



“十三五”国家重点出版物  
出版规划项目

中国制造  
2025



# 机器人环境感知 与控制技术

王耀南 梁桥康 朱江 等编著



化学工业出版社



“十三五”国家重点出版物  
出版规划项目



“中国制造2025”  
出版工程

# 机器人环境感知 与控制技术

王耀南 梁桥康 朱江 等编著



化学工业出版社

·北京·

本书共6章,分别从智能机器人力觉感知、智能机器人环境视觉感知、移动机器人的自主导航、移动机器人运动控制方法、环境感知与控制技术在无人机的应用展开了系统和全面的阐述。本书注重实际的机器人环境感知与控制技术的设计和应用,让读者在了解机器人环境感知与控制技术的基本原理和研究现状的同时,对机器人感知与控制系统的实际开发有深入的了解。

本书内容全面、图文并茂、设计案例丰富、实际应用性强,非常适合机器人技术相关方向的研究者和学生阅读,也适合智能新技术领域的从业人员参考学习。

### 图书在版编目(CIP)数据

机器人环境感知与控制技术/王耀南等编著. —北京:  
化学工业出版社, 2018.12

“中国制造2025”出版工程

ISBN 978-7-122-33158-8

I. ①机… II. ①王… III. ①机器人-传感器-研究  
②机器人控制-研究 IV. ①TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第234240号

---

责任编辑:宋辉 刘哲  
责任校对:边涛

文字编辑:陈喆  
装帧设计:尹琳琳

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张14¼ 字数267千字 2019年5月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888

售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

# 《“中国制造 2025”出版工程》

## 编委会

### 主任

孙优贤（院士）

### 副主任（按姓氏笔画排序）

王天然（院士） 杨华勇（院士） 吴澄（院士）

陈纯（院士） 陈杰（院士） 郑南宁（院士）

桂卫华（院士） 钱锋（院士） 管晓宏（院士）

### 委员（按姓氏笔画排序）

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 马正先 | 王大轶 | 王天然 | 王荣明 | 王耀南 | 田彦涛 |
| 巩水利 | 乔非  | 任春年 | 伊廷锋 | 刘敏  | 刘延俊 |
| 刘会聪 | 刘利军 | 孙长银 | 孙优贤 | 杜宇雷 | 巫英才 |
| 李莉  | 李慧  | 李少远 | 李亚江 | 李嘉宁 | 杨卫民 |
| 杨华勇 | 吴飞  | 吴澄  | 吴伟国 | 宋浩  | 张平  |
| 张晶  | 张从鹏 | 张玉茹 | 张永德 | 张进生 | 陈为  |
| 陈刚  | 陈纯  | 陈杰  | 陈万米 | 陈长军 | 陈华钧 |
| 陈兵旗 | 陈茂爱 | 陈继文 | 陈增强 | 罗映  | 罗学科 |
| 郑南宁 | 房立金 | 赵春晖 | 胡昌华 | 胡福文 | 姜金刚 |
| 费燕琼 | 贺威  | 桂卫华 | 柴毅  | 钱锋  | 徐继宁 |
| 郭彤颖 | 曹巨江 | 康锐  | 梁桥康 | 焦志伟 | 曾宪武 |
| 谢颖  | 谢胜利 | 蔡登  | 管晓宏 | 魏青松 |     |

# 序

制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。近十年来，我国制造业持续快速发展，综合实力不断增强，国际地位得到大幅提升，已成为世界制造业规模最大的国家。但我国仍处于工业化进程中，大而不强的问题突出，与先进国家相比还有较大差距。为解决制造业大而不强、自主创新能力弱、关键核心技术与高端装备对外依存度高等制约我国发展的问题，国务院于2015年5月8日发布了“中国制造2025”国家规划。随后，工信部发布了“中国制造2025”规划，提出了我国制造业“三步走”的强国发展战略及2025年的奋斗目标、指导方针和战略路线，制定了九大战略任务、十大重点发展领域。2016年8月19日，工信部、国家发展改革委、科技部、财政部四部委联合发布了“中国制造2025”制造业创新中心、工业强基、绿色制造、智能制造和高端装备创新五大工程实施指南。

为了响应党中央、国务院做出的建设制造强国的重大战略部署，各地政府、企业、科研部门都在进行积极的探索和部署。加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展，推动我国制造模式从“中国制造”向“中国智造”转变，加快实现我国制造业由大变强，正成为我们新的历史使命。当前，信息革命进程持续快速演进，物联网、云计算、大数据、人工智能等技术广泛渗透于经济社会各个领域，信息经济繁荣程度成为国家实力的重要标志。增材制造（3D打印）、机器人与智能制造、控制和信息技术、人工智能等领域技术不断取得重大突破，推动传统工业体系分化变革，并将重塑制造业国际分工格局。制造技术与互联网等信息技术融合发展，成为新一轮科技革命和产业变革的重大趋势和主要特征。在这种中国制造业大发展、大变革背景之下，化学工业出版社主动顺应技术和产业发展趋势，组织出版《“中国制造2025”出版工程》丛书可谓勇于引领、恰逢其时。

《“中国制造2025”出版工程》丛书是紧紧围绕国务院发布的实施制造强国战略的第一个十年的行动纲领——“中国制造2025”的一套高水平、原创性强的学术专著。丛书立足智能制造及装备、控制及信息技术两大领域，涵盖了物联网、大数

据、3D 打印、机器人、智能装备、工业网络安全、知识自动化、人工智能等一系列的核心技术。丛书的选题策划紧密结合“中国制造 2025”规划及 11 个配套实施指南、行动计划或专项规划，每个分册针对各个领域的一些核心技术组织内容，集中体现了国内制造业领域的技术发展成果，旨在加强先进技术的研发、推广和应用，为“中国制造 2025”行动纲领的落地生根提供了有针对性的方向引导和系统性的技术参考。

这套书集中体现以下几大特点：

首先，丛书内容都力求原创，以网络化、智能化技术为核心，汇集了许多前沿科技，反映了国内外最新的一些技术成果，尤其使国内的相关原创性科技成果得到了体现。这些图书中，包含了获得国家与省部级诸多科技奖励的许多新技术，因此，对新技术的推广应用很有帮助！这些内容不仅为技术人员解决实际问题，也为研究提供新方向、拓展新思路。

其次，丛书各分册在介绍相应专业领域的新技术、新理论和新方法的同时，优先介绍有应用前景的新技术及其推广应用的范例，以促进优秀科研成果向产业的转化。

丛书由我国控制工程专家孙优贤院士牵头并担任编委会主任，吴澄、王天然、郑南宁等多位院士参与策划组织工作，众多长江学者、杰青、优青等中青年学者参与具体的编写工作，具有较高的学术水平与编写质量。

相信本套丛书的出版对推动“中国制造 2025”国家重要战略规划的实施具有积极的意义，可以有效促进我国智能制造技术的研发和创新，推动装备制造业的技术转型和升级，提高产品的设计能力和技术水平，从而多角度地提升中国制造业的核心竞争力。

中国工程院院士

潘圣麟

# 前言

机器人是集传感技术、控制技术、信息技术、机械电子、人工智能、材料和仿生学等多学科于一体的高新技术产品，是先进制造业中不可替代的高新技术装备，是国际先进制造业的发展趋势。机器人的发展水平，已经成为衡量一个国家或地区制造业水平和科技水平的重要标志之一。随着人口老龄化和城市化进程的加速，服务机器人相关技术获得了飞速发展。我国机器人产业发展迅速，但在研发试验、关键零部件产业化、系统集成技术以及服务等方面与国外尚有差距。

