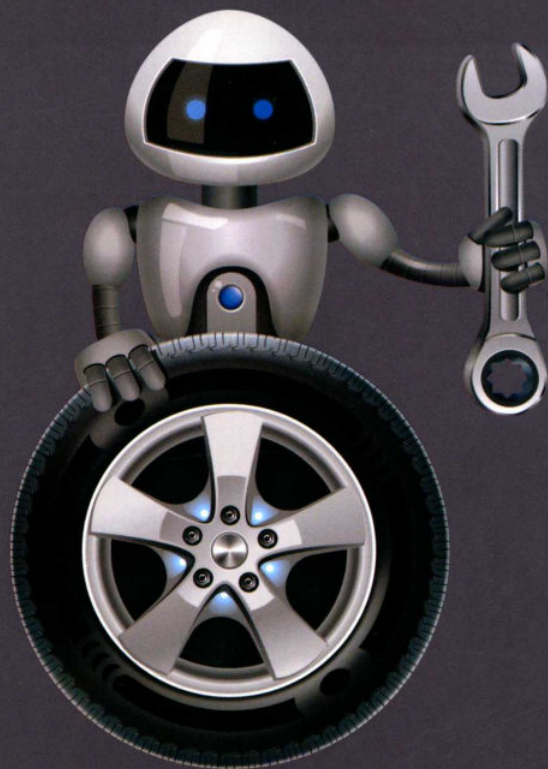




[美] 阿朗佐·凯利 (Alonzo Kelly) 著
卡内基·梅隆大学

王巍 崔维娜 等译
北京航空航天大学 北京化工大学

移动机器人学

数学基础、模型构建及实现方法

MOBILE
ROBOTICS

MATHEMATICS, MODELS, AND METHODS



机械工业出版社
China Machine Press

本书聚焦于轮式移动机器人，介绍与机器人的运动控制、环境感知和智能规划相关的一系列概念、方法和问题，内容连贯且阐释清晰，全景呈现了本领域的核心要素。全书按照构建移动机器人的步骤来组织章节，每一章探讨一个新的主题或一项新的功能，包括数值方法、信号处理、估计和控制理论、计算机视觉和人工智能。

○ 本书特色：集合众领域的核心理论于一体。

研究移动机器人学必须了解工程学、数学和物理学，以及不同应用领域的需求。虽然涉及面广，但其核心技术及数学基础是具有共性的。作者成功地将这些内容融为一体，用一本书实现了全面覆盖与系统阐述。

○ 阅读准备：本科及研究生阶段的数学知识。

这是读懂本书的前提，更是设计移动机器人的基础。本书在数学方面搭建的学习曲线颇具挑战，底层原理和前沿研究均有涵盖，只有透彻理解之后，才能体会其在工程实践中的精妙应用，进而达到融会贯通。

○ 学习建议：从数学基础到未来的实战之路。

受主题和时间所限，书中无法囊括全部技术细节，因此忽略了足式移动、标定、仿真、人机界面和多机器人系统等内容。对于有兴趣的读者，建议以本书为阶梯继续学习，并尝试制作属于自己的移动机器人。

作者简介

阿朗佐·凯利 (Alonzo Kelly) 卡内基·梅隆大学机器人研究所教授，研究方向包括机器人的建模、控制、位置估计、运动规划以及人机交互。在回归学术界之前，他曾在航天工业领域从业十年。

译者简介

王巍 北京航空航天大学机器人研究所教授，长期从事机器人学相关的科研与教学工作，研究方向为移动机器人系统设计和导航控制。承担多项科学基金和横向科研课题及工程，完成国家自然科学基金等项目40余项，发表论文100余篇，获得国家发明专利20余项。

崔维娜 北京化工大学教师，主要从事工程制图、计算机辅助设计、计算机图形学、机器人学等方面的研究与教学工作。



华章教育微信服务号

CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS
www.cambridge.org

投稿热线: (010) 88379604
读者信箱: hzsj@hzbook.com
客服电话: (010) 88361066 88379833 68326294

华章网站: www.hzbook.com
网上购书: www.china-pub.com
数字阅读: www.hzmedia.com.cn



上架指导: 人工智能/机器人

ISBN 978-7-111-63349-5



9 787111 633495

定价: 159.00元

机器人学译丛

[美] 阿朗佐·凯利 (Alonzo Kelly) 著
卡内基·梅隆大学

王巍 崔维娜 等译
北京航空航天大学 北京化工大学

移动机器人学

数学基础、模型构建及实现方法

MOBILE
ROBOTICS

MATHEMATICS, MODELS, AND METHODS



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

移动机器人学: 数学基础、模型构建及实现方法 / (美) 阿朗佐·凯利 (Alonzo Kelly) 著; 王巍等译. —北京: 机械工业出版社, 2019.7

(机器人学译丛)

书名原文: Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods

ISBN 978-7-111-63349-5

I. 移… II. ①阿… ②王… III. 移动式机器人—研究 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 165316 号

本书版权登记号: 图字 01-2015-5204

This is a Simplified-Chinese edition of the following title published by Cambridge University Press:

Alonzo Kelly, Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods, ISBN 978-1-107-03115-9.

© Alonzo Kelly 2013.

This Simplified-Chinese edition for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and China Machine Press in 2020.

This Simplified-Chinese edition is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorized export of this simplified Chinese is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and China Machine Press.

