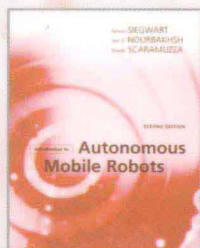
 国外名校最新教材精选

自主移动机器人导论

Introduction to Autonomous Mobile Robots

[美] R·西格沃特
I·R·诺巴克什 著
D·斯卡拉穆扎
李人厚 宋青松 译


(第2版)



and Siegwart
ian R. Nourbakhsh
Davide Scaramuzza



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

 国外名校最新教材精选

Introduction to Autonomous Mobile Robots

自主移动机器人导论

(第2版)

R·西格沃特

[美] I·R·诺巴克什 著

D·斯卡拉穆扎

Roland Siegwart

Swiss Federal Institute of Technology, Zurich

Illah R. Nourbakhsh

Carnegie Mellon University

Davide Scaramuzza

Swiss Federal Institute of Technology, Zurich

李人厚 宋青松 译



西安交通大学出版社

Xi'an Jiaotong University Press

Roland Siegwart, Illah R. Nourbakhsh and Davide Scaramuzza

Introduction to Autonomous Mobile Robots, 2nd

ISBN: 978-0-262-01535-6

Copyright©2011 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图字 25-2012-062 号

图书在版编目(CIP)数据

自主移动机器人导论:第2版 / (美)西格沃特(Siegwart, R.), (美)诺巴克什(Nourbakhsh, I. R.), (美)斯卡拉穆扎(Scaramuzza, D.)著;李人厚,宋青松译.

—西安:西安交通大学出版社,2013.5

书名原文:Introduction to Autonomous Mobile Robots, 2nd

ISBN 978-7-5605-4548-6

I. ①自… II. ①西…②诺…③斯…④李…⑤宋… III. ①移动式机器人
IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 210129 号

书 名 自主移动机器人导论(第2版)
著 者 (美)R·西格沃特 I·R·诺巴克什 D·斯卡拉穆扎
译 者 李人厚 宋青松

出版发行 西安交通大学出版社
地 址 (西安市兴庆南路10号 邮政编码710049)
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)
电子邮件 xjtupress@163.com
印 刷 西安建科印务有限责任公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 21.625
印 数 0001~3000 字数 424千字
版次印次 2013年5月第1版 2013年5月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-4548-6/TP·577
定 价 58.00元

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665380

读者信箱:banquan1809@126.com

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。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。由于移动机器人学的分支学科迅速进步,我们正处在技术发展的前沿且向前推进的时刻,书中的形式描述和分析,会证明是有用的。

本书第2版大大扩充了第1版的内容。特别是第2、4、5和6章的内容已极大地扩展,涵盖了计算机视觉和机器人学方面最新技术发展水平的知识。尤其是在第2章中,我们加入了运动、腿式和微型飞行机器人的最新和最普及的实例。在第4章里,我们加入了对新的传感器,诸如3D激光测距仪、飞行时间摄像机、IMU(惯性测量单元)和全向摄像机,与工具诸如图像滤波、摄像机标定、立体结构、运动结构、可视里程表、摄像机最普及的特征检测器(Harris、FAST、SURF和SIFT)和激光图像,以及最后,位置辨识和图像检索的特征包方法的描述。在第5章中,我们加入了对概率论的介绍,并用更好的形式描述方法和更多的例子,改进并扩充了对马尔可夫和卡尔曼滤波器定位的阐述。而且,我们还加入了对同时定位和制图(SLAM)问题的叙述,随后说明了求解该问题的最普通的方法,如扩展卡尔曼滤波器SLAM、基于图形的SLAM、粒子滤波器SLAM,以及最新的单目可视的SLAM。最后在第6章里,我们补充了对路径规划的图像-搜索算法的描绘诸如宽度优先、深度优先、Dijkstra、A*、D*,以及快速探索随机树。除了这些诸多新加内容外,我们还提供了技术发展的参考文献和在线资源以及可下载的软件(见本书网站:<http://www.mobilerobots.org>)。

我们希望,本书能为机器人学的本科和研究生提供基础知识和分析工具。在

他们的整个职业生涯中,当评估甚至评审移动机器人的方案和产品时会非常需要这些知识和工具。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,也适合于研究生。其中的个别章节,如感知或运动学,在机器人学的特殊子领域更深入的课程中可以用作综述。

