

621.85  
К 79

Д. Крейг СИСТЕМЫ И ТЕХОЛОГИИ



Джон Крейг

# ВВЕДЕНИЕ В РОБОТОТЕХНИКУ

Механика и управление



---

---

# Оглавление

<b>Предисловие редактора перевода</b> . . . . .	xiii
<b>Предисловие</b> . . . . .	xv
<b>ГЛАВА 1. Введение</b> . . . . .	1
1.1. История автоматизации промышленного производства . . . . .	1
1.2. Механика манипуляторов и управление ими . . . . .	4
1.3. Условные обозначения . . . . .	20
<b>ГЛАВА 2. Пространственные описания и преобразования</b> . . . . .	27
2.1. Введение . . . . .	27
2.2. Описания: положения, ориентации, системы отсчета . . . . .	27
2.3. Отображения: перевод описаний из одной системы отсчета в другую . . . . .	32
2.4. Операторы: сдвиги, вращения и преобразования . . . . .	40
2.5. Общие выводы . . . . .	46
2.6. Арифметика преобразования . . . . .	47
2.7. Уравнения преобразования . . . . .	50
2.8. Другие способы представления ориентации . . . . .	54
2.9. Преобразование свободных векторов . . . . .	68
2.10. Эффективность вычислений . . . . .	70
<b>ГЛАВА 3. Кинематика манипуляторов</b> . . . . .	85
3.1. Введение . . . . .	85
3.2. Описание звена . . . . .	85
3.3. Описание соединения звеньев . . . . .	89
3.4. Привязка систем отсчета к звеньям манипулятора . . . . .	92
3.5. Кинематика манипуляторов . . . . .	100
3.6. Пространство положений приводов, конфигурационное про- странство и декартово пространство . . . . .	103
3.7. Примеры: кинематика двух промышленных роботов . . . . .	105

3.8.	Системы отсчета со стандартными именами . . . . .	118
3.9.	Где находится инструмент? . . . . .	121
3.10.	Эффективность вычислений . . . . .	121
<b>ГЛАВА 4.</b>	<b>Обратная задача кинематики манипуляторов . . . . .</b>	<b>135</b>
4.1.	Введение . . . . .	135
4.2.	Разрешимость . . . . .	135
4.3.	Понятие подпространства манипулятора с $n < 6$ . . . . .	142
4.4.	Алгебраический и геометрический подходы . . . . .	145
4.5.	Алгебраическое решение за счет сведения к многочлену . . . . .	151
4.6.	Решение Пайпера в случае трех пересекающихся осей . . . . .	152
4.7.	Примеры решения обратной задачи кинематики манипуляторов . . . . .	155
4.8.	Стандартные системы отсчета . . . . .	165
4.9.	Функция SOLVE для манипулятора . . . . .	167
4.10.	Повторяемость и точность . . . . .	168
4.11.	Эффективность вычислений . . . . .	169
<b>ГЛАВА 5.</b>	<b>Якобианы: скорости и статические силы . . . . .</b>	<b>181</b>
5.1.	Введение . . . . .	181
5.2.	Положение и ориентация, изменяющиеся во времени . . . . .	181
5.3.	Линейная и угловая скорости твердых тел . . . . .	185
5.4.	Более подробно об угловой скорости . . . . .	189
5.5.	Движение звеньев робота . . . . .	194
5.6.	«Распространение» скорости от звена к звену . . . . .	194
5.7.	Якобианы . . . . .	200
5.8.	Особые точки . . . . .	203
5.9.	Статические силы в манипуляторе . . . . .	206
5.10.	Якобианы в пространстве сил . . . . .	210
5.11.	Декартово преобразование скоростей и статических сил . . . . .	211
<b>ГЛАВА 6.</b>	<b>Динамика манипуляторов . . . . .</b>	<b>223</b>
6.1.	Введение . . . . .	223
6.2.	Ускорение твердого тела . . . . .	223
6.3.	Распределение масс . . . . .	226
6.4.	Уравнение Ньютона и уравнение Эйлера . . . . .	231
6.5.	Итерационный метод Ньютона–Эйлера . . . . .	232
6.6.	Сравнение итерационного и аналитического методов . . . . .	237
6.7.	Пример динамических уравнений в замкнутой форме . . . . .	237