本书在机器人视觉感知与控制国家工程实验室的多项国家级课题（国家自然科学基金 61733004、61673163 等）成果的基础上，详细介绍智能机器人的环境感知与控制技术及其应用——将机器人理论知识和实际应用相结合，通过典型应用实例的讲解使读者对智能机器人环境感知与控制技术的理解更加深入和具体。全书共 6 章，第 1 章主要介绍了移动机器人的研究现状，对移动机器人的应用场景和主要科学技术问题进行了综述。第 2 章对智能机器人力觉技术的研究现状、常见的检测原理和发展趋势进行了论述。第 3 章介绍了基于视觉感知的移动机器人环境感知方法，重点阐述了障碍物实时检测和识别、地形表面类型识别和非结构化环境下可通行性评价方法。第 4 章和第 5 章主要讨论移动机器人的自主导航和运动控制方法，其中包括反应式导航控制方法、基于混合协调策略和分层结构的行为导航方法、基于模糊逻辑的非结构化环境下自主导航、基于运动学和动力学的移动机器人同时镇定和跟踪控制、基于动态非完整链式标准型的移动机器人神经网络自适应控制方法等。第 6 章主要介绍了环境感知与控制技术在无人机系统中的应用。

参与本书编著工作的有朱江、王耀南（第 1 章、第 3 章和第 4 章）、梁桥康（第 2 章）、缪志强（第 5 章）和谭建豪（第 6 章）。全书由王耀南和梁桥康负责统稿和审校。鉴于编著者水平有限，书中难免有不足之处，敬请广大读者批评指正。

编著者

## 1 第1章 绪论

- 1.1 移动机器人的研究现状 /2
- 1.2 移动机器人应用中的科学技术问题 /11
- 1.3 移动机器人自主导航关键技术的研究现状 /12
  - 1.3.1 环境信息获取 /12
  - 1.3.2 环境建模与定位 /14
  - 1.3.3 环境认知 /14
  - 1.3.4 导航避障 /15
- 参考文献 /18

## 20 第2章 智能机器人力觉感知

- 2.1 智能机器人多维力/力矩传感器的研究现状 /21
- 2.2 智能机器人多维力/力矩传感器的分类 /23
- 2.3 电阻式多维力/力矩传感器的检测原理 /26
- 2.4 智能机器人多维力/力矩传感器的发展 /30
- 参考文献 /32

## 34 第3章 移动机器人环境视觉感知

- 3.1 3D 摄像机 /35
  - 3.1.1 SR-3000 内参数标定 /36
  - 3.1.2 SR-3000 深度标定 /38
  - 3.1.3 SR-3000 远距离数据滤波算法 /44
- 3.2 基于三维视觉的障碍物实时检测与识别方法 /47
  - 3.2.1 基于图像与空间信息的未知场景分割方法 /48
  - 3.2.2 非结构化环境下障碍物的特征提取 /52
  - 3.2.3 基于相关向量机的障碍物识别方法 /54
  - 3.2.4 实验结果 /58
- 3.3 基于视觉的地形表面类型识别方法 /65
  - 3.3.1 基于 Gabor 小波和混合进化算法的地表特征提取 /67



- 3.3.2 基于相关向量机神经网络的地表识别 /72
- 3.3.3 实验结果 /77
- 3.4 非结构化环境下地形的可通行性评价 /81
  - 3.4.1 地形的可通行性 /81
  - 3.4.2 基于模糊逻辑的地形可通行性评价 /83
  - 3.4.3 实验结果 /96
- 参考文献 /100

## 第4章 移动机器人的自主导航

- 4.1 移动机器人反应式导航控制方法 /103
  - 4.1.1 单控制器反应式导航 /103
  - 4.1.2 基于行为的反应式导航 /105
- 4.2 基于混合协调策略和分层结构的行为导航方法 /108
  - 4.2.1 总体方案 /108
  - 4.2.2 基于模糊神经网络的底层基本行为控制器设计 /109
  - 4.2.3 多行为的混合协调策略 /119
- 4.3 基于模糊逻辑的非结构化环境下自主导航 /124
- 4.4 算法小结 /126
- 4.5 实验结果 /127
- 参考文献 /131

