



上海科技专著出版资金资助
上海交通大学学术出版基金资助

轮式自主移动机器人

曹其新 张蕾 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

上海科技专著出版资金资助
上海交通大学学术出版基金资助

常州大学图书馆
藏 书

自主移动机器人

曹其新 张 蕾 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书围绕机器人将从为工业生产服务扩展到人们的日常生活领域所面临的技术课题,介绍轮式移动机器人自主控制的关键技术、理论方法和应用,提出机器人各功能模块的技术和实现方法,并介绍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、导航,以及机器人图形化编程控制系统。本书总结作者几年来在机器人方面的科研和教学工作,较系统地把轮式自主移动机器人所涉及的关键技术集成为一个整体,既适合各高等院校自动化、机器人学等专业的本科生,也适合从事移动机器人和服务机器人的研究、开发和应用的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

轮式自主移动机器人/曹其新,张蕾编著. —上海:
上海交通大学出版社,2012
ISBN 978-7-313-07665-6

I. 轮... II. ①曹.. ②张... III. 移动式机器人 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 159694 号

轮式自主移动机器人

曹其新 张蕾 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

常熟市华通印刷有限公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:16 插页:3 字数:299 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-07665-6/TP 定价:68.00 元

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0512-52391383

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪，科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略，上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”，资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

前 言

我国制定的“十一五”、“十二五”以及中长期发展规划中把智能机器人技术作为重点发展方向,并以家用机器人、危险作业机器人和医疗机器人等作为突破口,促进我国智能机器人产业的发展。因此,随着全球的机器人应用产业重心从制造业向非制造业的转移,机器人技术的研究重点也从结构式环境下工作的固定式机械臂、机械手转向非结构未知环境下自主移动式平台和机器人智能化。尤其是近几年来,人民生活水平不断提高,人口老龄化问题日益严峻,服务机器人需求的崛起给机器人技术与产业带来了空前的发展机遇,比尔·盖茨先生预言,服务机器人产业即将重复个人计算机产业崛起的道路,使机器人成为我们日常生活的一部分。而与服务机器人领域密切相关的就是轮式自主移动机器人的关键技术。

本书在介绍轮式移动机器人研究现状的基础上,系统地描述轮式机器人所涉及的基础知识和关键技术。全书共分7章,第1章叙述轮式移动机器人概况,从发展、定义、种类和用途讨论轮式移动机器人将使“家家都有机器人”成为可能。第2章从几种典型轮子和布置介绍了轮式移动机器人的构造和特征。第3章介绍轮式移动机器人的运动控制,内容包括运动学和动力学建模、运动控制和硬件驱动装置。第4章介绍轮式移动机器人的感知与识别。第5章讨论轮式移动机器人的定位、导航和路径规划技术。第6章介绍轮式移动机器人的集成技术、软件编程与仿真技术。最后一章介绍轮式移动机器人的应用实例,探讨在设计开发及应用轮式移动机器人时要考虑的因素、关键技术和实现步骤。

本书是作者近年来从事轮式移动机器人研究和教学取得成果的总结并参考和引用了国内外相关文献和研究成果基础上编著而成的,具有较好的基础性、系统性和实用性,可作为本科生高年级学生和研究生教材,也适合从事轮式移动机器人研究、开发和应用的科技人员学习参考。

近十年来,本书作者在机器人研究中获得多项研究基金和项目的资助,其中有国家自然科学基金、国家“863”计划项目、教育部博士点基金、教育部重大项目培育基金、教育部机械系统与振动国家重点实验室基金,以及株式会社安川电机等项目的资助,作者在此表示感谢。

