

*Моей семье – Филиппе, Люси и Мадлен –
за их снисходительность и поддержку;
моим родителям Маргарет и Дэвиду
за то, что разожгли мое любопытство;
и Ричарду (Лу) Полу, заронившему семя,
из которого выросла эта книга*

Содержание

Вступительное слово	16
Предисловие.....	18
Специальные обозначения.....	26
 1 Введение.....	 33
1.1 Краткая история роботов.....	33
1.2 Типы роботов.....	36
1.3 Определение робота	42
1.4 Зрение роботов.....	42
1.5 Этические аспекты робототехники.....	45
1.6 О книге	47
1.6.1 Python и книга.....	48
1.6.2 Условные обозначения, соглашения и структура книги	50
1.6.3 Целевая аудитория.....	52
1.6.4 Обучение с помощью книги	53
1.6.5 Преподавание с помощью книги.....	53
1.6.6 Структура книги.....	54
1.6.7 Дополнительное чтение	57
 Часть I Основы	 59
 2 Представление местоположения и ориентации	 60
2.1 Основы	60
2.1.1 Относительное положение.....	60
2.1.2 Системы координат	64
2.1.3 Графы положений.....	66
2.1.4 Краткое резюме	68
2.2 Работа в двух измерениях (2D).....	71
2.2.1 Ориентация в двух измерениях.....	71
2.2.2 Положение в двух измерениях.....	76
2.3 Работа в трех измерениях (3D).....	86
2.3.1 Ориентация в трех измерениях.....	87
2.3.2 Положение в трех измерениях.....	109
2.4 Дополнительные темы	117
2.4.1 Прямой и обратный порядок умножения преобразований.....	117

2.4.2	Поворот системы координат и поворот точки	118
2.4.3	Матрица направляющих косинусов.....	119
2.4.4	Эффективность представления	119
2.4.5	Расстояние между ориентациями	120
2.4.6	Нормализация	121
2.4.7	Понятие экспоненциального отображения	122
2.4.8	Подробнее о кручениях.....	125
2.4.9	Конфигурационное пространство.....	131
2.5	Использование Toolbox	133
2.6	Подведение итогов	137
2.6.1	Дополнительное чтение	139
2.6.2	Упражнения	141
3	Время и движение.....	144
3.1	Изменение положения во времени.....	144
3.1.1	Скорость изменения ориентации	145
3.1.2	Скорость изменения положения	146
3.1.3	Преобразование пространственных скоростей.....	147
3.1.4	Вращение, задаваемое в приращениях	149
3.1.5	Движение твердого тела, задаваемое в приращениях	152
3.2	Ускорение тел и системы отсчета	153
3.2.1	Динамика движущихся тел	153
3.2.2	Преобразование сил и моментов	155
3.2.3	Инерциальная система координат.....	156
3.3	Создание положения, изменяющегося во времени	158
3.3.1	Гладкие одномерные траектории.....	158
3.3.2	Многокоординатные траектории.....	162
3.3.3	Многосегментные траектории.....	163
3.3.4	Интерполяция ориентации в 3D.....	165
3.3.5	Декартово движение в 3D.....	168
3.4	Применение: инерциальная навигация	170
3.4.1	Гироскопы	171
3.4.2	Акселерометры	175
3.4.3	Магнитометры	180
3.4.4	Слияние инерциальных датчиков.....	184
3.5	Подведение итогов	188
3.5.1	Дополнительное чтение	189
3.5.2	Упражнения	190
	Часть II Мобильная робототехника	193
4	Мобильные роботы.....	195
4.1	Колесные мобильные роботы	197
4.1.1	Автомобили	198
4.1.2	Автомобиль с дифференциальным управлением.....	212
4.1.3	Всенаправленное транспортное средство.....	215

