



# 全方位移动机器人导论

赵冬斌 易建强 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 全方位移动机器人导论

赵冬斌 易建强 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书内容共 14 章,分为上下两篇:上篇介绍全方位移动机器人的系统结构、运动学、动力学、运动控制和运动规划方法;下篇介绍全方位移动机械手的系统结构、运动学、动力学、协调运动规划和控制方法。

本书可供从事智能机器人、人工智能和智能控制研究、设计和应用的科技人员和高等院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

全方位移动机器人导论/赵冬斌,易建强著. —北京:科学出版社,2010  
ISBN 978-7-03-027560-8

I. ①全… II. ①赵… ②易… III. ①移动式机器人-研究 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 085573 号

---

责任编辑:张海娜 / 责任校对:张 琪

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010 年 5 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2010 年 5 月第一次印刷 印张: 13 3/4

印数: 1—3 000 字数: 261 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

全方位移动机器人(omni-directional wheeled mobile robot, OWMR)是一类典型的移动机器人系统,具有平面内完全的3个自由度,可以在任意时刻实现平面内任意方向的运动,因此,非常适合工作在各种复杂环境,能在各种狭小环境中高效运动。全方位移动机械手(omni-directional wheeled mobile manipulator, OWMM)是一种具有操作功能的 OWMR,通常由 OWMR 和安装在其上的一个或多个具有若干自由度的机械手(manipulator)构成。这种结构使机械手拥有更大的工作空间、更高的运动冗余性,并具有同时移动和操作的功能,使其能在更短时间内,以更优位姿完成更大范围内的任务,优于传统的机械手和移动机器人。

从理论上讲,全方位移动机器人通常采用冗余驱动方式来实现机器人的全方位运动,在运动过程中需要多个驱动轮之间的协调,与差分驱动方式的移动机器人不同。而全方位移动机械手则增加了移动平台和机械手之间的耦合,其动力学模型更复杂、非线性更强,为控制理论和方法的应用提出了更高挑战。从应用上看,全方位移动机器人和全方位移动机械手系统可以代替人工作在各种危险场合,如排除炸药、垃圾处理、野外探险、太空作业以及一些具有复杂应用的工业场合,如船体焊接等,也可以实现与人的交互合作,如取小物品、开门、搬运物体等,具有广泛的应用领域和前景。

全方位移动机器人一直是机器人领域的重要研究方向之一,其系统结构、运动学、动力学、运动规划、运动控制、考虑干扰和不确定性条件下的智能控制方法等研究内容一直受到国内外众多学者关注。本书一方面陈述本领域的国内外研究现状和趋势,另一方面介绍近年来作者在上述研究内容上所获得的一些研究成果,为读者提供本领域的相关动态,促进相关人员对本领域的深入研究。

本书是在作者数年来的研究工作成果、所培养的博士研究生和硕士研究生的学位论文以及一些领域内发表的重要期刊会议论文的基础上进一步深化、加工而成的。全书共14章,分为上下两篇:上篇介绍全方位移动机器人的系统结构、运动学、动力学、运动控制和运动规划方法;下篇介绍全方位移动机械手的系统结构、运动学、动力学、协调运动规划和控制方法。

本书的撰写参考了国内外的相关研究成果,这些成果是本书主要学术思想的源泉,在此对涉及的专家和研究人员表示衷心的感谢。作者得到北京航空航天大学宗光华教授和中国科学院自动化研究所谭民研究员的评审和宝贵建议,在此向两位老师表示衷心的感谢。感谢国家自然科学基金项目(60475030、60621001)

和科技部国际重点合作项目(2004DFB02100)的资助。感谢邓旭玥博士、李新春博士和徐冬博士为本书提供的材料,感谢宋佐时博士、谭湘敏博士和王大伟硕士的相关研究工作。