本书的起源横跨大西洋。作者在美国斯坦福大学、瑞士苏黎士联邦理工学院(ETH)、美国卡内基梅隆大学和瑞士洛桑联邦理工学院(EPFL)为本科生和研究生教授过移动机器人学课程。这些课程资料和讲义笔记的组合,形成了本书最初的版本。我们已组合了各自的笔记,提出了总的架构,并且决定在2004年出第一版之前用此教材试教了2年,然后对目前出版的书又另用了6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,本书对移动机器人学众多的专业人员来说,如果被证明是一个具有富有成果的起始点,那将是对我们最大的褒奖了。

致 谢

本书是瑞士苏黎世联邦理工学院(ETH)和洛桑联邦理工学院(EPFL)、匹兹堡卡内基美隆大学(CMU)机器人研究所,以及全球许多其他地方的众多研究者和学生的启迪与贡献的结晶。

我们要感谢移动机器人学的所有研究人员,通过他们与学界共享目标和愿景,使这个领域变得如此丰富和鼓舞人心。正是他们的著作,使我们能够为本书搜集到丰富的资料。

为本书再版最有价值和提供直接支持与贡献的是来自我们当前 ETH 的合作群体。我们要感谢 Friedrich Fraundorfer 对位置辨识这一节的贡献;感谢 Samir Bouabdallah 对飞行机器人这一节的贡献;感谢 Christain David Remy 对动力学考虑这一节的贡献;感谢 Martin Rufli 对路径规划的贡献;感谢 Agostino Mrtinelli 对某些方程式细致的核对;感谢 Deon Sabatta 和 Jonathan Classens 对某些章节的仔细的评阅和他们富有成果的讨论;也感谢 Sarah Bulliard 的有用的建议。进而,我们要再次强调我们对本书第一版做出贡献的人们的感谢。特别要感谢 Kai Aras 对不确定性表示和卡尔曼滤波器定位的贡献;感谢 Matt Mason 对运动学的贡献;感谢 Al Rizzi 对反馈控制方面导航的贡献;感谢 Roland Philippsen 和 Jan Persson 对避障的贡献;感谢 Gilles Caprari 和 Yves Pigue 对移动控制输入和建议的贡献;感谢 Marco Lauria 对某些图示奉献了她的天赋;感谢 Marti Louw 对封面设计所作的努力;还要感谢 Nicoola Tomatis、Remy Blank 和 Maric-Jo Pellaud。

本书也受其他课程的启发,特别是受到瑞士联邦理工学院(不论是在苏黎世还是在洛桑)有关移动机器人学讲义的启发。自 1997 年以来,本书的素材一直被用作 EPFL、ETH 和 CMU 的教程。我们要感谢数以百计的学生,他们继承了教程,并通过校正和评论为本书做出了贡献。

我们与本书的出版者 MIT 出版社一直合作愉快。感谢 Gregory McNamee 对本书细致和宝贵的文字编辑;感谢 MIT 出版社的 Ads Brunstein、Katherine Almeida、Abby Streeter Roake、Marc Lowenthal 和 Susan Clark 在本书编辑和最后定稿中的帮助。

与本书有关的丰富教学资源可查阅以下网址：
<http://www.mobilerobots.org>

目 录

序言

致谢

第 1 章 引言	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 本书综述	(9)
第 2 章 运动	(11)
2.1 引言.....	(11)
2.1.1 运动的关键问题.....	(14)
2.2 腿式移动机器人.....	(14)
2.2.1 腿的构造与稳定性.....	(15)
2.2.2 动力学考虑.....	(18)
2.2.3 腿式机器人运动的例子.....	(20)
2.3 轮式移动机器人.....	(28)
2.3.1 轮式运动:设计空间	(28)
2.3.2 轮式运动:实例研究	(34)
2.4 飞行移动机器人.....	(39)
2.4.1 引言.....	(39)
2.4.2 飞机器结构.....	(41)
2.4.3 自主 VTOL 最新技术水平	(42)
2.5 习题.....	(44)
第 3 章 移动机器人运动学	(46)
3.1 引言.....	(46)
3.2 运动学模型和约束.....	(47)
3.2.1 表示机器人的位置.....	(47)
3.2.2 前向运动学模型.....	(49)
3.2.3 轮子运动学约束.....	(51)
3.2.4 机器人运动学约束.....	(56)
3.2.5 举例:机器人运动学模型和约束	(57)
3.3 移动机器人的机动性.....	(60)
3.3.1 机动性的程度.....	(60)
3.3.2 可操纵度.....	(64)
3.3.3 机器人的机动性.....	(64)
3.4 移动机器人工作空间.....	(66)
3.4.1 自由度.....	(66)