6.8.	Структура динамических уравнений манипулятора . . . . .	241
6.9.	Динамика манипуляторов в формулировке Лагранжа . . . . .	244
6.10.	Формулировка динамики манипуляторов в декартовом пространстве . . . . .	248
6.11.	Включение в уравнения динамики влияния нетвердых тел . . . . .	252
6.12.	Моделирование динамики . . . . .	253
6.13.	Эффективность вычислений . . . . .	254
<b>ГЛАВА 7.</b>	<b>Генерация траектории . . . . .</b>	<b>269</b>
7.1.	Введение . . . . .	269
7.2.	Общие сведения, касающиеся описания и расчета траектории . . . . .	270
7.3.	Траектории в конфигурационном пространстве . . . . .	271
7.4.	Траектории в декартовом пространстве . . . . .	290
7.5.	Геометрические проблемы построения траекторий в пространстве декартовых координат . . . . .	293
7.6.	Генерация траекторий во время выполнения программы . . . . .	297
7.7.	Описание траекторий на языке программирования роботов . . . . .	300
7.8.	Планирование траекторий на основе динамической модели . . . . .	301
7.9.	Планирование траекторий без столкновений . . . . .	301
<b>ГЛАВА 8.</b>	<b>Проектирование манипуляторов . . . . .</b>	<b>309</b>
8.1.	Введение . . . . .	309
8.2.	Проектирование с учетом требований задачи . . . . .	310
8.3.	Конфигурация кинематической цепи . . . . .	314
8.4.	Количественная оценка рабочего пространства . . . . .	321
8.5.	Избыточные и замкнутые структуры . . . . .	325
8.6.	Приводные схемы . . . . .	329
8.7.	Жесткость и прогибы . . . . .	332
8.8.	Датчики положения . . . . .	338
8.9.	Датчики силы . . . . .	339
8.10.	Нюансы проектирования датчиков силы . . . . .	340
<b>ГЛАВА 9.</b>	<b>Линейное управление манипуляторами . . . . .</b>	<b>353</b>
9.1.	Введение . . . . .	353
9.2.	Управление с обратной связью . . . . .	354
9.3.	Линейные системы второго порядка . . . . .	356
9.4.	Управление системами второго порядка . . . . .	365
9.5.	Разделение закона управления . . . . .	367



9.6. Управление движением по заданной траектории . . . . .	370
9.7. Подавление помех . . . . .	371
9.8. Непрерывное и дискретное управление . . . . .	373
9.9. Моделирование одного сочленения и управление им . . . . .	374
9.10. Архитектура регулятора промышленного робота . . . . .	382
<b>ГЛАВА 10. Нелинейное управление манипуляторами . . . . .</b>	<b>393</b>
10.1. Введение . . . . .	393
10.2. Нелинейные и нестационарные системы . . . . .	394
10.3. Системы многомерного управления . . . . .	399
10.4. Задача управления манипуляторами . . . . .	400
10.5. Практические соображения . . . . .	401
10.6. Системы управления современных промышленных роботов . . . . .	408
10.7. Анализ устойчивости по Ляпунову . . . . .	410
10.8. Системы управления в декартовом пространстве . . . . .	416
10.9. Адаптивное управление . . . . .	422
<b>ГЛАВА 11. Силовое управление манипуляторами . . . . .</b>	<b>431</b>
11.1. Введение . . . . .	431
11.2. Применение промышленных роботов в сборочном производ- стве . . . . .	432
11.3. Концепции управления в частично ограниченных задачах . . . . .	433
11.4. Задача комбинированного позиционно-силового управления . . . . .	440
11.5. Силовое управление системой «масса–пружина» . . . . .	441
11.6. Схема комбинированного позиционно-силового управления . . . . .	445
11.7. Схемы управления современных промышленных роботов . . . . .	451
<b>ГЛАВА 12. Языки и системы программирования роботов . . . . .</b>	<b>459</b>
12.1. Введение . . . . .	459
12.2. Три уровня программирования роботов . . . . .	460
12.3. Пример задачи . . . . .	463
12.4. Требования, предъявляемые к языкам программирования ро- ботов . . . . .	466
12.5. Проблемы, свойственные языкам программирования роботов . . . . .	471
<b>ГЛАВА 13. Системы автономного программирования . . . . .</b>	<b>479</b>
13.1. Введение . . . . .	479

13.2. Основные вопросы, связанные с разработкой систем автономного программирования . . . . .	483
13.3. Симулятор Pilot . . . . .	490
13.4. Автоматическое выполнение подзадач в системах автономного программирования роботов . . . . .	500
<b>Приложение А. Тригонометрические тождества . . . . .</b>	<b>507</b>
<b>Приложение В. 24 представления ориентации с помощью множества углов . . . . .</b>	<b>509</b>
<b>Приложение С. Некоторые формулы обратной кинематики . . . . .</b>	<b>513</b>
<b>Решения отдельных упражнений . . . . .</b>	<b>515</b>
<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>525</b>