在本书编著过程中,研究组的栾楠、冷春涛、顾嘉俊、张镇、黄彦文、陈培华、邓成呈等具体参加了实验材料的提供、内容的翻译和编写工作。编写过程中还得到

了众多老师、专家、朋友和学生的热情鼓励和帮助,为此表示衷心的感谢。

由于作者水平所限和编写时间仓促,缺点和不足之处,殷切希望广大读者批评指正。

曹其新 张 蕾

2011年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 什么是轮式移动机器人	1
1.2 轮式移动机器人的种类	6
1.3 轮式移动机器人的用途	8
1.4 轮式移动机器人的研究内容	9
参考文献	12
第 2 章 轮式移动机器人的构造和特征	14
2.1 轮式移动机器人的构成	14
2.1.1 构成要素	14
2.1.2 基本构型	16
2.2 典型的轮式移动机器人结构	20
2.2.1 传统轮	20
2.2.2 全方位轮	21
2.2.3 近期新概念轮	26
2.3 轮子设计实例研究	28
2.3.1 双轮差速移动机器人	28
2.3.2 全方位轮式移动机器人	30
参考文献	34
第 3 章 轮式移动机器人的运动控制	37
3.1 运动学建模	37
3.1.1 机器人坐标系	37
3.1.2 双轮差速移动机器人运动学模型	39
3.1.3 全方位移动机器人运动学模型	40
3.2 动力学建模	43
3.2.1 双轮差速移动机器人动力学模型	43
3.2.2 全方位移动机器人动力学模型	44
3.3 硬件驱动装置	49

3.3.1	驱动电机	49
3.3.2	位置和速度传感器	55
3.3.3	运动控制与驱动器	57
3.4	运动控制算法	61
3.4.1	传统控制算法	61
3.4.2	现代控制算法	67
3.5	运动控制实例	70
3.5.1	系统结构介绍	71
3.5.2	全方位移动机器人的状态方程	73
3.5.3	模糊滑模变结构控制方法	75
3.5.4	实验结果	77
	参考文献	83
第4章	机器人的感知与环境识别	85
4.1	轮式移动机器人内传感器	86
4.1.1	位置角度传感器	86
4.1.2	速度和角速度传感器	89
4.1.3	加速度和角加速度传感器	90
4.1.4	姿态角的检测	92
4.2	轮式移动机器人外传感器	93
4.2.1	触觉与接近感知传感器	93
4.2.2	测距传感器	94
4.2.3	视觉传感器	98
4.2.4	导航相关的传感器	102
4.3	轮式移动机器人中的多传感器信息融合	105
4.3.1	多传感器信息融合的常用方法	105
4.3.2	多传感器信息融合在移动机器人中的应用	108
	参考文献	111
第5章	移动机器人的定位、导航与规划	112
5.1	定位	112
5.1.1	环境地图的表示方法	113
5.1.2	定位的常用方法	116
5.1.3	基于概率方法的定位	121

5.1.4 同时定位和地图创建	127
5.2 导航	131
5.2.1 无地图的导航	131
5.2.2 基于地图的导航	132
5.3 路径规划	134
5.3.1 路径规划的常用方法	134
5.3.2 智能路径规划算法	142
5.3.3 非平坦地形的可通过性分析	143
5.4 一个基于异构视觉的自主导航实例	147
5.4.1 异构视觉系统构建	147
5.4.2 自主机器人移动平台	149
5.4.3 自主移动机器人导航的实现	150
参考文献	159
第 6 章 机器人的编程与仿真	164
6.1 机器人语言	164
6.1.1 机器人语言描述	164
6.1.2 机器人语言的种类和特点	165
6.2 示教与编程	167
6.2.1 在线示教与编程	167
6.2.2 离线示教与编程	168
6.2.3 虚拟示教与编程	169
6.3 机器人仿真	170
6.3.1 三维建模软件	171
6.3.2 三维图形仿真技术	172
6.3.3 动力学仿真软件	176
6.3.4 常见的动力学发动机	178
6.3.5 移动机器人的动力学仿真	181
6.4 机器人仿真实例	181
6.4.1 移动服务机器人的仿真控制系统	181
6.4.2 移动服务机器人系统的仿真过程	186
参考文献	190
第 7 章 轮式移动机器人应用实例	192

7.1 应用轮式移动机器人的要因	192
7.2 竞赛机器人——足球机器人	193
7.2.1 机器人足球赛	193
7.2.2 足球机器人实例	195
7.2.3 足球机器人的发展趋势	203
7.3 室内服务型机器人——迎宾机器人	205
7.3.1 导游导购和迎宾机器人	206
7.3.2 迎宾机器人实例	209
7.4 室外移动机器人——助老助行机器人	227
7.4.1 助老助行机器人的研究现状	227
7.4.2 一种新型助老助行机器人	231
7.4.3 助老助行机器人的发展趋势	244
参考文献	245

第1章 绪论

机器人以其具有灵活性、提高生产率、改进产品质量、改善劳动条件等优点而得到广泛应用。为了获得更大的独立性,人们对机器人的灵活性及智能提出更高的要求,要求机器人能够在一定范围内安全运动,完成特定的任务,增强机器人对环境的适应能力。因此,近年来,移动机器人特别是自主式移动机器人成为机器人研究领域的中心之一。日本、韩国和欧洲都将机器人作为一个战略产业,给予了大力支持,美国也将机器人列为警惕技术,认为机器人技术将对未来战争产生巨大影响,采取了对外其他国家实施技术封锁的政策。我国制定的“十一五”以及中长期发展规划中都把智能机器人技术作为重点发展方向,以家用机器人、危险作业机器人和医疗机器人等作为突破口,促进我国智能机器人产业的发展。因此,随着全球的产业重心从制造业向非制造业的转移,机器人技术的研究重点也从结构式环境下工作的固定式机械臂、机械手转向非结构未知环境下自主移动式平台和机器人智能化。然而,目前在腿式、履带式、轮腿式等各种结构形式中,轮式移动机器人将成为最经济、最有应用前景的一种。

1.1 什么是轮式移动机器人

自20世纪60年代以来,世界各国争相进行了移动机器人的研究,取得了大量研究成果并积累了丰富的实践经验,使移动机器人技术成为机器人学的一个重要分支,并呈现出日益加速发展的良好势头。近年来,移动机器人的学科体系正逐步形成,以至于在一些重要国际学术期刊中出现了与“Robotics”相对应的“Mobotics”一词。

移动机构的实现主要有轮式、履带式、腿式、蛇行式、跳跃式和复合式。其中履带式具有接地比压小,在松软的地面附着性能和通过性能好,爬楼梯、越障平稳性高,良好的自复位能力等特点。但是履带式移动平台的速度较慢、功耗较大、转向时对地面破坏程度大。腿式机器人虽能够满足某些特殊的性能要求,能适应复杂的地形,但由于其结构自由度太多、机构复杂,导致难以控制、移动速度慢、功耗大。蛇行式和跳跃式虽然在某些方面,如复杂环境、特殊环境、机动性等具有其独特的优越性,但也存在一些致命的缺陷,如承载能力、运动平稳性等。复合式机器人虽能适应复杂环境或某些特殊环境,如管道,有的甚至还可以变形,但其结构及控制

都比较复杂。相比之下,轮式移动机器人虽然存在运动稳定性与路面的路况有很大关系、在复杂地形如何实现精确的轨迹控制等问题,但是由于其具有自重轻、承载大、机构简单、驱动和控制相对方便、行走速度快、机动灵活、工作效率高等优点,而被大量应用于工业、农业、反恐防爆、家庭、空间探测等领域。

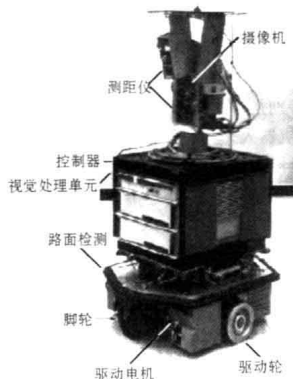


图 1-1-1 Shakey 移动机器人

移动机器人家族最早出现和最普遍存在的一位成员就是轮式机器人,1969 年美国 Stanford Research Institute(SRI)研制成功“Shakey”系统,如图 1-1-1 所示,标志着移动机器人研究的正式开端。这个轮式移动机器人具有一个 TV 摄像头和一个触觉探测器。机载处理器通过无线信号同大型分时计算机相互通信。视觉处理和规划任务由主计算机完成,驱动电机的控制则由机载计算机完成,其主要目标是研究在复杂环境下机器人系统实时控制问题,涉及任务规划、运动规划、多传感器信息处理与融合、目标识别与定位以及系统集成等关键技术。“Shakey”证实了许多通常属于人工智能(Artificial Intelligence, AI)领域的严肃的科学结论,并将它们同移动机

