

Roland Siegwart · Illah R. Nourbakhsh

# 自主移动机器人导论

〔美〕 R·西格沃特 著  
I·R·诺巴克什

李人厚 译

Introduction to

## Autonomous Mobile Robots



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

Introduction to Autonomous Mobile Robots

# 自主移动机器人导论

[美] R·西格沃特 著  
I·R·诺巴克什

Roland Siegwart

Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne

Illah R. Nourbakhsh

Carnegie Mellon University

李人厚 译



西安交通大学出版社

Xi'an Jiaotong University Press

## 内 容 提 要

任何成功的机器人的设计涉及到运动学、信号分析、信息论、人工智能和概率论等多个不同学科的综合。为此,本书提出了一系列交互模块中,使移动性成为可能的技术和制作工艺。随着各章内容的深入,覆盖了移动机器人学的各个方面,包括硬件设计、轮子设计、运动学分析、传感器、感知、定位、作图,以及机器人控制体系结构。本书把移动机器人的所有方面集成为一个整体,既适合作为我国各高等院校自动化、机器人学等专业的研究生教材,也可提供其他相关专业的科技人员参考。

Roland Siegwart and Illah R. Nourbakhsh  
Introduction to Autonomous Mobile Robots

ISBN:0-262-19502-X

Copyright©2004 by Massachusetts Institute of Technology

Original language published by Massachusetts Institute of Technology. All rights reserved. No part of this book may be reproduced in any form by any electronic or mechanical means (including photocopying, recording, or information storage and retrieval) without permission in writing from the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by Massachusetts Institute of Technology and Xi'an Jiaotong University Press.

本书中文简体字翻译版由美国 MIT 出版社授权西安交通大学出版社出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制和抄袭本书的任何部分。

陕西省版权局著作权合同登记号:25-2005-069 号

### 图书在版编目(CIP)数据

自主移动机器人导论 / (美)西格沃特(Siegwart, R.), (美)诺巴克什(Nourbakhsh, I. R.)著; 李人厚译. —西安:西安交通大学出版社, 2006. 8

书名原文: Introduction to Autonomous Mobile Robots

ISBN 7-5605-2161-4

I. 自... II. ①西... ②诺... ③李... III. 移动式机器人-简介 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 097231 号

书 名 自主移动机器人导论  
著 者 [美]R·西格沃特 I·R·诺巴克什  
译 者 李人厚  
出版发行 西安交通大学出版社  
地 址 西安市兴庆南路 25 号(邮编:710049)  
电 话 (029)82668357 82667874(发行部)  
(029)82668315 82669096(总编办)  
电子邮件 xjtupress@163.com  
印 刷 陕西宝石兰印务有限责任公司  
字 数 266 千字  
开 本 727 mm × 960 mm 1/16  
印 张 21  
印 次 2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷  
印 数 0 001~3 000  
书 号 ISBN 7-5605-2161-4 / TP·432  
定 价 37.00 元

版权所有 侵权必究

## 序 言

移动机器人学是一个年轻的领域。它的基础包括了许多工程和科学学科,从机械、电气和电子工程到计算机、认知和社会科学。这些主要领域,各有它们介绍性的教科书部分,用以激励和鼓舞新的学生,为他们以后的高级课程和研究做准备。著述本书的目的是给移动机器人学提供预备性的指导。

本书对移动机器人学的基础进行了介绍,其范围包括构成本领域的机械、电机、传感器、感知和认知等各个方面。我们知道,专题学术讨论会的论文集和期刊发表的论文,可以向新学生提供移动机器人学所有方面的技术发展水平的简单印象。但在这里,我们的目的是提供基础知识——该领域的正式介绍。正当技术发展的前沿因所有移动机器人学的分支学科迅速进步而向前推进的时候,书中的形式描述和分析,会证明是有用的。

我们希望,本书能向机器人学本科和研究生,提供他们整个职业生涯中,评估甚至评审移动机器人的方案和产品所需要的基础知识和分析工具。总体而言,本教科书作为概论性的移动机器人学的课本,既适合于本科生,又适合于研究生。个别章节,如感知或运动学,可以作为有关机器人学的特殊子领域中更专门的课程的综述。

本书的起源横跨大西洋。作者在美国斯坦福大学、瑞士联邦理工大学(苏黎世)、美国卡内基梅隆大学和瑞士联合工业大学(洛桑)为本科生和研究生教授过移动机器人学课程。它们的课程资料和讲义的组合形成了本书最初的版本。我们已综合了各自的笔记,提出了总的架构,并且在此教材决定出版之前又试教了两年。

本书组织的纵览和各章概要请参阅 1.2 节。

最后,对教师和学生而言,我们希望,对机器人学众多的发展,本书证实是一个具有富有成果的起始点,那就是对我们莫大的奖励了。

# 目 录

## 序言

### 第1章 引言

- 1.1 引言 ..... (1)
- 1.2 本书综述 ..... (11)

### 第2章 运动

- 2.1 引言 ..... (13)
  - 2.1.1 运动的关键问题 ..... (17)
- 2.2 腿式移动机器人 ..... (18)
  - 2.2.1 腿的构造与稳定性 ..... (18)
  - 2.2.2 腿式机器人运动的例子 ..... (21)
- 2.3 轮式移动机器人 ..... (31)
  - 2.3.1 轮子运动:设计空间 ..... (31)
  - 2.3.2 轮子运动:实例研究 ..... (39)

### 第3章 移动机器人运动学

- 3.1 引言 ..... (47)
- 3.2 运动学模型和约束 ..... (48)
  - 3.2.1 表示机器人的位置 ..... (49)
  - 3.2.2 前向运动学模型 ..... (51)
  - 3.2.3 轮子运动学约束 ..... (54)
  - 3.2.4 机器人运动学约束 ..... (61)
  - 3.2.5 举例:机器人运动学模型和约束 ..... (63)
- 3.3 移动机器人的机动性 ..... (67)
  - 3.3.1 活动性的程度 ..... (67)

3.3.2	可操纵度	(72)
3.3.3	机器人的机动性	(73)
3.4	移动机器人工作空间	(75)
3.4.1	自由度	(75)
3.4.2	完整机器人	(76)
3.4.3	路径和轨迹的考虑	(78)
3.5	基本运动学之外	(82)
3.6	运动控制	(82)
3.6.1	开环控制	(83)
3.6.2	反馈控制	(84)

#### 第4章 感知

4.1	移动机器人的传感器	(91)
4.1.1	传感器分类	(91)
4.1.2	表征传感器的特性指标	(93)
4.1.3	轮子/电机传感器	(100)
4.1.4	导向传感器	(101)
4.1.5	基于地面的信标	(104)
4.1.6	有源测距	(107)
4.1.7	运动/速度传感器	(119)
4.1.8	基于视觉的传感器	(120)
4.2	表示不确定性	(149)
4.2.1	统计的表示	(149)
4.2.2	误差传播:对不确定的测量进行组合	(153)
4.3	特征提取	(155)
4.3.1	基于距离数据的特征提取(激光、超声和基于视觉测距)	(158)
4.3.2	基于可视表象的特征提取	(166)

#### 第5章 移动机器人的定位

5.1	引言	(185)
5.2	定位的挑战:噪声和混叠	(186)
5.2.1	传感器噪声	(187)
5.2.2	传感器混叠	(188)
5.2.3	执行器噪声	(189)

5.2.4	里程表位置估计的误差模型 .....	(191)
5.3	定位或不定位:基于定位的导航与编程求解的对比.....	(196)
5.4	信任度的表示 .....	(199)
5.4.1	单假设信任度 .....	(199)
5.4.2	多假设信任度 .....	(202)
5.5	地图表示方法 .....	(205)
5.5.1	连续的表达方法 .....	(205)
5.5.2	分解策略 .....	(208)
5.5.3	发展水平:地图表示方法的最新挑战.....	(215)
5.6	基于概率地图的定位 .....	(218)
5.6.1	引言 .....	(218)
5.6.2	马尔可夫定位 .....	(221)
5.6.3	卡尔曼滤波器定位 .....	(235)
5.7	定位系统的其他例子 .....	(251)
5.7.1	基于路标的导航 .....	(252)
5.7.2	全局唯一定位 .....	(253)
5.7.3	定位信标系统 .....	(255)
5.7.4	基于路由的定位 .....	(257)
5.8	自主地图的构建 .....	(257)
5.8.1	随机构图的技术 .....	(258)
5.8.2	其他的构图技术 .....	(261)

## 第6章 规划与导航

6.1	引言 .....	(265)
6.2	导航能力:规划和反应.....	(266)
6.2.1	路径规划 .....	(268)
6.2.2	避障 .....	(281)
6.3	导航的体系结构 .....	(300)
6.3.1	代码重用与共享的模块性 .....	(300)
6.3.2	控制定位 .....	(301)
6.3.3	分解技术 .....	(302)
6.3.4	实例研究:分层机器人结构.....	(308)

## 参考文献

# 第 1 章 引 言

## 1.1 引言

至今,在工业制造中,机器人学已取得了最伟大的成功。机器人手臂或机械手,构成了 20 亿美元的工业产值。在装配线中,把机器人的肩膀用螺栓固定在特定位置上,机器人的手臂可以极快速度和极高精度移动,完成重复性任务,如点焊和喷漆等(图 1.1)。在电子工业中,机械手以超人的精度安放装在表面的元件,可制造便携式电话和笔记本电脑。

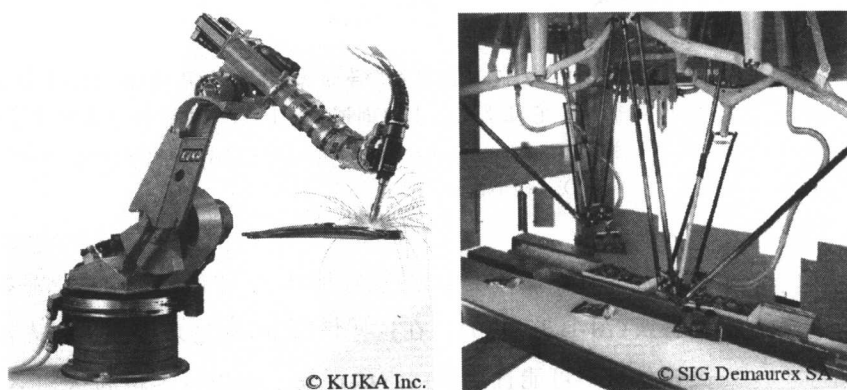


图 1.1 在巧克力包装时自动装配厂焊接机器人 KUKA 和 SIG Demareux SA (EPFL<sup>[140]</sup>创作)的平行机器人 Delta 的照片



但是,对于所有的这些成功应用,商用机器人存在着一个根本的缺点:缺乏机动性。固定的机械手被插销在固定地方,其运动范围是有限的。相反,移动机器人能够行走,穿过整个制造工厂,灵活地在它最有效的地方施展它的才能。

本书着重于研究机动性技术:移动机器人如何能够无监督地移动,穿过现实世界环境完成它的任务?第一个挑战的问题是运动本身,机器人应该怎样运动?什么是它的特殊运动机构,使它优于别的运动机构?

恶劣环境,诸如在金星,引发了更为不寻常的运动机构(图 1.2)。

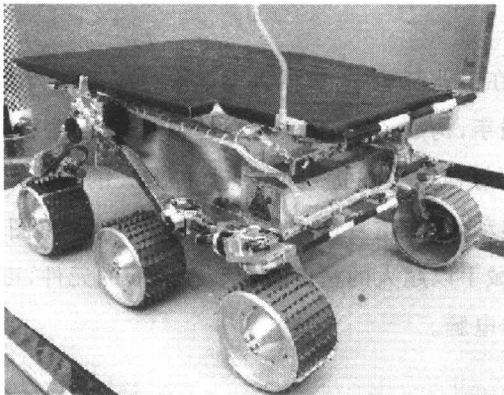


图 1.2 1997 年夏季,在探险者探索金星期间所使用的 Sojourner(旅居者)机器人。它几乎完全由地面遥控。但某些机载传感器考虑了障碍检测([http://ranier.oact.hq.nasa.gov/telerobotics\\_page/telerobotics.shtm](http://ranier.oact.hq.nasa.gov/telerobotics_page/telerobotics.shtm))。© NASA/JPL

在危险和荒凉的环境中,甚至在地球上,这种远距离操纵系统已经得到普及(图 1.3~1.6)。在这些情况下,低复杂度的机器人常常使人类操作员不可能直接控制它的运动。人执行定位和认知活动,但依靠机器人的控制方案提供运动控制。

例如,Plustech 的行走机器人提供腿的自动协调,而人类操作员选择行走的总体方向(图 1.3)。图 1.6 描述的是水下车辆,它控制



图 1.3 Plushtech 开发的第一个应用驱动的行走机器人。它专门移动砍伐森林的木材。其腿的协调是自动的,但导航依旧由机器人上的人类操作员进行(<http://www.plustech.fi>)。© Plustech

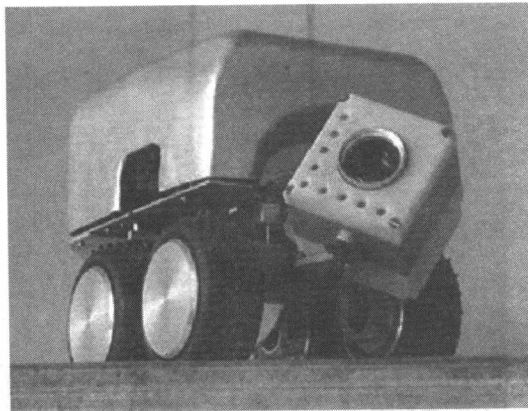


图 1.4 通风管道监测机器人。它以带有变焦距和传感器的全倾斜的摄像机为特征,用作倾斜控制、墙壁跟踪、和交叉口检测(<http://asl.epfl.ch>)。© Sedirep/EPFL



图 1.5 先锋号图片,在切尔诺贝利专门探索石棺的机器人。© Wide World Photos

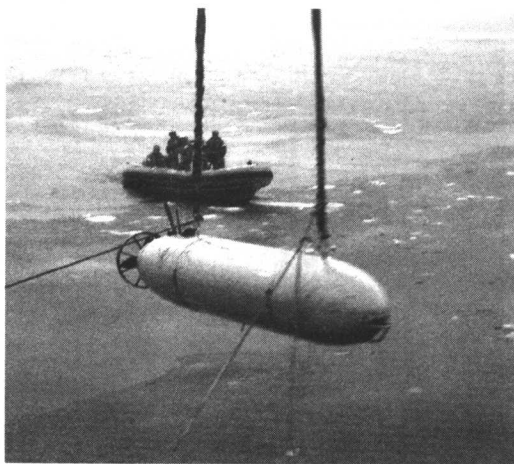


图 1.6 图片:MBARI's ALTEX AUV(自主水下车辆)回收到破冰船 Healy,接着潜入北极冰下。Todd Walsh © 2001 MBARI

6个推进器,不管水下湍流和水流如何,都能自主地稳定机器人潜水艇,而操作员要做的则是选择潜水艇要达到的目标位置。

其他商业机器人不是在人类不能去的地方运行,而是在人类环境中与人共享空间(图 1.7)。这些机器人之所以引人注目不是因为它们的机动性,而是因为**自主性**。所以,它们在无人干预的情况下,保持对位置的感觉和导航能力是极为重要的。

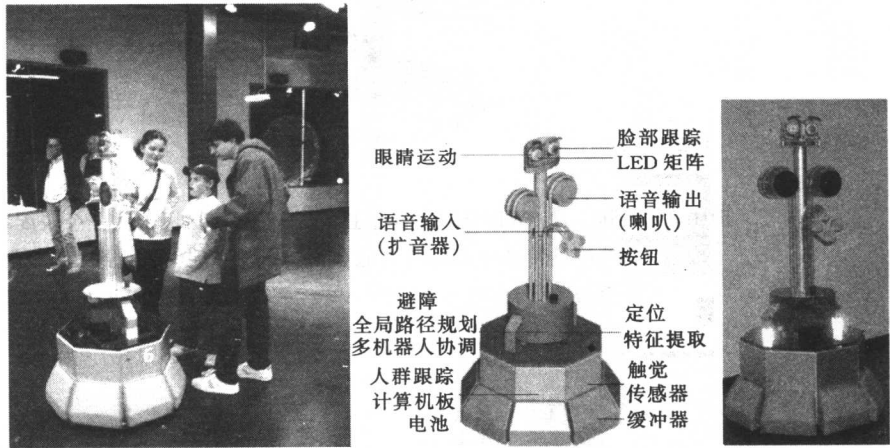


图 1.7 导游机器人能够以教育的方式在展览会上做介绍和交流<sup>[48,118,132,143]</sup>。10 个机器人已经在为期 5 个月的瑞士展览会 EXPO.02 上会见无数参观者。机器人由 EPFL<sup>[132]</sup>(<http://robotics.epfl.ch>)开发,由 BlueBot-ics(<http://www.bluebotics.ch>)商品化

例如,AGV (autonomous guided vehicle, 自主导向车) 机器人(图 1.8),可跟踪用定制传感器做成的专用导向电线,自主地在不同装配站之间分发零件。

Helpmate 服务机器人跟踪天花板上灯的位置走遍医院,传送食物和药品,天花板的灯被人为地指向机器人的前方(图 1.9)。好几个公司已开发了自主清洁机器人,主要用于大型楼宇(图 1.10)。一种这样的机器人正用在巴黎地下铁道。其他专门的清洁机器人利用超市过道正规的几何图式,促进定位和导航任务。

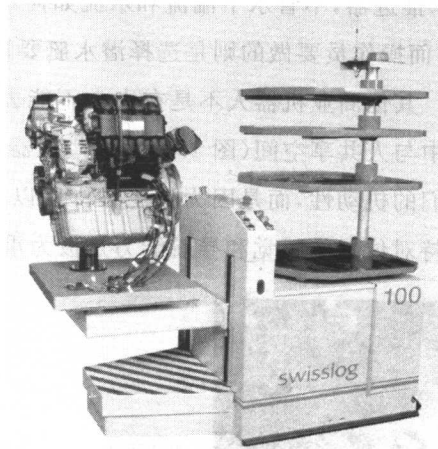


图 1.8 最新一代 SWISSLOG 的自主导向车 (AGV), 用于从一个装配站到另一装配站传送电机部件。它受装在地板的电线引导。在工业、仓库甚至医院中, 由成千上万的 AGV 传送产品。© Swisslog

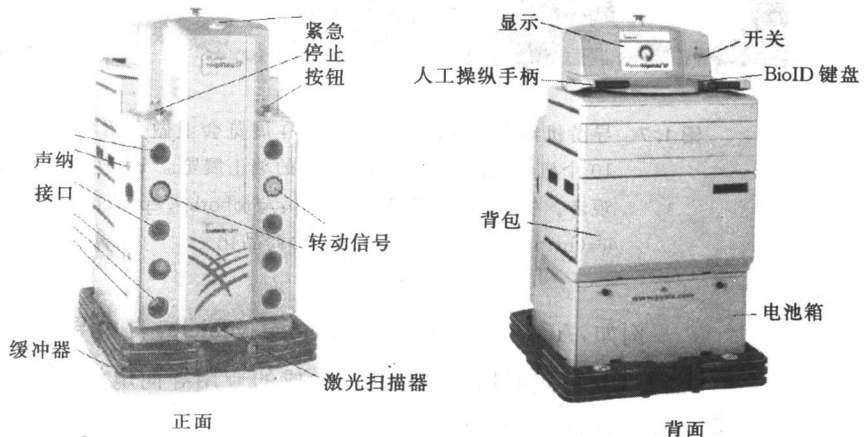
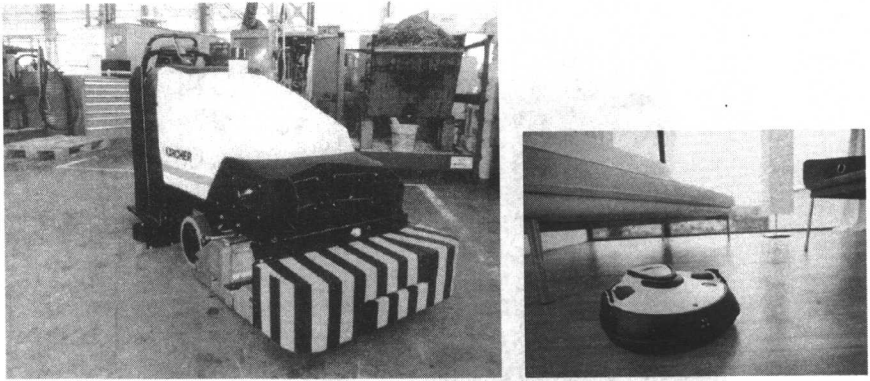


图 1.9 HELPMATE 是用于医院传送任务的移动机器人。它有各种走廊中自主导航、机装的传感器, 定位的主传感器是朝向天花板看的摄像机。它可以以天花板的灯或路标作参考 (<http://www.pyxis.com>)。© Pyxis Corp



**图 1.10** 由德国 Alfred Karcher GmbH & Co. 公司开发和销售的 BR 700 工业清扫机器人(左边)和 RoboCleaner RC 3000 家用机器人。BR 700 的导航系统是基于非常复杂的声纳系统和一个陀螺。RoboCleaner RC 3000 具有特定的驱动策略,它覆盖从严重污染区域直到真正干净区域。光学传感器用来测量所吸空气的污染程度(<http://www.karcher.de>)。© Alfred karcher GmbH & Co

利用标准的、调整为实验室环境服务的机器人研究平台,可以进行认知、定位和导航等高层次问题的深入研究。这是移动机器人当今最大的市场之一。根据尺寸和地形可能性分类,现在有各种编程移动机器人平台。最普遍研究的机器人是那些 ActivMedia Robotics、K-Team SA 和 IRobot(图 1.11~1.13),以及小型机器人,如 EPFL(洛桑的瑞士联邦理工大学)的 Alice(图 1.14)。

虽然,如上所述,移动机器人有应用和市场的广阔范畴,但真正非常成功的移动机器人有一个千真万确的事实:它的设计包含了许多不同知识体的集成。了不起的是,这使移动机器人学达到了成为一个交叉学科领域的程度。为了解决运动问题,移动机器人专家必须了解机械机构、运动学、动力学和控制理论。为了建立鲁棒的感知系统,移动机器人专家必须沟通信号分析领域和专门的知识体系,如计算机视觉等,以便适当地使用众多的传感器工艺技术。定位和导航方面需要计算机算法、信息论、人工智能和概率论知识。

