

Домашнее чтение. Robot Modeling and Control by Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar. Перевод

Оглавление

Домашнее чтение. Robot Modeling and Control by Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar. Перевод.....	1
Перевод текста (20 000 знаков).....	1

Перевод текста (20 000 знаков)

Робототехника - относительно молодая область современных технологий, которая пересекает традиционные границы инженерных наук. Понимание сложности роботов и их применения требует знаний в области электротехники, машиностроения, системной и промышленной инженерии, информатики, экономики и математики. Новые инженерные дисциплины, такие как инженер-технолог, прикладная инженерия и инженерия знаний, появились для того, чтобы справиться со сложностью области робототехники и автоматизации производства.

Эта книга посвящена основам робототехники, включая кинематику, динамику, планирование движения, компьютерное зрение и управление. Наша цель - дать полное представление о наиболее важных концепциях в этих предметах применительно к промышленным роботам-манипуляторам, мобильным роботам и другим механическим системам. Полное изложение дисциплины робототехники потребовало бы нескольких томов. Тем не менее, в настоящее время большинство приложений роботов имеют дело с манипуляторами промышленных роботов, работающих в структурированной заводской среде, поэтому первое введение в предмет робототехники должно включать тщательное рассмотрение тем, представленных в этом тексте.

Термин "робот" был впервые введен в наш лексикон чешским драматургом Карелом Чапеком в его пьесе "Универсальные роботы Россума", написанной в 1920 году. С тех пор этот термин применяется к большому разнообразию механических устройств, таких как телеоператоры, подводные аппараты, автономные наземные вездеходы и т.д. Практически все, что работает с некоторой степенью автономности, обычно под управлением компьютера, в какой-то момент было названо роботом. В данном тексте под термином "робот" будет подразумеваться промышленный манипулятор с компьютерным управлением типа, показанного на рисунке 1.1. Этот тип робота, по сути, представляет собой механическую руку, работающую под управлением компьютера. Такие устройства, хотя и далеки от роботов из научной фантастики, тем не менее, являются чрезвычайно сложными электромеханическими системами, аналитическое описание которых требует передовых методов и представляет собой множество сложных и интересных исследовательских проблем.

Официальное определение такого робота дано Американским институтом роботов (RIA): Робот - это перепрограммируемый многофункциональный манипулятор, предназначенный

для перемещения материала, деталей, инструментов или специализированных устройств посредством переменных запрограммированных движений для выполнения различных задач. Ключевым элементом в приведенном выше определении является перепрограммируемость роботов.

Именно компьютерный мозг придает роботу полезность и адаптивность. Так называемая революция в робототехнике, по сути, является частью более масштабной компьютерной революции.

Даже эта ограниченная версия робота имеет ряд особенностей, которые делают его привлекательным в промышленной среде. Среди преимуществ, часто приводимых в пользу внедрения роботов, - снижение затрат на рабочую силу, повышение производительности труда, гибкость по сравнению со специализированными машинами и более гуманные условия труда, поскольку скучные, повторяющиеся или опасные работы выполняются роботами.

Робот, как мы его определили, родился в результате слияния двух более ранних технологий: телеоператоров и фрезерных станков с числовым программным управлением. Телеоператоры, или устройства типа "ведущий-ведомый", были разработаны во время второй мировой войны для работы с радиоактивными материалами. Компьютерное числовое управление (ЧПУ) было разработано из-за высокой точности, необходимой при обработке некоторых изделий, например, компонентов высокоэффективных самолетов. Первые роботы, по сути, объединяли механические связи телеоператора с автономностью и программируемостью станков с ЧПУ.

Первые успешные применения роботов-манипуляторов, как правило, были связаны с передачей материала, например, литьем под давлением или штамповкой, когда робот просто находится у пресса для выгрузки и либо передачи, либо укладки готовых деталей. Эти первые роботы могли быть запрограммированы на выполнение последовательности движений, таких как перемещение в место А, закрытие захвата, перемещение в место В и т.д., но не имели возможностей внешних датчиков. Более сложные приложения, такие как сварка, шлифовка, удаление заусенцев и сборка, требуют не только более сложных движений, но и некоторой формы внешних датчиков, таких как зрение, тактильные или силовые датчики, из-за более активного взаимодействия робота с окружающей средой.

Следует отметить, что важные области применения роботов отнюдь не ограничиваются теми промышленными работами, где робот непосредственно заменяет человека. Существует множество других применений робототехники в областях, где использование людей непрактично или нежелательно. Среди них подводные и планетарные исследования, поиск и ремонт спутников, обезвреживание взрывных устройств и работа в радиоактивной среде. Наконец, протезы, такие как искусственные конечности, сами по себе являются роботизированными устройствами, требующими методов анализа и проектирования, аналогичных методам анализа и проектирования промышленных манипуляторов.

1.1

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОБОТОВ

Хотя роботы сами по себе являются механическими системами, в этом тексте мы будем в первую очередь заниматься разработкой математических моделей для роботов и манипулированием ими. В частности, мы разработаем методы представления основных геометрических аспектов манипулирования роботами, динамических аспектов манипулирования и различных датчиков, имеющих в современных роботизированных системах. Вооружившись этими математическими моделями, мы сможем разработать

методы планирования и управления движениями роботов для выполнения определенных задач. Здесь мы опишем некоторые основные идеи, характерные для разработки математических моделей роботов-манипуляторов.

1.1.1

Символическое представление роботов

Роботы-манипуляторы состоят из звеньев, соединенных шарнирами и образующих кинематическую цепь. Шарниры обычно бывают вращательными (револьверными) или линейными (призматическими). Револьверный шарнир подобен шарниру и обеспечивает относительное вращение между двумя звеньями. Призматический шарнир обеспечивает линейное относительное движение между двумя звеньями. Обозначим револьверные шарниры буквой R , а призматические - буквой P , и нарисуем их, как показано на рисунке 1.2. Например, трехзвенный рычаг с тремя револьверными шарнирами - это рычаг RRR .

Каждый шарнир представляет собой соединение между двумя звеньями. Мы обозначаем ось вращения револьверного шарнира или ось, по которой перемещается призматический шарнир, через z_i , если шарнир является соединением звеньев i и $i + 1$. Совместные переменные, обозначаемые θ для револьверного шарнира и d для призматического шарнира, представляют собой относительное смещение между соседними звеньями. Мы уточним это в главе 3.

1.1.2

Пространство конфигурации

Конфигурация манипулятора - это полная спецификация расположения каждой точки манипулятора. Множество всех возможных конфигураций называется конфигурационным пространством. В нашем случае, если мы знаем значения суставных переменных (т.е. угол поворота для револьверных шарниров или смещение шарнира для призматических шарниров), то можно легко определить положение любой точки манипулятора, поскольку предполагается, что отдельные звенья манипулятора жесткие, а основание манипулятора неподвижно. Поэтому в данном тексте мы будем представлять конфигурацию набором значений для совместных переменных. Мы будем обозначать этот вектор значений q и говорить, что робот находится в конфигурации q , когда переменные суставов принимают значения $q_1 - - - q_n$, причем $q_i = \theta_i$ для револьверного сустава и $q_i = d_i$ для призматического сустава.

Считается, что объект имеет n степеней свободы (DOF), если его конфигурация может быть минимально задана n параметрами. Таким образом, число DOF равно размерности конфигурационного пространства. Для робота-манипулятора число сочленений определяет число DOF. Жесткий объект в трехмерном пространстве имеет шесть DOF: три для позиционирования и три для ориентации (например, углы крена, тангажа и рысканья). Поэтому манипулятор, как правило, должен иметь не менее шести независимых DOF. При наличии менее шести DOF манипулятор не может достичь любой точки рабочей среды с произвольной ориентацией. Для определенных задач, таких как обхват препятствий или уход за ними, может потребоваться более шести DOF. Манипулятор, имеющий более шести связей, называется кинематически избыточным манипулятором. Сложность управления манипулятором быстро возрастает с увеличением числа звеньев. 1.1.3

Пространство состояний

Конфигурация обеспечивает мгновенное описание геометрии манипулятора, но ничего не говорит о его динамической реакции. Напротив, состояние манипулятора - это набор переменных, которые, вместе с описанием динамики манипулятора и входных данных, достаточны для определения любого будущего состояния манипулятора. Пространство состояний - это множество всех возможных состояний.

В случае манипулятора динамика является ньютоновской и может быть определена путем обобщения знакомого уравнения $F = ma$. Таким образом, состояние манипулятора может быть задано путем указания значений для совместных переменных q и для совместных скоростей \dot{q} (ускорение связано с производной совместных скоростей).

Обычно мы представляем состояние в виде вектора $x = (q, \dot{q})^T$. Таким образом, размерность пространства состояний равна $2n$, если система имеет n DOF.

1.1.3

Пространство состояний

Конфигурация обеспечивает мгновенное описание геометрии манипулятора, но ничего не говорит о его динамической реакции. Напротив, состояние манипулятора - это набор переменных, которые, вместе с описанием динамики манипулятора и входных данных, достаточны для определения любого будущего состояния манипулятора. Пространство состояний - это множество всех возможных состояний.

В случае манипулятора динамика является ньютоновской и может быть определена путем обобщения знакомого уравнения $F = ma$. Таким образом, состояние манипулятора может быть задано путем указания значений для совместных переменных q и для совместных скоростей \dot{q} (ускорение связано с производной совместных скоростей).

Обычно мы представляем состояние в виде вектора $x = (q, \dot{q})^T$. Таким образом, размерность пространства состояний равна $2n$, если система имеет n DOF.

1.1.4

Рабочее пространство

Рабочее пространство манипулятора - это общий объем, занимаемый конечным эффектором при выполнении манипулятором всех возможных движений. Рабочее пространство ограничено геометрией манипулятора, а также механическими ограничениями на шарниры. Например, револьверный шарнир может быть ограничен неполными 360° движения. Рабочее пространство часто разделяют на достигаемое рабочее пространство и пространство для ловкости рук. Достижимое рабочее пространство - это все множество точек, достижимых манипулятором, тогда как ловкое рабочее пространство состоит из тех точек, которые манипулятор может достичь при произвольной ориентации конечного рычага. Очевидно, что рабочее пространство ловкости является подмножеством достижимого рабочего пространства. Рабочие пространства нескольких роботов будут показаны далее в этой главе.

1.2

РОБОТЫ КАК МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Существует ряд физических аспектов роботов-манипуляторов, которые мы не обязательно будем рассматривать при разработке наших математических моделей. К ним относятся механические аспекты (например, как на самом деле реализованы сочленения), точность и

повторяемость, а также оснастка, закрепленная на концевом эффекторе. В этом разделе мы кратко опишем некоторые из них.

1.2.1

Классификация роботов-манипуляторов

Роботы-манипуляторы могут быть классифицированы по нескольким критериям, таким как источник энергии или способ приведения в действие суставов, их геометрия или кинематическая структура, предполагаемая область применения или метод управления. Такая классификация полезна прежде всего для того, чтобы определить, какой робот подходит для выполнения конкретной задачи. Например, гидравлический робот не подойдет для работы с пищевыми продуктами или в чистых помещениях. Более подробно мы объясним это ниже. Источники питания. Как правило, роботы работают на электричестве, гидравлике или пневматике. Гидравлические приводы не имеют себе равных по скорости реакции и способности создавать крутящий момент. Поэтому гидравлические роботы используются в основном для подъема тяжелых грузов. Недостатки гидравлических роботов заключаются в том, что они склонны к утечке гидравлической жидкости, требуют гораздо больше периферийного оборудования (например, насосов, которые требуют большего обслуживания), и они шумные. Роботы, управляемые серводвигателями постоянного или переменного тока, становятся все более популярными, поскольку они дешевле, чище и тише. Пневматические роботы недороги и просты, но ими невозможно точно управлять. В результате пневматические роботы ограничены в области применения и популярности.

Область применения. Роботы часто классифицируются по области применения на сборочные и несборочные. Роботы для сборки, как правило, небольшие, с электрическим приводом и револьверной или SCARA (описаны ниже) конструкцией. Основными областями применения немонтажных роботов на сегодняшний день являются сварка, окраска распылением, обработка материалов, а также погрузка и разгрузка машин.

Метод управления. По методу управления роботы делятся на сервоприводные и несервоприводные. Самые первые роботы были несервоприводными. Эти роботы, по сути, являются устройствами с открытым контуром, движение которых ограничено заранее определенными механическими упорами, и они полезны в основном для перемещения материалов. Фактически, в соответствии с определением, данным ранее, роботы с фиксированной остановкой вряд ли могут считаться роботами. Роботы с сервоприводом используют замкнутый цикл компьютерного управления для определения своего движения и, таким образом, способны быть действительно многофункциональными, перепрограммируемыми устройствами.

Сервоуправляемые роботы далее классифицируются в соответствии с методом, который контроллер использует для управления конечным эффектором. Самый простой тип роботов этого класса - робот "точка-точка". Робот "точка-точка" может быть обучен дискретному набору точек, но нет контроля за траекторией движения конечного движителя в промежутках между обученными точками. Таких роботов обычно обучают серии точек с помощью обучающего кулона. Затем эти точки сохраняются и воспроизводятся. Роботы "точка-точка" сильно ограничены в своем применении. В роботах с непрерывной траекторией движения, с другой стороны, можно управлять всей траекторией движения конечного движителя. Например, конечный движитель робота можно научить следовать по прямой линии между двумя точками или даже по контуру,

например, сварочного шва. Кроме того, часто можно управлять скоростью и/или ускорением концевой экскаватора. Это наиболее продвинутые роботы, требующие самых сложных компьютерных контроллеров и разработки программного обеспечения.

Геометрия. Большинство промышленных манипуляторов в настоящее время имеют шесть или менее степеней свободы. Эти манипуляторы обычно классифицируются кинематически на основе первых трех суставов руки, при этом запястье описывается отдельно. Большинство этих манипуляторов относятся к одному из пяти геометрических типов: шарнирные (RRR), сферические (RRP), SCARA (RRP), цилиндрические (RPP) или декартовы (PPP). Мы обсудим каждый из них ниже. Каждый из этих пяти манипуляторов является серийным звеньевым роботом. Шестой отдельный класс манипуляторов состоит из так называемых параллельных роботов. В параллельном манипуляторе звенья расположены в замкнутой, а не открытой кинематической цепи. Хотя мы включили краткое обсуждение параллельных роботов в эту главу, их кинематику и динамику сложнее вывести, чем у роботов с последовательными звеньями, и поэтому они обычно рассматриваются только в более продвинутых учебниках.

1.2.2

Роботизированные системы

Робот-манипулятор следует рассматривать как нечто большее, чем просто ряд механических связей. Механическая рука является лишь одним из компонентов общей роботизированной системы, показанной на рис. 1.3, которая состоит из руки, внешнего источника энергии, инструментальной оснастки, внешних и внутренних датчиков, компьютерного интерфейса и управляющего компьютера. Даже программное обеспечение следует рассматривать как неотъемлемую часть общей системы, поскольку способ программирования и управления роботом может оказать значительное влияние на его производительность и последующий спектр применения.

1.2.3

Точность и повторяемость

Точность манипулятора - это мера того, насколько близко манипулятор может подойти к заданной точке в пределах своего рабочего пространства. Повторяемость - это мера того, насколько близко манипулятор может вернуться в ранее заданную точку. Основным методом определения ошибок позиционирования в большинстве случаев являются датчики положения, расположенные на шарнирах, либо на валу двигателя, приводящего в действие шарнир, либо на самом шарнире. Как правило, прямого измерения положения и ориентации конечного эффектора не существует. Приходится полагаться на предполагаемую геометрию манипулятора и его жесткость, чтобы вывести (т.е. рассчитать) положение конечного эффектора из измеренных положений суставов. Поэтому на точность влияют вычислительные ошибки, точность обработки конструкции манипулятора, эффекты гибкости, такие как изгиб звеньев под действием гравитационных и других нагрузок, люфт шестерен и множество других статических и динамических эффектов. Именно по этой причине роботы проектируются с чрезвычайно высокой жесткостью. Без высокой жесткости точность может быть повышена только путем прямого определения положения конечного механизма, например, с помощью технического зрения.

Однако после того, как манипулятору задана точка, например, с помощью обучающего пера, вышеуказанные эффекты принимаются во внимание, и управляющий компьютер сохраняет значения энкодера, необходимые для возврата в заданную точку.

Таким образом, на повторяемость в первую очередь влияет разрешение контроллера. Разрешающая способность контроллера означает наименьшее приращение движения, которое может ощутить контроллер. Разрешение рассчитывается как общее расстояние, пройденное концевиком, деленное на 2^n , где n - количество бит точности энкодера. В данном контексте линейные оси, то есть призматические шарниры, обычно имеют более высокое разрешение, чем револьверные шарниры, поскольку расстояние по прямой, пройденное концевиком линейной оси между двумя точками, меньше, чем соответствующая длина дуги, пройденная концевиком вращательного звена.

Кроме того, как мы увидим в последующих главах, вращательные оси обычно приводят к большому количеству кинематических и динамических связей между звеньями с последующим накоплением ошибок и более сложной проблемой управления. Тогда возникает вопрос, в чем преимущества револьверных шарниров при проектировании манипуляторов.

Ответ заключается, прежде всего, в большей ловкости и компактности конструкций с револьверными шарнирами. Например, на рис. 1.4 показано, что при одинаковом диапазоне перемещений вращательное звено можно сделать гораздо меньше, чем звено с линейным движением. Таким образом, манипуляторы, выполненные на основе револьверных шарниров, занимают меньший рабочий объем, чем манипуляторы с линейными осями. Это повышает способность манипулятора работать в одном пространстве с другими роботами, машинами и людьми. В то же время манипуляторы с револьверными шарнирами лучше маневрируют вокруг препятствий и имеют более широкий спектр возможных применений.

1.2.4

Запястья и конечные эффекторы

Суставы в кинематической цепи между рукой и конечным эффектором называются запястьем. Запястные суставы почти всегда являются вращательными. Все чаще встречаются манипуляторы со сферическими запястьями, под которыми мы понимаем запястья, три оси суставов которых пересекаются в общей точке. Сферическое запястье символически представлено на рисунке 1.5. Сферическое запястье значительно упрощает кинематический анализ, позволяя эффективно развязать позиционирование и ориентацию конечного эффектора. Типично поэтому манипулятор будет обладать тремя степенями свободы для позиционирования, которые создаются тремя или более суставами руки. Число степеней свободы для ориентации будет зависеть от степени свободы запястья. Обычно запястья имеют одну, две или три степени свободы в зависимости от области применения. Например, робот SCARA, показанный на рис. 1.14, имеет четыре степени свободы: три для руки и одну для запястья, которое имеет только вращение вокруг конечной оси z .

Говорят, что робот хорош только настолько, насколько хороша его рука или конечный движитель.

Рука и запястье робота используются в основном для позиционирования конечного движителя и любого инструмента, который он может нести. Именно концевой движитель или инструмент фактически выполняет работу. Самым простым типом концевых эффекторов являются захваты, которые обычно способны выполнять только два действия - открываться и закрываться. Хотя этого вполне достаточно для переноса материалов, обработки некоторых деталей или захвата простых инструментов, это не подходит для

других задач, таких как сварка, сборка, шлифовка и т.д. Поэтому большое количество исследований посвящено разработке специальных конечных эффекторов, а также инструментов, которые можно быстро менять в зависимости от задачи. Также много исследований посвящено разработке антропоморфных рук. Такие руки разрабатываются как для протезирования, так и для использования в производстве. Поскольку нас интересует анализ и управление самим манипулятором, а не конкретным приложением или конечным эффектором, мы не будем обсуждать дизайн конечного эффектора или исследование захвата и манипуляции.

...