本书原版由剑桥大学出版社出版。

本书简体字中文版由剑桥大学出版社与机械工业出版社合作出版。未经出版者预先书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

此版本仅限在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 销售。

本书介绍与移动机器人的控制、感知和规划技术相关的数学基础、系统模型、传感器技术和算法。数学基础方面, 涵盖矩阵理论、刚体变换、线性与非线性优化、微分代数与微分方程、最优估计等; 系统模型方面, 涵盖运动学和动力学模型、控制系统模型、传感器和环境模型等; 传感器技术方面, 涵盖常用的车轮里程计、超声波传感器、激光雷达以及各种视觉传感器; 算法方面, 涵盖位姿估计、观测误差估计、同步定位和地图构建、运动规划等。

本书可作为机器人学相关专业高年级本科生和研究生的教材, 也可供该领域的科研人员和工程技术人员参考。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 朱秀英

责任校对: 李秋荣

印刷: 北京瑞德印刷有限公司

版次: 2020 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 36.25

书号: ISBN 978-7-111-63349-5

定价: 159.00 元

客服电话: (010) 88361066 88379833 68326294

投稿热线: (010) 88379604

华章网站: www.hzbook.com

读者信箱: hzsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

相对于工业机器人, 移动机器人的潜在应用领域更多, 对智能化的要求也更高。针对各种特定或非特定场景, 学术界在移动机器人领域开展了持续数十年的研究, 并已逐渐将其应用到了外星探索、工业物流、商业服务等场景。虽然移动机器人的结构形态会随着应用场景的变化而采用不同的设计, 但是它们在系统建模、运动控制、环境感知、智能规划等方面却具有共性。这些涉及多个学科的共性技术是研究智能移动机器人的基础, 而这些技术的核心理论, 无一例外地需要利用各种数学工具来构建。在一本书中对上述技术领域及其数学基础进行系统化阐述是一项艰巨的任务, 而这正是本书最大的特点。

正如书名所指, 本书遵循数学基础、模型构建和实现方法的逻辑结构, 针对移动机器人运动控制、环境感知和智能规划所涉及的理论问题进行了深入阐述。本书首先介绍了机器人建模和参数优化所需的数学方法, 包括矩阵理论、刚体模型表达、运动学模型、位姿变换、函数的线性化和优化、方程组求解方法、非线性优化方法、微分代数和微分方程等。在上述数学基础上, 阐述了机器人动力学模型的构建方法。在讲解机器人位姿估计理论之前, 本书介绍了以概率论为基础的最优估计方法。在明确系统模型和参数辨识方法的基础上, 对移动机器人控制方法进行了系统论述, 包括经典控制方法和基于状态空间的现代控制方法。对变化环境的实时感知是移动机器人区别于工业机器人的另一大特征, 因此, 本书对移动机器人多种感知传感器的技术原理及其数据处理算法进行了系统阐述。基于前面的理论和方法, 书中详细介绍了移动机器人的定位和地图构建这一综合性技术。最后, 本书对移动机器人运动规划问题进行了探讨。

本书可供机器人学相关专业的高年级本科生、研究生和高校教师作为教材使用, 也可供从事移动机器人研究的科研人员和工程技术人员参考。对于数学基础好的读者, 本书是一本揭示如何把数学原理应用到移动机器人各个方面的优秀指导书。如果读者对理解书中的数学知识感到困难, 则建议以本书为索引, 系统地复习本科和研究生阶段所学的数学课程。通过这样的再次学习和理解, 相信读者会对如何在工程实践中应用数学原理产生融会贯通之感。

本书译稿由王巍、崔维娜进行统稿和校对, 参与本书翻译工作的人员为崔维娜、祁贤雨、李明博、刘光伟、刘艳朋、王林青、张啸宇、廖子维。

虽然我们已经对译稿进行了仔细校对, 查阅了大量相关资料, 使译文尽可能符合中文习惯并保持术语的一致性, 但由于本书涉及的学科和技术领域非常广泛, 错误或不当之处仍难以完全避免, 敬请各位读者和同行专家谅解, 诚挚欢迎读者将相关意见、建议发送到电子邮箱 wangweilab@buaa.edu.cn。

特别感谢机械工业出版社华章公司的朱秀英编辑, 她耐心、细致的工作使本书得以顺利出版。

译者

2019年5月于北京

机器人学是一个极具挑战性与成就感的研究领域。在绝大多数机器人学者的经历中，最重要的时刻，莫过于机器人在自己设计的软件和电路的指引下，第一次完成任务的时候。为了富有成效地探究和钻研机器人学，需要了解工程学、数学和物理学。然而，这些学科的内容却并不能带给我们“魔幻”的感觉，也就是当我们与自己亲手创造的那些有灵活反应的半智能设备交互时的奇妙感受。

本书介绍与一类机器人——移动机器人——相关的科学与工程学内容。尽管与机械臂有许多相似的部分，但移动机器人仍然具备相当多的特性，使其足够单独用一本书来讲解。虽然本书聚焦于轮式移动机器人，但是大部分内容与特定的运动本体子系统无关。