3.4.2	完整机器人	(67)
3.4.3	路径和轨迹的考虑	(68)
3.5	基本运动学之外	(70)
3.6	运动控制	(71)
3.6.1	开环控制	(71)
3.6.2	反馈控制	(72)
3.7	习题	(76)
第4章	感知	(77)
4.1	移动机器人的传感器	(77)
4.1.1	传感器分类	(77)
4.1.2	表征传感器的特性指标	(78)
4.1.3	表示不确定性	(83)
4.1.4	轮子/电机传感器	(87)
4.1.5	导向传感器	(88)
4.1.6	加速度计	(90)
4.1.7	惯性测量单元	(91)
4.1.8	基于地面的信标	(92)
4.1.9	有源测距	(94)
4.1.10	运动/速度传感器	(106)
4.1.11	视觉传感器	(107)
4.2	计算机视觉的基本原理	(107)
4.2.1	引言	(107)
4.2.2	数字摄像机	(108)
4.2.3	图像形成	(112)
4.2.4	全向摄像机	(120)
4.2.5	立体结构	(127)
4.2.6	运动结构	(136)
4.2.7	运动与光流	(142)
4.2.8	颜色跟踪	(144)
4.3	图像处理基础	(146)
4.3.1	图像滤波	(146)
4.3.2	边缘检测	(149)
4.3.3	计算图像相似性	(154)
4.4	特征提取	(155)
4.5	图像特征提取:兴趣点检测器	(158)
4.5.1	引言	(158)
4.5.2	理想的特征检测器属性	(158)
4.5.3	角检测器	(159)
4.5.4	光度测定和几何变化的不变性	(164)
4.5.5	斑块检测器	(170)

4.6	位置识别	(175)
4.6.1	引言	(175)
4.6.2	从特征包到视觉词	(176)
4.6.3	使用倒排文件的有效位置识别	(177)
4.6.4	鲁棒位置识别的几何验证	(178)
4.6.5	应用	(178)
4.6.6	位置识别的其它图像表象	(178)
4.7	基于距离数据(激光,超声)的特征提取	(181)
4.7.1	直线提取	(182)
4.7.2	6个直线提取算法	(186)
4.7.3	距离直方图特征	(195)
4.7.4	其他几何特征提取	(196)
4.8	习题	(197)
第5章	移动机器人的定位	(199)
5.1	引言	(199)
5.2	定位的挑战:噪声和混叠	(199)
5.2.1	传感器噪声	(200)
5.2.2	传感器混叠	(201)
5.2.3	执行器噪声	(202)
5.2.4	里程表位置估计的误差模型	(203)
5.3	定位或不定位:基于定位的导航与编程求解的对比	(206)
5.4	信任度的表示	(208)
5.4.1	单假设信任度	(210)
5.4.2	多假设信任度	(211)
5.5	地图表示方法	(213)
5.5.1	连续的表达方法	(213)
5.5.2	分解策略	(215)
5.5.3	发展水平:地图表示方法的最新挑战	(220)
5.6	基于概率地图的定位	(222)
5.6.1	引言	(222)
5.6.2	机器人定位问题	(223)
5.6.3	概率论的基本概念	(225)
5.6.4	术语	(226)
5.6.5	基于概率地图定位的组成	(228)
5.6.6	定位问题的分类	(229)
5.6.7	马尔可夫定位	(229)
5.6.8	卡尔曼滤波器定位	(242)
5.7	定位系统的其他例子	(256)
5.7.1	基于路标的导航	(256)
5.7.2	全局唯一定位	(257)

5.7.3	定位信标系统	(258)
5.7.4	基于路由的定位	(259)
5.8	自动制图	(259)
5.8.1	引言	(259)
5.8.2	SLAM:同时定位和制图问题	(261)
5.8.3	SLAM 的数学定义	(261)
5.8.4	扩展卡尔曼滤波器(EKF)的 SLAM	(263)
5.8.5	具有单摄像机的视觉 SLAM	(265)
5.8.6	对 EKF SLAM 的讨论	(268)
5.8.7	基于图形的 SLAM	(270)
5.8.8	粒子滤波器的 SLAM	(271)
5.8.9	SLAM 中公开的难题	(272)
5.8.10	开放源代码 SLAM 的软件和其它资源	(273)
5.9	习题	(273)
第 6 章	规划和导航	(275)
6.1	引言	(275)
6.2	导航能力:规划和反应	(275)
6.3	路径规划	(277)
6.3.1	图形搜索	(278)
6.3.2	势场路径规划	(289)
6.4	避障	(293)
6.4.1	Bug 算法	(293)
6.4.2	向量场直方图	(297)
6.4.3	气泡带技术	(299)
6.4.4	曲率速度技术	(300)
6.4.5	动态窗口方法	(301)
6.4.6	Schlegel 避障方法	(302)
6.4.7	接近图	(303)
6.4.8	梯度法	(303)
6.4.9	加上动态约束	(303)
6.4.10	其他方法	(304)
6.4.11	综述	(304)
6.5	导航的体系结构	(306)
6.5.1	代码重用与共享的模块性	(306)
6.5.2	控制定位	(307)
6.5.3	分解技术	(307)
6.5.4	实例研究:分层机器人结构	(311)
6.6	习题	(316)
	参考文献	(318)

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。

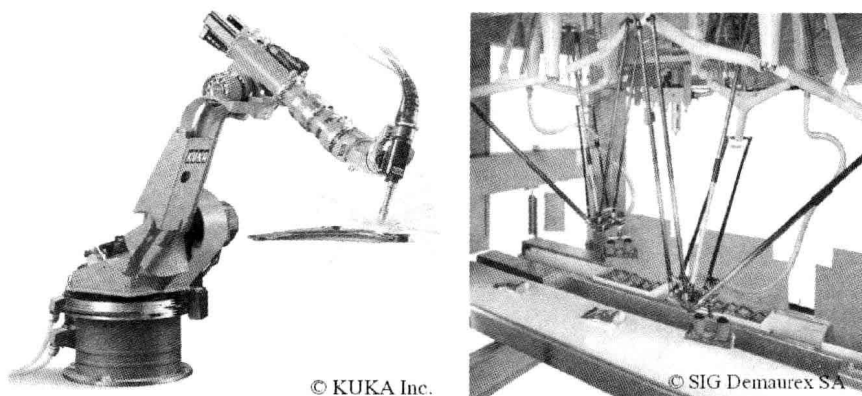


图 1.1 在巧克力包装时,自动装配的焊接机器人 KUKA 和 SIG Demareux SA(EPFL^[305]制作)的平行机器人 Delta 的照片

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?它的特殊运动机构究竟是什么,该机构为什么优于别的运动机构?

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)。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。

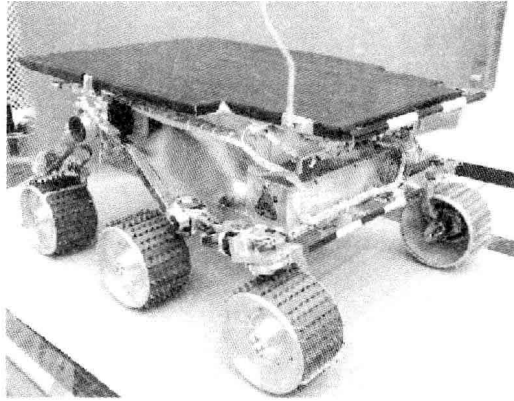


图 1.2 1997 年夏季,在探险者探索金星期间所使用的 Sojourner(旅居者)机器人。它几乎完全由地面遥控,但某些机载传感器考虑了障碍检测(http://ranier.oact.hq.nasa.gov/telerobotics_page/telerobotics.shtm)。© NASA/JPL

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

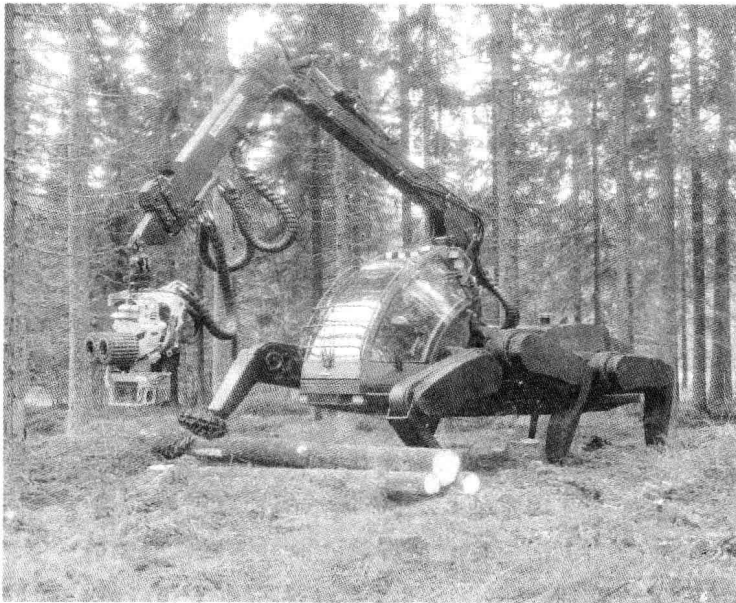


图 1.3 Plustech 开发的第一个面向应用的行走机器人。它专门移动砍伐森林的木材。其腿的协调是自动的,但导航依旧由机器人上的人类操作员进行(<http://www.plustech.fi>)。© Plustech

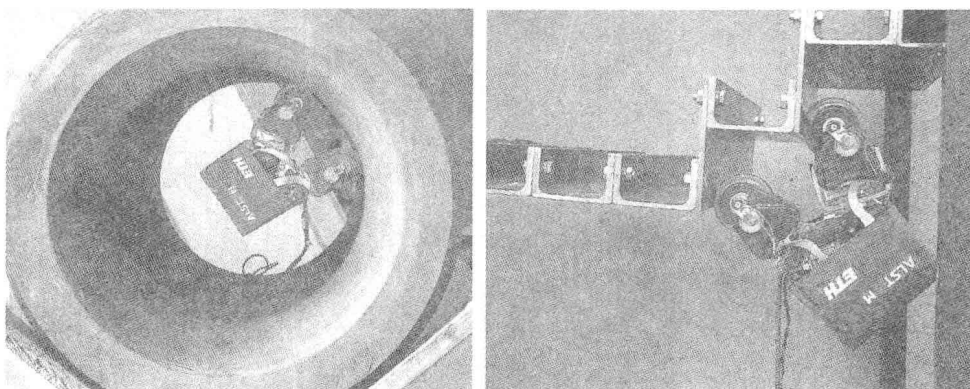


图 1.4 由 ASL(苏黎世 ETH)和 ALSTOM 开发的磁控车健身车(MagneBike)。它是磁轮机器人,有高度的移动性,用于检测复杂的形状结构,如铁磁管道和透平机(<http://www.asl.ethz.ch/>)。ALSTOM/ETH Zurich



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

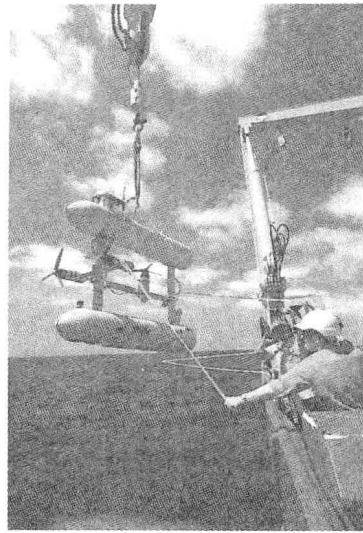


图 1.6 自主水下车辆 (AUV) Sirius, 在完成国外 RV Southern Surveyor 任务后收藏。
©Robin Beaman James Cook University

