

**Искусственный
интеллект**
Современный подход
Второе издание

Artificial Intelligence

A Modern Approach

Second edition

Stuart J. Russel and Peter Norvig



Prentice Hall
Upper Saddle River, New Jersey 07458

Искусственный интеллект

Современный подход

Второе издание

Стюарт Рассел, Питер Норvig

Москва • Санкт-Петербург • Киев
2007



ББК 32.973.26-018.2.75

P24

УДК 681.3.07

Издательский дом “Вильямс”

Зав. редакцией *С.Н. Тригуб*

Перевод с английского и редакция *К.А. Птицына*

По общим вопросам обращайтесь в Издательский дом “Вильямс” по адресу:

info@williamspublishing.com, <http://www.williamspublishing.com>

115419, Москва, а/я 783; 03150, Киев, а/я 152

Рассел, Стюарт, Норвиг, Питер.

P24 Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд. : Пер. с англ. — М. : Издательский дом “Вильямс”, 2007. — 1408 с. : ил. — Парал. тит. англ.

ISBN 978-5-8459-0887-2 (рус.)

В книге представлены все современные достижения и изложены идеи, которые были сформулированы в исследованиях, проводившихся в течение последних пятидесяти лет, а также собраны на протяжении двух тысячелетий в областях знаний, ставших стимулом к развитию искусственного интеллекта как науки проектирования рациональных агентов. Теоретическое описание иллюстрируется многочисленными алгоритмами, реализации которых в виде готовых программ на нескольких языках программирования находятся на сопровождающем книгу Web-узле.

Книга предназначена для использования в базовом университетском курсе или в последовательности курсов по специальности. Применима в качестве основного справочника для аспирантов, специализирующихся в области искусственного интеллекта, а также будет небезытересна профессионалам, желающим выйти за пределы избранной ими специальности. Благодаря кристальной ясности и наглядности изложения вполне может быть отнесена к лучшим образцам научно-популярной литературы.

ББК 32.973.26-018.2.75

Все названия программных продуктов являются зарегистрированными торговыми марками соответствующих фирм.

Никакая часть настоящего издания ни в каких целях не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, если на это нет письменного разрешения издательства Prentice Hall, Inc.

Authorized translation from the English language edition published by Prentice Hall, Copyright © 2003 by Pearson Education, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from the Publisher.

Russian language edition was published by Williams Publishing House according to the Agreement with R&I Enterprises International, Copyright © 2007

ISBN 978-5-8459-0887-2 (рус.)

ISBN 0-13-790395-2 (англ.)

© Издательский дом “Вильямс”, 2007

© by Pearson Education, Inc., 2003

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	24
Об авторах	31
Часть I. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ	33
Глава 1. Введение	34
Глава 2. Интеллектуальные агенты	75
Часть II. РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ	109
Глава 3. Решение проблем посредством поиска	110
Глава 4. Информированный поиск и исследование пространства состояний	153
Глава 5. Задачи удовлетворения ограничений	209
Глава 6. Поиск в условиях противодействия	240
Часть III. ЗНАНИЯ И РАССУЖДЕНИЯ	281
Глава 7. Логические агенты	282
Глава 8. Логика первого порядка	341
Глава 9. Логический вывод в логике первого порядка	380
Глава 10. Представление знаний	440
Часть IV. ПЛАНИРОВАНИЕ	511
Глава 11. Основы планирования	512
Глава 12. Планирование и осуществление действий в реальном мире	564
Часть V. НЕОПРЕДЕЛЕННЫЕ ЗНАНИЯ И РАССУЖДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ	621
Глава 13. Неопределенность	622
Глава 14. Вероятностные рассуждения	660
Глава 15. Вероятностные рассуждения во времени	718
Глава 16. Принятие простых решений	778
Глава 17. Принятие сложных решений	815
Часть VI. ОБУЧЕНИЕ	863
Глава 18. Обучение на основе наблюдений	864
Глава 19. Применение знаний в обучении	902
Глава 20. Статистические методы обучения	945
Глава 21. Обучение с подкреплением	1010