移动机器人领域正处于日新月异的快速发展时期，同时，许多专家从事的工作都兼顾研究与商业应用。任何一本涉及该领域的书，都只反映了它的一个方面，并受限于图书出版时对该领域的理解程度。然而，本领域快速发展的态势、持续数十年的研究历史以及日益扩展和流行的现状都表明，现在是时候整理一本初期读本，以一种更易被读者接受的方式来梳理领域中的一些基本思想。

即时性的另一个影响是，本书必然要忽略很多有用的信息。许多主题（如感知）仅做了简要描述，而足式移动、标定、仿真、人机界面和多机器人系统等内容则完全忽略了。这是因为，本书的主旨是从移动机器人的基础要素和深入研究中提取出一系列连贯的概念、方法和问题并进行清晰的阐释，这些内容不仅推动着前沿实践应用，而且代表了本领域独特的核心。

为此，本书的大部分素材都尽可能地限定于二维轮式机器人及结构化环境。这样的假设既可保证本书阐述内容的完整和一致，又使其足够丰富和易懂，同时，也不会使读者受困于针对某一特例的细节描述。

本书模仿构建移动机器人的次序来安排章节的逻辑结构。每一章呈现一个新的主题或一项新的功能，并以它们问世的时间来排序。这些主题包括：数值方法、信号处理、估计和控制理论、计算机视觉和人工智能。

在写作本书之时，名为“好奇号”的科学实验漫游车刚刚抵达火星。这是我们面向火星的第三个移动机器人任务，之前那些任务（火星探测漫游者）的成果已成为历史。本书并不是面向所有人群的读物，而是针对那些有所准备并有志于进入移动机器人领域的读者。如果你能掌握本书的内容，就能了解移动机器人的“大脑”里究竟有些什么，并为制作自己的移动机器人做好充分准备。

译者序

前言

第 1 章 绪论 1

1.1 移动机器人应用 1

1.2 移动机器人分类 2

1.2.1 地面自主移动机器人 2

1.2.2 服务机器人 2

1.2.3 清洁和草坪护理机器人 3

1.2.4 社交机器人 3

1.2.5 野外机器人 4

1.2.6 检测、侦查、监控和勘探
机器人 5

1.3 移动机器人工程 6

1.3.1 移动机器人子系统 6

1.3.2 全书概述 6

1.3.3 轮式移动机器人基础 8

1.3.4 参考文献与延伸阅读 9

1.3.5 习题 9

第 2 章 数学基础 10

2.1 约定和定义 10

2.1.1 符号约定 10

2.1.2 附体坐标系 14

2.1.3 参考文献与延伸阅读 16

2.2 矩阵基础 17

2.2.1 矩阵运算 17

2.2.2 矩阵函数 19

2.2.3 矩阵求逆 20

2.2.4 秩-零化度定理 22

2.2.5 矩阵代数 23

2.2.6 矩阵微积分 25

2.2.7 莱布尼茨法则 31

2.2.8 参考文献与延伸阅读 32

2.2.9 习题 32

2.3 刚体变换基础 33

2.3.1 定义 33

2.3.2 为什么使用齐次变换 33

2.3.3 语义和解释 34

2.3.4 参考文献与延伸阅读 43

2.3.5 习题 44

2.4 机构运动学 45

2.4.1 正运动学 45

2.4.2 逆运动学 49

2.4.3 微分运动学 52

2.4.4 参考文献与延伸阅读 54

2.4.5 习题 54

2.5 方向和角速度 55

2.5.1 欧拉角形式的方向表示 56

2.5.2 角速度和小角度 59

2.5.3 欧拉角形式的角速度与方向
变化率 612.5.4 轴角形式的角速度与方向
变化率 62

2.5.5 参考文献与延伸阅读 63

2.5.6 习题 64

2.6 传感器的运动学模型 64

2.6.1 摄像机的运动学模型 64

2.6.2 激光测距传感器的运动学
模型 65

2.6.3 参考文献与延伸阅读 71

2.6.4 习题 71

2.7 变换图与位姿网络 71

2.7.1 关系变换 71

2.7.2 位姿网络求解 74

2.7.3 过约束网络 75

2.7.4 用于一般位置坐标系的微分
运动学 77

2.7.5 参考文献与延伸阅读 81

2.7.6 习题 81

2.8 四元数	82	4.1.1 观测问题	138
2.8.1 表示和符号	82	4.1.2 改变参考系	139
2.8.2 四元数乘法	83	4.1.3 应用实例: 姿态稳定裕度估计	143
2.8.3 其他四元数运算	85	4.1.4 运动状态的递归变换	145
2.8.4 三维旋转表示	86	4.1.5 参考文献和延伸阅读	148
2.8.5 姿态和角速度	88	4.1.6 习题	149
2.8.6 参考文献与延伸阅读	90	4.2 轮式移动机器人运动学	149
2.8.7 习题	90	4.2.1 刚体运动概况	150
第3章 数值方法	92	4.2.2 轮式移动机器人固定接触点的速度运动学	152
3.1 向量函数的线性化和优化	92	4.2.3 常用转向系统配置	155
3.1.1 线性化	93	4.2.4 参考文献和延伸阅读	159
3.1.2 目标函数优化	94	4.2.5 习题	160
3.1.3 约束优化	98	4.3 约束运动学与动力学	160
3.1.4 参考文献与延伸阅读	103	4.3.1 禁止方向的约束	161
3.1.5 习题	103	4.3.2 纯滚动(无侧滑)约束	165
3.2 方程组	103	4.3.3 拉格朗日动力学	168
3.2.1 线性系统	103	4.3.4 地形接触	173
3.2.2 非线性系统	108	4.3.5 轨迹估计与预测	175
3.2.3 参考文献与延伸阅读	110	4.3.6 参考文献和延伸阅读	179
3.2.4 习题	110	4.3.7 习题	180
3.3 非线性优化和约束优化	111	4.4 线性系统理论概述	181
3.3.1 非线性优化	111	4.4.1 线性定常系统	181
3.3.2 约束优化	116	4.4.2 线性动态系统的状态空间表示	187
3.3.3 参考文献与延伸阅读	119	4.4.3 非线性动态系统	190
3.3.4 习题	120	4.4.4 非线性动态系统的扰动动力学	192
3.4 微分代数系统	120	4.4.5 参考文献与延伸阅读	194
3.4.1 约束动力学	121	4.4.6 习题	195
3.4.2 一阶和二阶约束运动学系统	123	4.5 预测模型与系统辨识	195
3.4.3 拉格朗日动力学	125	4.5.1 制动	196
3.4.4 约束	129	4.5.2 转向	197
3.4.5 参考文献与延伸阅读	133	4.5.3 车辆翻倒	199
3.4.6 习题	133	4.5.4 车轮打滑和偏航稳定性	202
3.5 微分方程的积分	134	4.5.5 动力学模型的参数化和线性化	204
3.5.1 状态空间中的动力学模型	134	4.5.6 系统辨识	207
3.5.2 状态空间模型的积分	134	4.5.7 参考文献与延伸阅读	213
3.5.3 参考文献与延伸阅读	137		
3.5.4 习题	137		
第4章 动力学	138		
4.1 动坐标系	138		

4.5.8 习题	214	6.1.1 位姿修正与航位推算法	296
第5章 最优估计	215	6.1.2 位姿修正	298
5.1 随机变量、随机过程与随机变换	215	6.1.3 三角测量中的误差传播	300
5.1.1 不确定性的表征	215	6.1.4 实际位姿修正系统	307
5.1.2 随机变量	216	6.1.5 航位推算法	308
5.1.3 不确定性变换	222	6.1.6 实际航位推算系统	316
5.1.4 随机过程	229	6.1.7 参考文献与延伸阅读	316
5.1.5 参考文献与延伸阅读	234	6.1.8 习题	317
5.1.6 习题	234	6.2 用于状态估计的传感器	318
5.2 协方差传播与最优估计	235	6.2.1 关节传感器	318
5.2.1 连续积分与平均过程的方差	235	6.2.2 环境场传感器	319
5.2.2 随机积分	239	6.2.3 惯性参考系	320
5.2.3 最优估计	244	6.2.4 惯性传感器	322
5.2.4 参考文献与延伸阅读	251	6.2.5 参考文献与延伸阅读	327
5.2.5 习题	251	6.2.6 习题	327
5.3 状态空间卡尔曼滤波器	252	6.3 惯性导航系统	328
5.3.1 引言	252	6.3.1 引言	328
5.3.2 线性离散时间卡尔曼滤波	254	6.3.2 惯性导航的数学原理	328
5.3.3 非线性系统的卡尔曼滤波	256	6.3.3 惯性导航中的误差和辅助系统	332
5.3.4 简单应用实例：二维平面的移动机器人	260	6.3.4 应用实例：简单的里程计辅助姿态航向基准系统	335
5.3.5 关于卡尔曼滤波的实用信息	269	6.3.5 参考文献与延伸阅读	338
5.3.6 其他形式的卡尔曼滤波	274	6.3.6 习题	338
5.3.7 参考文献与延伸阅读	274	6.4 卫星导航系统	339
5.3.8 习题	275	6.4.1 引言	339
5.4 贝叶斯估计	276	6.4.2 工作原理	339
5.4.1 定义	276	6.4.3 状态测量	340
5.4.2 贝叶斯法则	278	6.4.4 性能参数	343
5.4.3 贝叶斯滤波	282	6.4.5 运行模式	345
5.4.4 贝叶斯建图	286	6.4.6 参考文献与延伸阅读	346
5.4.5 贝叶斯定位	292	6.4.7 习题	346
5.4.6 参考文献与延伸阅读	295	第7章 控制	348
5.4.7 习题	295	7.1 经典控制	348
第6章 状态估计	296	7.1.1 引言	348
6.1 位姿估计的数学基础	296	7.1.2 虚拟弹簧阻尼系统	351
		7.1.3 反馈控制	353
		7.1.4 参考模型和前馈控制	358
		7.1.5 参考文献与延伸阅读	361

7.1.6 习题	361	8.2.4 透镜、滤光片和反射镜	436
7.2 状态空间控制	362	8.2.5 参考文献与延伸阅读	439
7.2.1 引言	362	8.2.6 习题	440
7.2.2 状态空间反馈控制	363	8.3 感知传感器	440
7.2.3 应用实例：机器人轨迹跟踪	366	8.3.1 激光测距传感器	440
7.2.4 感知控制	370	8.3.2 超声波测距传感器	444
7.2.5 转向轨迹生成	372	8.3.3 可见光摄像机	445
7.2.6 参考文献与延伸阅读	377	8.3.4 中远红外波长摄像机	447
7.2.7 习题	378	8.3.5 雷达	449
7.3 预测控制的优化与建模	378	8.3.6 参考文献与延伸阅读	451
7.3.1 变分法	378	8.3.7 习题	451
7.3.2 最优控制	381	8.4 几何级与语义级计算机视觉概述	451
7.3.3 模型预测控制	385	8.4.1 像素级分类	451
7.3.4 求解最优控制问题的方法	387	8.4.2 计算立体视觉	453
7.3.5 参数化最优控制	390	8.4.3 障碍物探测	456
7.3.6 参考文献与延伸阅读	393	8.4.4 参考文献与延伸阅读	459
7.3.7 习题	394	8.4.5 习题	459
7.4 智能控制	394	第9章 定位和地图构建	462
7.4.1 引言	395	9.1 表示和问题	462
7.4.2 评价	397	9.1.1 引言	462
7.4.3 表达	399	9.1.2 表示	463
7.4.4 搜索	405	9.1.3 定时和运动问题	465
7.4.5 参考文献与延伸阅读	409	9.1.4 定位的相关问题	466
7.4.6 习题	410	9.1.5 结构概述	468
第8章 感知	411	9.1.6 应用实例：无人地面车辆的地形地图	469
8.1 图像处理算子与算法	411	9.1.7 参考文献与延伸阅读	473
8.1.1 计算机视觉算法分类	412	9.1.8 习题	473
8.1.2 高通滤波算子	413	9.2 视觉定位和运动估计	473
8.1.3 低通算子	417	9.2.1 引言	473
8.1.4 信号和图像匹配	418	9.2.2 定位和运动估计的信号对准	479
8.1.5 特征检测	420	9.2.3 用于定位和运动估计的特征匹配	483
8.1.6 区域处理	422	9.2.4 搜索最优位姿	488
8.1.7 参考文献与延伸阅读	425	9.2.5 参考文献与延伸阅读	496
8.1.8 习题	425	9.2.6 习题	497
8.2 非接触传感器的物理特性及原理	426	9.3 同步定位与地图构建	498
8.2.1 非接触传感器	426		
8.2.2 测距技术	427		
8.2.3 辐射信号	430		

9.3.1	引言	498	10.2.1	连续运动规划	517
9.3.2	循环构建地图的全局一致性	499	10.2.2	最优搜索的重要创意	522
9.3.3	回访检测	503	10.2.3	一致代价序贯规划算法	525
9.3.4	离散路标的 EKF SLAM	505	10.2.4	加权序贯规划	529
9.3.5	应用实例: 激光反射器的自动探测	508	10.2.5	序贯运动规划的实现	536
9.3.6	参考文献与延伸阅读	510	10.2.6	参考文献与延伸阅读	538
9.3.7	习题	511	10.2.7	习题	539
第 10 章	运动规划	512	10.3	实时全局运动规划: 在未知的动态环境中的移动	539
10.1	引言	512	10.3.1	引言	539
10.1.1	路径规划简介	513	10.3.2	有限深度搜索	541
10.1.2	路径规划的系统阐述	514	10.3.3	实时方法	543
10.1.3	无障碍运动规划	515	10.3.4	规划修正方法: D^* 算法	544
10.1.4	参考文献与延伸阅读	516	10.3.5	分层规划	551
10.1.5	习题	517	10.3.6	参考文献与延伸阅读	553
10.2	全局路径规划的表示与搜索	517	10.3.7	习题	553
			索引	554	

绪论

长久以来，用于汽车焊接的机械臂已经随处可见。然而，一种新型的机器人——移动机器人，其重要性和能力正在悄然不断地增长。经过几十年的发展，在遍布世界的机器人实验室的研究场景中，移动机器人已经能够从一个位置自动运动到另一个位置。移动性赋予机器人一种新的与人互动的能力，并使我们能够从一些无法完成的任务中解脱出来。

火星漫游车所取得的引人注目的巨大成功，使得移动机器人从科幻领域跨入现实，进入了公众的视线（图 1-1）。与此同时，诸如搏斗机器人之类的电视节目、日渐增多的机器人玩具，也越来越受到大众的欢迎。

机器人的移动性改变了一切。每当移动机器人运动时，它都需要面对千差万别的场地环境。与一台静止不动的机器人相比，移动机器人能够影响更大范围的周边环境，同时也更易受周边环境的影响。更为重要的是，对机器人而言充满危险的外部世界无法被人为改变，以迎合机器人的局限性，因此，移动性要求机器人具备更高的智能水平。即便对生物系统而言，在各种地点和环境中都能成功适应不同的需求和风险也是一项严峻的挑战。

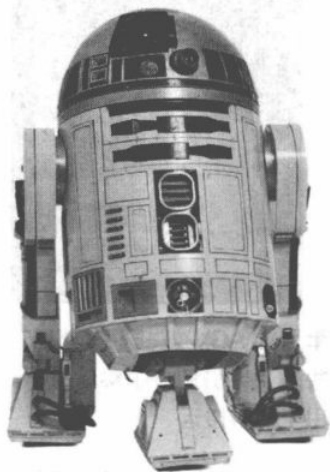


图 1-1 科幻小说成为现实。作者的很多同龄人是通过 1977 年上映的第一部《星球大战》电影知道了机器人和太空旅行。仅仅 20 年之后的 1997 年，我们基本不怀疑，我们自己为探路者任务设计的机器人能够在火星上四处运动

1.1 移动机器人应用

所有有动物、人类或者机动车辆等在其中执行任务的环境，都是移动机器人潜在的工作场合。一般而言，使用自动化技术的一些主要原因如下：

- 质量更好。制造商可以提高产品质量——可能源于更好的一致性、更易于检测或更容易控制。
- 速度更快。与其他方法相比，自动化技术由于生产效率的提高、停机时间的减少和资源消耗的降低，能够获得更高的生产力。
- 更安全。一旦机器能够成为一种可行的替代选择，有时人类可免于冒不必要的风险。
- 成本更低。使用机器人可以减少经费开支。机器人的保养维修成本与对应的人力驱动设备相比要低廉得多。
- 适应性。有些场景由于尺度或者环境未知的原因，人类不能涉足。

1.2 移动机器人分类

我们可以从如下维度对移动机器人进行分类，如物理特性和性能、适用的工作环境或者涉及的工作任务。几种不同类型的移动机器人如图 1-2 所示。

1.2.1 地面自主移动机器人

地面自主移动机器人（AGV）被设计用来在室内或室外环境下，以及在工厂、仓库和海运码头等地方进行物料搬运（该应用领域被称为物流）。利用 AGV，可以在工厂里运送汽车零部件、在出版公司搬运新闻纸、在核电站运输核废料等（见图 1-3）。



图 1-2 牵引式 AGV (美国费城 JBT 公司)。这些激光导引型自主移动机器人在工厂中用于物料搬运



图 1-3 集装箱跨运车。用于轮船上集装箱的装卸，这些自动化的运输车可能是目前已投入使用的最大尺寸的 AGV

早期的地面自主移动机器人利用预先埋设在地板上的金属感应线来实现导航。现代的 AGV 系统通常使用激光三角测量系统，或结合了断续安装在地板上的磁性信标的惯性导航系统。

利用无线通信技术，将所有的运输车辆与用于物流控制的中央计算机相连，是现代 AGV 系统的典型做法。AGV 可根据工况的不同进一步细分：拖动装载物料的拖车（牵引式 AGV），利用货叉实现物料的装载和卸载（叉车式 AGV），利用位于小车顶部的平台来传送物料（单元式载货 AGV）。

AGV 或许是移动机器人技术最为成熟的应用市场。一些公司依靠给相互竞争的众多运输车制造商出售器件和控制方案来生存，而运输车辆制造商也竞相给那些为特定应用提供解决方案的增值系统集成商提供产品。地面自主移动机器人不仅仅能够用于物料的搬运，卡车、火车、轮船和飞机的货物装卸，也将为自主移动车辆的后续发展提供潜在的应用空间。

1.2.2 服务机器人

服务机器人可执行服务行业中由人工完成的工作。有些服务工作，例如邮件、食品和药物等的分发投递，被看作一种“轻量型”的物料搬运，这与 AGV 的工作性质相类似。但是，更多的服务型任务具有需要与人进行更高水平的密切接触的特征，其范围涵盖从应对人群到解答问题。

如图 1-4 所示，医疗服务机器人可以给患者分发食物、饮用水、药物和阅读材料等。它

们也可以将生物样品、废弃物、病史档案和行政管理报告从医院的一个地方搬运到另外一个地方。

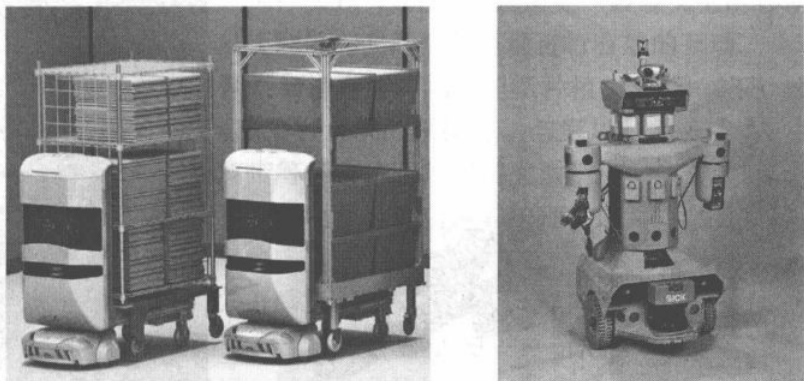


图 1-4 健康护理和监控服务机器人。(左图) 来自艾同 (Aethon) 公司, 在医院中用于搬运食品、亚麻布、病历报告、生物标本和生物垃圾的“牵引式”自动导引运输车。(右图) 名叫的罗巴特 (Robart) 的监控机器人, 定期扫描库房以防不受欢迎入侵者

监控机器人犹如自动化安全卫士。在有些场景中, 它们出色地穿越一片区域并轻易识别外来入侵者的自主能力颇具价值。这是最早被移动机器人制造商关注的应用之一。

3

1.2.3 清洁和草坪护理机器人

其他服务机器人包括那些用于公共场所、家庭地板清洁和草坪护理的机器 (见图 1-5)。清洁机器人主要用于机场、超市、大型购物中心、工厂等。它们执行的任务诸如清洗、扫除、真空处理、地毯清洗和垃圾清运等。

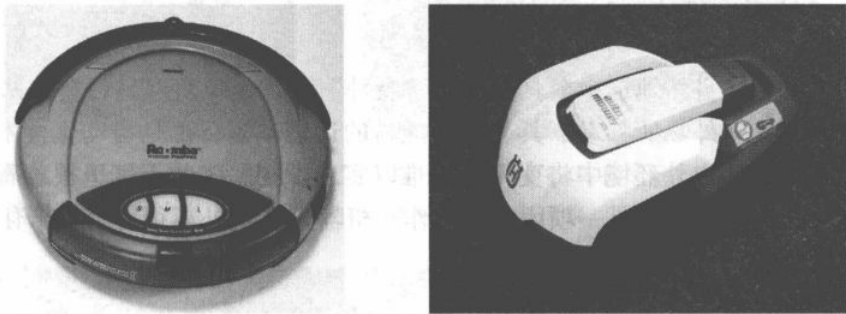


图 1-5 地板和草坪护理服务机器人。这种类型的移动机器人关注的是工作区域遍历问题, 它们试图“光顾”某预定义区域中的所有位置

这些服务机器人所关注的重点, 并不是到哪儿去或者携带什么物品的问题, 而是需要到达所有的角落至少一次。为了达到清洁的目的, 它们需要覆盖指定地板区域的所有部位。

1.2.4 社交机器人

社交机器人属于服务机器人的一种, 专门用于与人类之间的沟通互动 (见图 1-6)。通常它们的主要使命是传达信息或用于娱乐。虽然固定的信息亭也能够传达信息, 但是社交机器人由于某种原因需要具备灵活机动性。

4

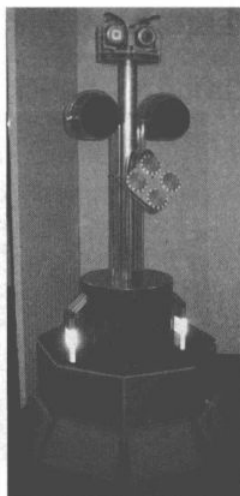
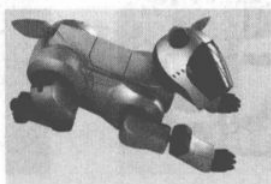
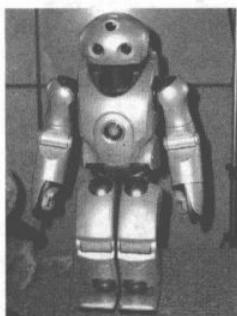


图 1-6 娱乐和导游机器人。(左图) 索尼 (SONY) 公司研发的能够依靠双足行走的机器人“克里奥”(QRIO); (中图) 索尼公司推出的电子宠物机器人“爱宝”(AIBO) 正在跳舞和表演; (右图) 导游机器人 EPFL 从一站运动到另外一站, 它的周围经常围满了观众, 此时 EPFL 正在讲解博物馆的展品

社交机器人的一些潜在应用场合包括在零售店(杂货店、五金店)回答关于商品位置的问题。在餐馆给孩子们发放汉堡的机器人也是非常有意思的。专为老年人和体弱多病者研发的机器人助手, 可以帮助它们的主人出行(机器人导盲犬)、活动或记住服药时间。

近年来, 索尼公司已经生产出一些令人印象深刻的机器人, 并将其投放市场, 目标是供机器人的主人娱乐消遣。最早出现的此类机器人被宣传包装为“宠物”。博物馆和展览会的自主导游机器人可以指导顾客游览特定的展区。

1.2.5 野外机器人

野外机器人在室外自然地形中极具挑战的“野外”环境下执行各种任务(见图 1-7)。几乎所有类型的、可在室外场所移动、具有作业能力的运输车辆, 都是自动化技术的潜在候选对象。绝大多数任务在户外环境中将变得更加难以实现。在恶劣的天气里很难看清事物, 决定如何穿越复杂的自然地形也是一项困难的工作。机器人在室外还很容易被卡住。



图 1-7 野外机器人。野外机器人必须与它所处的环境密切结合。(左图) 与左图所示的机器类似的半自动伐木归堆机, 被用来收集整理砍伐的树木; (右图) 自动挖掘机的原型机可进行大规模挖掘作业, 以应对那些需要在短时间内装载大量泥土的应用场景

各种能执行实际工作的野外移动平台，都要根据任务需求合理配置作业工具。于是，野外机器人从外观上看很像与之对应的人工操作的机器。野外移动机器人通常具有手臂和安装在移动底盘上的工具（一般称之为执行端）。因此，它们是更一般意义上的移动机器人实例，即机器人不仅能够随处移动，而且还能够与实际工作环境进行有效的互动。

在农业方面，野外机器人的现实和潜在应用场合包括种植、除草、施药（除草剂、杀虫剂、化肥等）、剪枝、收割，还有蔬菜、水果的采摘等。与家用割草任务相比，在公园、高尔夫球场以及高速公路的中间隔离带等场合，必须使用大型割草设备。专门用于割草的人工操作设备可以利用自动化技术来实现。对森林和苗圃的护理，以及对已成材树木的采伐，也是野外机器人潜在的应用场合。

野外机器人在矿业开采和洞穴开凿方面也存在各种各样的不同应用潜力。在地面，露天矿山的挖掘机、装载设备、岩石运输卡车都已经实现了自动化；地下钻孔机、锚杆施工机、连续采煤机和用来完成装载—拖运—倾卸作业的铲运机（LHD）也都已经实现了自动化。

1.2.6 检测、侦查、监控和勘探机器人

检测、侦查、监控和勘探机器人也属于野外机器人，它们都是基于移动平台并配置相应的装置，以对某一区域进行检测，或者查找、探测位于某一区域内的物体（见图 1-8）。通常，使用机器人的最恰当的理由是：由于环境太危险，不能为了完成工作任务而让人类冒如此的风险。很显然，机器人需要面对诸如此类的工作环境，包括遭受强核辐射的地区（需深入核电站内部），某些军队和警察任务场景（如侦查、排爆），以及太空探索。



图 1-8 勘探机器人。（左图）军用机器人用于探索对士兵可能具有危险性的环境；（右图）火星科学实验室正在火星上极为恶劣的环境中寻找生命迹象

在能源部门，可以使用机器人检测核反应堆部件或装置，包括蒸汽发生器、压力排管和废物储存罐。机器人还可以用来检测高压输电线，也可以用于供气和输油管道的铺设或维护。遥控式水下无人潜器的自主控制能力日益增强，利用水下潜器可以检测安装在海底的石油钻井设备，如石油钻塔、通信电缆，甚至还可以帮助搜寻失事船只残骸，例如泰坦尼克号。

最近几年中，开发机器人士兵的研究工作开展得尤为火热。机器人车辆被认为可以肩负起承担多种军事任务的使命，例如军事侦查和监控、部队补给、雷区定位测绘、扫雷和救护。军用车辆的生产制造商正在努力攻关，力争在自己的产品中植入各种机器人技术。爆炸物处理是一个业已存在、具有无限商机的市场。

在太空探索中，一些机器人车辆已经能够在火星表面自主移动几公里远；在推进器驱动下围绕太空站运行的空间机器人，其概念也已经摆到设计蓝图上一段时间了。

1.3 移动机器人工程

1.3.1 移动机器人子系统

一旦我们尝试构建具备自主移动能力的系统，许多明显的挑战随即纷至沓来。在能力概念层级的最底层，是机器人的自动控制能力。实现自动控制涉及感知驱动器状态，例如转向角、速度或者车轮转速，并给这些驱动器赋予精确的能量，从而使它们输出正确的驱动力。然而，实现有效的四处移动需要的不仅仅是油门、方向盘和发动机都按照指令运行，还需要有一位驾驶员。本书主要讲述如何构建这样一位驾驶员。

通常，导航的一个目标是能够运动到某一特定的位置，或者遵循确定路径运动。为了实现这一目标，需要建立一个车辆状态估计系统，以实时掌握移动车辆的位置。如果前进道路上没有障碍物，导航和控制技术就能够使移动机器人从一个位置运动到另外一个位置（即便闭着眼睛）。但是如果存在障碍物怎么办？对感知的需求，即理解当前周边环境的能力，来源于多种不同的情况，包括沿视野中的道路运动、避开一棵倒下的大树、成功识别出正在搜寻的对象等。

然而这种对环境的理解感知仅仅能够作为智能的一个方面，智能的另外一个方面是规划。规划是一种从多种可选行动方案中预测结果的能力，也是针对当前状态，从中选择最佳方案的能力。为了预测环境和移动车辆之间的相互作用，机器人规划通常既需要环境模型，也需要车辆模型。环境模型又称为机器人地图，该模型可用于确定移动车辆的运动方向。

机器人地图可以外部构建生成，也可以由车载建图系统产生。车载建图系统利用导航和感知系统，记录移动机器人在正确的相对位置感知的主要对象特征。除了有助于路径规划，机器人地图还有其他用途。如果地图同时记录了感知对象及其所处的位置坐标，机器人就可以据此确定自身在地图中所处的位置。如果机器人能够把它当前实际感知到的对象与应该看见的对象相匹配，就可以据此判断自己是否处于场景中某一特定的假设位置。

1.3.2 全书概述

本书将讨论上述所有子系统的各个方面，按照机器人在样机构建过程中相关系统的研发、集成和测试顺序来介绍。

本书首先介绍数学基础（第2章）、数值方法（第3章）、物理模型（第4章），这些都是其余后续内容的重要基础。此后将根据需要逐步引入数学、建模和方法等相关附加内容。第5章首先引入概率论的相关理论知识，然后介绍了对移动机器人具有重要意义的高级主题——最优估计。利用最优估计技术，能够更为有效地解决移动机器人定位和环境探测问题。接下来讲述状态估计（第6章），因为状态估计为移动控制提供了基本的反馈信息。其中也清楚地讲述了移动机器人的一些特有问題。正如我们即将认识到的，与如何准确地获知机器人真实运动或其所处的位置相比，移动问题通常并不难。

随后的第7章介绍控制系统设计和分析。这一章所介绍的基础技术，用来使被控对象按照可控且有意图的方式运动。控制能够使移动机器人以某一特定速度、曲率运动到指定的目标位置和朝向；也能够使任意关节运动到指定点、打孔或拾取某一空间物体。一旦将感知技术（第8章）附加到基本运动平台，事情就立刻变得有趣了。突然之间，移动系统可能就可以寻找东西、识别对象、跟随或躲避人类。通常而言，机器人在局部区域的运动效果会更加令人满意。这样的系统也可以在小范围内完成地图构建，并基于状态估计的结果规划移动机