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。

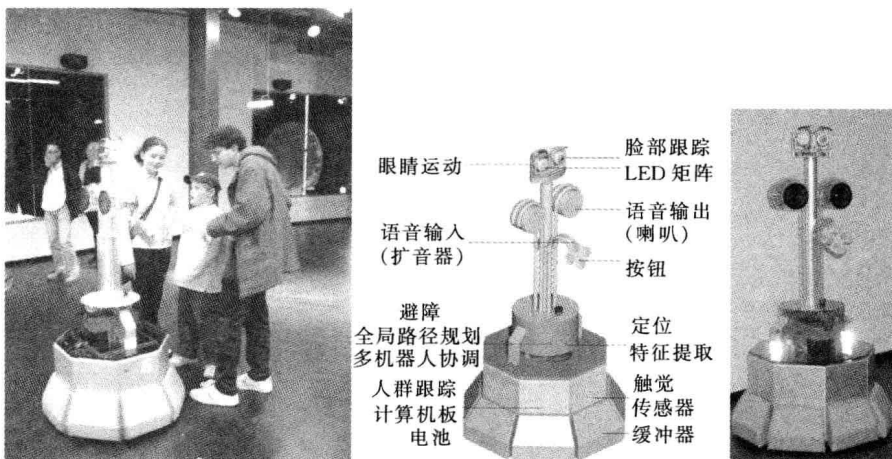


图 1.7 导游机器人能够以教育的方式在展览会上做介绍和交流^[85,251,288,310]。10 个机器人已经在为期 5 个月的瑞士展览会 EXPO.02 上会见无数参观者。机器人由 EPFL^[288] (<http://robotics.epfl.ch>) 开发,由 BlueBotics(<http://www.bluebotics.com>) 商品化

例如,AGV(autonomous guided vehicle,自主导向车)机器人(图 1.8),可通过跟踪安装在地面的专用导线(图 1.8(a)),或用机载激光器在一个用户专用地图范围内定位,来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, 天花板的灯被设计指向机器人的前方(图 1.9)。好几个公司已开发了自主清洁机器人, 主要用于大型楼宇的清洗(图 1.10)。这样的机器人正用在巴黎地铁中。其他专门的清洁机器人利用超市过道正规的几何图式, 帮助完成定位和导航任务。

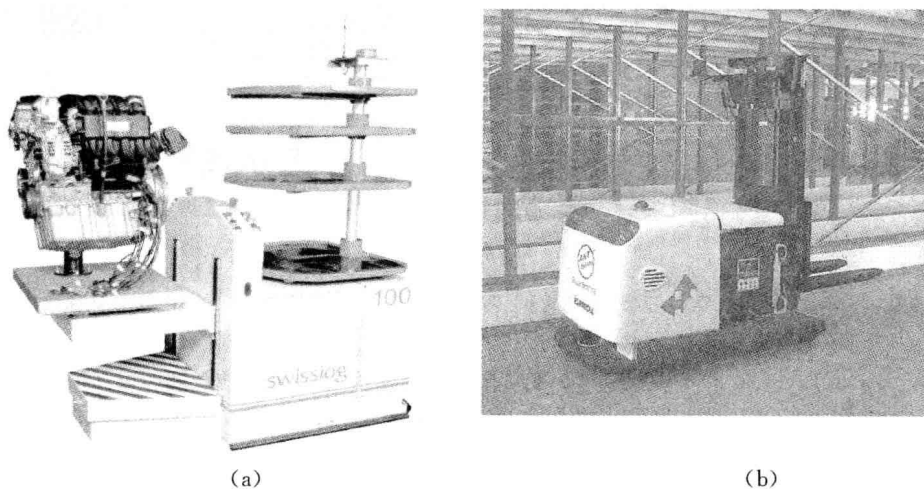


图 1.8 (a)由 SWISSLOG 制造的自主导向车(AGV),用于从一个装配站到另一个装配站传送电机部件。它受装在地板的电线引导。在工业、仓库甚至医院中由成千上万 AGV 传送产品。© Swisslog (b)装备由 BlueBotics 和 Paquito 提供的自主导航工艺技术,由 Esatroll 生产的铲车,不依靠电线、磁标或反射器,而是用机载的激光器来相对于环境形状定位。图片由 BlueBotics 提供(<http://bluebotics.com>)

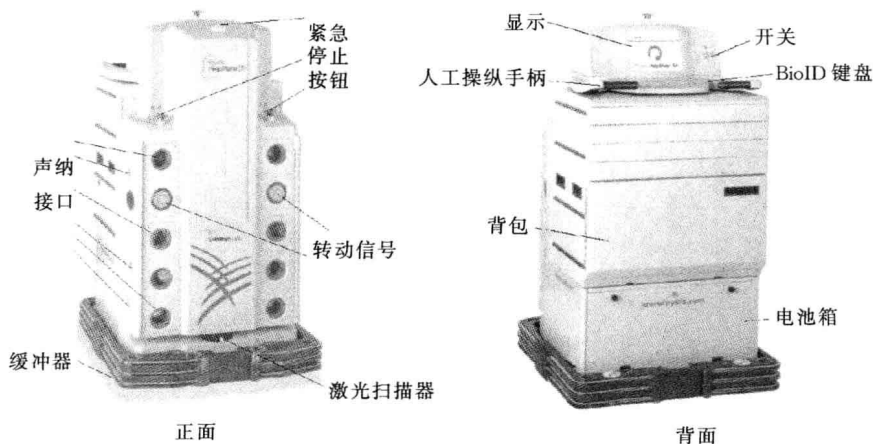


图 1.9 HELPMATE 是用于医院传送任务的移动机器人。它有各种走廊中自主导航、机装的传感器,定位的主传感器是朝向天花板看的摄像机。它可以以天花板的灯或路标作参考(<http://www.pyxis.com>)。© Pyxis Corp