作 者

2010年2月于北京

# 目 录

## 前言

## 上篇 全方位移动机器人

<b>第 1 章 全方位移动机器人介绍</b> .....	3
1.1 引言 .....	3
1.2 移动机器人 .....	3
1.3 全方位移动机器人 .....	5
1.4 移动机器人控制问题 .....	7
1.4.1 传统控制方法 .....	8
1.4.2 智能控制方法 .....	9
1.5 移动机器人路径规划问题.....	10
1.6 上篇介绍.....	11
参考文献 .....	12
<b>第 2 章 全方位移动机器人的结构</b> .....	17
2.1 引言.....	17
2.2 机器人的定义与结构.....	17
2.2.1 广义运动学 .....	17
2.2.2 典型结构 .....	19
2.2.3 OWMR .....	22
参考文献 .....	25
<b>第 3 章 全方位移动机器人的运动控制</b> .....	27
3.1 引言.....	27
3.2 全方位移动机器人的轮系结构.....	27
3.3 运动学模型.....	28
3.3.1 模型建立 .....	28
3.3.2 几种特殊的运动方式 .....	32
3.3.3 模型分析 .....	33
3.3.4 完整与非完整约束 .....	35
3.3.5 电机转速的影响.....	36
3.4 基于运动学的跟踪控制.....	37
3.4.1 控制器设计 .....	38

3.4.2 仿真分析 .....	38
3.5 机器人运动控制的实现 .....	40
3.5.1 机器人速度控制器的实现 .....	40
3.5.2 基本导航功能 .....	42
3.6 本章小结 .....	43
参考文献 .....	44
<b>第4章 全方位移动机器人的运动与挤压力同时控制 .....</b>	<b>45</b>
4.1 引言 .....	45
4.2 动力学模型 .....	46
4.2.1 模型1——整体动力学模型 .....	46
4.2.2 模型2——分体动力学模型 .....	48
4.3 运动控制 .....	51
4.3.1 基于模型1的运动控制 .....	51
4.3.2 基于模型2的运动控制 .....	51
4.4 挤压力控制 .....	52
4.5 机器人运动与挤压力同时控制 .....	54
4.5.1 机器人本体转向情形 .....	54
4.5.2 机器人本体不转向情形 .....	55
4.6 仿真分析 .....	56
4.6.1 机器人本体转向情形 .....	57
4.6.2 机器人本体不转向情形 .....	62
4.7 本章小结 .....	68
参考文献 .....	69
<b>第5章 基于概率路径图的机器人路径规划 .....</b>	<b>70</b>
5.1 引言 .....	70
5.2 相关内容 .....	71
5.2.1 PRM .....	71
5.2.2 模拟退火 .....	73
5.3 优化路径规划器 .....	74
5.3.1 新路径的产生 .....	75
5.3.2 路径评价函数 .....	76
5.4 仿真分析 .....	77
5.5 本章小结 .....	80
参考文献 .....	81
<b>第6章 基于蚁群优化的机器人路径规划 .....</b>	<b>83</b>
6.1 引言 .....	83

6.2	ACO .....	83
6.2.1	蚂蚁的捕食行为 .....	83
6.2.2	基本 ACO .....	84
6.2.3	仿真分析 .....	86
6.3	基于改进 ACO 的机器人路径规划 .....	88
6.3.1	离散域的机器人规划问题 .....	88
6.3.2	改进 ACO 算法 .....	89
6.3.3	仿真分析 .....	91
6.4	基于 APF 导向 ACO 的机器人路径规划 .....	96
6.4.1	基于 APF 的机器人路径规划 .....	96
6.4.2	APF 导向 ACO 算法 .....	97
6.4.3	仿真分析 .....	98
6.5	本章小结 .....	101
	参考文献 .....	102

## 下篇 全方位移动机械手

<b>第 7 章</b>	<b>全方位移动机械手介绍</b> .....	105
7.1	引言 .....	105
7.2	全方位移动机械手的运动规划 .....	107
7.3	全方位移动机械手的运动控制 .....	110
7.4	下篇介绍 .....	114
	参考文献 .....	115
<b>第 8 章</b>	<b>全方位移动机械手的运动学</b> .....	120
8.1	引言 .....	120
8.2	系统结构 .....	120
8.3	整体运动学 .....	122
8.4	可操作度分析 .....	125
8.4.1	广义可操作度定义 .....	125
8.4.2	奇异位姿 .....	127
8.4.3	可操作度分析 .....	128
8.4.4	方向可操作度分析 .....	130
8.4.5	全方位移动平台与差分驱动移动平台的比较 .....	131
8.5	本章小结 .....	133
	参考文献 .....	133
<b>第 9 章</b>	<b>全方位移动机械手的分级协调运动规划</b> .....	134



9.1	引言 .....	134
9.2	遗传算法简介 .....	134
9.3	基于遗传算法的运动规划 .....	136
9.3.1	目标位姿的确定 .....	136
9.3.2	全方位移动平台位置的运动规划 .....	137
9.3.3	机械手的路径规划及与全方位移动平台姿态的协调 .....	138
9.4	仿真分析 .....	139
9.5	本章小结 .....	143
	参考文献 .....	144
<b>第 10 章</b>	<b>末端任务给定的动态运动规划 .....</b>	<b>145</b>
10.1	引言 .....	145
10.2	静态规划 .....	145
10.2.1	给定任务的离散化 .....	145
10.2.2	随机位姿的产生 .....	146
10.2.3	路图的构建及搜索 .....	147
10.3	动态规划 .....	149
10.3.1	动态避障策略 .....	149
10.3.2	局部规划器 .....	150
10.3.3	动态规划算法 .....	151
10.4	仿真分析 .....	151
10.4.1	静态规划 .....	152
10.4.2	动态规划 .....	153
10.5	本章小结 .....	154
	参考文献 .....	154
<b>第 11 章</b>	<b>全方位移动机械手的动力学 .....</b>	<b>155</b>
11.1	引言 .....	155
11.2	分体运动学 .....	156
11.3	动力学模型 .....	158
11.3.1	整体动力学模型 .....	158
11.3.2	分体动力学模型 .....	160
11.4	全方位移动机械手的运动控制 .....	163
11.4.1	基于整体动力学模型的跟踪控制 .....	163
11.4.2	基于分体动力学模型的镇定控制 .....	164
11.5	仿真分析 .....	165
11.6	本章小结 .....	167
	参考文献 .....	167

---

<b>第 12 章 全方位移动机械手的滑模轨迹跟踪控制</b> .....	168
12.1 引言 .....	168
12.2 滑模控制的基本理论 .....	169
12.3 基于滑模方法的轨迹跟踪控制 .....	170
12.4 仿真分析 .....	175
12.5 本章小结 .....	177
参考文献 .....	177
<b>第 13 章 全方位移动机械手的自适应轨迹跟踪控制</b> .....	179
13.1 引言 .....	179
13.2 自适应控制基本理论 .....	179
13.3 基于自适应方法的轨迹跟踪控制 .....	181
13.4 仿真分析 .....	184
13.5 本章小结 .....	186
参考文献 .....	186
<b>第 14 章 全方位移动机械手的神经网络轨迹跟踪控制</b> .....	188
14.1 引言 .....	188
14.2 神经网络控制基本理论 .....	189
14.2.1 神经网络的构成 .....	190
14.2.2 神经网络的函数逼近特性 .....	192
14.3 基于神经网络的自适应控制 .....	192
14.3.1 自适应神经网络控制 .....	192
14.3.2 自适应神经网络滑模控制 .....	195
14.3.3 分离式神经网络应用 .....	197
14.4 仿真分析 .....	199
14.4.1 自适应神经网络控制器仿真分析 .....	200
14.4.2 自适应神经网络滑模控制器仿真分析 .....	202
14.5 本章小结 .....	205
参考文献 .....	206

# 上篇 全方位移动机器人



# 第 1 章 全方位移动机器人介绍

## 1.1 引 言

机器人是当代自动化技术和人工智能技术发展的典型体现,也代表着制造技术发展发展的新水平。机器人尤其是工业机器人的广泛应用,极大地提高了生产力。目前世界上使用的机器人已有百万之多,并且此数目仍在快速增长。其应用领域也从传统的制造业、军事应用逐步扩展到服务业、空间探索等。

反过来,机器人的发展也对自动控制技术、智能技术、传感技术、制造技术提出了更高的要求。现在的机器人具有较强的运动能力,一定的操作能力,初步的看、听、说能力,简单的决策能力。可以预见,未来的机器人,将具有更高的智能、更精巧的结构、更人性化的机械设计。

由此可见,机器人不仅是一个迅速发展的产业,还是一门迅速发展的交叉学科。因此,机器人学、机器人技术已引起各国学界和产业界的极大关注<sup>[1]</sup>。

## 1.2 移动机器人

机器人从诞生到现在已有了长足进步和发展。其中,能够在工作空间中运动的移动机器人更是发展迅速,已成为机器人学中繁荣发展的一个分支。特别是二十多年来,微电子技术、传感器技术、计算机技术、网络技术及相关技术的发展,极大地促进了移动机器人技术的发展。另外,机器人技术也得到了广泛应用,包括军用和民用<sup>[2]</sup>。

移动机器人就活动的(空间)范围来划分,可以分为水下机器人、地面机器人、飞行机器人和空间机器人等<sup>[3]</sup>;就驱动方式而言,可以分为轮式移动机器人、履带式移动机器人、腿式移动机器人(包括仿人机器人)等<sup>[2]</sup>。结合这两种分类,本书主要介绍地面轮式移动机器人。

早在 20 世纪 60 年代,西方发达国家已经开始了移动机器人的研究。早期的移动机器人主要为地面移动机器人,代表性机器人主要有: Nilsson 等研制的 Shakey(主要作为相关人员研究人工智能的载体,如图 1.1(a)所示)<sup>[4]</sup>,法国 Hilare 研究计划所研制的 Hilare 机器人<sup>[5]</sup>,Moravec 等研制的 Stanford Cart(图 1.1(b))<sup>[6]</sup>等。其中,Moravec 所提出的栅格地图(grid map)是移动机器人构建地图的经典方法。

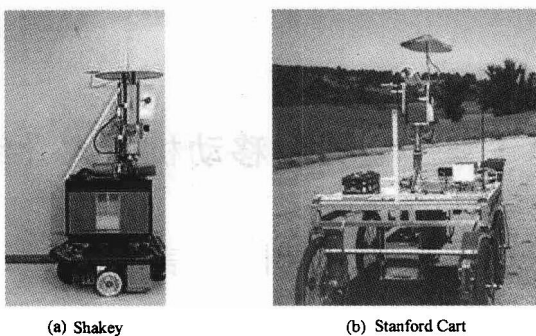


图 1.1 典型移动机器人 Shakey<sup>[4]</sup> 和 Stanford Cart<sup>[6]</sup>

上述几种机器人都是轮式移动机器人。同期,腿式移动机器人也开始设计研制,如 GE 公司研制的 4 腿移动机器人 GE Quadruped<sup>[7]</sup>。

这些早期的移动机器人主要关注于各种关键技术的发展,如地图构建、传感器技术、运动规划与控制、机器人导航等,它们强调对机器人环境的认知与建模<sup>[6]</sup>,采用传统的逻辑推理方法实现机器人的智能<sup>[4]</sup>。

从 20 世纪 80 年代至今,移动机器人的研制进入一个爆炸式增长阶段<sup>[3]</sup>。一方面,许多大公司开始设计制造各种商业化的移动机器人;另一方面,智能移动机器人作为人工智能技术、自动控制技术、计算机技术与机器人技术相结合的产物而得到更多重视<sup>[8,9]</sup>。

一般而言,一个机械系统如果具有可编程功能,能够自动执行某种操作,即可称为机器人。智能机器人则更强调机器人自主适应环境的功能。简而言之,智能机器人能够感知周围环境,建立环境模型,进行推理决策,作出相应的反馈纠正,完成预定的工作任务。这类机器人不仅作为特种机器人应用于某些事故处理中,而且也在服务业得到较为广泛的应用,比较有名的包括 SONY 公司生产的 Aibo 宠物狗<sup>[10]</sup>(图 1.2),本田公司的仿人机器人 Asimo 等。

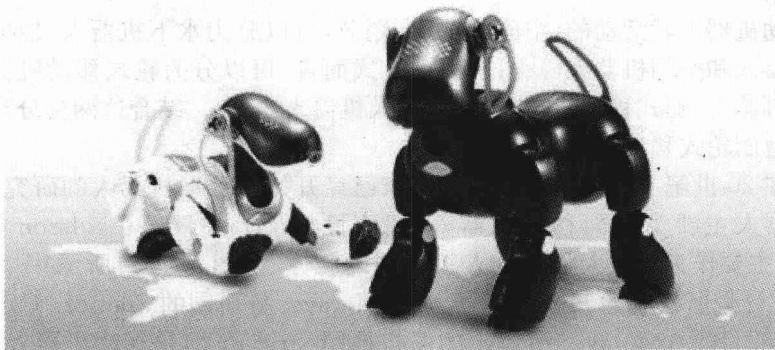


图 1.2 Aibo 宠物狗<sup>[10]</sup>

### 1.3 全方位移动机器人

本节所讨论的全方位移动机器人都为轮式移动机器人。对腿式移动机器人而言,因为这类机器人大部分都具有全方位移动能力,单独考虑这类全方位移动机器人没有意义。所谓全方位移动机器人,就是指如果不考虑驱动电机转速限制,机器人能够在任何时刻向平面上任何方向运动。通常,轮式机器人大部分都使用差分驱动轮系作为机器人的驱动系统。这样的机器人能够在不同曲率半径的圆弧或直线上运动,也能够原地旋转自身;但它不能沿轮子平面的法线方向运动。这个限制对全方位移动机器人来说并不存在。