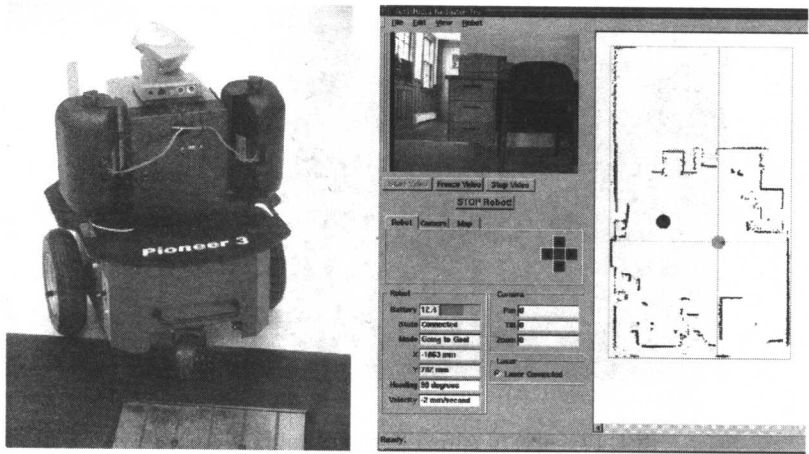


图 1.11 PIONEER(先锋)是一个模块移动机器人。它提供各种选择,像钳子或机装的摄像机等。它装备了由加利福尼亚斯坦福 SRI 开发的精密复杂的导航数据库(复印得到 ActivMedia Robotics 允许, <http://www.MobileRobots.com>)

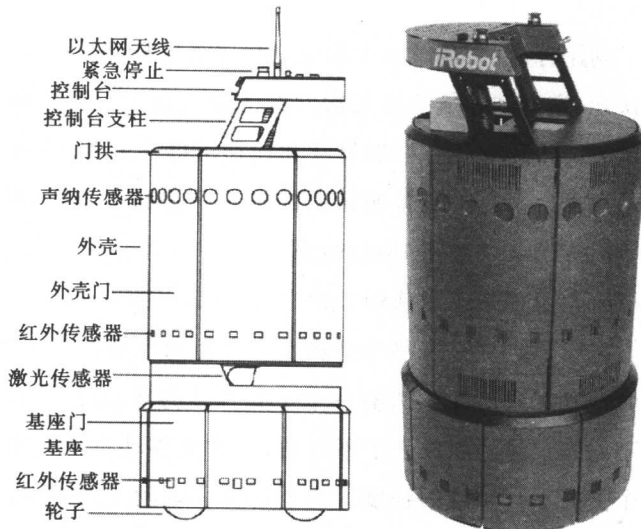


图 1.12 iRobot 的 B21 是一个精密复杂移动机器人,机装 3 个英特尔奔腾处理器。它具有为高性能导航任务而配备的众多类型的传感器(<http://www.irobot.com/rwi/>)。© iRobot Inc

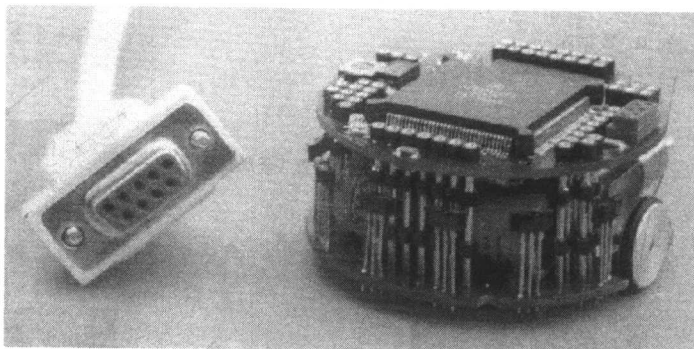


图 1.13 KHEPERA 是研究和教育用的小型机器人,直径大约只有 60 mm。它有各种附加模块,如钳子或摄像机等。到 1998 年年底已经销售了 700 台以上。KHEPERA 由瑞士 K-Team SA 制造和分销 (<http://www.k-team.com>)。© K-Team SA

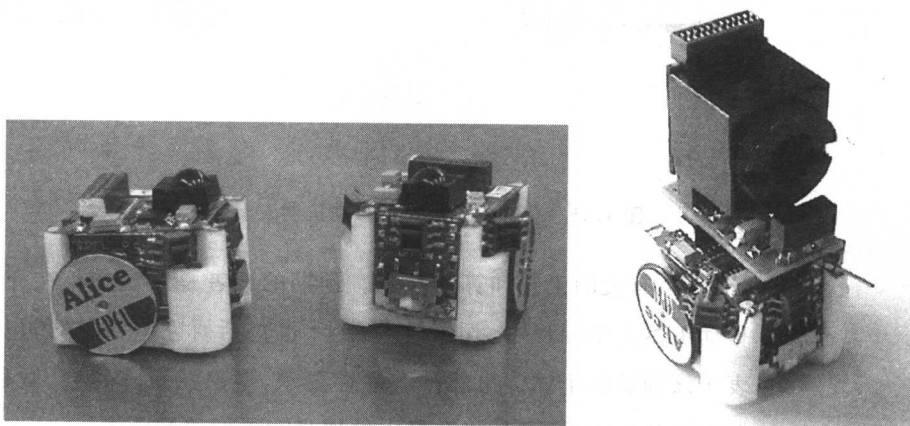


图 1.14 Alice 是最小的全自主机器人之一,它体积约为  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ ,它具有约 8 h 的里程表,并使用红外测距传感器、触觉触须线,甚至有导航的小摄像机<sup>[54]</sup>

图 1.15 表示了贯穿本书要用到的移动机器人系统的抽象控制方案。该图确认了与移动机器人相关的许多知识主体。

本书对移动机器人学的所有方面作了介绍,包括软件和硬件设



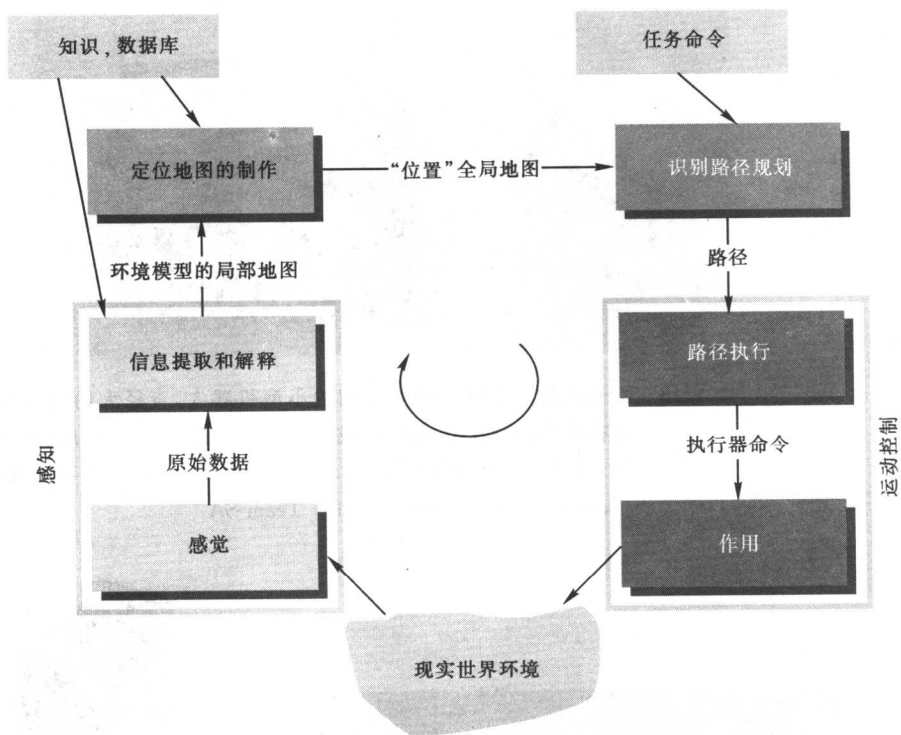


图 1.15 贯穿本书所用的移动机器人参考控制方案

计考虑、有关的工艺和算法技术。预期的读者是广泛的。在介绍性移动机器人学课程中,既包括本科生,也包括研究生,同样还包括热衷于该领域的个体。虽然没有硬性要求,但熟悉矩阵代数、微积分、概率论和计算机程序,将会极大地增强读者的接受能力。

移动机器人学是一个很大的领域,本书并不着重于一般性机器人学,也不把重点放在移动机器人的应用上,而是放在移动性本身。从机制和感知到定位和导航,本书重点放在能使之鲁棒移动的技术和工艺学上。

显然,一个有用的、商业上可行的移动机器人完成的不只是移动。它可以用在擦亮超市地板,在工厂守卫,打扫高尔夫球场,在博物馆做导游,或在超市提供导购。有抱负的移动机器人工作者将从