Часть VII. ОБЩЕНИЕ, ВОСПРИЯТИЕ И ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ДЕЙСТВИЙ	1045
Глава 22. Общение	1046
Глава 23. Вероятностная обработка лингвистической информации	1102
Глава 24. Восприятие	1141
Глава 25. Робототехника	1188
Часть VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	1247
Глава 26. Философские основания	1248
Глава 27. Настоящее и будущее искусственного интеллекта	1277
Приложение А. Математические основы	1288
Приложение Б. Общие сведения о языках и алгоритмах, используемых в книге	1297
Литература	1302
Предметный указатель	1373

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	24
Краткий обзор книги	25
Отличия от первого издания	26
Как использовать эту книгу	27
Использование Web-узла	28
Благодарности	28
Об обложке	30
Об авторах	31
Часть I. Искусственный интеллект	33
Глава 1. Введение	34
1.1. Общее определение искусственного интеллекта	34
Проверка того, способен ли компьютер действовать подобно человеку: подход, основанный на использовании теста Тьюринга	36
Как мыслить по-человечески: подход, основанный на когнитивном моделировании	37
Как мыслить рационально: подход, основанный на использовании “законов мышления”	38
Как мыслить рационально: подход, основанный на использовании рационального агента	39
1.2. Предыстория искусственного интеллекта	40
Философия (период с 428 года до н.э. по настоящее время)	40
Математика (период примерно с 800 года по настоящее время)	43
Экономика (период с 1776 года по настоящее время)	45
Неврология (период с 1861 года по настоящее время)	46
Психология (период с 1879 года по настоящее время)	49
Вычислительная техника (период с 1940 года по настоящее время)	51
Теория управления и кибернетика (период с 1948 года по настоящее время)	52
Лингвистика (период с 1957 года по настоящее время)	53
1.3. История искусственного интеллекта	54
Появление предпосылок искусственного интеллекта (период с 1943 года по 1955 год)	54
Рождение искусственного интеллекта (1956 год)	55
Ранний энтузиазм, большие ожидания (период с 1952 года по 1969 год)	56
Столкновение с реальностью (период с 1966 года по 1973 год)	60
Системы, основанные на знаниях: могут ли они стать ключом к успеху (период с 1969 года по 1979 год)	62

Превращение искусственного интеллекта в индустрию (период с 1980 года по настоящее время)	65
Возвращение к нейронным сетям (период с 1986 года по настоящее время)	65
Превращение искусственного интеллекта в науку (период с 1987 года по настоящее время)	66
Появление подхода, основанного на использовании интеллектуальных агентов (период с 1995 года по настоящее время)	68
1.4. Современное состояние разработок	69
1.5. Резюме	71
Библиографические и исторические заметки	72
Упражнения	73
ГЛАВА 2. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АГЕНТЫ	75
2.1. Агенты и варианты среды	75
2.2. Качественное поведение: концепция рациональности	78
Показатели производительности	78
Рациональность	79
Всезнание, обучение и автономность	80
2.3. Определение характера среды	82
Определение проблемной среды	83
Свойства проблемной среды	86
2.4. Структура агентов	90
Программы агентов	91
Простые рефлексные агенты	93
Рефлексные агенты, основанные на модели	96
Агенты, основанные на цели	97
Агенты, основанные на полезности	99
Обучающиеся агенты	100
2.5. Резюме	103
Библиографические и исторические заметки	104
Упражнения	106
ЧАСТЬ II. РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ	109
ГЛАВА 3. РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ПОСРЕДСТВОМ ПОИСКА	110
3.1. Агенты, решающие задачи	110
Хорошо структурированные задачи и решения	113
Формулировка задачи	115
3.2. Примеры задач	116
Упрощенные задачи	116
Реальные задачи	120
3.3. Поиск решений	122
Измерение производительности решения задачи	126
3.4. Стратегии неинформированного поиска	127
Поиск в ширину	127