一般来说,全方位移动机器人驱动系统可由多个万向轮(caster wheel)<sup>[11]</sup>、瑞典轮(Swedish/Mecanum wheel)<sup>[12~14]</sup>构成,如图 1.3 所示。当然,也有其他构成方式,如正交轮(orthogonal wheel)<sup>[15]</sup>或球轮(ball wheel)<sup>[16]</sup>等。其中,正交轮<sup>[13]</sup>由一个轮盘和很多小轮构成,其中小轮均匀分布在轮盘的边缘,轮盘的中心轴和小轮的中心轴正交。杨福广等<sup>[17]</sup>描述的另外一种正交轮,每个轮由两个中心轴正交的小轮构成。与之相似的还有一种切换轮<sup>[18,19]</sup>,每个轮子由一个轮盘和挂置在它边缘的许多滚子构成。球轮<sup>[16]</sup>由一组滚子支撑的滚动球体构成,并由另一组滚子提供驱动。Ferriere 等<sup>[20]</sup>对几种具有全方位移动能力的驱动轮系从负载、抗干扰能力等方面作了比较。

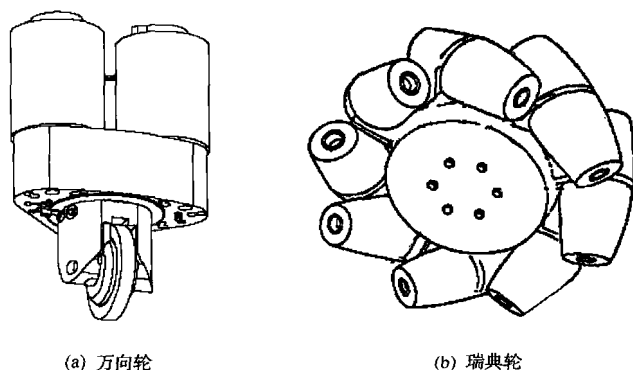


图 1.3 万向轮<sup>[11]</sup>与瑞典轮<sup>[13]</sup>

上述机器人都是将各种轮子作为其驱动部分,机器人另有其本体部分。还有一些机器人,本身就是一个球体<sup>[21,22]</sup>,因而也具有全方位移动能力。

移动机器人的运动学模型或动力学模型可分别根据刚体力学或 Lagrange 动力学方法求得, Kim 等<sup>[23]</sup>还讨论了一种在增广坐标系下求得移动机器人运动学模

型的方法。Campion 等<sup>[12]</sup>给出了一般情形下由同心轮(centered wheels)、万向轮、瑞典轮构成驱动系统的移动机器人的运动学模型,并根据其运动能力,将它们分为五类,分别分析了各自的可控性、运动能力等。

一般而言,如果不考虑各种非理想因素,如轮子与地面之间的滑动、机器人驱动系统的轮齿间隙和外界扰动,全方位移动机器人的运动学模型和动力学模型是不难得到的。但是,各种非理想因素和外界扰动不可避免。因此,在全方位移动机器人运动学、动力学建模中,往往需要考虑这些因素以及外界扰动。例如,通常假设轮子与地面的接触点不发生滑动,而事实上,由于轮子设计本身的原因(如某些切变轮)或是非理想因素(如地面摩擦力的影响)的影响,这种滑动往往不可避免。Williams 等<sup>[19]</sup>考虑摩擦力的影响,提出了一种切换轮驱动的全方位移动机器人有滑动的动力学模型。刘开周等<sup>[24]</sup>将正交轮的受力变化视为不确定性干扰,提出了一种全方位移动机器人的不确定扰动数学模型。Wang 等<sup>[25]</sup>则针对轮式移动机器人的轮子前滑和侧滑问题,进行了详细的建模分析。随着实际应用的日益普及,目前这方面的研究逐渐成为热点。

全方位移动机器人的运动学模型和动力学模型是实现控制的必要条件,而且,通过对机器人力学模型的分析,有助于全方位移动机器人控制器的设计。赵冬斌等<sup>[26]</sup>分析了全方位移动机器人的结构和运动学特性。Yi 和 Kim<sup>[27]</sup>根据全方位移动机器人的运动学模型,分析了其构形空间中可能存在的奇点,并提出了一种无奇点驱动分配方案。Kim 等<sup>[28]</sup>提出了基于虚拟螺杆和虚拟关节的运动能力分析方法,并将其应用于全方位移动机器人的运动能力分析。邓旭玥等<sup>[29]</sup>研究了滑动对运动学模型的影响。Chung 等<sup>[30]</sup>针对由 3 个万向轮驱动的全方位移动机器人,详细地分析了各种形式的动力学模型,为相应控制器的设计带来方便。通过对移动机器人力学模型的分析,亦可为机器人驱动系统的设计提供参考, Park 等<sup>[31]</sup>讨论了全方位移动机器人驱动系统的优化设计问题,得出由 3 个主动驱动的万向轮构成的驱动系统具有最好性能的结论。Jung 和 Kim<sup>[32]</sup>提出了一种增强移动机器人运动能力的方法,即通过给非全方位移动机器人增加一个关节,使其具有全方位的移动能力。冷春涛等<sup>[33]</sup>分析了全方位移动机器人在不同方向上的速度和加速性能。

由万向轮系构成的机器人,比较知名的有 Nomadic XR4000,其主要机械结构如下:轮直径 11cm,轮滚动轴与转向轴之间的偏移为 2cm。在大部分地面上,最大加速度和最大速度可以达到  $2\text{m/s}^2$ 、 $1.25\text{m/s}$ 。这种由万向轮系构成的全方位移动机器人具有如下优点:

(1) 运动平稳。在机器人运动的过程中,万向轮与地面连续接触,因此机器人不会在纵向方向上产生振动;而正交轮、瑞典轮则可能出现振动。



(2) 便于建立数学模型。由万向轮构成的驱动轮系,可以逻辑清晰地导出轮子转向速度、滚动速度与机器人本体速度的关系。并且,在得到的数学模型中,各个参数都有明确的物理含义,可以在机械制造的过程中设定。

(3) 便于控制。体现在两个方面:一方面,由于万向轮系构成的全方位移动机器人具有逻辑结构简单的“本体速度-轮速度”的映射关系,便于机器人运动控制器的设计;另一方面,轮子的驱动装置比较简单。

(4) 负载能力大、抗干扰能力强。正因为万向轮系的负载能力大,所以用它做较大、较重的机器人的驱动系统,如本书下篇介绍的全方位移动机械手等。瑞典轮和球轮由于机械结构的原因,不适合于重负载。另外,万向轮系对地面环境(是否足够平坦光滑,是否清洁等)没有很高的要求,球形机器人对这方面的要求比较严格。

## 1.4 移动机器人控制问题

在机器人学的发展过程中,控制问题始终是一个极其重要的问题。早期的机器人控制的研究对象多为机械手,并已取得大量的成果<sup>[34,35]</sup>。随着人们对机器人移动能力的关注,大量形式各异的移动机器人开始出现,移动机器人的控制问题也得到了很多学者的关注<sup>[36,37]</sup>。

应用机器人的目的,归根结底是要控制机器人来完成某项任务。因此,控制效果的好坏将直接关系到机器人的工作能力的高低。对移动机器人来说,对其移动本体的控制更是重中之重,因为机器人其他的动作一般都建立在本体运动控制的基础上。如果对机器人本体的控制不能满足要求,研制高性能的移动机器人无异于缘木求鱼。同时,移动机器人的控制与一般系统的控制有区别。前者的被控对象——移动机器人,是一个开放的系统,需要不断与外界环境交互;而且,一般而言外界环境是不断变化的,这些都给移动机器人控制带来困难。由此可以得出,移动机器人控制是一个必须重视的问题。

移动机器人控制问题可以分为两类<sup>[38]</sup>。

### 1) 镇定控制

镇定控制(regulation)又称为点到点控制。其控制目标为控制机器人运动到工作空间中的指定点。一般来说,要求控制系统具有渐进稳定性以及足够的鲁棒性,而对控制系统的动态响应特性则没有过多要求。

### 2) 跟踪控制

跟踪控制(tracking control)是指其控制目标为控制机器人跟踪工作空间的参考轨迹。同样要求控制系统具有渐进稳定性,同时要求控制系统有较好的动态响