器人的智能联系起来^[1],虽然“Shakey”只能解决简单的感知、运动规划和控制问题,但它却是当时将 AI 应用于机器人的最为成功的研究平台。

此后,轮式移动机器人以其相对简单的结构和较强的适应性而受到学术界的广泛重视。随着研究的不断深入,轮式移动机器人的运动能力、对不同环境的适应能力、智能性、稳定性等方面有了很大的提高。同时,各种应用例子表明,移动机器人作为人类的新型生产和使用工具,在减轻劳动强度,提高生产率,改变生产模式,把人从危险、恶劣、繁重的工作环境下解放出来等方面,显示出极大的优越性。以星球无人探测机器人为例,这类探测机器人被用于在无人协助的情况下,托载一定数量科学分析仪器对未知星球环境,如地表构造、土壤、空气的成分、温度、岩石构造、地质特征等进行探测、采取标本试样、分析,并将有用的图片,分析数据传回地球。完成这项工作,需要探测机器人具有极高的环境适应性和自身系统的鲁棒性,同时又要具备较好的运动性和灵活性。而轮式移动机器人的出现无疑为探测机器人的研究人员提供了一个不错的选择。而实际上也正是如此,许多国际知名的科研院所和公司都是采用轮式机器人作为本体来设计自己的无人探测机器人

的,如前苏联研制的轮式无人探测机器人 Lunokhod 1(见图 1-1-2),于 1970 年 11 月 10 日首次登陆月球,成为第一台登陆外星球的无人探测机器人。

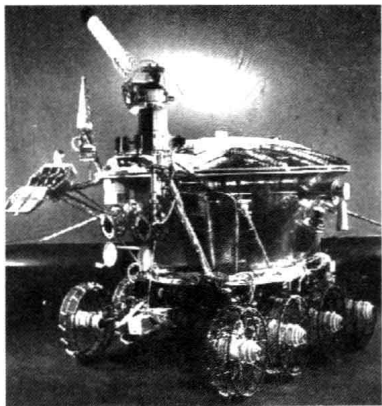


图 1-1-2 Lunokhod 1 移动机器人

到了 20 世纪 70 年代末,随着计算机的应用和传感技术的发展,移动机器人研究又出现了新的高潮^[2]。特别是在 80 年代中期,许多国家有计划地开展了移动机器人技术的研究。如美国的 Hughes 人工智能中心在 1987 年首次进行了移动机器人越野实验^[3],Stanford 大学的室内移动机器人能在立体制导系统引导下慢速步行^[4],中国科学院沈阳自动化研究所^[5]、清华大学智能与系统实验室^[6]、北京航空航天大学^[7]、河北工业大学^[8]等科研院所较早地开展了对移动机器人的研究。设计和制造机器人的浪潮席卷全世界,一大批世界著名的公司开始研制移动机器人平台,这些移动机器人主要作为大学实验室及研究机构的移动机器人实验平台,从而促进了移动机器人学多种研究方向的出现。20 世纪 90 年代以来,以研制高水平的环境信息传感器和信息处理技术,高适应性的移动机器人控制技术,真实环境下的规划技术为标志,开展了移动机器人更高层次的研究。比如机器人世界杯足球赛(RoboCup)^[9]是以 Multi-agent 系统(MAS)与分布式人工智能(DAI)为主要研究背景的,其主要目的就是通过提供一个标准的、易于评价的比赛平台,促进 DAI 与 MAS 的研究与发展。涉及的研究领域包括:智能机器人系统、智能体结构设计、传感器融合技术、多智能体系统、实时规划和推理以及基于网络的三维图形交互等。RoboCup 比赛的水平直接反映了机器人与智能控制技术的研究水平,同

时,其产生的国际影响又大大促进了机器人与智能控制技术的研究与发展。图 1-1-3 为上海交通大学机器人研究所研制的“交龙”足球机器人,该机器人在中国机器人大赛的中型全自主机器人足球赛项目中连续 4 年获得冠军,并进入了 RoboCup 世界杯中型足球机器人比赛。



图 1-1-3 “交龙”双轮差速自主移动机器人

移动机器人的发展主要有两个方面的原因。其一,移动机器人在众多领域日渐广泛的应用。在军事领域,美国、英国、德国等西方先进国家已将移动机器人编入战斗序列,并成功用于营地自动巡逻、快速装填炮弹、排雷、布雷等任务;在宇航探险领域,美国研制的“Pathfinder”、“Sojourner”完成了对火星表面的实地探测,取得了大量有重大价值的火星资料,被誉为代表 20 世纪自动化技术的最高科学成就之一^[9];在制造自动化领域,大量 AGV 与柔性制造系统、物流自动化系统有机结合在一起,在轿车自动装配和无人车间等现代制造技术方面取得了极大成功,在提高劳动生产率的同时大大提高了产品质量;在能源领域,各类遥控移动机器人在核电站安全检测方面发挥了无与伦比的作用;在服务和娱乐领域,大量移动机器人已经承担了地铁清洁、医护助理、办公助手、礼仪接待以及商店售货等众多工作。据美国机器人技术发展中心预测,未来十年内仅用于农业的移动机器人就可能形成 150 亿美元的新型产业。由此可见,日益强烈的社会需求和科技进步是推动机器人技术快速发展的强大外部动力。其二,世界各国政府巨大的资金投入以及计算机、传感器技术、自动控制理论、材料科学、机械制造工艺、机构学、电子技术、通信技术、仿真技术以及人工智能等现代科学技术的发展,也为移动机器人技术的发展

奠定了坚实的基础,并提供了必要的技术条件。微机计算能力和存储能力的提高使移动机器人运行更复杂、更精确的实时控制程序成为可能;网络技术的发展,使移动机器人与主控计算机、其他协作机器人间的通信能力大大增强;计算机软件技术的发展为移动机器人系统提供了更稳定、更快速的运行环境和开发平台;原有传感器的性能不断提高,各类新型传感器不断出现,特别是智能传感器的出现使信息融合技术不断发展,大大提高了移动机器人的感知能力和交互能力;非线性控制理论和模糊控制、神经网络控制等智能控制理论的发展和完善,提高了移动机器人的可控性,使其控制水平有了显著提高。

具有代表性的是2004年1月4日,美国National Aeronautics and Space Administration(NASA)火星探索移动机器人“勇气号”(见图1-1-4)在全世界的关注中成功着陆火星。而另一部“机遇号”火星车也在2004年1月25日顺利在火星表面登陆。肩负着寻找宇宙伙伴的它们不辱使命,标志着人类发射的星际探测器自动化程度提升到了前所未有的水平,同时也标志着智能轮式移动机器人的研究工作已经提高到了一个新的高度。除此之外,许多轮式移动机器人因为其对于未知环境较强的适应性能,正在被越来越多的研究人员重视并应用于其他领域。

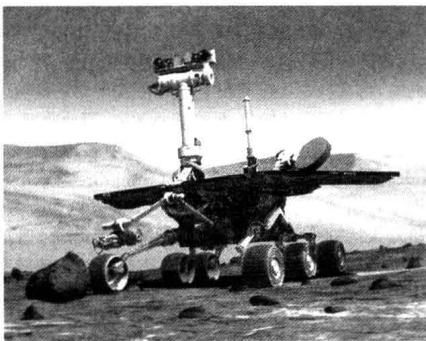


图1-1-4 “索杰那”火星探测机器人

总之,轮式移动机器人是一个具有特殊构型,采用轮子移动的方式,能够利用它的传感器,到达任何一个可以到达、并且期望到达的位置,操纵它的操作手或者其他工具完成期望任务的机器人。它是一个集感知系统、运动系统、作业系统和控制系统于一身的复杂系统,它由传感器了解其自身变化与外部环境的变化,再根据原始任务进行任务的分解与分配、规划,直到控制动作执行机构的动作,从而改变

外部环境或外部环境与机器人自身的关系。

由于轮式移动机器人控制简单、移动灵活,已经被广泛应用于人类的生产、生活实践中,也为其他相关技术的发展提供了丰富的研究素材和应用平台。现在以移动机器人作为载体开发的特种机器人种类繁多,如农业中使用的自主行走拖拉机^[10],智能轮椅^[11],核工业中的废料运输机器人^[12],服务机器人^[13],高速公路中的自动驾驶车^[14]等等。随着信息技术、电子技术的发展,移动机器人作为人工智能的一个分支也将吸收这些成果,功能将更完善,新的轮式移动机器人也将不断地涌现出来^[15]。

1.2 轮式移动机器人的种类

轮式移动机器人种类繁多,根据不同应用、结构形式以及控制方法有各种各样的分类方法,这里首先介绍四种,即分别按照轮式移动机器人的车轮数、运动约束性、平衡特性以及控制方式来分类。

首先,根据轮式移动机器人的车轮个数来分类:普通的轮式移动机器人有两个、三个、四个或六个滚轮,或有驱动(主动)轮和自位(从动)轮,或有驱动轮、转向机构和制动机构。自位轮在沿回转轴开始转动直至转至转弯结束为止的时间内,驱动轮产生滑动,无法确定正确的移动量和转动角度。另外,使用转向机构和制动机构改变运动方向时,将在静止状态下产生很大的阻力^[16]。虽然说与腿式移动机器人相比,轮式机器人地形适应性较差,但在能量效率、运动速度、控制性能和机构复杂性方面性能更佳^[17,18]。按照平面运动的自由度划分,轮式移动机器人包括差速轮(differential drive)式移动机器人和全方位(omni-directional)移动机器人。由于平面运动包含三个自由度,具有三个自由度的机器人称为全方位移动机器人。这种类型的移动机器人运动性能优越,适于高速高灵活场合,但是其运动效率不高。差速轮式移动机器人仅包含两个自由度,具有较高的运动效率,且结构简单,使用场合较多。国内外对于轮式智能机器人(Wheeled Mobile Robot, WMR)的移动载体的研究也越来越多。在这些 WMR 中根据移动平台的驱动轮、方向轮和平衡轮的数量不同,轮式移动平台可分为二轮移动平台、三轮移动平台、四轮移动平台和多轮移动平台,乃至全方位移动平台,两轮的王MR 的稳定性是一个主要的问题,目前有人致力于双轮稳定行驶。实验三轮的王MR 比较常见,代表性的车轮配置方式是一个前轮和两个后轮,两个后轮独立驱动,前轮仅起支撑作用,靠后轮的差速实现转向。也有采用前轮驱动兼转向的方式。还有采用后轮驱动前轮转向的方式,并且许多都应用到实际的系统中了。

四轮移动机构具有很好的稳定性,它的驱动方式也有多样,目前应用最为广

泛。但是四轮的 WMR 在不平的地面上行走时有可能出现一个轮子不着地的情况,这样用码盘等传感器做里程计时将产生很大的误差。另外,如果在四个轮子上安装四个电机来驱动的话,因为 WMR 在平面上运动时最多有三个自由度,所以会出现冗余的情况。普通的车轮移动机构虽然对野外崎岖不平的地面适应性很差,但由于其快速的移动性能和控制上的简易性,仍然受到研究者的青睐,而将普通的车轮经过适当的组合之后,可以实现在阶梯上的运动,所以不少人致力于多节轮式移动机器人的研究与开发。

第二,按照 WMR 运动的约束方程可以将其分成两类:完整性约束(holonomic)和非完整性约束(non-holonomic)的 WMR。考虑一个具有 n 个广义坐标 q 的机械系统,受到 m 个如下的约束: $C(q)=0$,如果这些约束方程具有 $C(q)=0$ 的形式或者通过积分可以化为 $C(q)=0$ 的形式,则它代表一个完整的约束。否则是一个非完整性的约束系统。

对于一个非完整性约束的轮子来说,它只能在与轮子轴垂直的方向前进或者后退,在不打滑的情况下不具有侧向移动的能力。在 WMR 平台中,如果它的约束方程中有非完整性约束方程,或者说如果它的某个轮子不具有侧向滑动的能力,那么它就是一个非完整约束的 WMR。非完整约束在现实世界中是随处可见的,象传统的车轮都属于非完整约束的轮子。非完整约束的 WMR 的运动能力的限制使得这类系统的轨迹规划、轨迹跟踪等问题中又增加了一个约束条件而变得困难了,另外,在非完整约束条件下的 WMR 的运动学方程和动力学方程是非线性函数,用常规的线性控制理论进行控制是很困难的,而且也不能简单地化成线性的系统。可见,对于非完整约束的 WMR 的控制也存在一定的难度,但由于它的普遍性,目前有为数不少的学者在致力于非完整性移动机器人的运动控制的研究。

第三,根据轮式移动机器人平衡性能分类,有动态平衡式和静态平衡式两种。单轮和双轮移动机器人由于机构的独特性,必须采用动态平衡原理才能实现正常运动,因此又称为动态平衡移动机器人。单轮移动机器人与双轮移动机器人采用不同的运动原理,两者的机构也完全不同。单轮移动机器人典型的例子是卡内基-梅隆大学机器人研究所研制的 Gyrover I 和 Gyrover II 机器人^[19](见图 1-2-1),它采用回转平衡的方式实现机器人的动态平衡。双轮移动机器人采用移动倒立摆原理实现机器人的动态平衡,Segway 移动交通工具是双轮移动机器人研究成果的代表。多轮移动机器人中最为常见的是三轮和四轮移动机器人。

最后,根据控制方式分类:有遥控操纵式、程序数值控制式、示教再现式和自主控制式。按照轮子的数量分类,可分为单轮、双轮移动机器人和多轮移动机器人。