнических систем в промышленных предприятиях.

Для исследователей

Thrun S., Burgard W., Fox D. – Probabilistic Robotics. MIT Press, 2005.

Методы стохастического моделирования и локализации мобильных роботов, алгоритмы SLAM.

LaValle S.M. – Planning Algorithms Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

Универсальный справочник по алгоритмам планирования в робототехнике, затрагивающий дискретные, непрерывные, оптимизационные и стохастические методы.

Russell S.J., Norvig P. – Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4-е изд. New Jersey: Pearson, 2020.

Классический учебник по искусственному интеллекту, включающий главы по машинному обучению и восприятию для робототехнических систем.

Серия «Мир робототехники и мехатроники». Коллекция монографий и переводных изданий по узким темам: коллаборативные роботы, сенсорные сети, человеко-роботное взаимодействие.

Международные конференции RAAD, ICRA, IROS. Крупнейшие научные форумы в области робототехники и автоматизации для публикации передовых исследований.

Примечание: Список постоянно обновляется с учетом быстрого развития отрасли. Рекомендуется следить за новыми изданиями IFR, IEEE, Springer и ведущих технических университетов.



Промышленная робототехника: от теории к практике

Канал «Промышленная робототехника, роботизация производства» https://t.me/industrial_robot — это ваш проводник в мир современной промышленной автоматизации!



Что вас ждет:

- Обзоры новейших робототехнических решений и технологий;
- Разбор реальных кейсов внедрения роботов на производстве;
- Аналитика рынка и статистика;
- Практические советы по программированию и настройке манипуляторов;
- Интервью с ведущими экспертами отрасли.



Для кого: инженеров-автоматизаторов, технических директоров, студентов робототехнических специальностей, всех, кто интересуется будущим промышленности.



Особенности:

- Еженедельные дайджесты мировых новостей робототехники;
- Эксклюзивные материалы с выставок и конференций;
- Обзоры учебной литературы и курсов;
- Практические схемы и алгоритмы управления.

Присоединяйтесь к сообществу профессионалов: https://t.me/industrial_robot

Подпишитесь прямо сейчас и будьте в курсе всех трендов в промышленной робототехнике!