Поиск в глубину	130
Поиск с ограничением глубины	131
Поиск в глубину с итеративным углублением	133
Двунаправленный поиск	135
Сравнение стратегий неинформированного поиска	136
3.5. Предотвращение формирования повторяющихся состояний	136
3.6. Поиск с частичной информацией	139
Проблемы отсутствия датчиков	140
Проблемы непредвиденных ситуаций	142
3.7. Резюме	144
Библиографические и исторические заметки	145
Упражнения	147
ГЛАВА 4. ИНФОРМИРОВАННЫЙ ПОИСК И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ	153
4.1. Стратегии информированного (эвристического) поиска	154
Жадный поиск по первому наилучшему совпадению	155
Поиск A*: минимизация суммарной оценки стоимости решения	157
Эвристический поиск с ограничением объема памяти	163
Обучение лучшим способам поиска	166
4.2. Эвристические функции	167
Зависимость производительности поиска от точности эвристической функции	168
Составление допустимых эвристических функций	170
Изучение эвристических функций на основе опыта	173
4.3. Алгоритмы локального поиска и задачи оптимизации	174
Поиск с восхождением к вершине	175
Поиск с эмуляцией отжига	180
Локальный лучевой поиск	181
Генетические алгоритмы	182
4.4. Локальный поиск в непрерывных пространствах	187
4.5. Поисковые агенты, действующие в оперативном режиме, и неизвестные варианты среды	189
Задачи поиска в оперативном режиме	190
Агенты, выполняющие поиск в оперативном режиме	193
Локальный поиск в оперативном режиме	194
Обучение в ходе поиска в оперативном режиме	197
4.6. Резюме	198
Библиографические и исторические заметки	199
Упражнения	204
ГЛАВА 5. ЗАДАЧИ УДОВЛЕТВОРЕНИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ	209
5.1. Задачи удовлетворения ограничений	210
5.2. Применение поиска с возвратами для решения задач CSP	214
Упорядочение переменных и значений	217
Распространение информации с помощью ограничений	219

Интеллектуальный поиск с возвратами: поиск в обратном направлении	224
5.3. Применение локального поиска для решения задач удовлетворения ограничений	226
5.4. Структура задач	228
5.5. Резюме	233
Библиографические и исторические заметки	233
Упражнения	236
ГЛАВА 6. ПОИСК В УСЛОВИЯХ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ	240
6.1. Игры	240
6.2. Принятие оптимальных решений в играх	242
Оптимальные стратегии	242
Минимаксный алгоритм	245
Оптимальные решения в играх с несколькими игроками	246
6.3. Альфа-бета-отсечение	247
6.4. Неидеальные решения, принимаемые в реальном времени	252
Функции оценки	252
Прекращение поиска	254
6.5. Игры, которые включают элемент случайности	257
Оценка позиции в играх с узлами жеребьевки	260
Сложность оценки ожидаемых минимаксных значений	261
Карточные игры	262
6.6. Современные игровые программы	264
6.7. Обсуждение изложенных сведений	268
6.8. Резюме	270
Библиографические и исторические заметки	271
Упражнения	276
ЧАСТЬ III. ЗНАНИЯ И РАССУЖДЕНИЯ	281
ГЛАВА 7. ЛОГИЧЕСКИЕ АГЕНТЫ	282
7.1. Агенты, основанные на знаниях	284
7.2. Мир вампуса	286
7.3. Логика	290
7.4. Пропозициональная логика: очень простая логика	294
Синтаксис	295
Семантика	296
Простая база знаний	299
Логический вывод	300
Эквивалентность, допустимость и выполнимость	301
7.5. Шаблоны формирования рассуждений в пропозициональной логике	303
Резолюция	306
Прямой и обратный логический вывод	311
7.6. Эффективный пропозициональный логический вывод	316
Полный алгоритм поиска с возвратами	316

Алгоритмы локального поиска	318
Трудные задачи определения выполнимости	320
7.7. Агенты, основанные на пропозициональной логике	322
Поиск ям и вампусов с помощью логического вывода	322
Слежение за местонахождением и ориентацией	324
Агенты на основе логических схем	325
Сопоставление двух описанных типов агентов	330
7.8. Резюме	332
Библиографические и исторические заметки	333
Упражнения	337
ГЛАВА 8. ЛОГИКА ПЕРВОГО ПОРЯДКА	341
8.1. Дополнительные сведения о представлении	341
8.2. Синтаксис и семантика логики первого порядка	347
Модели для логики первого порядка	347
Символы и интерпретации	349
Термы	351
Атомарные высказывания	351
Сложные высказывания	352
Кванторы	352
Равенство	357
8.3. Использование логики первого порядка	357
Утверждения и запросы в логике первого порядка	358
Проблемная область родства	358
Числа, множества и списки	361
Мир вампуса	363
8.4. Инженерия знаний с применением логики первого порядка	366
Процесс инженерии знаний	367
Проблемная область электронных схем	369
8.5. Резюме	374
Библиографические и исторические заметки	374
Упражнения	376
ГЛАВА 9. ЛОГИЧЕСКИЙ ВЫВОД В ЛОГИКЕ ПЕРВОГО ПОРЯДКА	380
9.1. Сравнение методов логического вывода в пропозициональной логике и логике первого порядка	381
Правила логического вывода для кванторов	381
Приведение к пропозициональному логическому выводу	382
9.2. Унификация и поднятие	384
Правило вывода в логике первого порядка	384
Унификация	386
Хранение и выборка	388
9.3. Прямой логический вывод	390
Определенные выражения в логике первого порядка	390
Простой алгоритм прямого логического вывода	392
Эффективный прямой логический вывод	394

9.4. Обратный логический вывод	399
Алгоритм обратного логического вывода	399
Логическое программирование	401
Эффективная реализация логических программ	403
Избыточный логический вывод и бесконечные циклы	406
Логическое программирование в ограничениях	408
9.5. Резолюция	409
Конъюнктивная нормальная форма для логики первого порядка	410
Правило логического вывода с помощью резолюции	412
Примеры доказательств	413
Полнота резолюции	416
Учет отношения равенства	420
Стратегии резолюции	421
Средства автоматического доказательства теорем	423
9.6. Резюме	428
Библиографические и исторические заметки	429
Упражнения	435
ГЛАВА 10. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗНАНИЙ	440
10.1. Онтологическая инженерия	440
10.2. Категории и объекты	443
Физическая композиция	445
Меры	448
Вещества и объекты	449
10.3. Действия, ситуации и события	451
Онтология ситуационного исчисления	451
Описание действий в ситуационном исчислении	453
Решение проблемы представительного окружения	455
Решение проблемы выводимого окружения	457
Исчисление времени и событий	459
Обобщенные события	460
Процессы	462
Интервалы	464
Флюэнтные высказывания и объекты	465
10.4. Мыслительные события и мыслимые объекты	466
Формальная теория убеждений	467
Знания и убеждения	469
Знания, время и действия	470
10.5. Мир покупок в Internet	471
Сравнение коммерческих предложений	476
10.6. Системы формирования рассуждений о категориях	477
Семантические сети	478
Описательные логики	482
10.7. Формирование рассуждений с использованием информации, заданной по умолчанию	483
Открытые и закрытые миры	484

Отрицание как недостижение цели и устойчивая семантика модели	486
Логика косвенного описания и логика умолчания	488
10.8. Системы поддержки истинности	491
10.9. Резюме	494
Библиографические и исторические заметки	495
Упражнения	503
ЧАСТЬ IV. ПЛАНИРОВАНИЕ	511
ГЛАВА 11. ОСНОВЫ ПЛАНИРОВАНИЯ	512
11.1. Задача планирования	513
Язык задач планирования	514
Выразительность и расширения языка	516
Пример: воздушный грузовой транспорт	518
Пример: задача с запасным колесом	519
Пример: мир блоков	520
11.2. Планирование с помощью поиска в пространстве состояний	521
Прямой поиск в пространстве состояний	522
Обратный поиск в пространстве состояний	523
Эвристики для поиска в пространстве состояний	525
11.3. Планирование с частичным упорядочением	527
Пример планирования с частичным упорядочением	532
Планирование с частичным упорядочением и несвязанными переменными	534
Эвристики для планирования с частичным упорядочением	535
11.4. Графы планирования	536
Применение графов планирования для получения эвристической оценки	539
Алгоритм Graphplan	541
Завершение работы алгоритма Graphplan	544
11.5. Планирование с помощью пропозициональной логики	545
Описание задач планирования в пропозициональной логике	546
Сложности, связанные с использованием пропозициональных кодировок	549
11.6. Анализ различных подходов к планированию	551
11.7. Резюме	553
Библиографические и исторические заметки	554
Упражнения	558
ГЛАВА 12. ПЛАНИРОВАНИЕ И ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ДЕЙСТВИЙ В РЕАЛЬНОМ МИРЕ	564
12.1. Время, расписания и ресурсы	564
Составление расписаний с ресурсными ограничениями	567
12.2. Планирование иерархической сети задач	570
Представление декомпозиций действий	572
Модификация планировщика для его использования в сочетании с декомпозициями	574

Обсуждение вопроса	577
12.3. Планирование и осуществление действий в недетерминированных проблемных областях	580
12.4. Условное планирование	584
Условное планирование в полностью наблюдаемых вариантах среды	584
Условное планирование в частично наблюдаемых вариантах среды	589
12.5. Контроль выполнения и перепланирование	594
12.6. Непрерывное планирование	600
12.7. Мультиагентное планирование	605
Кооперация: совместные цели и планы	605
Многотельное планирование	606
Механизмы координации	608
Конкуренция	610
12.8. Резюме	611
Библиографические и исторические заметки	612
Упражнения	616

ЧАСТЬ V. НЕОПРЕДЕЛЕННЫЕ ЗНАНИЯ И РАССУЖДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ 621

ГЛАВА 13. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ	622
13.1. Действия в условиях неопределенности	622
Учет наличия неопределенных знаний	623
Неопределенность и рациональные решения	626
Проект агента, действующего в соответствии с теорией решений	627
13.2. Основная вероятностная система обозначений	628
Высказывания	628
Атомарные события	629
Априорная вероятность	630
Условная вероятность	632
13.3. Аксиомы вероятностей	635
Использование аксиом вероятностей	635
Теоретическое обоснование аксиом вероятностей	636
13.4. Логический вывод с использованием полных совместных распределений	638
13.5. Независимость	642
13.6. Правило Байеса и его использование	644
Применение правила Байеса: простой случай	644
Использование правила Байеса: комбинирование свидетельств	646
13.7. Еще одно возвращение в мир вампуса	648
13.8. Резюме	652
Библиографические и исторические заметки	653
Упражнения	656
ГЛАВА 14. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ РАССУЖДЕНИЯ	660
14.1. Представление знаний в неопределенной проблемной области	660

14.2. Семантика байесовских сетей	664
Представление полного совместного распределения	664
Отношения условной независимости в байесовских сетях	669
14.3. Эффективное представление распределений условных вероятностей	669
14.4. Точный вероятностный вывод в байесовских сетях	675
Вероятностный вывод с помощью перебора	676
Алгоритм устранения переменной	678
Сложность точного вероятностного вывода	681
Алгоритмы кластеризации	682
14.5. Приближенный вероятностный вывод в байесовских сетях	683
Методы непосредственной выборки	684
Вероятностный вывод по методу моделирования цепи Маркова	690
14.6. Распространение вероятностных методов на представления в логике первого порядка	694
14.7. Другие подходы к формированию рассуждений в условиях неопределенности	699
Методы на основе правил для формирования рассуждений в условиях неопределенности	700
Представление незнания: теория Демпстера–Шефера	703
Представление неосведомленности: нечеткие множества и нечеткая логика	704
14.8. Резюме	706
Библиографические и исторические заметки	707
Упражнения	712
ГЛАВА 15. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ РАССУЖДЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ	718
15.1. Время и неопределенность	719
Состояния и наблюдения	719
Стационарные процессы и марковское предположение	720
15.2. Вероятностный вывод во временных моделях	724
Фильтрация и предсказание	725
Сглаживание	728
Поиск наиболее вероятной последовательности	731
15.3. Скрытые марковские модели	734
Упрощенные матричные алгоритмы	734
15.4. Фильтры Калмана	737
Обновление гауссовых распределений	738
Простой одномерный пример	739
Общий случай	743
Области применения калмановской фильтрации	744
15.5. Динамические байесовские сети	746
Процедура создания сетей DBN	747
Точный вероятностный вывод в сетях DBN	752
Приближенный вероятностный вывод в сетях DBN	754
15.6. Распознавание речи	758
Звуки речи	760

Слова	763
Предложения	765
Разработка устройства распознавания речи	769
15.7. Резюме	770
Библиографические и исторические заметки	771
Упражнения	774
ГЛАВА 16. ПРИНЯТИЕ ПРОСТЫХ РЕШЕНИЙ	778
16.1. Совместный учет убеждений и желаний в условиях неопределенности	778
16.2. Основы теории полезности	780
Ограничения, налагаемые на рациональные предпочтения	781
В начале была Полезность	783
16.3. Функции полезности	784
Полезность денег	784
Шкалы полезности и оценка полезности	788
16.4. Многоатрибутные функции полезности	790
Доминирование	790
Структура предпочтений и многоатрибутная полезность	793
16.5. Сети принятия решений	795
Способы представления задачи принятия решений с помощью сети принятия решений	795
Вычисления с помощью сетей принятия решений	798
16.6. Стоимость информации	798
Простой пример	799
Общая формула	800
Свойства показателей стоимости информации	802
Реализация агента, действующего на основе сбора информации	802
16.7. Экспертные системы, основанные на использовании теории принятия решений	803
16.8. Резюме	807
Библиографические и исторические заметки	808
Упражнения	810
ГЛАВА 17. ПРИНЯТИЕ СЛОЖНЫХ РЕШЕНИЙ	815
17.1. Задачи последовательного принятия решений	816
Пример	816
Оптимальность в задачах последовательного принятия решений	819
17.2. Итерация по значениям	822
Полезности состояний	823
Алгоритм итерации по значениям	824
Сходимость итерации по значениям	826
17.3. Итерация по стратегиям	829
17.4. Марковские процессы принятия решений в частично наблюдаемых вариантах среды	831
17.5. Агенты, действующие на основе теории решений	836
17.6. Принятие решений при наличии нескольких агентов: теория игр	839

Содержание	17
17.7. Проектирование механизма	851
17.8. Резюме	855
Библиографические и исторические заметки	856
Упражнения	859
ЧАСТЬ VI. ОБУЧЕНИЕ	863
ГЛАВА 18. ОБУЧЕНИЕ НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ	864
18.1. Формы обучения	864
18.2. Индуктивное обучение	867
18.3. Формирование деревьев решений на основе обучения	870
Деревья решений, рассматриваемые как производительные элементы	870
Выразительность деревьев решений	872
Индуктивный вывод деревьев решений на основе примеров	873
Выбор проверок атрибутов	877
Оценка производительности обучающего алгоритма	879
Шум и чрезмерно тщательная подгонка	880
Расширение области применения деревьев решений	883
18.4. Обучение ансамбля	884
18.5. Принципы функционирования алгоритмов обучения: теория вычислительного обучения	889
Оценка количества необходимых примеров	890
Обучение списков решений	892
Обсуждение полученных результатов	894
18.6. Резюме	895
Библиографические и исторические заметки	896
Упражнения	899
ГЛАВА 19. ПРИМЕНЕНИЕ ЗНАНИЙ В ОБУЧЕНИИ	902
19.1. Логическая формулировка задачи обучения	902
Примеры и гипотезы	903
Поиск текущей наилучшей гипотезы	905
Поиск на основе оценки наименьшего вклада	908
19.2. Применение знаний в обучении	913
Некоторые простые примеры	914
Некоторые общие схемы	915
19.3. Обучение на основе объяснения	917
Извлечение общих правил из примеров	919
Повышение эффективности правила	921
19.4. Обучение с использованием информации о релевантности	923
Определение пространства гипотез	923
Обучение и использование информации о релевантности	924
19.5. Индуктивное логическое программирование	927
Практический пример	928
Нисходящие методы индуктивного обучения	931

Индуктивное обучение с помощью обратной дедукции	934
Совершение открытий с помощью индуктивного логического программирования	937
19.6. Резюме	939
Библиографические и исторические заметки	940
Упражнения	943
ГЛАВА 20. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБУЧЕНИЯ	945
20.1. Статистическое обучение	946
20.2. Обучение с помощью полных данных	950
Обучение параметрам с помощью метода максимального правдоподобия: дискретные модели	950
Наивные байесовские модели	953
Обучение параметрам с максимальным правдоподобием: непрерывные модели	954
Обучение байесовским параметрам	956
Определение путем обучения структур байесовских сетей	959
20.3. Обучение с помощью скрытых переменных: алгоритм EM	961
Неконтролируемая кластеризация: определение в процессе обучения смешанных гауссовых распределений	962
Обучение байесовских сетей со скрытыми переменными	966
Обучение скрытых марковских моделей	969
Общая форма алгоритма EM	970
Определение с помощью обучения структур байесовских сетей со скрытыми переменными	971
20.4. Обучение на основе экземпляра	972
Модели ближайшего соседа	973
Ядерные модели	975
20.5. Нейронные сети	976
Элементы в нейронных сетях	977
Структуры сетей	979
Однослойные нейронные сети с прямым распространением (персептроны)	980
Многослойные нейронные сети с прямым распространением	985
Определение в процессе обучения структур нейронных сетей	990
20.6. Ядерные машины	991
20.7. Практический пример: распознавание рукописных цифр	995
20.8. Резюме	998
Библиографические и исторические заметки	1000
Упражнения	1005
ГЛАВА 21. ОБУЧЕНИЕ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ	1010
21.1. Введение	1010
21.2. Пассивное обучение с подкреплением	1012
Непосредственная оценка полезности	1014
Адаптивное динамическое программирование	1015

Обучение с учетом временной разницы	1016
21.3. Активное обучение с подкреплением	1020
Исследование среды	1021
Определение функции “действие—стоимость” с помощью обучения	1025
21.4. Обобщение в обучении с подкреплением	1027
Приложения методов обучения к ведению игр	1031
Применение к управлению роботами	1032
21.5. Поиск стратегии	1033
21.6. Резюме	1037
Библиографические и исторические заметки	1039
Упражнения	1042
ЧАСТЬ VII. ОБЩЕНИЕ, ВОСПРИЯТИЕ И ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ДЕЙСТВИЙ	1045
ГЛАВА 22. ОБЩЕНИЕ	1046
22.1. Общение как действие	1047
Основные понятия языка	1048
Составные этапы общения	1050
22.2. Формальная грамматика для подмножества английского языка	1054
Словарь языка \mathcal{E}_0	1054
Грамматика языка \mathcal{E}_0	1055
22.3. Синтаксический анализ (синтаксический разбор)	1056
Эффективный синтаксический анализ	1058
22.4. Расширенные грамматики	1065
Субкатегоризация глагола	1068
Порождающая мощь расширенных грамматик	1071
22.5. Семантическая интерпретация	1071
Семантика небольшой части английского языка	1072
Время события и времена глаголов	1074
Введение кванторов	1075
Прагматическая интерпретация	1078
Применение грамматик DCG для производства языковых конструкций	1079
22.6. Неоднозначность и устранение неоднозначности	1080
Устранение неоднозначности	1083
22.7. Понимание речи	1085
Разрешение ссылок	1085
Структура связной речи	1087
22.8. Индуктивный вывод грамматики	1089
22.9. Резюме	1092
Библиографические и исторические заметки	1093
Упражнения	1097
ГЛАВА 23. ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОБРАБОТКА ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ	1102
23.1. Вероятностные языковые модели	1103
Вероятностные контекстно-свободные грамматики	1106

Определение с помощью обучения вероятностей для грамматики PCFG	1108
Определение с помощью обучения структуры правил для грамматики PCFG	1110
23.2. Информационный поиск	1110
Сравнительный анализ систем информационного поиска	1114
Совершенствование информационного поиска	1115
Способы представления результирующих наборов	1117
Создание систем информационного поиска	1119
23.3. Извлечение информации	1121
23.4. Машинный перевод	1124
Системы машинного перевода	1127
Статистический машинный перевод	1127
Определение с помощью обучения вероятностей для машинного перевода	1132
23.5. Резюме	1134
Библиографические и исторические заметки	1135
Упражнения	1138
ГЛАВА 24. ВОСПРИЯТИЕ	1141
24.1. Введение	1141
24.2. Формирование изображения	1143
Получение изображения без линз — камера-обскура	1144
Системы линз	1145
Свет: фотометрия формирования изображения	1146
Цвет — спектрофотометрия формирования изображения	1147
24.3. Операции, выполняемые на первом этапе обработки изображения	1148
Обнаружение краев	1150
Сегментация изображения	1153
24.4. Извлечение трехмерной информации	1154
Движение	1156
Бинокулярные стереоданные	1158
Градиенты текстуры	1161
Затенение	1162
Контур	1164
24.5. Распознавание объектов	1168
Распознавание с учетом яркости	1171
Распознавание с учетом характеристик	1172
Оценка позы	1175
24.6. Использование системы машинного зрения для манипулирования и передвижения	1177
24.7. Резюме	1180
Библиографические и исторические заметки	1181
Упражнения	1184
ГЛАВА 25. РОБОТОТЕХНИКА	1188
25.1. Введение	1188