## 第5章 移动机器人运动控制方法

- 5.1 基于运动学的移动机器人同时镇定和跟踪控制 /134
  - 5.1.1 问题描述 /135
  - 5.1.2 主要结果 /136
- 5.2 基于动力学的移动机器人同时镇定和跟踪控制 /151
  - 5.2.1 反演控制方法介绍 /151
  - 5.2.2 问题描述 /153
  - 5.2.3 主要结果 /155
- 5.3 基于动态非完整链式标准型的移动机器人神经网络自适应控制 /170
  - 5.3.1 问题描述 /171
  - 5.3.2 基于模型的控制 /172
  - 5.3.3 神经网络自适应控制 /176
- 参考文献 /186

## 第6章 环境感知与控制技术在无人机系统的应用

- 6.1 概述 /188
- 6.2 无人机系统关键技术概述 /190
- 6.3 无人机视觉感知与导航 /203
  - 6.3.1 基于双目立体视觉的环境感知 /205
  - 6.3.2 基于视觉传感器的导航方式 /213
- 6.4 无人机在电力系统中的应用 /215
- 参考文献 /217



# 第1章

## 绪论

移动机器人 (mobile robot) 是机器人学中的一个重要分支, 是能够通过自身传感器获取周围环境的信息和自身状态, 实现在有障碍物的环境中自主向目标运动, 进而完成特定任务的机器人。移动机器人与其他机器人的最大区别在于它具备在工作环境中“移动”的特性。

20 世纪 60 年代以来, 机械加工制造、装配、喷涂、检测、焊接等各种类型的机器人相继出现在工业生产中并实用化, 大大提高了各种产品的质量、一致性和生产效率。尽管这些固定在某一位置的机器人具有速度快、精度高的优点, 但有限的活动范围使得其应用领域大大受到限制。随后, 美国、欧洲、日本等国家和我国相继有计划地开展了移动机器人技术的研究。从结构不同的轮式机器人到形态各异的仿生机器人, 从巡逻安防的护卫机器人到日常家用的服务机器人, 移动机器人的研究领域及其应用范围在不断地延伸和拓展。随着技术的飞速发展, 移动机器人开始逐步从室内环境扩展到复杂、不规则的室外非结构化环境, 如户外无人驾驶车辆、空间自主移动探测机器人、矿井搜救机器人、无人作战移动车等, 极大地拓展了人类在危险、救援、军事和空间探测等极限环境下的工作能力。

环境认知和导航避障能力直接决定了移动机器人在室外非结构化环境下的自主工作能力。其中环境认知是研究如何在所获得的环境数据基础上, 从计算统计、模式识别以及语义等不同角度挖掘数据中的特征与模式, 从而实现移动机器人对场景的有效分析与理解; 而自主避障是在理解环境的基础上研究机器人如何快速、无碰撞地向目标运动。随着火星探测、月球探索、无人驾驶汽车越野大赛等计划的实施, 人们开展了很多基于视觉的复杂地貌下认知与导航避障研究, 取得了一些进展, 但是仍没有满意的结果。与世界发达国家相比, 目前我国在这一领域的研究尚处于起步阶段。为了提高我国在智能移动机器人领域的技术水平, 亟须开展移动机器人在非结构化环境下的认知与自主导航避障方法的研究, 从而更好地服务于国民经济和国防建设。

## 1.1 移动机器人的研究现状

移动机器人的种类繁多, 可从不同角度出发对其分类: ①按工作的场合可分为室内机器人和室外机器人; ②按移动机构可分为轮式机器人、多足机器人、履带式机器人等; ③按控制体系结构可分为功能式结构机器人、行为式结构机器人和混合式机器人; ④按功能和用途可分为服务

机器人、搬运机器人、清洁机器人、行星探测机器人等。本节将介绍一批典型的移动机器人。

### (1) 教学科研用移动机器人通用平台

此类移动机器人主要面向教学和科研，通常为轮式结构，配备有视觉系统、激光测距仪、声呐、电子罗盘等丰富的传感器，具备串行、无线网络等通信接口，并可根据需要配置控制设备。这些机器人不仅提供了方便完善的控制平台，还提供较为友好的软件开发环境，可满足室内移动机器人研究或适应各种地形的室外移动机器人研究的需要。其典型代表主要有 Active Media 公司 Pioneer 系列移动机器人、Nomadic Technology 公司开发的 Nomad 系列移动机器人和 iRobot 公司的 iRobot 系列移动机器人等，如图 1-1 所示。

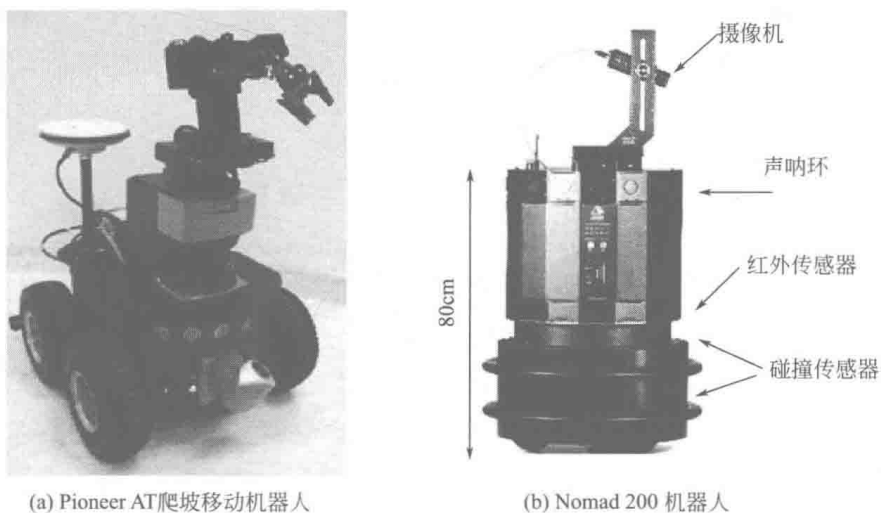


图 1-1 典型的通用移动机器人科研平台

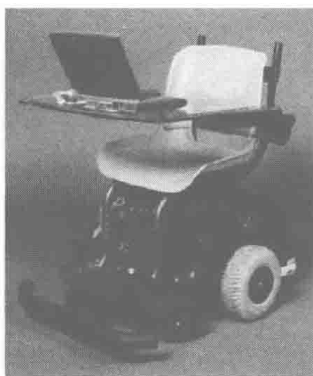
这些成熟的移动机器人通用平台，使研究人员不用在开发移动机器人硬件平台上耗费过多的时间，而是将精力集中在研究针对特殊环境、特定功能的智能控制算法上。

### (2) 服务机器人

欧美国于 20 世纪 70 年代中期就开始了以康复机器人为代表的服务机器人的研究，主要有美国麻省理工学院的 Wheelersley [图 1-2(a)] 项目、法国的 Vahm [图 1-2(b)] 项目、德国乌尔姆大学的 Maid [图 1-2(c)] 项目、西班牙的 Siamo 项目、加拿大 AAI 公司的 Tao 项目、KISS 学院的 Tinman 项目等。这些轮椅机器人产品基本上采用类似于移动机

机器人的控制系统，采用通用计算机作为上位机，驱动控制系统、传感器系统作为下位机。如麻省理工智能轮椅实验室的轮椅机器人威尔斯利，这个轮椅机器人有三种控制方法：菜单、操纵杆和用户界面。菜单模式下，轮椅的操作类似一般的电动轮椅；在操纵杆模式下，用户通过操纵杆发出方向命令来避障；用户界面模式下，用户和机器之间仅需通过用户眼睛运动来控制轮椅，即用鹰眼系统来进行驱动。西班牙 Siamo 项目是根据用户的残障程度及特殊需求建造的多功能系统。项目初期成果是一个轮椅原型，包括运动和驾驶控制（低级控制），基于语音的人机界面、操纵杆，由超声波和红外传感器组成的感知系统（高级控制），轮椅可以探测障碍及突兀不平地带。

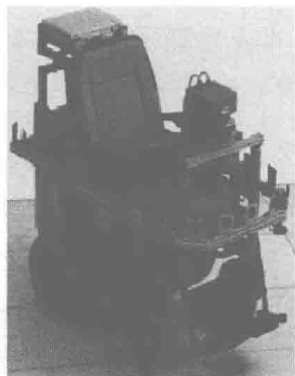
目前在欧美、日本等国家，一些公司已经研制开发出了一些智能程度高、自主能力强的轮椅机器人概念产品。美国的奥林巴斯最近研发出一种名为 Whill 的新型轮椅，如图 1-2(d) 所示。美国麻省理工学院研制出了一种语音控制的机器人轮椅，可以在基于导航的情况下完全通过语音控制的方式在空间内移动，如图 1-2(e) 所示。德国人工智能研究中心也研发了一款轮椅机器人，如图 1-2(f) 所示，该机器人可在社区内完成自主行驶、自动避障和语音识别等。日本残疾人国家康复中心开发了针对物理残疾者使用的轮椅机器人 Orpheu，如图 1-2(g) 所示，它可以通过使用者的手势来导航，还可以借助 Wi-Fi 技术将当前获取到的全景图像传输出去，提供给远程的监护者。日本汽车生产商丰田公司近年来也开始专注轮椅机器人的研发，推出了一款轮椅机器人的概念产品，外形酷似未来的个人汽车，如图 1-2(h) 所示。



(a) Wheelesley



(b) Vahm



(c) Maid



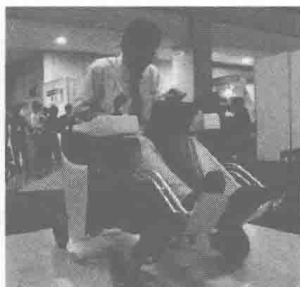
(d) Whill



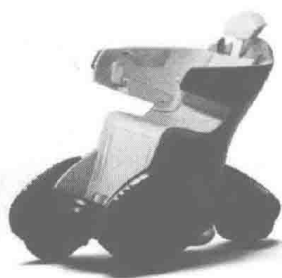
(e) 美国麻省理工学院轮椅机器人



(f) 德国人工智能研究中心轮椅机器人



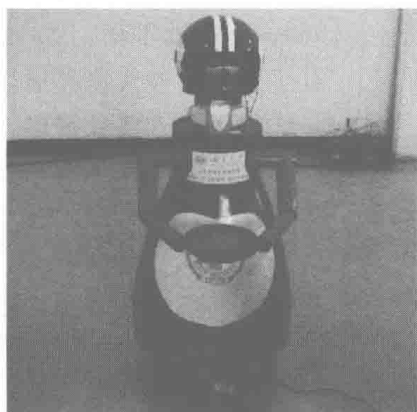
(g) Orpheu



(h) 丰田概念轮椅机器人



(i) 上海交通大学“交龙”轮椅机器人



(j) 服务机器人

图 1-2 典型的服务机器人

在国家“863”计划的支持下,自20世纪90年代起,我国在该领域开展了大量研究工作,中国科学院自动化研究所研制出护士助手机器人“艾姆”、智能保安机器人等。2009年6月,哈尔滨工业大学继研制出“青青”服务机器人后,又研制出一种智能陪护机器人,该机器人可以自主行走、避障,为老年人、残疾人提供各种辅助操作。上海交通大学研

制的“交龙”轮椅机器人 [图 1-2(i)], 具备自主避障、穿越狭窄过道及门口等功能, 并提供触摸屏和语音交互功能, 能实现多种运动指令的识别, 且其识别速率较高, 满足轮椅在运行中的实时性要求, 已在上海世博会中用于服务行动不便的人士。该项目组自主研发的一种服务机器人 [图 1-2(j)], 具备自主导航避障的能力。目前, 家用服务机器人已成为我国机器人领域的重要发展方向。

### (3) 无人驾驶智能车辆

美国卡内基梅隆大学 (Carnegie Mellon University, CMU) 研制的 Navlab 系列智能车辆已发展有数十代, 几乎集成了室外移动机器人所有关键技术, 非常具有代表性。自 2004 年起, 美国国防部高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 开始举办无人驾驶比赛, 在第一次比赛中参赛队伍被要求在沙漠里行驶 200 多千米, 但是没有一支队伍取得成功。2005 年的比赛有 5 辆车完成所有赛程, 冠军由斯坦福大学获得, 他们的比赛用车为一辆改装过的大众途锐 R5 柴油车。2007 年的比赛最终胜利者为卡内基梅隆大学。

20 世纪 80 年代欧洲启动了研究智能车辆的 Eureka-PROMETHEUS 项目。在此背景下, 奔驰公司与德国国防军大学自 1987 年开始联合研制 VaMoRs 系列无人驾驶智能车辆, 其跟踪道路标志线的时速在当时可达 96km/h。近年来, VaMoRs 系列在不断挑战新的速度纪录的同时, 还拥有了适应各种气象环境以及自动超车换道的能力。

我国无人驾驶智能车的研究还处于初级阶段, 整体研究工作和水平与欧美国家相比还有一定的差距。清华大学从 1988 年开始研制 THMR 系列无人驾驶车辆, 其 THMR-V 能自主完成信息融合、路径规划、行为与决策控制、通信管理、驾驶控制等功能, 在高速公路上自动驾驶的最高时速可达 150km/h。此外, 国防科技大学的 CITAVT-N、西安交通大学的 Springrobot、吉林大学的 JLUIV 系列和 Cybercar 也很有代表性。为了推进我国在无人驾驶智能车领域的研究, 国家自然科学基金委员会近年来将此列入重大研究计划。自 2009 年起开始举办中国“智能车未来挑战”比赛, 比赛内容包括交通信号、标识和标线的识别及障碍物规避等无人驾驶车辆基本行驶功能测试, 模拟城区道路及高速路上的行驶性能测试等。在首届比赛中, 上海交通大学、湖南大学、西安交通大学、清华大学、国防科技大学、意大利帕尔玛大学等国内外 7 所大学的队伍、10 余辆无人驾驶车辆参加了比赛, 如图 1-3 所示。该赛事的开展对我国智能车研发从实验室走向现场交流、推动和促进无人驾驶车辆的创新与发展具有重要意义。





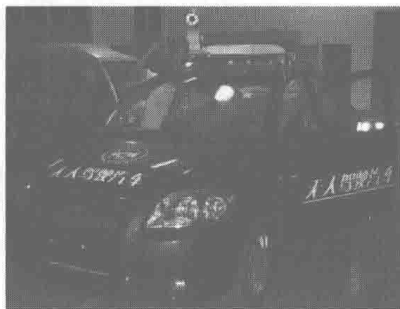
(a) CMU Navlab-11



(b) 清华大学无人驾驶车



(c) Springrobot在“智能车未来挑战”比赛中



(d) 湖南大学无人驾驶车

图 1-3 无人驾驶智能车辆

#### (4) 自主工业机器人

自主工业机器人在工业生产中满足了保证产品质量、提高生产效率、节约材料消耗以及保障人身安全、减轻劳动强度的要求，因而受到国内外学者的广泛关注。

在工厂、医院等场合，为了将大宗物品从某一位置搬运到另一位置，Humberto 等在前人成果的基础上研制了自主导航车。如图 1-4(a) 所示，该车配置有激光传感器，具备导航避障、路径识别跟踪等能力，能够节省大量的人力和物力，提高工作效率。

面对各种各样的清洗需求，日本率先开展壁面移动机器人的研究工作，开发出各种各样的壁面移动机器人，并以壁面移动机器人技术为核心，结合专门的清洗机构，形成多种形式的壁面清洗机器人。我国的壁面移动机器人研究起步较晚，但发展很快，哈尔滨工业大学、北京航空航天大学在该领域处于国内领先地位。针对火电、核电等行业的关键设备——大型冷凝器的清洗需求，自主研发了面向大型冷凝器清洗作业的