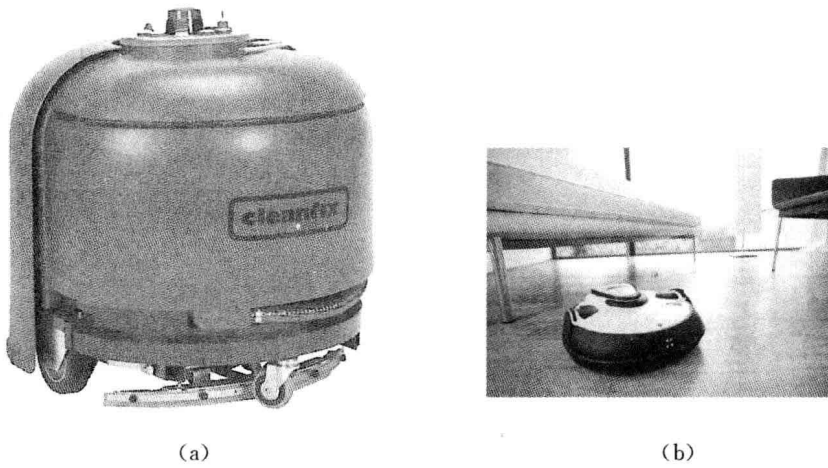


图 1.10 (a) 由 Cleanfix 公司开发和出售的 Robo 40 是一个用户机器人,用于清洁大型健身房。Robo 40 的导航系统是基于复杂的声纳和红外系统 (<http://www.cleanfix.com> © cleanfix); (b) RoboCleaner RC 3000 覆盖严重污染区域,具有特定的直到区域真正干净的驱动策略。光学传感器测量所吸入空气的污染程度 (<http://www.karcher.de>)。© Alfred kärcher GmbH&Co.

利用标准的适合于实验室环境的研究机器人平台,可以深入研究机器人认知、定位和导航等高层次问题。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,现在有各种各样可编程的移动机器人平台。最普遍的研究机器人是 Pioneer、BIBA 和 e-puck(图 1.11~1.13),以及很小的机器人,如 EPFL(洛桑的瑞士联邦理工大学)的 Alice(图 1.14)。

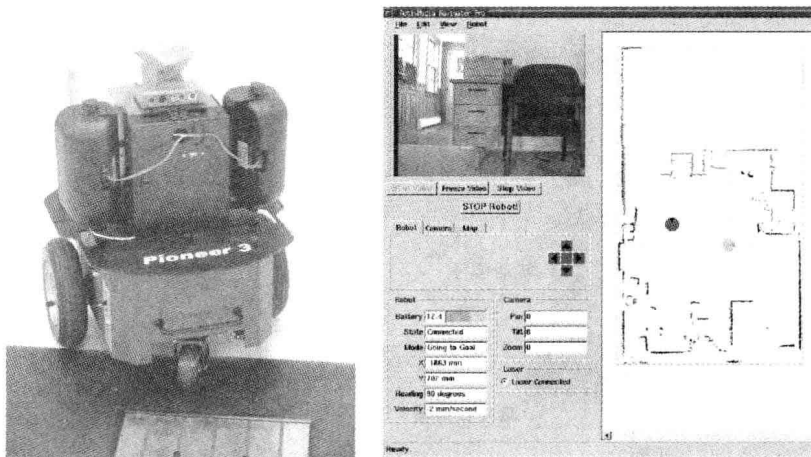


图 1.11 PIONEER(先锋)是一个模块移动机器人。它提供各种选择,如一个钳子或一台机载的摄像机等。它装备了由加利福尼亚斯坦福 SRI 开发的精密复杂的导航数据库。图片由 ActivMedia Robotics 提供。(<http://www.MobileRobots.com>)