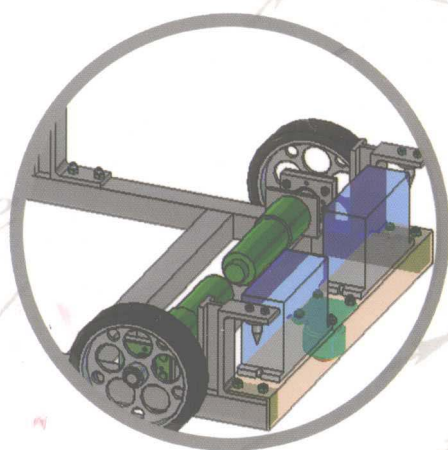


移动机器人 及其自主化技术

*MOBILE ROBOTS
AND THE AUTONOMOUS
TECHNOLOGIES*

宋永端 主编
李丹勇 蔡文川 参编



移动机器人及其自主化技术

宋永端 主编
李丹勇 蔡文川 参编



机械工业出版社

本书全面深入地介绍了移动机器人的相关理论和关键技术。全书共分8章,内容包括移动机器人的系统组成与体系结构、移动机器人本体设计、移动机器人系统设计基础、移动机器人传感器技术、移动机器人定位、移动机器人控制技术、称动机器人视觉系统、自主式移动机器人实例等。本书内容新颖,注重基础,强调理论联系实际,并较为系统地介绍了移动机器人系统实际设计步骤及方法,用实例阐述了相关算法的应用,同时还兼顾移动机器人技术的广度和深度,介绍了一些新的技术和新的方法,以帮助读者开阔视野。

本书可作为高等院校自动化专业、计算机、机电工程、信息工程、电子信息工程等专业本科生、研究生教材,也可作为移动机器人技术入门学习的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

移动机器人及其自主化技术/宋永端主编. —北京:机械工业出版社, 2012.5

ISBN 978-7-111-37301-8

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第014156号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李馨馨 责任编辑:李馨馨 王琪

版式设计:霍永明 封面设计:鞠杨

责任印制:杨曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2012年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17.25印张·434千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-37301-8

定价:59.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

机器人技术涉及机械设计、传感器技术、计算机技术、控制技术、机器视觉、人工智能、机电一体化等多个研究领域。而随着计算机、控制理论、人工智能理论、传感器等技术的不断更新,机器人研究已经发展到一个崭新的阶段。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方向发展,开发速度越来越快,应用领域也越来越广。移动机器人已广泛用于工农业生产、海洋开发、宇宙探测、社会服务、娱乐等领域。

目前移动机器人研究的重点及难点在于如何使机器人在未知、复杂、动态环境下独立(自主)完成某项指定任务,即移动机器人的自主化及智能化。这方面的研究不仅可以推动相关科学技术的发展,同时其应用必将带来巨大的经济效益和社会效益。

本书是作者结合自身的研究工作,吸收和借鉴国内外有关文献内容编著而成的。全书遵循理论与实际相结合、侧重基本原理、体现研究重点、兼顾实际应用的原则,既注重基础,为移动机器人技术入门学习提供系统的理论指导,又强调理论联系实际,较为深入地介绍了机器人系统实际设计步骤及方法,同时还兼顾移动机器人技术的广度和深度,介绍了一些新的技术和新的方法,以帮助读者开阔视野。

本书围绕移动机器人技术所涉及的内容和主要研究方向展开,从体系结构、控制理论应用及信息处理技术3个层面对移动机器人技术作了系统的阐述。本书共分8章。第1章阐述移动机器人的概念、发展、分类及关键技术;第2章以应用实例的方式介绍移动机器人本体设计相关技术;第3章介绍移动机器人常用的基本知识,主要包括机器人的系统硬件设计和软件设计的基本思路、实现以及可靠性;第4章介绍移动机器人常用传感器的基本原理和使用方法;第5章介绍移动机器人定位的概念、定位方法以及定位算法中的滤波技术和SLAM技术;第6章介绍移动机器人的PID控制、神经网络控制、自适应控制,以及基于记忆算法的移动机器人编队控制等控制方法和技术;第7章介绍移动机器人的视觉系统、摄像机标定方法、图像处理技术、彩色图像处理方法及移动机器人目标点跟踪技术等;第8章以实例的方式,从系统总体设计到综合集成,介绍自主式智能系统的设计开发过程以及注意事项。

本书由宋永端主编,李丹勇和蔡文川参编。本书的编写得到了国家重点基础研究发展规划973项目(2012CB2152027)、国家自然科学基金(60974052、61134001)的资助。在策划及编写过程中,以下老师和同学提供了大量帮助:袁雪、康轶非、王忠立,宋宇、曾翔宇、刘虎、陈垚、周军、贾梓筠、陈鹤楠等,在此一并表示感谢。本书的编写还得到了北京交通大学智能系统及再生能源研究中心的大力支持,书中内容还得益于国内外机器人领域的专家和学者的相关论文及专著,编者特此深表谢意。

机器人技术发展迅猛,日新月异,由于作者的水平所限,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 机器人的定义及由来	1
1.1.1 机器人的定义	1
1.1.2 机器人的由来	1
1.2 移动机器人简介	2
1.2.1 移动机器人的定义	2
1.2.2 移动机器人的分类	3
1.3 典型移动机器人	3
1.3.1 室外移动机器人	3
1.3.2 室内移动机器人	7
1.4 其他典型移动机器人	8
1.5 移动机器人的特点与特征	10
1.5.1 移动机器人的特点	10
1.5.2 移动机器人的特征	11
1.6 移动机器人的关键技术	12
1.6.1 移动机器人机构	12
1.6.2 移动机器人的控制体系结构	12
1.6.3 视觉实时处理技术	16
1.6.4 车体的定位技术	17
1.6.5 基于多传感器的信息融合技术	18
1.6.6 路径规划技术	18
1.6.7 车体控制技术	19
1.7 移动机器人技术的发展	19
1.8 移动机器人竞赛	20
参考文献	21
第 2 章 移动机器人本体设计	22
2.1 走行机构	22
2.1.1 足式走行机构	22
2.1.2 履带式走行机构	23
2.1.3 轮式走行机构	23
2.2 走行电动机选型	27
2.2.1 电动机简介	27
2.2.2 电动机容量及转矩的计算	28
2.3 走行机构设计	32
2.3.1 驱动轴的设计与校核	33
2.3.2 键的设计	35

2.3.3 车轮的设计	35
2.3.4 一体式轴承座的设计	37
2.3.5 从动轮系的结构设计	38
2.3.6 车体稳定性分析	39
2.4 底盘结构设计	40
2.5 提升机构设计	42
2.5.1 剪叉式升降平台	42
2.5.2 丝杠提升	42
2.6 夹持机构设计	43
2.6.1 夹持机构运动学分析	44
2.6.2 基于 MATLAB 的夹持机构运动学分析	45
2.6.3 基于 ADAMS 的夹持机构运动学仿真	47
参考文献	50
第 3 章 移动机器人系统设计基础	52
3.1 移动机器人硬件系统知识	52
3.1.1 电源系统	53
3.1.2 主控模块	57
3.1.3 电动机控制模块	61
3.1.4 定位信息采集模块	78
3.1.5 其他模块	84
3.2 机器人软件系统知识	88
3.2.1 软件系统设计概要	88
3.2.2 软件系统总体设计	90
3.2.3 软件系统开发工具介绍	91
3.2.4 嵌入式操作系统	101
3.2.5 软件抗干扰技术	106
3.2.6 通信方式介绍	108
参考文献	122
第 4 章 移动机器人传感器技术	124
4.1 内部传感器	124
4.1.1 电位器	124
4.1.2 编码器	127
4.1.3 陀螺仪	131
4.1.4 电子罗盘	136
4.1.5 StarGazer 室内定位系统	140
4.1.6 GPS 系统	142

4.1.7 组合导航系统	148	自适应控制	195
4.2 外部传感器	148	6.8 基于虚拟领队的无人车编队	
4.2.1 接触开关和光电开关	149	记忆控制	206
4.2.2 红外传感器	150	参考文献	209
4.2.3 超声波传感器	152	第7章 移动机器人视觉系统	211
4.3 需要考虑的问题	157	7.1 机器人视觉系统简述	211
参考文献	158	7.1.1 机器人视觉的基本概念及作用	211
第5章 移动机器人自主定位	159	7.1.2 机器人视觉系统的组成	212
5.1 机器人定位模型	159	7.1.3 机器人视觉系统的分类	212
5.1.1 机器人运动方程	160	7.2 摄像机模型	212
5.1.2 机器人观测方程	161	7.2.1 单目视觉模型	212
5.1.3 数据关联	162	7.2.2 双目视觉模型	214
5.2 Kalman 滤波及粒子滤波	162	7.3 摄像机标定	215
5.2.1 扩展型 Kalman 滤波器	162	7.3.1 摄像机的畸变模型	216
5.2.2 粒子滤波器	163	7.3.2 摄像机的标定技术	217
5.3 自主定位及地图构建核心框架	164	7.4 利用单目摄像机测量距离及角度	221
5.3.1 基于扩展 Kalman 滤波器的机器人自主		7.4.1 单目测量与目标物体的距离	221
定位与地图构建	165	7.4.2 单目测量与目标物体的角度	223
5.3.2 基于蒙特卡罗方法的机器人自主定位		7.5 图像处理	225
与地图构建	166	7.5.1 灰度图像与彩色图像	225
5.4 SLAM 实验与仿真	169	7.5.2 图像增强	227
5.4.1 Tim Bailey 仿真平台	169	7.5.3 图像分割	230
5.4.2 Carpark 数据库	171	7.6 物体跟踪	238
参考文献	173	7.6.1 计算区域的直方图	239
第6章 移动机器人控制技术	174	7.6.2 卡尔曼滤波	239
6.1 非完整约束和非完整系统	174	7.6.3 MeanShift 跟踪算法	241
6.2 移动机器人控制问题	174	7.6.4 CamShift 跟踪算法	241
6.2.1 移动机器人运动控制研究背景	174	参考文献	244
6.2.2 移动机器人轨迹跟踪		第8章 自主式移动机器人实例	246
控制研究现状	176	8.1 智能迎宾移动机器人简介	246
6.2.3 移动机器人轨迹跟踪发展趋势	177	8.2 迎宾机器人的控制体系结构	247
6.3 移动机器人智能 PID 控制	178	8.2.1 迎宾机器人控制系统设计	247
6.3.1 常规 PID 控制算法简介	178	8.2.2 混合式体系结构	249
6.3.2 PID 控制方法	178	8.2.3 迎宾机器人的行为管理及	
6.3.3 智能 PID 控制方法	179	运动控制	250
6.3.4 PID 校正下的直线目标点		8.2.4 迎宾机器人的软件结构	254
跟踪算法应用	180	8.2.5 语音控制及人机交互	255
6.3.5 PID 校正下的弧线跟踪算法	181	8.3 室外地面无人驾驶车辆 (ALV)	258
6.4 基于 Lyapunov 理论的移动机器人		8.3.1 室外地面无人驾驶	
目标点跟踪算法	183	车辆简介	258
6.5 基于神经网络的移动机器人		8.3.2 ALV 系统功能模块介绍	260
自适应控制	186	8.3.3 视觉环境模型学习与定位	261
6.6 基于虚拟领队的无人车神经网络		8.3.4 BJTU-I 无人车辆系统	
自适应编队控制	189	平台简介	264
6.7 一般非线性系统的神经网络		参考文献	267

第1章 绪 论

两院院士宋健曾说过：“机器人学的进步和应用是本世纪自动控制最有说服力的成就，是当代最高意义上的自动化”。科学的进步与技术的创新，为机器人的研究与应用开辟了广阔的思路与应用空间。

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，它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，而移动机器人是机器人学中的一个重要分支。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的方向发展，它的应用也越来越广泛，几乎渗透到各个领域。本章通过介绍移动机器人的由来、分类、典型移动机器人系统，以及移动机器人相关关键技术和进展，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背景知识。

1.1 机器人的定义及由来

1.1.1 机器人的定义

什么是机器人？这是一个十分有趣的话题。根据人们一般的理解，机器人是具有一些类似人的功能的机械电子装置或者自动化装置，它仍然是个机器。它有3个特点：有类人的某些功能，例如作业功能、感知功能、行走功能；能完成一定动作；还可以根据人的编程自动工作。这里最显著的特点是通过编程可以改变它的工作方式及工作模式。机器人作为服务人类的新型生产工具，在降低劳动强度，提高生产效率，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。但机器人问世已有几十年，机器人仍然没有一个统一的定义。原因之一是机器人技术还在不断发展，新的机型、新的功能不断涌现。其根本原因在于机器人涉及人的概念而成为了一个难以回答的哲学问题。欧美学者认为，机器人应该是“由计算机控制的通过编程使其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：“机器人是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”。概括来说，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。

1.1.2 机器人的由来

1920年，一位名叫卡佩克（K. Capek）的捷克斯洛伐克作家出版了一部科幻小说，名为《罗萨姆万能机器人公司》（Rossum's Universal Robots）。小说构想了一个机器人，名叫

罗伯特，也就是英文中的 Robot，它从不吃饭，却能不知疲倦地连续工作。1920 年正值一战过后，各国工业迅速发展，卓别林的著名电影《摩登时代》就反映了那一时期工人日复一日如机器人般在生产线上重复劳作的场景。这样繁重的体力劳动让人们开始幻想能否出现一种替代品帮助人类完成此类工作。这部小说在几年内便传遍了欧洲、日本等国家和地区，并改编成了当时流行的木偶剧及话剧。虽然当时人们只将其当作一部科幻小说，并未与日常的生产和工作结合起来，但机器人这一名词就此在全世界流传开来。

为什么要发展机器人？简单说来，有 3 个理由使人类有必要发展机器人：第一，机器人可以完成人类不适宜承担的工作，例如将人类从有毒、有害或危险的环境中解放出来；第二，机器人可以更快、更好地完成一些工作，例如汽车生产线上的焊接工作，此类重复性工作机器人完成的效率及质量将远超过人类；第三，机器人可以完成一些人类无法进行的工作，这是发展机器人的一个最重要的理由，例如对太空、深海的探测，以及一些微观环境下工作，都需要通过机器人来完成。

机器人是 20 世纪人类最伟大的发明之一。从某种意义上讲，一个国家机器人技术水平的高低反映了这个国家综合技术实力的强弱。现在，机器人已在工业领域得到了广泛的应用，而且正以惊人的速度不断向军事、医疗、服务、娱乐等非工业领域扩展。毋庸置疑，21 世纪机器人技术必将得到更大的发展空间，成为各国必争之知识经济制高点。在计算机技术和人工智能科学发展的基础上，又产生了智能机器人的概念。智能机器人是具有感知、思维和行动功能的机器，是机构学、自动控制、计算机、人工智能、微电子学、光学、通信技术、传感技术、仿生学等多种学科和技术的综合成果。智能机器人可获取、处理和识别多种信息，自主地完成较为复杂的操作任务，比一般的工业机器人具有更大的灵活性、机动性和更广泛的应用领域。智能机器人作为新一代生产和服务工具，在制造领域和非制造领域具有更广泛、更重要的地位，如在核工业、水下、空间、农业、工程机械（地上和地下）、建筑、医疗、救灾、排险、军事、服务、娱乐等方面，可代替人类完成各种工作。同时，智能机器人作为自动化、信息化的装置与设备，完全可以进入网络世界，发挥更多、更大的作用，这对人类开辟新的产业，提高生产水平与生活水平具有十分现实的意义。因此，面向制造业的先进工业机器人和面向非制造业的先进机器人的研究与开发应用将成为 21 世纪智能机器人的两个重要发展方向。

1.2 移动机器人简介

自主式的移动机器人系统是具有高度的自规划、自组织、自适应能力，适合在复杂非结构化环境中工作的机器人。

1.2.1 移动机器人的定义

移动机器人的研究始于 20 世纪 60 年代末期，当时机械加工、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，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，目的是应用人工智能技术，在复杂环境下实现机器人系统的自主推理、规划和控制。自主式移动机器人的目标是在没有人为干预且无需对环境作任

何规定和改变的条件下,有目的的移动和完成相应任务。

移动机器人是机器人技术的一个重要研究领域,也是机器人学的一个重要分支。移动机器人是一类能够通过传感器信息和自身状态,实现在有障碍物的环境中面向目标的自主运动,从而完成一定任务的机器人系统。移动机器人依靠自身携带的传感器主要面向的任务包括地图构建、路径规划与定位、目标识别、多机器人协作定位以及自主环境探索与认知等。

1.2.2 移动机器人的分类

移动机器人是机器人研究领域中的一个重要分支,是多学科相互交叉的研究领域,集人工智能、智能控制、信息处理、图像处理、检测与转换等专业技术为一体,跨计算机、自动控制、机械、电子等多学科,成为当前智能机器人研究的热点之一。

移动机器人可以从不同的角度进行分类。根据工作环境的不同可分为室内移动机器人和室外移动机器人;按移动方式的不同可分为轮式移动机器人、步行移动机器人、蛇形移动机器人、履带式移动机器人、爬行移动机器人等;按功能和用途的不同可分为服务型移动机器人、军用移动机器人、娱乐型移动机器人等;按作业空间的不同可分为陆地移动机器人、水下移动机器人、无人飞机和空间移动机器人。

1.3 典型移动机器人

1.3.1 室外移动机器人

室外智能移动机器人又称自主陆地车辆(Autonomous Land Vehicle, ALV)或无人驾驶车辆与智能机器人(Unmanned Vehicle and Intelligent Robot)。由于室外移动机器人不但在军事上具有特殊的应用价值,而且在公路交通运输中有着广泛的应用前景,因此引起了世界各国的普遍重视。在这方面,美国、法国、德国、日本等国家走在世界的前列。20世纪80年代初期,在美国国防部高级研究计划局(DARPA)的资助下,卡内基·梅隆大学(CMU)、斯坦福大学(Stanford)和麻省理工学院(MIT)等著名大学开展了ALV的研究,试图研制出在非结构化环境中能够自主移动的车辆。美国国家航空航天局(NASA)下属的喷气推进实验室(JPL)也开展了这方面的研究。中国从“八五”期间开始了类似研究,具有代表性的研究成果有由多所高校联合研制的军用室外移动机器人7B.8,其部分关键技术已达到国际先进水平;由清华大学开发的THMR-Ⅲ型、THMR-V型机器人,其行动决策与规划技术已达到国际先进水平。

根据室外智能移动机器人的应用领域及道路环境的不同,目前室外移动机器人的研究重点可分为两个方面:一是结构化道路(高速公路、高等级公路)上的车辆自主驾驶或辅助驾驶,其目标应用领域为民用运输部门或公路安全部门,代表成果有卡内基·梅隆大学的NavLab-5系统、德国联邦国防大学的VaMoRs.P系统、德国大众汽车公司的Caravelle系统;二是移动机器人在非结构化道路(一般道路、土路、校园网道路)上的机动性、灵活性与自然地理环境下的越野性,其目标应用领域主要是军事,代表成果有卡内基·梅隆大学的NavLab系统、斯坦福大学的Stanley系统等。我国的7B.8系统、THMR-Ⅲ系统及THMR-V系统,均属于面向非结构化道路的智能移动机器人。

本节结合相关文献,主要介绍了几款知名的室外移动机器人,主要包括:国外的Nav-

Lab 系统、Stanley 系统，以及国内清华大学的 THMR 系统等。

1. NavLab 系统^[4]

美国卡内基·梅隆大学机器人研究所研制的 NavLab 系列机器人代表了室外移动机器人的发展方向，其典型代表有 NavLab - 1 系统和 NavLab - 5 系统。

NavLab - 1 系统问世于 20 世纪 80 年代，其计算机系统由 Warp、Sun3、Sun4 组成，它可完成图像处理、图像理解、传感器信息融合、路径规划和车体控制等任务。NavLab - 1 系统的传感器包括彩色摄像机、激光雷达、超声、陀螺、光码盘、全球卫星定位系统 (GPS) 等。它在卡内基·梅隆大学校园网道路上的实验速度为 12km/h，在一般非结构化道路上的运行速度为 10km/h，在典型结构化道路上的运行速度为 28km/h，使用神经网络控制器 ALVINN 控制车体的最高速度为 88km/h。此外，卡内基·梅隆大学还以吉普车为平台，开发出面向越野的系统 NavLab - 2 (HMMWV)。

NavLab - 5 系统于 1995 年建成，车体采用 Pontiac 自动跑车，如图 1-1 所示。卡内基·梅隆大学与 AssistWare 技术公司合作开发了便携式高级导航支撑平台 (Portable Advanced Navigation Support, PANS)。其传感器系统包括视觉传感器——SONY DXC - 151A 彩色摄像机、差分 GPS 系统一套，(差分模式下定位精度为 2 ~ 5m)、光纤陀螺以及光电码盘。计算机系统包括一台 SparcLx 便携式工作站和一台 HCl1 微控制器。工作站用于完成传感器信息处理与融合、全局与局部路径规划；HCl1 用于完成底层车体控制与安全监控。NavLab - 5 在试验场环境道路上自动驾驶的平均速度为 88.5km/h。公路实验时首次进行了横穿美国大陆的长途自动驾驶试验，其自动驾驶的路程为 4496km，占总路程的 98.1%。尽管所行驶的道路绝大部分为高速公路，但仍有一部分路况复杂的市区公路以及路面条件较差的普通道路，同时还包括清晨、夜晚和暴雨等恶劣气候。虽然计算机仅控制方向，而节气门和制动由人工控制，但这个结果仍具有重要意义。



图 1-1 NavLab - 5 系统实物

2. Stanley 系统^[10]

Stanley 自动跑车 (见图 1-2) 由美国斯坦福大学为参加 2005 年 10 月参加了 DARPA 挑战赛 (无人驾驶车辆通过沙漠) 而专门研制的。

Stanley 是以大众途锐 R5 越野车为基础改制而成的，它装备了大量传感器。车顶行李架上安装有 5 个不同倾斜角度的激光测距仪，用于测量车辆前进方向 25m 范围内不同横断面的路况信息。车顶安装有稍微倾斜向下的彩色摄像机，用于测量车辆行驶前方较远距离道路的前方和斜下方的路况信息。车顶还有两个安装在激光测距仪阵列的两侧频率为 24Hz 的雷达探测仪，用于长距离大障碍物的检测，覆盖面积达 200m，能测量大约 20°方位的前方道路的行驶路况。该激光测距仪系统与摄像机、雷达系统组成了 Stanley 系统的环境感知系统，这套系统可以精



图 1-2 Stanley 自动跑车实物

确地确定车辆行驶时的位置，精度可以达到毫米级。也就是说，该系统可以告知 Stanley 未来的地形情况，以便让 Stanley 可以决定向哪里行驶，以及以什么速度行驶。

此外，Stanley 拥有全球定位系统（GPS）和两个 GPS 罗盘，以及惯性组合导航系统，它们共同组成了车体传感器系统，其主要职能是精确估计车辆的位置和速度。此外，在 Stanley 的车顶还装有一个由无线电天线和 3 个额外的 GPS 天线组成的 DARPA 的急停系统，该急停系统通过无线通信保证在车辆追逐的情况下，Stanley 仍能安全紧急停车。车顶架还安装有信号喇叭、报警灯和两个手动急停按钮。

图 1-3 为 Stanley 的部分设备实物图。这些设备中的任何一个都可以实时地采集到大量数据，并传送到位于越野车底部的一个高性能计算机内。它由 7 个网络连接的 Intel 奔腾 M 型主板组成，每个都含有主频为 1.6GHz 的中央处理器（CPU），并运行 Linux 操作系统。这套计算机系统还采用了独一无二的软件系统，传感器的处理频率高达 100Hz，转向、加速或制动等输出控制频率高达 20Hz。经过严密的计算分析，它可以发出转向、加速或制动等操作指令。这些指令通过电传线控（Drive-by-wire）系统被高速传给 Stanley 的电子执行机构，这样就可以根据道路情况而实时地完成各种行驶动作。Stanley 系统体系结构如图 1-4 所示^[10]。

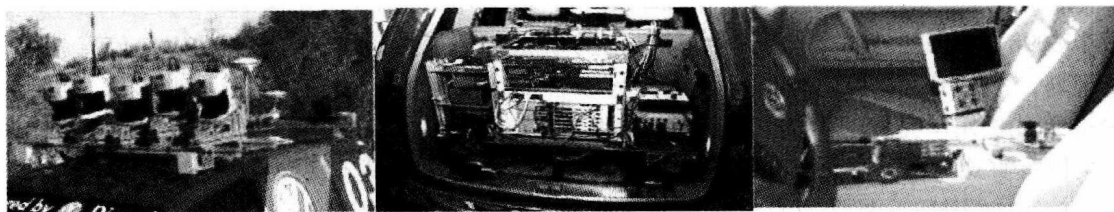


图 1-3 Stanley 车载部分设备实物图

Stanley 的核心技术——驾驶辅助系统在目前很多高档车上都有所应用，如我们最常见的（防侧滑系统）（ESP），它大大提高了汽车的安全性能，而像大众辉腾汽车装备的 ACC（自适应巡航控制系统）也属于驾驶辅助系统，可以有效防止追尾事故的发生。Stanley 采用的驾驶辅助系统则更为先进，它不仅集成了 ESP 和 ACC，还采用了更多的新技术，这些新技术将最终被用于量产的其他车型。

3. 清华大学的 THMR 系统

在国家 863 计划和国防科工委的资助下，清华大学计算机系智能技术与系统国家重点实验室自 1988 年开始研制清华智能车（Tsinghua Mobile Robot, THMR）系列移动机器人系统。该系统涉及自主式系统、体系结构、传感器信息的获取与处理、路径规划与立体视觉、感知动作、多行为控制、通信与临场感技术等多学科领域。

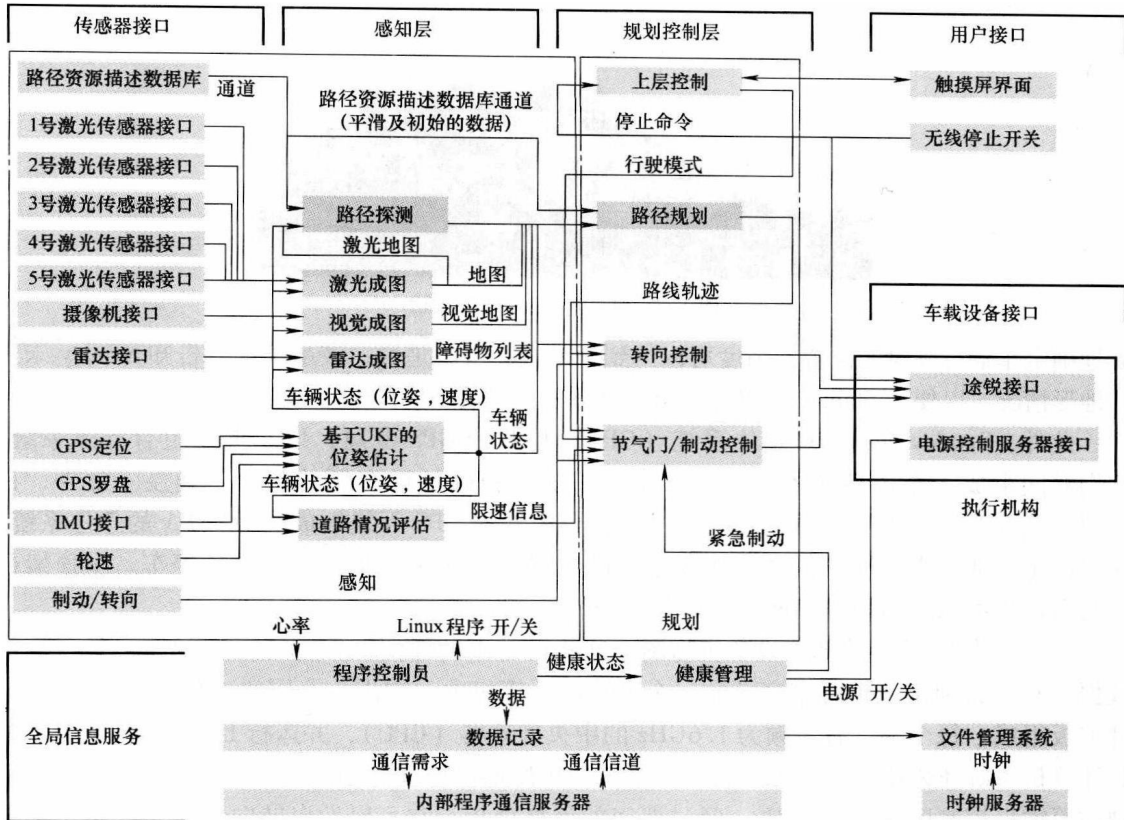


图 1-4 Stanley 系统体系结构

THMR - III系统是在BJ1022面包车的基础上改制而成的，集成了二维彩色摄像机、磁罗盘、光码盘、GPS、超声等传感器。计算机系统采用一台 Sun Spark 10、两台 PC - 486 和数个 8098 单片机。其中，Sun Spark 主要用于完成任务规划，根据地图数据库的信息进行全局规划，一台 PC 用于视觉信息处理，另一台 PC 用于局部规划、反馈控制及系统监控，8098 单片机用于完成超声波测量、位置测量、车体方向速度的控制。THMR - III系统的体系结构以垂直式为主，采用多层次感知 - 动作行为控制方式和基于模糊控制的局部路径规划及导航控制。THMR - III涉及直线跟踪算法、白线跟踪算法、连续障碍物跟踪算法、漫游避障、路标识别、视觉神经网络道路识别、道路模糊识别等多种导航算法，在自主道路跟踪时运行速度为 5 ~ 10km/h，避障速度达 5km/h。

THMR - V系统是清华大学系研制的新一代智能移动机器人，兼有面向高速公路和一般道路的功能。THMR - V是用三星 SXZ6510 七座厢式车改装的。THMR - V配备了 CCD 摄像机视觉处理系统，还安装了包括方向控制、节气门控制和制动控制的车体控制系统，同时还装有磁罗盘、光码盘、DGPS、二维扫描激光雷达测障系统。THMR - V上还配备了声/像无线电台、数据无线电台和通信计算机，操作员依据车上传来的图像信息进行视觉临场感遥控操作。

THMR - V系统由规划计算机、监控计算机、视觉计算机和多台测控计算机组成。它们是按照分层递阶的结构，分为智能级（规划计算机）、协调级（监控计算机）和执行级（视觉计算机和多台测控计算机）。各台计算机之间通过 10Mbit/s 以太网实现数据通信。系统拥有两台

使用奔腾 II 处理器的计算机, 其中一台用于进行视觉信息处理, 另一台用于完成信息融合、路径规划、行为控制、决策控制等功能。4 台 IPC (进程间通信) 工控机分别用于完成激光测距信息处理、定位信息处理、通信管理、驾驶控制等功能。如图 1-5 所示为 THMR - V 结构图^[4]。

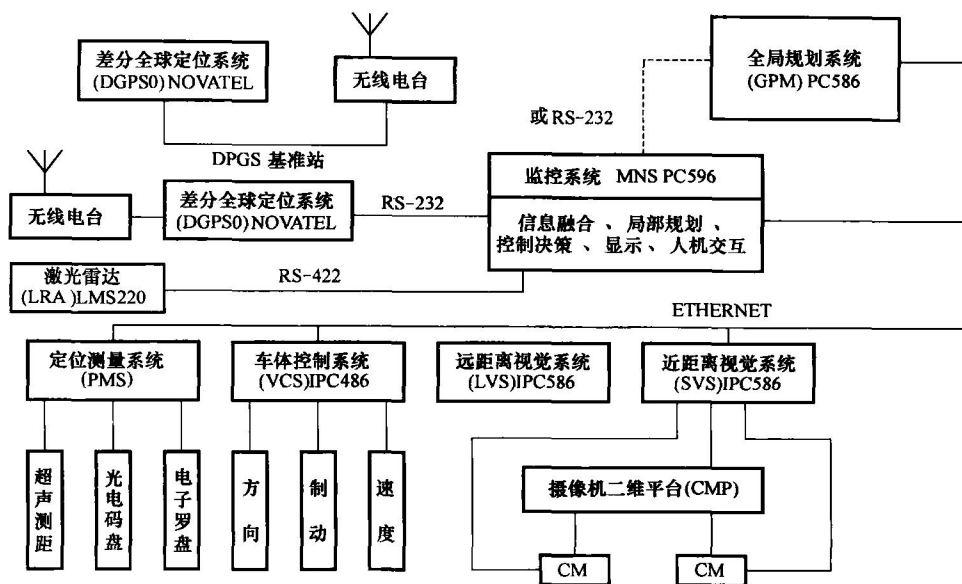


图 1-5 THMR - V 结构图

1.3.2 室内移动机器人

1. 先锋 (Pioneer) 系列机器人

先锋系列机器人是目前全世界最成熟的轮式移动机器人研究平台, 也是最早进入中国的高性能移动机器人研究平台。这个系列主要分为适应各种地形研究的室外机器人——AT 和室内研究机器人——DX。它们都有两个驱动轮, 后部带有平衡轮, 配有 ARIA Robotics API 和 Saphira 8 软件、ACTS 颜色跟踪软件、8 个前声呐系统、8 个后声呐系统, 有电子罗盘、手臂、抓手、车载计算机、视觉系统、有线遥控手柄、无线通信系统, 此外也可装有激光传感器、GPS、激光定位导航软件等。先锋系列机器人如图 1-6 所示。



图 1-6 先锋系列机器人

2. 日本本田 ASIMO 机器人

ASIMO 机器人身高 1.2m，体重 52kg，如图 1-7 所示。它能够带领客人到达会议室，并完成给客人端上咖啡等动作。它的行走速度范围是 0 ~ 1.6km/h，而且行走的范围和步调可调。早期的机器人要想在直线行走时突然转向，必须先停下来，而 ASIMO 机器人就要灵活得多。它采用了先进的 i-WALK 技术，可以实时地预测下一个移动动作并提前改变其重心。这也就使得本田 ASIMO 机器人可以行走自如，实现诸如 8 字形行走、下台阶、弯腰等各项动作。

3. 索尼 AIBO 机器狗

AIBO ERS-7 机器狗如图 1-8 所示，在它的胸部装有距离传感雷达，能够精确感知与外界物体的距离。而且它的关节灵活程度高，能够进行侧向移动。头部有 28 个 LED，用来表示其自身的感情变化，具有发声、声音处理器能力，能够准确录音，并能够分辨外界的声音，包括主人的口令等。

AIBO ERS-7 使用了 576MHz 的 64 位 RISC 处理器，内存为 64MB SDRAM，“眼睛”用 35 万像素的 CMOS 摄像机，而且还带有一个红外线距离感应器，以及加速感应器、振动感应器、静电触感应器等众多的感知“器官”。另外，还具有无线通信能力，支持无线局域网（IEEE 802.11b/Wi-Fi 标准）。

AIBO ERS-7 尺寸为 180mm × 278mm × 278mm，重量大约 1.6kg，采用锂电池组，功耗大约 7W，大约能够连续活动 1.5h，充电时间为 2.5h。

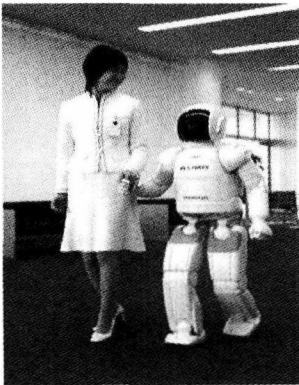


图 1-7 ASIMO 机器人

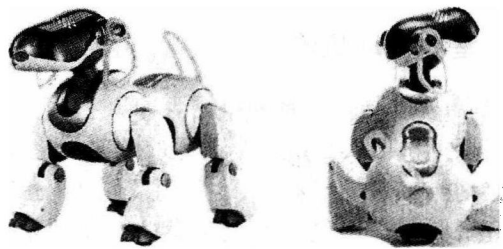


图 1-8 AIBO ERS-7 机器狗

1.4 其他典型移动机器人

1. 多移动机器人系统

随着计算机技术和无线通信技术的发展，多机器人协调合作已经成为可能，且得到了越来越广泛的应用。多个机器人协调合作可以完成单一机器人难以完成的任务。在工业领域，多个机器人可代替人类完成一些危险环境或恶劣环境下的作业，如搬运、分类、围捕等；在军事上，机器人小组可以完成复杂战地的火力侦察、安全警戒、排雷等危险性任务；在航空领域，利用多个太空机器人和外星探测机器人对未知星球进行探索，对太空站进行维修，不仅降低了成本，而且还提高系统的可靠性及安全性；在医学领域，将多个微型机器人放入人体内，可对病变部位进行深入检查和诊断。

多移动机器人的研究目标主要是多移动机器人协作（Cooperate）和多移动机器人协调（Coordinate），其中多移动机器人协作是指多个移动机器人（可以是两三个或者更多）通过

相互间交换信息，合作完成一个任务，如搬动物体等，这种方式可以弥补单个机器人不具备解决问题所需的充足的知识、能力、资源或信息，增强系统的快速性和可靠性，提高完成任务的质量，有效利用资源，增强系统的灵活性；多移动机器人协调是指具有相当数量的多机器人系统对目标、资源等进行合理安排，调整各自行动，最大限度地实现目标。当多个机器人在动态环境中执行某种群体行为时，协调的作用是调整每个机器人，使之能够适应环境并完成任务。可见，前者强调的是任务的复杂度，后者则强调系统的复杂度。

图 1-9 是美国国家航空研究院协调控制中心的无人机编队系统和地面无人车编队系统。其中，地面无人车编队系统成功实现了无人车系统自行定位、自主容错运行、多车多目标协调控制、精确停车、轨迹跟踪及变轨控制、避障及远程监控等。该平台受邀多次参加国际会议及美国国家科学基金会（NSF）举办的项目年审技术展示会。地面无人车系统仿真效果示意图如图 1-10 所示。



图 1-9 无人机编队系统和地面无人车编队系统

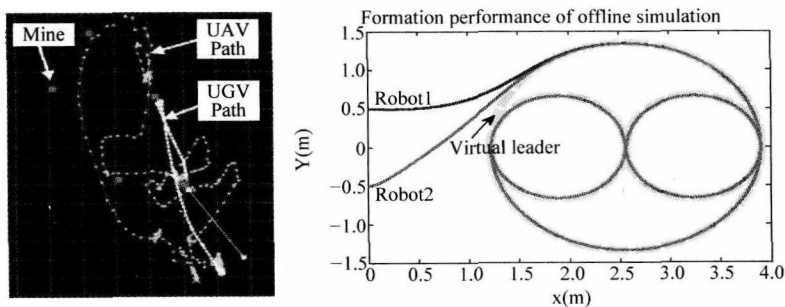


图 1-10 地面无人车系统仿真效果示意图

2. Rover 移动机器人

美国国家航空航天局下属的喷气推进实验室（JPL）的火星探测车——Rover 实际上是一个移动机器人，在火星上充当机器人地理学家，进行火星科学考察。

Rover 移动机器人如图 1-11 所示，主要组成部分包括：机器人躯体，它是一个恒温的电子箱（Warm Electronics Box, WEB）；机器人控制系统，它与人和动物的不同之处是它位于躯体内部；温度控制系统；Rover 移动机器人的颈、头和手臂；行走机构；电源系统；通信系统。

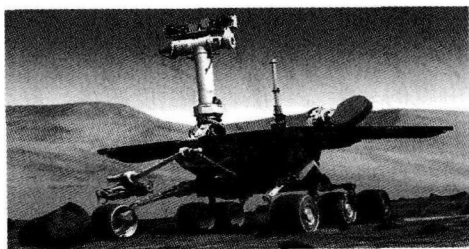


图 1-11 Rover 移动机器人

3. 军事机器人

军事机器人是一种用于军事领域的具有某种仿人功能的自动机，其作用有三个方面：一是直接执行战斗任务，二是侦察和观察，三是工程保障。军用机器人广泛的发展前景，引起了全世界军事家们的高度重视，许多国家为此都制定了军用机器人的发展计划。军用机器人有侦察机器人、爆炸物处理机器人、步兵支援机器人和无人机等。图 1-12 为拆弹机器人。

目前，智能军用机器人正向着拟人化、仿生化、小型化、多样化方向发展，随着计算机技术、光电子技术、通信技术以及自动控制技术的不断完善和进步，军事机器人将朝着更高的层次发展。

4. 仿生微型机器人

2005 年 9 月，研究人员在加州大学伯克利分校制作出了有史以来最小的移动机器人，如图 1-13 所示。它比人的头发丝还要细，仅仅约为 $1/100\text{mm}$ 。这个机器人像一个遥控小车，它可以向任何方向移动。它由一层电网供电，速度是每秒 $200\mu\text{m}$ 。



图 1-12 拆弹机器人

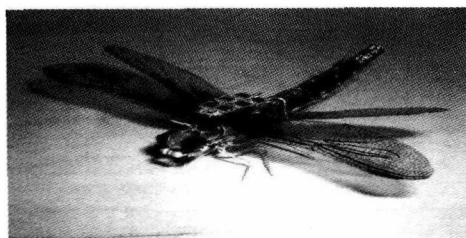


图 1-13 仿生微型机器人

1.5 移动机器人的特点与特征

1.5.1 移动机器人的特点

移动机器人技术在很多方面不同于常规的机器人技术。

(1) 固有的不精确

移动机器人所依赖的传感器很容易收集到不精确的数据，即便设备本身很精确；但由于传感器对于机器人所处环境的变化反应比较迟钝（如由于轮的滑动），所以导致数据不精确。

(2) 有限的自由度

移动机器人的自由度数目明显少于机械手。假设上下方向是不允许运动的，则机器人只有在二维平面运动，即有两个移动方向和一个转动方向共 3 个自由度。这仅仅是一般机械手自由度的一半。当然，自由度减少，复杂度也相应降低。

(3) 错误累计

一旦错误遗留就有不断增加的趋势，这是任何位置推算系统都具有的一个典型特征。如果机器人不能随时更新系统内部的位置信息，那么路径就无法计算，机器人也就无法执行运动，仅仅进行避障是不能保证机器人到达目标的。因此，信息必须通过不间断的更新来进行维护。

(4) 不完整建模

基于任何定义模型都是不完全的,否则就无需建模。比较工业机器人,移动机器人对环境的建模表示更不全面,这是由移动机器人所处环境的多样性以及非结构性所致。为了满足路径规划、避障等实时性约束,必须对空间和时间做折中的计算。当机器人在一个完全未知的环境中运动时,它对环境的表示是不完整的。这种环境表示将不得不以仅仅部分正确或者可能完全错误的传感器数据为依据动态建立。

(5) 环境的不确定性

即便对环境已经建模,其精确性也与期望值相距甚远。不仅机器人的位置不确定,目标的位置也可能不确定。此外,由于最近一次的环境信息读取是在运动中相对于环境或者机器人进行的,目标亦可能移动,这与机械手高度结构化的工作空间形成鲜明的对比。

(6) 非重复的路径

自主机器人在同样环境中执行两次运动,其轨迹可能不相同。虽然一般的路线可能相同,但当与位置相关的一些条件改变后,机器人运行的实际路径将不同于之前每次经过路径。

(7) 在线、连续的路径规划

机器人在长时间运动过程中千万不能闭上它的“眼睛”,也就是说,必须要保证持续的监视以避免冲突、碰撞的发生。为了获得高性能,在机器人运动过程中应该不断地对路径规划进行重新调整,以防止意外事故的发生。例如,出现了一个未预料的障碍物,那么就要调整运动轨迹使机器人绕行,或者一个已经建模的障碍物现在撤销了,那么就要使机器人选择更优的路径,这些动态的路径规划必须是实时进行的。

1.5.2 移动机器人的特征

(1) 自主性和适应性

机器人的运动由相应的控制策略来实现。由于现实环境是不可预知的、变化的,因此控制系统必须迅速而平滑地在各种控制策略之间切换,以适应当前的环境。机器人所具有的适应能力使其能够根据当前的目标和感知的场景重新配置运动模式,以实现在时变环境下运行。

(2) 实时性

机器人在保证正确有效地实现目标的前提下(包括自身安全),应能够对环境的突发事件及时做出响应。由于环境是非结构化的,机器人对环境的动态特性只能做出有限的推测,因此快速反应的能力是必不可少的。这种快速反应的能力一般通过条件反射式行为来实现。

(3) 鲁棒性

鲁棒性(Robustness)即健壮性,是指机器人处理噪声、突发事件、环境不确定性以及部分功能模块失灵等情况的能力,是系统在实际运行时必须具备的重要能力。鲁棒性要求控制结构必须拥有处理功能的冗余性,要求控制作用的实现在一定程度上是分散的。

(4) 异构性

由于设计、开发和测试控制系统的各个模块需要花很长的时间,因此需要一种可扩充的体系结构,这种结构应能很容易地加入新的功能、定义新的任务,即具有以一种增量模式实现机器人处理不同情况的能力。这里要重点考虑的是,机器人的控制体系结构应使其具有较好的学习能力。