4.2	Воздушные роботы.....	218
4.3	Дополнительные темы	227
4.3.1	Неголономные и малоприводные системы	227
4.4	Подведение итогов.....	231
4.4.1	Дополнительное чтение	232
4.4.2	Упражнения	235
5	Навигация.....	238
5.1	Введение в реактивную навигацию	240
5.1.1	Тележки Брайтенберга	241
5.1.2	Простые автоматы	244
5.2	Введение в навигацию по картам.....	246
5.3	Планирование маршрута с использованием графической карты.....	249
5.3.1	Планирование маршрута с минимальным временем.....	259
5.3.2	Подведение итогов.....	260
5.4	Планирование маршрута с использованием карты занятости	261
5.4.1	Преобразование расстояния.....	261
5.4.2	Алгоритм D*	268
5.5	Планирование маршрута с использованием дорожных карт.....	271
5.6	Планирование проходимого маршрута	277
5.6.1	Планировщик пути Дубинса	278
5.6.2	Планировщик пути Ридса–Шеппа	279
5.6.3	Планирование по решетке	280
5.6.4	Криволинейные полиномы.....	285
5.6.5	Планирование маршрута в конфигурационном пространстве	287
5.7	Дополнительные темы	292
5.7.1	Алгоритмы поиска A* и Дейкстры.....	292
5.7.2	Преобразование карт сеток занятости в графы.....	293
5.7.3	Преобразование между графами и матрицами.....	293
5.7.4	Локальное и глобальное планирование.....	293
5.8	Подведение итогов.....	294
5.8.1	Дополнительное чтение	295
5.8.2	Ресурсы	297
5.8.3	Упражнения	298
6	Определение местоположения и картографирование	301
6.1	Расчет пути с использованием одометрии	307
6.1.1	Моделирование робота	308
6.1.2	Оценка положения	311
6.2	Локализация с помощью ориентиров на карте	317
6.3	Создание карты ориентиров.....	326
6.4	Одновременная локализация и картографирование.....	330
6.5	SLAM на основе графа положений	335
6.6	Последовательная локализация методом Монте-Карло.....	342

6.7	SLAM на основе теоремы Рао–Блэквелла	349
6.8	Применение: лидар	350
6.8.1	Одометрия на основе лидара	352
6.8.2	Картографирование на основе лидара	354
6.8.3	Локализация на основе лидара	355
6.9	Подведение итогов	356
6.9.1	Дополнительное чтение	358
6.9.2	Упражнения	362
Часть III Роботы-манипуляторы		365
7	Кинематика робота-манипулятора	367
7.1	Прямая кинематика	369
7.1.1	Прямая кинематика на основе графа положений	370
7.1.2	Прямая кинематика как цепочка звеньев робота	378
7.1.3	Многорукие роботы	387
7.1.4	Унифицированный формат описания роботов (URDF)	390
7.1.5	Параметры Денавита–Хартенберга	395
7.2	Обратная кинематика	399
7.2.1	Двухмерные (планарные) роботизированные манипуляторы	400
7.2.2	Трехмерные роботизированные манипуляторы	403
7.2.3	Малоприводный манипулятор	407
7.2.4	Многоприводный манипулятор	409
7.3	Траектории	409
7.3.1	Движение в пространстве сочленений	410
7.3.2	Движение в декартовом пространстве	412
7.3.3	Представление кинематики в виде блок-схемы	414
7.3.4	Движение через сингулярность	414
7.3.5	Изменение конфигурации	416
7.4	Применение	417
7.4.1	Создание надписи на поверхности	417
7.4.2	Четвероногий шагающий робот	419
7.5	Дополнительные темы	424
7.5.2	Создание кинематической модели робота	425
7.5.3	Модифицированные параметры Денавита–Хартенберга	427
7.5.4	Произведение экспонент	429
7.5.5	Определение столкновений	432
7.6	Подведение итогов	434
7.6.1	Дополнительное чтение	434
7.6.2	Упражнения	436
8	Скорость манипулятора	438
8.1	Якобиан манипулятора	438
8.1.1	Якобиан в мировой системе координат	439
8.1.2	Якобиан в системе координат рабочего органа	442

8.1.3	Аналитический якобиан	443
8.2	Применение: управление движением с заданной скоростью	445
8.3	Обусловленность якобиана и манипулируемость	448
8.3.1	Вырожденные якобианы	448
8.3.2	Эллипсоид скорости и манипулируемость	450
8.3.3	Работа с вырожденным якобианом	454
8.3.4	Работа с неквадратным якобианом	455
8.4	Отношения сил	461
8.4.1	Преобразование динамических винтов в пространство сочленений	461
8.4.2	Эллипсоиды сил	462
8.5	Численная обратная кинематика	463
8.6	Дополнительные темы	465
8.6.1	Якобиан манипулируемости	465
8.6.2	Вычисление якобиана манипулятора с использованием кручений	465
8.6.3	Манипулируемость, масштабирование и единицы измерения	466
8.7	Подведение итогов	467
8.7.1	Дополнительное чтение	468
8.7.2	Упражнения	468

9 Динамика и управление472

9.1	Независимое управление сочленениями	473
9.1.1	Приводы	473
9.1.2	Трение	475
9.1.3	Масса звена	477
9.1.4	Редуктор	479
9.1.5	Моделирование сочленения робота	481
9.1.6	Контур управления скоростью	483
9.1.7	Контур управления положением	489
9.1.8	Подведение итогов	491
9.2	Уравнения движения твердого тела	492
9.2.1	Член силы тяжести	494
9.2.2	Матрица инерции	497
9.2.3	Трение	498
9.2.4	Матрица Кориолиса и центробежной связи	499
9.2.5	Влияние полезной нагрузки	499
9.2.6	Воздействие на основание	501
9.2.7	Динамическая манипулируемость	501
9.3	Прямая динамика	503
9.4	Компенсация динамики твердого тела	505
9.4.1	Управление с прямой связью	506
9.4.2	Регулятор с вычисляемым крутящим моментом	507
9.5	Динамика пространства задач и управление	509
9.6	Применение	516

9.6.1	Управление в операционном пространстве	516
9.6.2	Приводы переменной жесткости	519
9.7	Подведение итогов	521
9.7.1	Дополнительное чтение	522
9.7.2	Упражнения	524
Часть IV Компьютерное зрение		529
10	Свет и цвет	531
10.1	Спектральное представление света	531
10.1.1	Поглощение	535
10.1.2	Отражение	536
10.1.3	Яркость	536
10.2	Цвет	538
10.2.1	Человеческий глаз	538
10.2.2	Сенсор в цифровой камере	542
10.2.3	Измерение цвета	543
10.2.4	Воспроизведение цветов	545
10.2.5	Цветовое пространство	549
10.2.6	Названия цветов	554
10.2.7	Другие цветовые и хроматические пространства	555
10.2.8	Преобразование между различными основными цветами	559
10.2.9	Что такое белый цвет?	562
10.3	Дополнительные темы	562
10.3.1	Цветовая температура	563
10.3.2	Постоянство цвета	563
10.3.3	Баланс белого	564
10.3.4	Изменение цвета из-за поглощения	566
10.3.5	Двухцветное отражение	568
10.3.6	Гамма	569
10.4	Применение: цветное изображение	571
10.4.1	Сравнение цветовых пространств	571
10.4.2	Удаление теней	572
10.5	Подведение итогов	576
10.5.1	Дополнительное чтение	577
10.5.2	Источники данных	578
10.5.3	Упражнения	579
11	Изображения и их обработка	582
11.1	Получение изображения	583
11.1.1	Изображения из файлов	583
11.1.2	Изображения из последовательностей файлов	591
11.1.3	Изображения со встроенной камеры	592
11.1.4	Изображения из видеофайла	592
11.1.5	Изображения из интернета	596

