Содержание

От издательства 16

От автора 17

Глава 1. Введение в робототехнику 21
1.1. Определение и классификация роботов 21
1.1.1. Определение робота 21
1.1.2. Классификация роботов 23
1.1.3. Подход к решению задач управления различными типами роботов 26
1.1.4. Общее представление о задаче управления роботами на основе модели 28
1.2. Методы управления роботами 31
1.2.1. Первое и второе поколения роботов 31
1.2.2. Третье поколение: методы интеллектуального управления роботами 32
1.3. Методы управления на основе моделей и структура книги 32
1.3.1. Основы робототехники 32
1.3.2. Основные методы управления роботами 33
1.3.3. Управление с учетом неопределенностей 35
1.3.4. Силовое и гибридное позиционно-силовое управление 36
1.3.5. Оптимизация движения и оптимальное управление роботами 37
1.3.6. Моделирование и управление гибкими манипуляторами 38
1.3.7. Координированное управление группой роботов 38
1.3.8. Управление копирующими роботами 39
1.3.9. Управление мобильными манипуляторами 40
1.4. Как эффективно освоить теорию и методы модельного управления роботами 40
1.4.1. Фундаментальная инженерная подготовка 40
1.4.2. Объективная оценка робота как объекта управления и повышение профессиональной компетентности 41
1.5. О кибернетике, теории управления и инженерном управлении 44
1.5.1. О кибернетике Винера и понятии управления 44
1.5.2. Теория управления и управление техническими системами 46
Вопросы и упражнения 49

Глава 2. Объект управления и состав робототехнической системы 51
2.1. Общий состав робототехнической системы 52
2.1.1. Манипулятор для радиоактивных веществ как прототип робота 52

2.1.2. Общий состав робототехнической системы 55
2.1.3. Пример типичной робототехнической системы 85
2.2. Механическая система, механизмы и структура промышленного робота-манипулятора 89
2.2.1. Промышленный робот-манипулятор PUMA 262/562 89
2.2.2. Промышленные роботы-манипуляторы серии MOTOMAN K 94
2.3. Системы, механизмы и строение мобильных роботов 102
2.3.1. Системы шагающих мобильных роботов и механизмы двуногих роботов 102
2.3.2. Механизм и механическая структура четвероногого робота 105
2.3.3. Системы, механизмы и строение шагающих роботов с комбинированными способами передвижения 111
2.3.4. Система, механизм и строение робота с двумя руками, имитирующего обезьяну с различными способами передвижения 120
2.3.5. Системы, механизмы и строение колесных мобильных роботов 132
2.3.6. Промежуточное резюме 135
2.4. Практические проблемы управления роботами 136
2.4.1. Ограниченность управления роботами и проблемы собственных конструктивных ограничений и сингулярностей 136
2.4.2. Точность роботов и компенсация недостаточной механической точности средствами управления 137
2.4.3. О практических проблемах управления траекторией и усилием роботов 139
2.4.4. Практические вопросы управления шагающими и колесными мобильными роботами 142
2.5. Резюме 143
Вопросы и упражнения 143

Глава 3. Основы кинематики управляемого движения роботов 147
3.1. Механизмы роботов и представление позиции и ориентации 148
3.1.1. Понятие механизмов робота и их классификация 148
3.1.2. Степени свободы и сочленения робота 155
3.1.3. Математические задачи, связанные с применением манипулятора промышленного робота 167
3.1.4. Что такое кинематика робота? 171
3.1.5. Представление координатных систем манипулятора робота и распространенные конфигурации его звеньев 174
3.1.6. Начальная конфигурация механизма как эталон для сравнения конфигураций манипулятора промышленного робота 176
3.1.7. Представление ориентации концевого эффектора, установленного на механическом интерфейсе конца манипулятора промышленного робота 177
3.2. Координатные системы и преобразования координат 179
3.2.1. Объект и система координат 179
3.2.2. Геометрический анализ преобразований координат для относительного движения объектов и однородные матрицы преобразования координат 186

3.3. Решения прямой задачи кинематики для робототехнических механизмов и их применение ... 208
3.3.1. Создание системы координат для робототехнических механизмов ... 208
3.3.2. Представление параметров DH для звеньев и сочленений в механизмах роботов ... 210
3.3.3. Методы и примеры решения прямой задачи кинематики механизмов роботов ... 215
3.3.4. Методы решения прямой задачи кинематики и применение решений ... 219
3.4. Решения обратной задачи кинематики для механизмов роботов ... 221
3.4.1. Общие решения обратной задачи кинематики ... 221
3.4.2. Методы аналитической геометрии для решения обратной задачи кинематики ... 223
3.5. Матрица Якоби механизмов робота ... 237
3.5.1. Малые перемещения и матрица Якоби ... 237
3.5.2. Матрица Якоби для роботизированной руки с двумя степенями свободы в горизонтальной плоскости ... 240
3.5.3. Общее представление матрицы Якоби ... 241
3.5.4. Соотношение между силами и моментами в сочленениях ... 245
3.5.5. Соотношение преобразования координат силы ... 247
3.6. Динамика механизмов робота ... 250
3.6.1. Математическое описание кинематики и динамики механизмов робота ... 250
3.6.2. Применение векторного анализа и матричных преобразований в кинематике твердых тел или систем точечных частиц ... 252
3.6.3. От векторного представления уравнений Лагранжа к матричному ... 259
3.6.4. Уравнения движения многотельных систем, полученные методом Ньютона–Эйлера ... 267
3.7. Общая форма уравнения движения механизма робота и ее применение ... 275
3.7.1. Уравнения движения многотельной системы ... 275
3.7.2. Общая форма уравнений движения для многотельной роботизированной системы ... 276
3.8. Механизм и кинематика шагающих роботов ... 277
3.8.1. Прообразы механизмов и кинематики шагающих роботов ... 277
3.8.2. Основные походки шагающих роботов ... 281
3.8.3. Кинематика механизмов шагающих роботов и методы генерации паттернов ходьбы ... 284
3.9. Колесные мобильные роботы: их механизмы, кинематика и механика ... 293
3.9.1. Обзор колесных мобильных роботов ... 293
3.9.2. Принципы управления поворотными колесами ... 294
3.9.3. Принципы рулевого управления с независимым приводом ... 297
3.9.4. Угол и радиус поворота мобильного робота-тележки с рулевым механизмом ... 298
3.9.5. Угол и радиус поворота и кривизна траектории мобильного робота с независимым приводом на два колеса ... 300

3.9.6. Движущая сила, необходимая для перемещения колесных мобильных роботов 301
3.9.7. Расчет движущей силы с учетом момента инерции вращения 304
3.10. Резюме 306
Вопросы и упражнения 306

Глава 4. Определение параметров робота 311
4.1. Зачем нужно определять параметры робота? 311
4.2. Уравнение движения робота и физические параметры 313
4.3. Основная идея ограниченного случайного возбуждения движения робота и определения параметров 315
4.3.1. Ограниченное случайное возбуждение движения робота 315
4.3.2. Основная идея и принцип определения параметров робота 317
4.4. Уравнение движения робота и выбор базовых параметров 318
4.4.1. Уравнение движения робота и параметры 318
4.4.2. Определение и выбор базовых параметров 321
4.5. Принципы и алгоритмы определения параметров 322
4.5.1. Метод последовательного определения параметров 322
4.5.2. Метод одновременного определения параметров 326
4.5.3. Преимущества и недостатки последовательного и одновременного методов определения 328
4.6. Практические аспекты эксперимента по определению параметров 329
4.7. Эксперимент по определению параметров двуногого робота 330
4.7.1. Определение параметров робота на основе данных о силе, действующей на стопу, и данных о положении/скорости сочленений 330
4.7.2. Общая модель определения параметров и алгоритм решения 331
4.7.3. Моделирование задачи определения параметров двуногого робота 333
4.7.4. Эксперимент по определению параметров двуногого робота и анализ результатов 336
4.8. Резюме 338
Вопросы и упражнения 339

Глава 5. Управление положением и отслеживанием траектории робота 342
5.1. Общие положения кинематики робота и управления положением/траекторией 342
5.1.1. Взаимосвязь между кинематикой и динамикой робота 342
5.1.2. Общие принципы управления положением/траекторией робота 344
5.2. Основные понятия и классификация управления положением/траекторией робота 348
5.2.1. Некоторые основные понятия управления положением/траекторией робота 348
5.2.2. Суть траекторий в практическом управлении положением/траекторией на примере сварочного манипулятора 350

5.2.3. Классификация методов управления положением/траекторией робота 352
5.3. Управление позицией/траекторией робота с использованием PID 353
5.3.1. Математические и механические основы PID-управления 353
5.3.2. PID-контроллер позиционного и траекторного слежения робота 356
5.3.3. PD-система и технология управления позицией и траекторией робота 357
5.4. Динамическое управление 360
5.4.1. Что такое динамическое управление роботом 360
5.4.2. Динамическое управление роботом с опережающей связью 361
5.5. Прямое + PD-обратное динамическое управление 363
5.5.1. Что такое прямое + PD-обратное динамическое управление роботом 363
5.5.2. Контроллер и структура системы прямого + PD-обратного динамического управления 364
5.6. Метод управления с вычислением момента 365
5.6.1. В чем заключается метод вычисления момента в динамическом управлении роботом 365
5.6.2. Контроллер и структура системы управления по методу вычисления момента 366
5.7. Метод управления с разложением ускорений 367
5.7.1. Зачем нужен метод управления с разложением ускорений 367
5.7.2. В чем заключается метод управления с разложением ускорения в динамическом управлении роботом 368
5.7.3. Контроллер метода управления с разложением ускорения и структура его системы управления 369
5.7.4. Система управления по методу разложения ускорения с внешней системой измерения траектории положения и ориентации в рабочем пространстве робота 371
5.8. Резюме 372
Вопросы и упражнения 374

Глава 6. Управление усилием робота 377

6.1. Классификация роботизированных операций и основные понятия управления усилием 377
6.2. Датчики силы, используемые для управления усилием робота, и их применение 381
6.2.1. Шестикомпонентная сила и датчик силы 381
6.2.2. Датчик силы/момента JR3 в системах управления усилием 383
6.2.3. Преобразование данных, полученных датчиком силы/момента 385
6.2.4. Методы обработки внешних сил, действующих на робота со стороны окружающей среды, и способы обратной связи по силе 390
6.3. Моделирование взаимодействия манипулятора робота с рабочей средой 391
6.3.1. Моделирование робота и рабочей среды или объекта в плоскости 391
6.3.2. Общая модель взаимодействия ***n***-степенного робота с рабочей средой или объектом 392

6.3.3. О применении механических моделей взаимодействия робота и среды ... 393
6.4. Система управления усилием через положение ... 394
6.4.1. Понятие управления усилием через положение и классификация методов управления силой ... 394
6.4.2. Система управления усилием через жесткость (stiffness control) ... 397
6.4.3. Система управления усилием через демпфирование (damping control) ... 400
6.4.4. Система управления усилием через импеданс (impedance control) ... 404
6.4.5. Система управления усилием с виртуальным комплаентным управлением (compliance control) ... 405
6.4.6. Промежуточный итог по вопросам позиционно-силового управления ... 406
6.5. Система управления усилием, основанная на управлении моментом ... 407
6.5.1. Понятие и классификация систем управления усилием, основанных на управлении моментом ... 407
6.5.2. Система управления усилием в декартовой системе координат без динамической компенсации на основе $\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}$ и PD-управления и анализ устойчивости ... 409
6.5.3. Метод смешанного управления без динамической компенсации ... 412
6.5.4. Методы управления усилием с динамической компенсацией ... 412
6.5.5. Метод смешанного управления усилием с динамической компенсацией ... 414
6.6. Сравнение систем и методов управления усилием ... 415
6.7. Итоги главы ... 416
Вопросы и упражнения ... 416

Глава 7. Динамическое управление роботом при неопределенных параметрах модели ... 419

7.1. Неопределенность модели робота и проблемы динамического управления ... 419
7.1.1. Модель робота и неопределенность параметров модели ... 420
7.1.2. Проблема динамического управления роботом ... 424
7.1.3. Что такое робастное управление роботом ... 425
7.1.4. Что такое адаптивное управление роботом ... 426
7.2. Динамические характеристики робота и неопределенности в уравнениях динамики ... 427
7.2.1. Динамические характеристики ... 427
7.2.2. Представление неопределенностей модели робота ... 427
7.3. Управление на основе обратной задачи динамики и влияние неопределенностей ... 428
7.3.1. Номинальное управление ... 428
7.3.2. Матрицы коэффициентов усиления и устойчивый отклик замкнутой системы ... 430
7.3.3. Анализ влияния неопределенностей на устойчивость замкнутой системы ... 431

7.4. Робастное управление на основе метода Ляпунова 432
7.5. Робастное управление на основе пассивных характеристик 433
7.5.1. Основной способ робастного управления на основе пассивных характеристик – номинальное управление 433
7.5.2. Робастное управление, основанное на пассивных характеристиках – влияние неопределенности 436
7.5.3. Робастное управление по методу Ляпунова, основанное на пассивных характеристиках, и его улучшенный вариант 438
7.6. Адаптивное управление роботами 439
7.6.1. Адаптивное управление и типы адаптивных систем управления 439
7.6.2. Применение адаптивного управления к линейной модели системы манипулятора робота 441
7.6.3. Построение системы адаптивного управления с учетом конструкции роботизированного манипулятора 442
7.6.4. Моделирование системы роботизированного манипулятора в методах адаптивного управления 443
7.6.5. Моделирование системы робота, базовые параметры и закон (алгоритм) адаптивного управления 444
7.7. Резюме 449
Вопросы и упражнения 450

Глава 8. Оптимальное управление и кратчайшее время управления роботами 453
8.1. Основные понятия и формализация оптимального управления 453
8.1.1. Основные задачи, понятия и развитие вариационного метода 453
8.1.2. Основные понятия оптимального управления 456
8.1.3. Оптимальное управление стационарных и нестационарных систем и преобразование задач 457
8.2. Применение вариационного метода в задачах оптимального управления 458
8.2.1. Множитель Лагранжа $\lambda(t)$, функция Гамильтона $H(x, u, \lambda)$ и система уравнений Эйлера 458
8.2.2. Нормализованные формы граничных условий при применении вариационного метода к задачам оптимального управления 460
8.3. Принцип максимума для задачи со свободной конечной точкой в оптимальном управлении 463
8.3.1. Постановка задачи со свободной конечной точкой 463
8.3.2. Принцип максимума 463
8.4. Принцип максимума для задачи со свободной конечной точкой при подвижном t_f 464
8.5. Принцип максимума для задачи оптимального управления с ограничением на конечное состояние 465
8.6. Задача оптимального управления роботом 466
8.6.1. Прикладные задачи оптимального управления роботом 466
8.6.2. Оптимизационное представление задачи нахождения оптимального управляющего воздействия робота 467

8.7. Методы нахождения оптимального управляющего воздействия в задаче оптимального управления роботом 469
8.7.1. Градиентный метод решения задачи нахождения оптимального управляющего воздействия робота 469
8.7.2. Численный алгоритм и процедура решения задачи оптимального управления методом градиента 471
8.8. Управление роботом по критерию минимального времени 473
8.8.1. Формализация задачи управления роботом по критерию минимального времени 473
8.8.2. Эксперимент и результаты управления по критерию минимального времени для плоского робота с двумя степенями свободы (2-DOF) 475
8.9. Резюме 484
Вопросы и упражнения 484

Глава 9. Манипуляторы с гибким звеном – моделирование и управление 486
9.1. Основы моделирования гибких звеньев 486
9.1.1. Переход от жесткого промышленного манипулятора к механизму с гибкими звеньями 486
9.1.2. Типы и основные принципы работы гибких звеньев роботов 489
9.1.3. Системы координат и координатные преобразования гибкого звена робота типа «жесткое сочленение – упругое звено» 491
9.1.4. Уравнения прямой кинематики гибкого звена робота типа «жесткое сочленение – упругое звено» 493
9.2. Динамическое моделирование гибкого звена и его уравнения движения 496
9.2.1. Метод Лагранжа для динамического моделирования гибкого звена робота 496
9.2.2. Динамическое моделирование однозвенного робота с гибким звеном 501
9.3. Теория и методы управления роботизированными гибкими манипуляторами 506
9.3.1. Уравнение состояния и уравнение выхода 506
9.3.2. Робастное управление гибким звеном робота 509
9.4. Результаты моделирования управления гибким звеном робота 513
9.4.1. Модель и физические параметры гибкого звена робота 513
9.4.2. Результаты моделирования управления гибким звеном робота и их анализ 514
9.5. Резюме 516
Задачи и упражнения 517

Глава 10. Координированное управление группой роботов 518
10.1. Проблема координации одиночного робота и систем из нескольких роботов 518

10.1.1. Что представляет собой задача координации нескольких роботов? ... 518
10.1.2. Ключевые вопросы координированного управления несколькими роботами ... 520
10.2. Движение и внутренние силы объекта операции при групповой манипуляции ... 522
10.2.1. Движение объекта операции и определение координатных систем ... 522
10.2.2. Внутренние силы, действующие на объект манипулирования ... 527
10.3. Координированное управление операциями с объектом ... 529
10.3.1. Вопросы, которые необходимо учитывать при манипулировании объектом несколькими роботами ... 529
10.3.2. Управление движением объекта и внутренними силами ... 530
10.3.3. О проблеме распределения нагрузки ... 534
10.4. Координированное управление на основе импедансного контроля ... 534
10.4.1. Введение ... 534
10.4.2. Задача комплаентного управления при удержании одного объекта и виртуальный импеданс ... 535
10.4.3. Импедансное управление отдельными роботизированными манипуляторами при удержании одного объекта ... 536
10.4.4. Импедансное управление двумя роботизированными манипуляторами при выполнении сборочных операций ... 538
10.5. Резюме ... 545
Вопросы и упражнения ... 545

Глава 11. Управление роботами в системах «ведущий–ведомый» ... 548
11.1. Обзор концепции и истории развития роботов типа «ведущий–ведомый» ... 548
11.1.1. Что такое система «ведущий–ведомый» и система роботизированных операционных манипуляторов ... 548
11.1.2. Обзор истории развития систем типа «ведущий–ведомый» ... 551
11.2. Основы двустороннего управления ... 552
11.2.1. Структура системы двустороннего управления ... 552
11.2.2. Моделирование системы с одной степенью свободы ... 554
11.2.3. Симметричное двустороннее управление ... 555
11.2.4. Двустороннее управление с отражением усилия ... 556
11.2.5. Двустороннее управление с возвратом усилия ... 557
11.2.6. Унифицированное представление двусторонних систем управления ... 559
11.3. Стабильность системы управления «ведущий–ведомый» ... 561
11.4. Двустороннее управление, ориентированное на обеспечение стабильности системы ... 562
11.4.1. Параллельный метод управления ... 562
11.4.2. Управление на основе гипотетической (виртуальной) внутренней модели ... 564
11.4.3. Динамическое управление в системе «ведущий–ведомый» ... 566

11.4.4. Импедансное управление в системе «ведущий–ведомый» 567
11.5. Управление «ведущий–ведомый» в системе гетерогенных роботов 568
11.5.1. Проблемы управления в робототехнической системе «ведущий–ведомый» и понятие гетерогенности 568
11.5.2. Двунаправленное управление в общем координатном пространстве 569
11.5.3. Двунаправленное управление в координатных системах отдельных манипуляторов 571
11.6. Резюме 572
Вопросы и задания 573

Глава 12. Основы теории, методов и технологий управления мобильными роботами 575
12.1. Введение в управление мобильными роботами 575
12.1.1. Перемещение, способы перемещения и классификация мобильных роботов 575
12.1.2. Обзор истории развития технологий мобильных роботов 576
12.1.3. Теоретические и практические проблемы управления мобильными роботами 587
12.2. Колесные мобильные роботы: управление движением по траектории 590
12.2.1. Управление движением по прямой при использовании органов управления, пропорциональных перемещению 590
12.2.2. Управление прямолинейным движением пропорционально перемещению и скорости 592
12.2.3. Управление прямолинейным движением мобильного робота с независимым приводом двух колес 594
12.2.4. Обобщение методов управления прямолинейным движением колесных мобильных роботов 595
12.2.5. Следование колесного мобильного робота по траектории и управление током электродвигателя 597
12.3. Неголономные системы колесных роботов и нелинейное управление 600
12.3.1. Нелинейное управление и интегрируемость 600
12.3.2. Что такое неполные связи и системы с неполными связями 603
12.3.3. Неголономное управление и управление недоприводными механическими системами 604
12.3.4. Геометрическая модель неинтегрируемых систем управления и недоприводных механизмов 609
12.3.5. Модель транспортного средства с неинтегрируемым ограничением скорости 612
12.4. Неполноприводное управление колесными мобильными роботами и проблема сингулярности 622
12.4.1. Введение 622
12.4.2. Управление мобильным роботом и проблема сингулярностей 623
12.4.3. Задача отслеживания траектории мобильного робота 628

12.4.4. Управление отслеживанием целевой траектории транспортного средства....630
12.5. Подвижная устойчивость колесного мобильного робота и управление устойчивым движением....631
12.5.1. Проблема подвижной устойчивости колесного мобильного робота....631
12.5.2. Анализ динамических характеристик движения модели тележки с двойным маятником и изменяемой длиной звена....635
12.5.3. Восстановление устойчивости и управление стабильным движением колесного мобильного робота с манипулятором на основе модели тележки с перевернутым маятником....652
12.6. Стабилизированное управление ходьбой и глобальный самостабилизатор для шагающих мобильных роботов....680
12.6.1. Обзор теории и методов стабилизированного управления ходьбой шагающих мобильных роботов....680
12.6.2. Принципы работы и способы применения датчиков в шагающих роботах....684
12.6.3. Концепция ZMP и принцип стабильного шага на основе ZMP....702
12.6.4. Принципы и технологии управления ходьбой полностью автономных гуманоидных роботов Honda (модели P2, P3 и ASIMO)....707
12.6.5. Построение глобального самостабилизатора для шагающих роботов на основе обучения с подкреплением и тренировочной платформы с параллельным механизмом....714
12.6.6. Итоги раздела....742
12.7. Резюме....742
Вопросы и упражнения....743

Литература....746

Предметный указатель....751

От издательства

Отзывы и пожелания

Мы всегда рады отзывам наших читателей. Расскажите нам, что вы думаете об этой книге – что понравилось или, может быть, не понравилось. Отзывы важны для нас, чтобы выпускать книги, которые будут для вас максимально полезны.

Вы можете написать отзыв на нашем сайте *www.dmkpress.com*, зайдя на страницу книги и оставив комментарий в разделе «Отзывы и рецензии». Также можно послать письмо главному редактору по адресу *dmkpress@gmail.com*; при этом укажите название книги в теме письма.

Если вы являетесь экспертом в какой-либо области и заинтересованы в написании новой книги, заполните форму на нашем сайте по адресу *http://dmkpress.com/authors/publish_book/* или напишите в издательство по адресу *dmkpress@gmail.com*.

Список опечаток

Хотя мы приняли все возможные меры для того, чтобы обеспечить высокое качество наших текстов, ошибки все равно случаются. Если вы найдете ошибку в одной из наших книг, мы будем очень благодарны, если вы сообщите о ней главному редактору по адресу *dmkpress@gmail.com*. Сделав это, вы избавите других читателей от недопонимания и поможете нам улучшить последующие издания этой книги.

Нарушение авторских прав

Пиратство в интернете по-прежнему остается насущной проблемой. Издательство «ДМК Пресс» очень серьезно относится к вопросам защиты авторских прав и лицензирования. Если вы столкнетесь в интернете с незаконной публикацией какой-либо из наших книг, пожалуйста, пришлите нам ссылку на интернет-ресурс, чтобы мы могли применить санкции.

Ссылку на подозрительные материалы можно прислать по адресу электронной почты *dmkpress@gmail.com*.

Мы высоко ценим любую помощь по защите наших авторов, благодаря которой мы можем предоставлять вам качественные материалы.

От автора

Как быстро летит время! В октябре 1989 г. я начал углубленно изучать теорию робототехники, а в марте 1990 г. купил в книжном магазине «Синьхуа» в Пекине свой первый классический учебник по робототехнике «Робототехника: управление, сенсорные технологии, зрение, интеллект», переведенный Ян Цзинъюем и опубликованный издательством Science and Technology Press of China. С той поры прошло более 33 лет. Но еще раньше я учился в магистратуре у своего наставника профессора Ван Юнцзе, занимаясь исследованием интеллектуальной технологии САПР для проектирования робота PUMA и разработкой программного обеспечения для моделирования механизмов робота. В 1992 г. я поступил в докторантуру к профессору Цай Хэгао, известному эксперту по робототехнике, и занимался разработкой антропоморфных манипуляторов с семью степенями свободы, а также проектированием и разработкой легких промышленных роботов. Я изучал и исследовал роботов на протяжении всего обучения. В 1999 г. по рекомендации профессора Цая я отправился в лабораторию профессора Тосио Фукуды в Университете Нагои в Японии в качестве постдокторанта, где занимался проектированием и разработкой антропоморфных и приматоподобных роботов. После возвращения в Китай в 2001 г. я начал преподавать в Харбинском политехническом институте.

Помимо вышеупомянутой книги по робототехнике, мне посчастливилось прочитать множество профессиональных книг по управлению роботами, включая японскую версию книги «Управление механическими системами» Кацухисы Фуруты, японскую версию книги «Управление роботами» профессора Таку Аримото из Университета Рицумейкан, японскую версию книги «Практика управления роботами», изданную Японским обществом измерений и автоматизации в 1997 г., и английскую версию книги «Управление роботами-манипуляторами на основе моделей», написанной в соавторстве с Чхэ Х. Аном, Кристофером Г. Аткесином, Джоном М. Холлербахом и др. и изданной Массачусетским технологическим институтом в 1988 г.

Я был чрезвычайно впечатлен глубиной теоретических, технологических и математических основ управления, которыми обладали эти эксперты и ученые, а также их огромным научным вкладом. По мере роста сложности управляемых объектов, которых мне доводилось изучать в области робототехники и управления движением, я все глубже ощущал разрыв между *реальными* проблемами управления объектами и академической теорией управления. Изучая управление роботами, я постоянно размышлял о том, как помочь аспирантам воспринимать теорию и методы управления с точки зрения реальных объектов.

Со временем у меня возникла и окрепла идея разработать специальный курс «Управление роботами» для аспирантов. В 2005 и 2007 годах я составил конспект лекций для аспирантов кафедры машиностроения Харбинского политехнического института. На основе этого конспекта я вел курсы «Бионический робот и его интеллектуальное управление движением» (без использования моделей) и «Практическое применение управления роботами» (с использованием моделей). Я постоянно обновлял содержание курсов, опираясь на результаты собственных исследований.

Аспиранты, начинающие изучать теорию управления роботами, с первых шагов сталкиваются с динамическими уравнениями, векторами и матрицами. Сначала они просто испытывают дискомфорт, но постепенно осознают, что существует досадный пробел в преподавании между скалярными уравнениями из курса теоретической механики на начальных курсах вуза и динамическими уравнениями *n*-мерных обобщенных координат и обобщенных сил, выраженных векторами и матрицами, с которыми приходится иметь дело в магистратуре.

Более того, в структурных схемах систем управления, представленных в учебниках по управлению роботами и других книгах, выходной сигнал контроллера напрямую передается на управляемый объект, а такие важнейшие компоненты *реальной* системы, как усилители мощности, сервоприводы и блоки управления, остаются «за кадром». Без объяснений преподавателя студентам сложно выстроить ментальную модель робототехнической системы, даже если они изучали сервоприводы и технологию управления.

Если реальные проблемы механической системы и механики управляемого объекта робота не объяснены или объяснены недостаточно, студенты рискуют застрять на этапе структурной схемы системы управления. Какие проблемы управления указывают на сингулярность механизма робота? Какова диалектическая связь между силовым управлением и управлением положением в гибридном позиционно-силовом управлении роботом? Какие практические проблемы следует учитывать при разработке эксперимента по определению параметров робота? Как сделать силовое управление роботом безопасным и в максимально широком диапазоне? Как настроить параметры силового контроллера для управления реальной системой? Как можно наглядно объяснить распределение внутренних сил робота и координацию нескольких роботов с физической точки зрения? В чем заключаются фундаментальные математические основы ПИД-регулятора? И это лишь краткий перечень вопросов.

Некоторые вопросы требуют более углубленного изучения, а некоторые просто не рассматриваются в учебниках. Существующие учебники по управлению роботами на основе моделей больше сосредоточены на теории проектирования регуляторов и анализе характеристик систем с точки зрения современной теории и методов управления, но недостаточно освещают практические аспекты *реального* объекта управления или просто объясняют одну теорию через другую. В конечном итоге студенты и читатели могут так и не понять суть.

С точки зрения управления реальным роботом необходимо сначала понять и осмыслить управляемый объект в контексте категории, к которой он принадлежит, и лишь затем применить современные теории, методы и технологии управления для достижения желаемых результатов. Кроме того, необходимо соответствующим образом изложить репрезентативные знания и процессы различных теорий, методов и технологий управления роботами в процессе разработки. Например, в 1971 г. Оксфордский университет в Великобритании разработал метод управления ходьбой и структуру системы управления для первого в мире двуногого шагающего робота с гидравлическим приводом Witt. Хотя уровень технологий того времени был весьма далек от современного, можно сказать, что это было предвидением, которое по-прежнему имеет важное значение.

Эта книга создана на основе многолетнего опыта научно-исследовательской и педагогической деятельности и курсов «Управление в практической робототехнике» (разработан в 2007 г. для магистрантов и аспирантов Харбинского политехнического университета, в 2018 г. признан лучшим курсом для аспирантов и позднее переименован в «Теорию и практику робототехнического управления») и «Основы инновационного проектирования колесных мобильных роботов» (разработан в 2014 г. для Института дополнительного образования Харбинского политехнического университета). В ней объединены как педагогические наработки, постоянно дополнявшиеся новыми материалами, так и результаты научных исследований автора в области промышленных манипуляторов, антропоморфных механизмов, роботов с различными способами передвижения, бионических и антропоморфных роботов, а также роботизированных систем для перемещения в смешанных средах и каркасных конструкциях.

В данной монографии рассматриваются современные теории, методы и технологии управления роботами, где основное внимание уделяется системам, сочетающим мобильность и наличие манипуляторов. В качестве объектов управления выступают роботы-манипуляторы, колесные и шагающие платформы. Цель издания – помочь читателям на конкретных примерах механических систем (включая комбинированные платформы с манипуляторами и роботы с гибридной подвижностью) глубже понять и освоить современные подходы к управлению робототехническими системами.

Книга также служит учебным пособием для слушателей моего MOOK[1] «Практическое применение робототехнического управления», размещенного на платформе XuetangX в декабре 2019 г. Учебный материал дополнен вопросами и задачами, большинство из которых направлено на углубленное осмысление и практическое применение системных знаний по теории управления роботами.

Я отдаю себе отчет в ограниченности моих знаний и компетенций, поэтому буду признателен коллегам и читателям за ценные замечания и предложения.

---

[1] MOOC, Massive Open Online Course (массовый открытый онлайн-курс, MOOK).

Пусть эта скромная работа послужит данью уважения великим учителям:

- профессору Цай Хэгао, одному из основоположников робототехники в Китае, академику Китайской инженерной академии, преподавателю Харбинского политехнического университета, и профессору Фукуде Тосио, ныне члену Китайской академии наук, ранее – профессору Университета Нагои (Япония).
- В 2024 г. исполнилось 90 лет со дня рождения моего наставника, профессора Цая – выдающегося ученого, чьи достижения и ученики прославили его имя.

Материалы, представленные в книге, основаны на результатах научных исследований, выполненных при поддержке:

- гранта Национального фонда естественных наук Китая (№ 50275032, Исследование антропоморфных роботов с гибридной подвижностью);
- целевой программы 863 (№ 2006AA04Z201, Разработка и экспериментальная проверка технологий для эмоционально-интерактивных антропоморфных роботов);
- проекта Национальной ключевой программы R&D (№ 2018YFB1304502, Бионические механизмы и модули для приматообразных мобильных роботов);

а также при участии в следующих проектах серии 863:

- исследование модульных гибких манипуляторов с зубчатыми передачами (№ 863-512-0);
- разработка прототипов легких роботов (№ 863-512-0).

Выражаю искреннюю благодарность всем, кто способствовал этим исследованиям.

У Вэйго
21 сентября 2023 г.
Лаборатория бионической и антропоморфной робототехники
Харбинский политехнический университет

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru