



电子信息科技专著出版专项资金资助出版

<http://www.phei.com.cn>

先进制造系统与新技术丛书

Mobile Robot Technology and It's Applications

# 移动机器人 技术及其应用

● 张毅 罗元 郑太雄 等编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

## 内 容 简 介

本书系统、深入地介绍了移动机器人的关键技术和控制理论方法、算法及其应用。全书共分十一章，内容包括了移动机器人系统组成、移动机器人的传感器和执行器、移动机器人的通信系统、移动机器人智能控制方法、移动机器人定位、移动机器人避障与追踪、移动机器人导航与路径规划、移动机器人视觉系统、多传感器信息融合技术、多机器人系统等。本书内容新颖，注重理论与实际应用的结合，在简单阐述理论、算法的基础上，采用实际应用的例子讲解了各算法的应用，力求使读者能较快掌握和应用这门高新技术。

本书可作为高等院校自动化专业、计算机、机械工程、系统工程、信息工程、电子信息工程等专业本科生、研究生教材，也可作为工程技术人员和科研工作者的参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

移动机器人技术及其应用 / 张毅等编著. —北京: 电子工业出版社, 2007.9

(先进制造系统与新技术丛书)

ISBN 978-7-121-04903-3

I. 移… II. 张… III. 移动式机器人—研究 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 129614 号

责任编辑: 钟永刚      文字编辑: 宋兆武

印 刷: 北京中科印刷有限公司

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 24.5 字数: 560 千字

印 次: 2007 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 5 000 册 定价: 42.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlls@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

## 电子工业出版社读者意见反馈表

尊敬的读者：

感谢您购买本社图书。为了能为您提供更优秀的图书，请您抽出宝贵的时间，将您的意见以下表的方式（可从 <http://www.huaxin.edu.cn> 下载本调查表）及时告知我们，以改进我们的服务。对采用您的意见进行修订的图书，我们将在该书的前言中进行说明并赠送您样书。

姓名：\_\_\_\_\_ 电话：\_\_\_\_\_

职业：\_\_\_\_\_ E-mail: \_\_\_\_\_

邮编：\_\_\_\_\_ 通信地址：\_\_\_\_\_

1. 您对本书的总体看法是：

很满意    比较满意    尚可    不太满意    不满意

2. 您对本书的结构（章节）：满意 不满意 改进意见\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

3. 您对本书的例题：满意 不满意 改进意见\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4. 您对本书的习题：满意 不满意 改进意见\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

5. 您对本书的实训：满意 不满意 改进意见\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

6. 您对本书其他的改进意见：

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

7. 您感兴趣或希望增加的教材选题是：

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

请寄：100036 北京万寿路 173 信箱机电交通分社 钟永刚收

电话：010-88254484    E-mail: zyg@phei.com.cn

## 反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

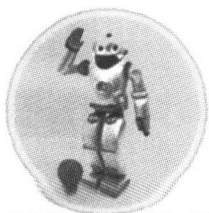
传 真：(010) 88254397

E-mail: [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036



## 序

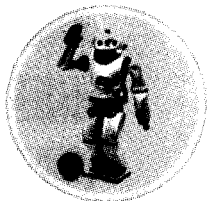
移动机器人是科学技术进步的产物，更是人类无限幻想和智慧的结晶。

自上世纪60年代以来，机器人作为工业生产中的新型工具，在减轻劳动强度，提高生产率，改变生产模式等方面，已经显示出了极大的优越性。然而，这些固定于某一位置的机器人尽管精度高，速度快，但活动范围与应用领域有限。因此，自20世纪80年代后期，许多国家有计划地开展了移动机器人技术的研究。从结构不同的轮式、履带机器人到形体不一的人形机器人，从日常家用的服务机器人到巡逻排爆的安全机器人，从形态各异的机器鱼到大小不一的无人飞行器，移动机器人的研究领域以及应用范围在不断地拓展。这些应用都对机器人的功能提出更高的要求，而不只是仅在结构化的环境中从事简单和重复性的劳动。准确地说，社会需要各种有一定的环境适应能力，同时具有不同程度智能的移动机器人。其研究涉及机器视觉、模式识别、智能传感器，多传感器信息融合、人工智能、自动控制等诸多学科的理论和技术。可以说，移动机器人将环境感知与信息融合、动态决策与路径规划、运动控制与任务执行等多种功能融于一身。移动机器人技术的发展是一个国家高科技水平和工业自动化程度的重要体现。

在过去的几十年时间里，人们对移动机器人技术的开发和研究取得了巨大的进步，国内外有关机器人的论著与教科书也是成果丰硕，但目前国内系统介绍移动机器人技术的专著却很少。张毅教授的《移动机器人技术及其应用》这本书在总结前人的实践经验基础上，无论是在结构安排还是在内容阐述中，都形成了自己的特色。书中在概括介绍各种移动机器人以及相关子系统后，从行为控制的观点出发，对移动机器人研究中的基本问题进行了分析，并将理论较强、信息处理较多的机器视觉、信息融合与多机器人系统着重成章进行研究论证。书中内容既有广度，又达到了必要的深度，相信广大科研工作者、教师和学生都能从中获益匪浅。

英国艾塞克斯大学 (University of Essex)  
Huosheng Hu (胡豁生) 教授

2007年7月1日



## 前 言

随着计算机、微电子、信息处理及智能控制的快速发展，机器人技术也在逐步深入和细化。移动机器人作为机器人技术的重要领域，正越来越多地受到人们的关注，朝着智能化和多样化的方向发展，开发速度越来越快，应用领域也越来越广。从机器人足球赛到陆地无人自主车赛，从无人机到机器鱼，从资源探测到机器人走向战场，移动机器人已经涉及工农业生产、军事应用、海洋开发、宇宙探测、社会服务、娱乐等各个领域。移动机器人的研究不仅可以推动科学技术的向前发展，同时其应用必将带来巨大的经济效益和社会效益。

移动机器人研究涉及机械工程、计算机、传感器技术、机器视觉、自动控制、人工智能等诸多科学领域，内容广泛。本书按照移动机器人技术所涉及的内容和主要方向来安排，从层次结构、控制理论应用及信息处理技术三个层面对移动机器人技术作了系统的阐述。主要内容包括移动机器人的基本结构、移动机器人的传感器与执行器技术、移动机器人的军/民应用，移动机器人的定位导航、避障追踪、路径规划等控制与智能控制的理论、算法及实现，移动机器人的视觉技术、信息融合中的理论与应用、多机器人系统的发展等。

本书是作者结合自身的研究工作，吸收和借鉴国内外期刊论文的最新研究成果及相关书籍内容编著而成的，是目前国内第一本针对移动机器人的研究用书。本书侧重移动机器人的基本问题与研究重点，尽量做到既讲清基本原理，又密切联系实际应用；既不乏经典理论，又侧重近年来的最新成果，尽可能地综合移动机器人研究的各个方面。

本书共分十一章：第1章，阐述移动机器人的概念、发展、分类及技术，系统介绍典型的移动机器人及其应用和展望；第2章，介绍移动机器人的体系结构、运动系统、感知系统、通信系统、控制系统、控制软件及Pioneer移动机器人；第3章，介绍移动机器人的常用传感器和常用的执行机构；第4章，分析移动机器人的通信系统特点及设计要求、无线通信技术、基于计算机网络的移动机器人通信和Ad Hoc无线通信网络等常用的通信系统和技术；第5章，介绍移动机器人的模糊控制、神经网络控制、模糊神经网络控制等智能控制方法和技术；第6章，介绍移动机器人定位的概念、相对定位、绝对定位等定位方法；第7章，介绍移动机器人避障技术、追踪技术等；第8章，介绍移动机器人环境理解与环境建模、人工势场法进行路径规划、 $A^*/D^*$ 算法进行路径规划、遗传算法动态路径规划、基于视觉与自适应模糊的路径导航技术和方法等；第9章，介绍移动机器人的视觉系统、摄像机标定方法、灰度图像处理技术、彩色图像处理方法及移动机器人视觉导航；第10章，介绍信息融合的概念和原理、信息融合的基本内容、常用信息融合方法的原理和应用；第11章，介绍多机器人系统涉及的领域与技术。

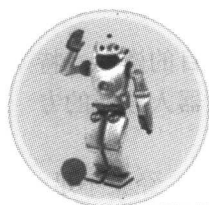
本书由重庆邮电大学自动化学院张毅教授、罗元副教授编写第1、2、3、4、5、6、7章和第10章，李锐和徐晓东编写第8、9章，郑太雄副教授编写第11章，研究生郭华、王洲、刘欢、杨锐敏、谢颖等参与了相关章节的资料收集和整理，并由张毅教授统编全稿。参加审阅工作的英国Essex大学计算机科学系胡豁生教授为本书提供了宝贵的意见。谨此表示

诚挚的感谢。

本书的研究工作和出版得到了教育部“春晖计划”项目及相关的科研项目的资助。特别感谢英国 Essex 大学计算机系胡豁生教授给予的大力支持。感谢国内外机器人领域的专家同意作者引用他们的论文和专著。

移动机器人技术内容十分广泛，涉及诸多学科领域。由于作者的水平所限、经验不足，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者



# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
1.1 移动机器人的发展 .....	(2)
1.2 移动机器人的分类 .....	(5)
1.3 移动机器人技术简介 .....	(10)
1.4 典型的移动机器人系统介绍 .....	(12)
1.5 移动机器人的应用及其展望 .....	(15)
本章小结 .....	(17)
<b>第 2 章 移动机器人系统的组成结构</b> .....	(19)
2.1 移动机器人的体系结构 .....	(20)
2.1.1 移动机器人体系结构的基本功能和要素 .....	(20)
2.1.2 移动机器人的三种基本体系结构 .....	(20)
2.2 移动机器人的运动系统 .....	(23)
2.2.1 移动机器人的移动机构 .....	(23)
2.2.2 移动机器人的动力学原理 .....	(24)
2.2.3 移动机器人的驱动系统 .....	(28)
2.3 移动机器人的感知系统 .....	(30)
2.3.1 移动机器人对传感器的要求 .....	(31)
2.3.2 移动机器人感知系统的结构分布 .....	(31)
2.4 移动机器人的通信系统 .....	(31)
2.5 移动机器人的控制系统 .....	(32)
2.5.1 控制系统的结构形式 .....	(32)
2.5.2 控制系统的硬件结构 .....	(33)
2.6 移动机器人的控制软件系统 .....	(33)
2.7 Pioneer 移动机器人简介 .....	(35)
本章小结 .....	(36)
<b>第 3 章 移动机器人的传感器和执行器</b> .....	(37)
3.1 移动机器人的传感器 .....	(38)
3.1.1 移动机器人的内部传感器 .....	(38)
3.1.2 移动机器人的外部传感器 .....	(42)
3.2 移动机器人的执行器 .....	(50)
3.2.1 执行器 .....	(50)
3.2.2 多自由度动力学 .....	(52)
本章小结 .....	(56)
<b>第 4 章 移动机器人的通信系统</b> .....	(57)

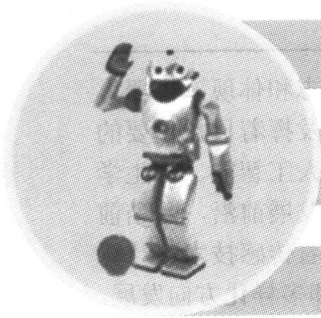


4.1	移动机器人通信系统的特点及设计要求	(58)
4.1.1	移动机器人通信的特点	(58)
4.1.2	移动机器人通信系统设计要求及评价指标	(59)
4.2	现代无线通信技术	(59)
4.2.1	GSM 通信系统	(59)
4.2.2	CDMA 通信系统	(63)
4.2.3	红外通信与蓝牙通信	(66)
4.2.4	UWB 超宽带通信技术	(70)
4.3	基于计算机网络的移动机器人通信	(75)
4.3.1	TCP/IP 协议族	(75)
4.3.2	基于 Internet/Web 的远程移动机器人	(81)
4.4	Ad Hoc 无线通信网络	(85)
4.4.1	Ad Hoc 网络	(85)
4.4.2	Ad Hoc 网的物理层	(87)
4.4.3	Ad Hoc 网的 MAC 协议	(88)
4.4.4	Ad Hoc 网络的路由协议	(91)
4.4.5	Ad Hoc 网络的其他研究热点及发展	(96)
	本章小结	(97)
<b>第 5 章</b>	<b>移动机器人智能控制方法</b>	<b>(99)</b>
5.1	概述	(100)
5.2	移动机器人的模糊控制	(100)
5.2.1	模糊控制原理	(100)
5.2.2	基于模糊逻辑推理的移动机器人导航控制	(107)
5.3	移动机器人的神经网络控制	(112)
5.3.1	神经网络控制概述	(112)
5.3.2	BP 神经网络算法	(113)
5.3.3	Hopfield 网络	(117)
5.3.4	径向基函数 (RBF) 网络	(119)
5.4	移动机器人的模糊神经网络控制	(122)
5.4.1	模糊神经网络控制原理	(122)
5.4.2	常规模糊神经网络在移动机器人中的应用	(131)
5.4.3	移动机器人的模糊 B 样条基神经网络控制	(134)
	本章小结	(138)
<b>第 6 章</b>	<b>移动机器人定位</b>	<b>(139)</b>
6.1	定位的概念	(140)
6.1.1	相对定位	(140)
6.1.2	绝对定位	(140)
6.2	移动机器人相对定位	(141)
6.2.1	航迹推算法	(141)
6.2.2	测距法	(145)

6.3 移动机器人绝对定位 .....	(148)
6.3.1 GPS 定位 .....	(149)
6.3.2 路标定位 .....	(156)
本章小结 .....	(165)
<b>第7章 移动机器人避障与追踪 .....</b>	<b>(167)</b>
7.1 移动机器人避障 .....	(168)
7.1.1 移动机器人常规避障 .....	(168)
7.1.2 移动机器人紧急避障 .....	(177)
7.2 移动机器人追踪 .....	(186)
7.2.1 移动机器人目标追踪控制 .....	(187)
7.2.2 移动机器人墙跟踪 .....	(191)
7.2.3 移动机器人气味追踪 .....	(197)
本章小结 .....	(206)
<b>第8章 移动机器人的路径规划 .....</b>	<b>(207)</b>
8.1 环境理解与环境建模 .....	(208)
8.1.1 环境理解 .....	(208)
8.1.2 环境建模 .....	(209)
8.2 人工势场法路径规划 .....	(213)
8.2.1 人工势场法基本原理 .....	(214)
8.2.2 时变势场法 .....	(217)
8.3 A* $D^*$ 法进行路径规划 .....	(218)
8.3.1 状态空间搜索 .....	(218)
8.3.2 A*算法路径规划 .....	(220)
8.3.3 $D^*$ 算法路径规划 .....	(222)
8.4 遗传算法动态路径规划 .....	(226)
8.4.1 遗传算法进行路径规划的基本原理 .....	(226)
8.4.2 遗传算法进行路径规划实验设计 .....	(229)
8.5 基于视觉与自适应模糊的路径导航 .....	(245)
8.5.1 导航线的识别 .....	(245)
8.5.2 导航线的跟踪和识别质量的自适应优化 .....	(247)
本章小结 .....	(250)
<b>第9章 机器视觉 .....</b>	<b>(253)</b>
9.1 移动机器人视觉系统 .....	(254)
9.1.1 移动机器人视觉系统简述 .....	(254)
9.1.2 移动机器人单目视觉系统 .....	(256)
9.1.3 移动机器人双目视觉系统 .....	(259)
9.1.4 移动机器人全景视觉系统 .....	(260)
9.1.5 移动机器人网络摄像头 .....	(264)
9.2 摄像机标定 .....	(265)
9.2.1 摄像机的畸变模型 .....	(265)

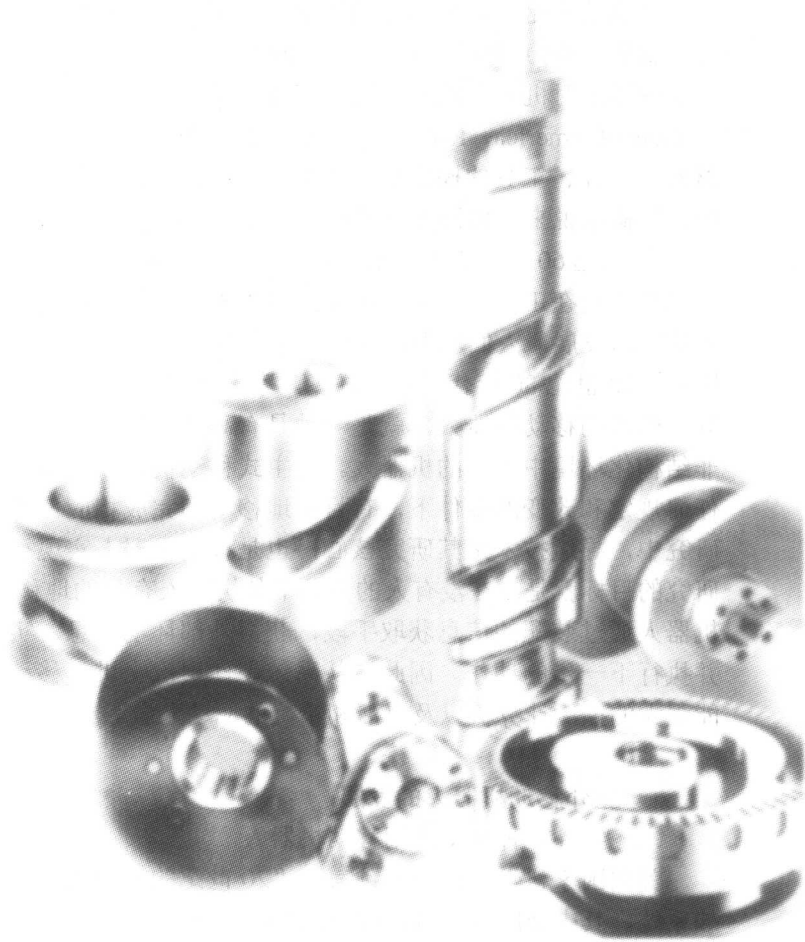
9.2.2 摄像机标定技术 .....	(267)
9.2.3 双目摄像机标定技术 .....	(272)
9.3 灰度图像处理 .....	(275)
9.3.1 二值图像处理 .....	(275)
9.3.2 图像分割 .....	(278)
9.4 彩色图像处理 .....	(281)
9.4.1 颜色空间 .....	(282)
9.4.2 颜色分割 .....	(285)
9.5 移动机器人视觉导航 .....	(291)
9.5.1 室内移动机器人视觉导航 .....	(291)
9.5.2 ALV 的视觉导航 .....	(300)
本章小结 .....	(304)
<b>第 10 章 信息融合 .....</b>	<b>(305)</b>
10.1 概述 .....	(306)
10.1.1 信息融合的目的和定义 .....	(306)
10.1.2 信息融合的基本原理 .....	(307)
10.1.3 信息融合技术在移动机器人领域中的应用和发展 .....	(308)
10.2 信息融合的基本内容 .....	(311)
10.2.1 信息融合系统建模 .....	(311)
10.2.2 信息的表示与转换 .....	(312)
10.2.3 信息融合系统的基本模型 .....	(312)
10.3 常用信息融合方法的原理和应用 .....	(317)
10.3.1 贝叶斯方法 (Bayes) .....	(317)
10.3.2 卡尔曼滤波法 .....	(318)
10.3.3 登普斯特—谢弗证据方法 (Dempster-Shafer) .....	(321)
10.3.4 航迹融合的分层法 .....	(326)
10.3.5 模糊集理论 .....	(329)
10.3.6 神经网络法 .....	(331)
10.3.7 应用举例 .....	(335)
本章小结 .....	(345)
<b>第 11 章 多机器人系统 .....</b>	<b>(347)</b>
11.1 概述 .....	(348)
11.1.1 多机器人系统的特点及应用 .....	(348)
11.1.2 多机器人系统的关键技术 .....	(349)
11.1.3 一些典型的多机器人系统 .....	(351)
11.2 多机器人系统的体系结构及分类 .....	(352)
11.2.1 从控制结构角度分类 .....	(352)
11.2.2 按通信系统结构分类 .....	(354)
11.2.3 按个体机器人结构分类 .....	(355)
11.3 多机器人的协调机制 .....	(355)

11.3.1 多机器人的协调方法.....	(355)
11.3.2 多机器人协调方法研究的三个阶段.....	(357)
11.4 多机器人的路径规划.....	(358)
11.5 多机器人学习.....	(360)
11.5.1 多机器人学习系统的类型.....	(360)
11.5.2 多机器人的强化学习分类.....	(360)
11.5.3 强化学习系统的原理.....	(362)
11.5.4 强化学习的主要算法.....	(363)
11.6 多机器人系统的应用平台——机器人足球比赛.....	(365)
11.6.1 机器人足球比赛简介.....	(365)
11.6.2 多机器人技术在机器人足球比赛中的应用.....	(368)
本章小结.....	(369)
<b>参考文献</b> .....	(370)



# 第 1 章

## 绪 论



机器人技术的发展是一个国家高科技水平和工业自动化程度的重要标志和体现。机器人在当前生产、生活中的应用越来越广泛,在某些场合和环境中正在替代人发挥着日益重要的作用。机器人技术是综合了计算机、控制论、机构学、信息和传感技术、人工智能、仿生学等多学科而形成的高新技术,集成了多学科的发展成果,代表了高技术的发展前沿,是当前科技研究的热点方向。而移动机器人是机器人学中的一个重要分支,且随着传感技术、计算机科学、人工智能及其他相关学科的迅速发展,移动机器人正向着智能化和多样化方向发展,它的应用也越来越广泛,几乎渗透到所有领域。本章通过介绍移动机器人的基本概念、发展过程、相关技术、一些典型系统、应用领域及展望,使读者对移动机器人有一个整体的了解,为后续章节的讲述提供基本的背景知识。

## 1.1 移动机器人的发展

机器人作为人类的新型生产工具,在减轻劳动强度、提高生产率、改变生产模式、将人从危险、恶劣、繁重的工作环境中解放出来等方面,显示出极大的优越性。不过,就机器人而言,目前还没有统一的定义,而且自机器人问世以来,人们就很难对机器人下一个确切的定义。欧美国家认为,机器人应该是“由计算机控制的通过编程具有可以变更的多功能的自动机械”;日本学者认为“机器人就是任何高级的自动机械”。我国科学家对机器人的定义是:“机器人是一种自动化的机器,所不同的是这种机器具备一些与人或生物相似的智能能力,如感知能力、规划能力、动作能力和协同能力,是一种具有高度灵活性的自动化机器。”目前国际上对机器人的概念已经渐趋一致,联合国标准化组织采纳了美国机器人协会(Robot Institute of America, RIA)于1979年给机器人下的定义:“一种可编程和多功能的,用来搬运材料、零件、工具的操作机;或是为了执行不同的任务而具有可改变和可编程动作的专门系统。”概括说来,机器人是靠自身动力和控制能力来实现各种功能的一种机器。

20世纪60年代以来,机械加工、弧焊点焊、喷涂、装配、检测等各种类型的机器人相继出现并迅速在工业生产中实用化,这大大提高了各种产品的一致性和质量。然而,随着机器人的不断发展,人们发现,这些固定于某一位置操作的机器人并不能完全满足各方面的需要。因此,20世纪80年代后期,许多国家有计划地开展了移动机器人(Mobile Robot)技术的研究。所谓的移动机器人,就是一种具有高度自规划、自组织、自适应能力,适合于在复杂的非结构化环境中工作的机器人。自主式移动机器人的目标是在没有人的干预且无需对环境作任何规定和改变的条件下,有目的地移动和完成相应任务。在自主式移动机器人相关技术的研究中,导航技术是其研究核心,也是移动机器人实现智能化及完全自主的关键技术。导航研究的目标就是:在没有人的干预下使机器人有目的地移动并完成特定任务,进行特定操作。机器人通过装配的信息获取手段,获得外部环境信息,实现自我定位,判定自身状态,规划并执行下一步的动作。因此单从系统硬件层次上讲,移动机器人必须具有丰富的传感器、功能强大的控制计算机以及灵活和精确的驱动系统。

### 1. 国外移动机器人的发展

#### (1) 室外几种典型应用移动机器人

美国国家科学委员会曾预言:“20世纪的核心武器是坦克,21世纪的核心武器是无人作战系统,其中2000年以后遥控地面无人作战系统将陆续装备部队,并走向战场。”为此,从

80年代开始,美国国防高级研究计划局(DARPA)专门立项,制定了地面无人作战平台的战略计划。从此,在全世界掀起了全面研究室外移动机器人的序幕,如DARPA的“战略计算机”计划中的自主地面车辆(ALV)计划(1983—1990),能源部制定的为期10年的机器人和智能系统计划(RIPS,1986—1995),以及后来的空间机器人计划;日本通产省组织的极限环境下作业的机器人计划;欧洲尤里卡中的机器人计划等。

初期的研究,主要从学术角度研究室外机器人的体系结构和信息处理,并建立实验系统进行验证。虽然由于80年代对机器人的智能行为期望过高,导致室外机器人的研究未达到预期的效果,却带动了相关技术的发展,为探讨人类研制智能机器人的途径积累了经验,同时,也推动了其他国家对于移动机器人的研究与开发。进入90年代,随着技术的进步,移动机器人开始在更现实的基础上,开拓各个应用领域,向实用化进军。

由美国NASA资助研制的“丹蒂II”八足行走机器人,是一个能提供对高移动性机器人运动的了解和远程机器人探险的行走机器人。它与其他机器人(如NavLab)不同之处,是它于1994年在斯珀火山的火山口中进行了成功的演示,虽然在返回时,在一陡峭的、泥泞的路上,失去了稳定性,倒向了一边,但作为指定的探险任务却早已完成。其他机器人在整个运动过程中,都需要人参与或支持。丹蒂计划的主要目标,是为实现在充满碎片的月球或其他星球的表面进行探索而提供一种机器人解决方案。

美国NASA研制的火星探测机器人“索杰那”于1997年登上火星,这一事件向全世界进行了报道。为了在火星上进行长距离探险,又开始了新一代样机的研制。命名为Rocky7,并在Lavic湖的岩溶流上和干涸的湖床上进行了成功的实验。

德国研制了一种轮椅机器人,并在乌尔姆市中心车站的客流高峰期的环境中和1998年汉诺威工业商品博览会的展览大厅环境中进行了实地现场表演。该轮椅机器人在公共场所拥挤的、有大量乘客的环境中,进行了超过36个小时的考验,所表现出的性能是其他现存的轮椅机器人或移动机器人不可匹敌的。这种轮椅机器人是在一个商业轮椅的基础上实现的。

国外还研制了一种独轮机器人,它与具有静态稳定性的多轮移动机器人相比,具有更好的动态稳定性、对姿态干扰的不敏感性、高可操作性、低的滚动阻力、跌倒的恢复能力和水陆两用性。这是运动性的一种新概念。

## (2) 高完整性机器人

没有一个系统可以做到100%可靠。一个可靠机器人是指它一直正常地工作;一个高完整性机器人则时刻监视自己的行为,一旦发现异常,立即停止运转。因此,一个高完整性机器人并不一定要连续工作,但工作时则一定是正确的。

## (3) 遥控移动机器人

对机器人自主性的挑战来自要求完成的任务和高度非结构化和变化的环境。在大多数室外环境中,要求机器人完全自主地完成的任务,目前还有一定的困难。远程操作的半自主机器人毫无疑问是一个发展方向。因此先进的远程操作技术是将来所必需的。完全遥控是实现远程操作一个或几个移动机器人的最佳可能方案,但价格昂贵。研制一套适于远程操作的、使用起来既自然又容易的人机交互方案是必需的。在未知和变化的环境中,头部跟踪系统是有效且可行的。

## (4) 环境与移动机器人集成

H.Ishiguro通过对以前机器人研究工作的回顾,发现过去智能机器人的工作主要集中在自主性上。因此,他提出了一个新概念:感知信息基础设施。就像人需要道路、交通信号灯等

一样，机器人为了在一个动态变化的环境中行动，也同样需要基础设施。作者将一个用导航移动机器人的分布式视觉系统作为例子，进行了解释和说明。实验在一个缩小了 1/12 的城镇模型中进行，内有阴影、树木结构、草地和房屋，足以代表室外环境的真实情况，并安装了用于机器人导航用的 16 个摄像机智能体，实现了移动机器人与环境的融合。

#### (5) 生态机器人学（生物机器人学）

生态机器人学就是把生态学的原理应用到移动机器人设计中去的实践。目前所用到的原理简述如下：

- ◆ 由于机器人和环境的不可分离性，因此应将其作为一个整体来看待；
- ◆ 机器人的行为是由这个系统的动力学创现出来的；
- ◆ 基于感知和行为的直接关系，为了达到系统的一个期望状态，机器人的任务就是将已有的信息映射到受其管理的控制参数上；
- ◆ 环境提供足够的信息以使产生自适应行为成为可能；
- ◆ 因为机器人在环境中，所以环境不必在机器人之中，也就是说，无需一个中心模型，但要留出空间用于具体任务的记忆和学习。

#### (6) 多机器人系统

美国 DARPA 的战术移动机器人计划，是一个四年研究计划，于 1998 年开始，分为技术开发和系统设计两个阶段进行。技术开发包括机器感知、半自主操作和机器人运动三个方面，目的是研究和开发由许多小的、低价的、半自主的移动机器人组成的机器人团队的协调与控制技术，并将其应用于重大战略情况下。例如：正在发生军事冲突的市区的侦察任务，在这种情况下，市区中人口稠密、建筑物多，涉及的人员分布在其里里外外、上上下下，从而使作战部队处于危险和不可预测的境地。因此，本项目的一个长期目标，就是在发生战斗的条件下，使用机器人团队，在现场的内外为部队提供支持。附带的另一个长期目标是建立和发展一个自制的工业标准基础，以迎接将来国防对军用机器人的需求。

美国的 MDARS 项目是在著名的保安机器人 ROBERT 的基础上建立的一个多移动机器人平台，用来在指定地点执行随机巡逻任务。第一期任务，是用于国防部仓库和储蓄场自动化闯入探测和库存量的查定，这期任务，在经历了实验室到模拟实验场地之后，已经在一个作战用的真实仓库环境内，进行了成功的演示。第二期任务，主要强调在国防部的室外仓储地的应用。

美国的 FETCH 计划是在 BUGS 计划的基础上，研究使用一群小的、坚固的、自主的移动机器人去清除地表上的未爆炸的 M42 炮弹。首先建立一个实验床，由四个机器人和一个陪同的操作员控制单元组成，研究如何确定任务要求和一个有效的机器人解决方案的参数。在这些参数中，要考虑自主与半自主机器人控制的比较，用于确定弹药位置的随机与直接搜索策略的比较，整个场地与有限移动驱动系统的比较。决定性的因子来自于任务的进一步细化和实际的性能。整个计划的最终目标是用一到两个得到基本训练的爆炸物处理专家，监控多达 50 个机器人，在一个足球场大小的现场上并行地工作，清除危险品。任务完成的标志是：在有限的时间内，搜集尽可能多的手榴弹。对机器人的要求：一是小且轻，以便搬运到现场，能在铺满自然障碍物和冲突后的残骸的现场中导航，能在现场的边界上停留，提高操作速度；二是成本不高，以便意外损坏是可以容忍，装有适应的和可重用的部件。

机器人正在从工厂的结构化环境进入人们每天的生活环境——医院、办公室、家庭、建筑工地和其他杂乱及不可控环境。要求机器人不仅能自主完成工作，而且能与人共同协作完成



任务或在人的指导下完成任务。这就需要机器人具有下述能力：移动和操作集成于一体的能力，在多机器人之间的协作能力，与人的交互能力和无碰撞路径的实时修改能力。Khatib 等讨论了这个问题，并给出了有关的模型、策略和算法的开发，并在斯坦福大学的两个完整性移动平台上进行了演示。

自从 1996 年成功地举行了第一次世界机器人足球赛以来，现在一年一度的世界机器人足球赛已经吸引了越来越多的团体参加，极大地推进了多移动机器人技术的研究，成为研究和验证人工智能成果的实验床。

还有关于多移动机器人的一些新的提法，如认知机器人学、生态机器人学、协作机器人学、社会机器人学以及广义社会学等。

## 2. 国内移动机器人的发展

我国在移动机器人的研究起步较晚，大多数研究尚处于某个单项研究阶段，主要的研究工作有：

- (1) 清华大学智能移动机器人于 1994 年通过鉴定。涉及五个方面的关键技术：基于地图的全局路径规划技术研究（准结构道路网环境下的全局路径规划，具有障碍物越野环境下的全局路径规划，自然地形环境下的全局路径规划）；基于传感器信息的局部路径规划技术研究（基于多种传感器信息的“感知—动作”行为，基于环境势场法的“感知—动作”行为，基于模糊控制的局部路径规划与导航控制）；路径规划的仿真技术研究（基于地图的全局路径规划系统的仿真模拟，室外移动机器人规划系统的仿真模拟，室内移动机器人局部路径规划系统的仿真模拟）；传感技术、信息融合技术研究（差分全球卫星定位系统、磁罗盘和光码盘定位系统、超声测距系统、视觉处理技术、信息融合技术）；智能移动机器人的设计和实现（智能移动机器人 THMR—Ⅲ 的体系结构、高效快速的数据传输技术、自动驾驶系统）。
- (2) 香港城市大学智能设计、自动化及制造研究中心的自动导航车和服务机器人。
- (3) 中国科学院沈阳自动化研究所的 AGV 和防爆机器人。
- (4) 中国科学院自动化所自行设计、制造的全方位移动式机器人视觉导航系统。
- (5) 哈尔滨工业大学于 1996 年研制成功的导游机器人等。

## 1.2 移动机器人的分类

移动机器人可以从不同的角度进行分类。从工作环境可分为室内移动机器人和室外移动机器人；按移动方式可分为轮式移动机器人、步行移动机器人、蛇形机器人、履带式移动机器人、爬行机器人等；按控制体系结构可分为功能式（水平式）结构机器人、行为式（垂直式）结构机器人和混合式机器人；按功能和用途可分为医疗机器人、军用机器人、助残机器人、清洁机器人等；按作业空间可分为陆地移动机器人、水下机器人、无人飞机和空间机器人。下面按照工作场所和功能的不同，对各类移动机器人作一个大概的介绍，可供读者在感性方面对各类移动机器人有个初步的了解和认识。

### 1. 管道机器人

管道机器人是一种可沿细小管道内部或外部自动行走，携带一种或多种传感器及操作机械，在工作人员的遥控操作或计算机自动控制下，进行一系列管道作业的机-电-仪一体化