11.1.6	Снимки из космоса	597
11.1.7	Изображения из кода	598
11.2	Гистограммы изображений	600
11.3	Монадические операции	602
11.4	Диадические операции	607
11.4.1	Применения	609
11.5	Пространственные операции	614
11.5.1	Линейная пространственная фильтрация	614
11.5.2	Сравнение с шаблоном	631
11.5.3	Нелинейные операции	638
11.6	Математическая морфология	640
11.6.1	Удаление шума	645
11.6.2	Обнаружение границы	646
11.6.3	Преобразование «попадание или промах»	647
11.6.4	Преобразование расстояния	649
11.7	Изменение формы	651
11.7.1	Обрезка	651
11.7.2	Изменение размера изображения	652
11.7.3	Пирамиды изображений	654
11.7.4	Деформация изображения	655
11.8	Подведение итогов	659
11.8.1	Дополнительное чтение	660
11.8.2	Источники изображений	662
11.8.3	Программные инструменты	662
11.8.4	Упражнения	662

12 Извлечение признаков изображения

12.1	Получение признаков из области	666
12.1.1	Классификация пикселей	668
12.1.2	Представление экземпляра объекта	681
12.1.3	Описание экземпляра объекта	686
12.1.4	Обнаружение объектов с использованием глубокого обучения	701
12.1.5	Итоги	703
12.2	Получение признаков из линий	705
12.2.1	Итоги	710
12.3	Получение признаков из точек	710
12.3.1	Классические детекторы углов	711
12.3.2	Угловые детекторы в масштабируемом пространстве	718
12.4	Применения	725
12.4.1	Распознавание символов	725
12.4.2	Поиск изображений	727
12.5	Подведение итогов	735
12.5.1	Дополнительное чтение	736
12.5.2	Упражнения	740

13	Формирование изображения	743
13.1	Перспективная камера	744
13.1.1	Перспективная проекция	744
13.1.2	Моделирование перспективной камеры	748
13.1.3	Дискретная плоскость изображения	750
13.1.4	Матрица камеры	753
13.1.5	Точки проекции	755
13.1.6	Дисторсия объектива	758
13.2	Калибровка камеры	761
13.2.1	Метод с использованием трехмерной мишени	761
13.2.2	Калибровка с использованием шахматной доски	764
13.2.3	Разложение калибровочной матрицы камеры	767
13.2.4	Определение положения откалиброванной камеры	770
13.3	Широкоугольные камеры	771
13.3.1	Камера с объективом «рыбий глаз»	772
13.3.2	Катадиоптрическая камера	775
13.3.3	Сферическая камера	779
13.4	Унифицированная модель формирования изображений	781
13.4.1	Сопоставление широкоугольных изображений со сферой	783
13.4.2	Преобразование сферического изображения в перспективное	786
13.5	Новые типы камер	788
13.5.1	Многокамерные массивы	788
13.5.2	Камеры светового поля	789
13.6	Применения	792
13.6.1	Координатные метки	792
13.6.2	Планарная гомография	793
13.7	Дополнительные темы	796
13.7.1	Проецирование произвольных линий и поверхностей в трехмерном пространстве	796
13.7.2	Неперспективные камеры	798
13.8	Подведение итогов	800
13.8.1	Дополнительное чтение и ресурсы	801
13.8.2	Упражнения	804
14	Использование нескольких изображений	806
14.1	Совмещение признаков	808
14.2	Геометрия нескольких ракурсов	814
14.2.1	Фундаментальная матрица	817
14.2.2	Существенная матрица	820
14.2.3	Вычисление фундаментальной матрицы по данным реального изображения	822
14.2.4	Планарная гомография	828
14.3	Разреженное стереозрение	835
14.3.1	Трехмерная триангуляция	836

14.3.2	Пакетная подстройка	841
14.4	Плотное стереозрение	850
14.4.1	Уточнение положения пиков	855
14.4.2	Типичные проблемы стереосопоставления	856
14.4.3	Исправление изображения	867
14.5	Анаглифы.....	870
14.6	Другие технологии определения глубины.....	872
14.6.1	Структурированный свет	872
14.6.2	Определение глубины по времени пролета луча.....	875
14.7	Облака точек	875
14.7.1	Поиск плоскости.....	877
14.7.2	Сопоставление двух наборов точек.....	878
14.8	Применения	881
14.8.1	Коррекция перспективы	881
14.8.2	Мозаика	884
14.8.3	Визуальная одометрия	888
14.9	Подведение итогов.....	893
14.9.1	Дополнительное чтение	894
14.9.2	Дополнительные ресурсы	900
14.9.3	Упражнения.....	902
Часть V Управление на основе машинного зрения.....		909
15	Управление на основе зрения.....	912
15.1	Визуальное сервоуправление на основе местоположения	914
15.2	Визуальное сервоуправление на основе изображения	917
15.2.1	Движение камеры и изображения.....	919
15.2.2	Управление движением объекта	927
15.2.3	Оценка глубины объекта.....	933
15.2.4	Проблемы с производительностью	936
15.3	Использование других признаков изображений.....	939
15.3.1	Линейные объекты	939
15.3.2	Эллиптические объекты	940
15.3.3	Фотометрические признаки.....	943
15.4	Подведение итогов.....	945
15.4.1	Дополнительное чтение	945
15.4.2	Упражнения.....	949
16	Продвинутое визуальное сервоуправление	952
16.1	IBVS с разделением XY/Z	953
16.2	IBVS с использованием полярных координат	956
16.3	IBVS для сферической камеры	959
16.4	Применение	962
16.4.1	Робот-манипулятор	962
16.4.2	Мобильный робот	964
16.4.3	Воздушный робот.....	968

16.5	Подведение итогов	970
16.5.1	Дополнительное чтение	970
16.5.2	Ресурсы	972
16.5.3	Упражнения	973
	Приложения	975
A	Установка наборов инструментов	976
B	Линейная алгебра	978
C	Геометрия	990
D	Группы и алгебра Ли	1010
E	Линеаризация, якобианы и гессианы	1017
F	Решение систем уравнений	1023
G	Гауссовы случайные величины	1035
H	Фильтр Калмана	1039
I	Графы	1047
J	Определение пика	1051
	Литература	1056
	Предметный указатель	1078

Вступительное слово

Однажды ко мне на рецензию попала очень толстая папка с диссертацией из далекой страны. Темой диссертации было «Визуальное управление роботами», а ее автором был *Питер Корк*. Я вспоминаю отрывок из моих комментариев, в котором говорил, что *это мастерская научная работа, качество диссертации, к которому следует стремиться всем студентам, зная, что очень немногие смогут его достичь*, – очень хорошо продуманное и выполненное исследование.

Связь между робототехникой и зрением вот уже более двух десятилетий является центральной нитью фундаментальных исследований и успешных прикладных разработок Питера Корка. Этот редкий опыт воплощен во втором издании его книги. В своем слиянии теории и практики это второе издание значительно выиграло от уникального сочетания академического и практического опыта автора, основанного на его многолетней работе в области роботизированной горнодобывающей, авиационной, подводной и полевой техники.

Существует множество учебников по робототехнике и компьютерному зрению, но лишь немногие из них достигли уровня интеграции знаний, анализа научной области и доходчивости иллюстраций, представленных в этой книге. Обсуждение подробное, повествование удивительно информативное и доступное, и в целом создается впечатление, что эта книга станет важнейшим ресурсом для сегодняшних и будущих исследователей в области робототехники. Я могу смело утверждать, что почти каждый аспект, который можно считать относящимся к задаче, был проанализирован и включен в эту книгу, и мою убежденность в этом подтверждает эффективное использование программного обеспечения *Toolbox*.

Читатель получит достаточно полное представление о мобильных роботах, навигации, позиционировании, кинематике руки-манипулятора, динамике и управлении на уровне сочленений, а также о моделировании камеры, обработке изображений, выделении признаков и многогракурсной геометрии. И в заключение эти области будут объединены в подробном обсуждении визуальных сервосистем. Автор также объясняет, как сложные задачи можно разделить на ряд частных задач, решаемых с использованием мощных численных инструментов и эффективного программного обеспечения.

Издательский проект *Springer Tracts in Advanced Robotics* (STAR) призван донести до сообщества исследователей последние достижения в области робототехники исходя из их значимости и качества. Наша цель – путем широкого и своевременного распространения важнейших научных разработок в области робототехники способствовать обмену информацией и сотрудничеству между исследователями и поддерживать дальнейший прогресс в этой быстро развивающейся области.

Питер Корк дополняет нашу серию STAR авторитетной книгой, охватывающей разные области, идеально задуманной и блестяще выполненной.

Усама Хатиб
Стэнфорд, Калифорния
Октябрь 2016 г.

Предисловие

« Скажи мне – и я забуду. Покажи – и я запомню. Заставь меня сделать – и я пойму.

Китайская пословица

« Простые вещи должны быть простыми, сложные вещи должны быть возможными.

Алан Кей

Сфера робототехники переживает бурное развитие. С момента выхода первого издания этой книги прошло более десяти лет, и, оглядываясь назад, мы видим значительный прогресс: появление беспилотных автомобилей на дорогах общего пользования и множества роботов на Марсе (в том числе летающего); роботизированный сбор проб с астероидов и комет; развитие таких видов бизнеса, как Amazon и DARPA Subterranean Challenge, где группы наземных и воздушных роботов автономно картографируют подземные пространства. Мы стали свидетелями революции беспилотников – летательные аппараты, которые когда-то были прерогативой аэрокосмических гигантов, теперь можно купить всего за несколько десятков долларов. Все это стало возможным благодаря постоянному росту вычислительной мощности и колоссальному прогрессу в разработке недорогих инерциальных датчиков и камер, в значительной степени обусловленному большим спросом на высококачественные мобильные устройства. Создавать роботов становится все проще – 3D-печать теперь очень доступна, операционная система для роботов ROS (Robot Operating System) стала достаточно функциональной и получила широкое распространение, а мощные технологии для хобби, такие как Arduino, Raspberry Pi и сервоприводы Dynamixel, можно приобрести очень недорого. Это, в свою очередь, способствовало росту мирового сообщества энтузиастов и дало возможность отдельным людям, работающим дома, и небольшим стартапам создавать то, что раньше было под силу только крупным корпорациям.

Роботы – это машины, управляемые данными: они собирают данные, обрабатывают их и предпринимают действия на их основе. Данные поступают от различных датчиков, измеряющих, например, скорость вращения колес, угол поворота сочленения руки-манипулятора или интенсивность освещенности миллионов пикселей на светочувствительной матрице кинокамеры,

Когда я начал заниматься робототехникой и компьютерным зрением в середине 1980-х, как раз появился компьютер IBM PC – он имел 16-рядный микропроцессор с частотой 4.77 МГц и 16 Кбайт памяти (с возможностью расширения до 256 Кбайт).

составляющих изображение окружающего мира. Многим робототехническим приложениям приходится обрабатывать огромный объем данных в масштабе реального времени.

С одной стороны, прогресс развития робототехники обусловлен ростом доступных вычислительных мощностей. ◀ Закон Мура предсказывает, что количество транзисторов на кристалле будет удваиваться каждые два года, что позволит постоянно увеличивать объем памяти и осуществлять параллельную обработку данных с помощью нескольких ядер и графических процессоров (GPU). Одновременно с этим будут уменьшаться размеры транзисторов и увеличиваться тактовая частота.

С другой стороны, прогрессу способствует развитие алгоритмов, лежащих в основе вычислений для решения задач робототехники. За десятилетия исследовательское сообщество разработало множество решений важных задач восприятия, позиционирования, планирования и управления. Однако для решения любой конкретной задачи имеется широкий выбор алгоритмов, и каждый из них может иметь несколько реализаций. Они написаны на разных языках, в разных стилях, с применением разных соглашений о структуре API и имеют разное качество кода, документации, поддержки и условия лицензирования. Это серьезная проблема для современной робототехники, и «склеивание» разрозненных фрагментов программного обеспечения превратилось в обязательный навык для занимающихся робототехникой. Платформа ROS ◀ помогла стандартизировать интерфейсы и функции, необходимые для решения

См. ► <https://ros.org>.

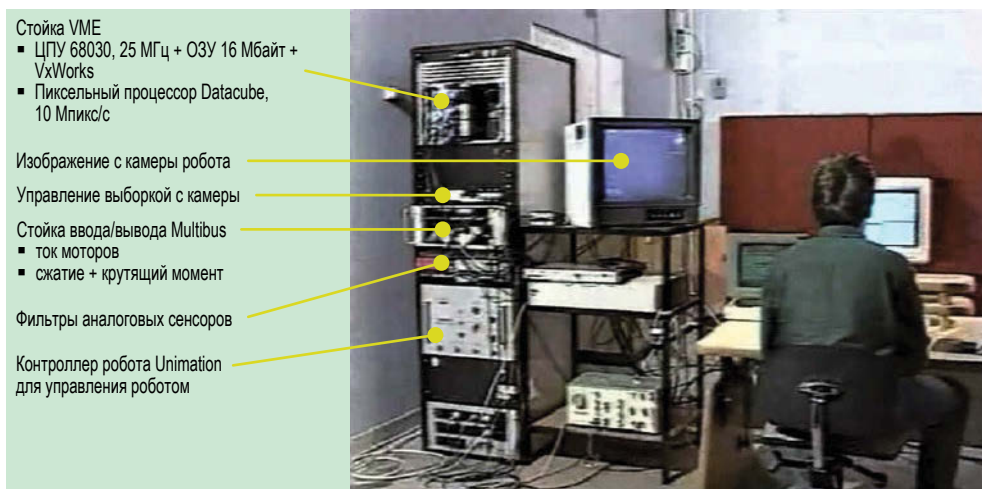


Рис. 0.1. Когда-то для управления роботами с использованием технологии машинного зрения требовалось много специального оборудования. Здесь автор книги сидит возле стойки, набитой модулями для обработки изображений в реальном времени и управления роботом PUMA 560 (1992 г.). За прошедшие 30 с лишним лет количество транзисторов, размещаемых на кристалле, выросло примерно в $2^{30/2} \approx 30\,000$ раз, в полном соответствии с законом Мура

конкретной задачи. Тем не менее программная сторона робототехники все еще слишком сложна и требует больше времени, чем следовало бы. К сожалению, эта сложность и огромный выбор представляют собой серьезное препятствие для новичков.

- » Программные инструменты, используемые в этой книге, специально выбирались, чтобы уменьшить сложность для читателя

Программные инструменты, используемые в этой книге, специально выбирались, чтобы уменьшить сложность для читателя. Они предоставляют полный и хорошо согласованный набор функций. Мы с вами будем использовать Python, популярный язык программирования с открытым исходным кодом, и несколько свободно распространяемых наборов инструментов, обеспечивающих поддержку функций, необходимых в робототехнике и компьютерном зрении. Все это делает распространенные алгоритмы наглядными и доступными. Весь демонстрируемый здесь код вы можете использовать для решения своих задач, дорабатывать его и изменять. Он даст вам «поддержку» на начальном этапе вашего пути в робототехнику.

- » Позволит пользователю работать с реальными задачами, а не только с тривиальными примерами

Для иллюстрации каждой темы используется программное обеспечение, и такой подход имеет ряд преимуществ. Во-первых, использование программных инструментов позволит пользователю работать с реальными задачами, а не только с тривиальными примерами. Для управления роботами, с конечностями, состоящими из двух и более звеньев, и обработки реальных изображений с миллионами пикселей необходимые вычисления многократно превышают возможности человека. Во-вторых, они помогут получить понятное визуальное представление, которое в противном случае могло бы затеряться на фоне сложных вычислений. Мы можем быстро и легко экспериментировать, играть в игру «что, если...» и выводить результаты на экран, используя мощные инструменты отображения 2D- и 3D-графики, имеющиеся в Python и в библиотеке Matplotlib.

- » Разговорное повествование, охватывающее робототехнику и компьютерное зрение – как по отдельности, так и вместе

Я старался использовать в книге свободное разговорное повествование, переплетая текст, математические формулы и примеры кода, охватывающее робототехнику и компьютерное зрение, как по отдельности, так и вместе. Я хотел показать,

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru