



# 多移动机器人 协同原理与技术

SYNERGY PRINCIPLES AND  
TECHNOLOGIES  
OF MULTI-MOBILE ROBOTS

蔡自兴 等著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 多移动机器人协同原理与技术

Synergy Principles and Technologies of Multi-mobile Robots

蔡自兴 陈白帆 刘丽珏 余伶俐 著

国防工业出版社

·北京·

# 内 容 简 介

本专著以多移动机器人的协同技术和方法为研究内容,涉及多移动机器人的研究概述、体系结构、通信、协同机制、协作定位与建图、目标协作跟踪、多移动机器人系统实例及其应用和展望等。本专著着重介绍多移动机器人研究在体系结构、可重构通信、协同任务分配和路径规划、相关机器学习、环境认知、多目标跟踪等方面的理论和方法上取得的一些进展,对于提高多移动机器人系统的协同工作的技术水平,促进相关技术的发展,具有重要的科学意义。

本专著是在总结国家基础研究项目研究成果的基础上写成的,是作者进行创新研究成果的结晶,其内容含有较为明显的创新。本专著可供从事智能机器人、人工智能、智能控制和智能系统研究、设计和应用的科技人员和高等院校师生阅读和参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

多移动机器人协同原理与技术/蔡自兴等著. —北京:  
国防工业出版社, 2011. 2  
ISBN 978-7-118-06854-2

I. ①多… II. ①蔡… III. ①机器人—研究 IV.  
①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 254961 号

※

国防工业出版社出版发行  
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)  
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司  
新华书店经售

\*

开本 710×960 1/16 印张 18½ 字数 321 千字  
2011 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 50.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422  
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474  
发行业务:(010)68472764

# 前 言

随着移动机器人应用的领域和范围的不断扩展,多移动机器人由于其具有的单机器人无法比拟的优越性已越来越受到重视。多移动机器人系统的协同原理和技术的相关研究是人工智能和智能机器人的国际前沿研究课题,也是多移动机器人开发研究的热点和难点问题之一。对多移动机器人的体系结构和协同机制、未知环境的定位与建图、目标定位与跟踪以及多移动机器人通信等,尚有许多关键理论和技术问题有待解决和完善。

本书以多移动机器人的协同工作和重构技术及方法为研究内容,在体系结构、可重构通信、协同机制、机器学习、环境认知、多目标跟踪等方面的理论和研究方法研究上取得一些突破性进展,推动人工智能、模式识别、导航控制等学科的前沿问题研究的进展,为提高多移动机器人系统的协同工作的技术水平,促进相关技术的发展,具有重要的科学意义。本研究成果也为军事、航天、海洋、建筑、交通、工业和服务业等领域多移动机器人协同系统的开发研究提供了新的设计理论和技术,为用于军事、航天、深海作业和其他领域的多移动机器人系统的应用奠定了理论和技术基础。

2006年1月至2008年5月,本人主持了国家国防基础科研项目“异质多移动体的××××与重构技术的基础研究”,并于2008年5月17日通过了国防科工委组织的结题验收。在国防科工委的支持和项目组成员的共同努力下,经过近3年的深入研究,已取得了一批成果,分别在国际期刊(如IEEE Transactions等)上发表论文21篇,在国内期刊上发表论文135篇,在国内外主流会议上发表论文101篇。获得国家发明专利“一种可重构的多移动机器人通信方法”

(200810030495.7)授权1项和软件著作权登记“多机器人仿真系统”1项。由于这些成果都是以分散的形式在各杂志或论文集上出现,不方便查阅和交流,因此有必要将该项目的成果汇集起来,以专著的形式奉献给广大的机器人学研究者和读者们。

本书主要内容有:多移动机器人的研究意义、基本理论、研究现状;多移动机器人的硬件体系结构,包括多移动机器人团队的体系结构、多移动机器人团队的通信机制;多移动机器人的协同机制,包括任务描述和分配方法、多移动机器人的协作、多移动机器人团队的运动协调机制;多移动机器人协作环境感知、目标检测与定位的理论及方法,包括多移动体协作的环境建模与定位研究、有效的多异质传感器信息融合策略、快速的运动目标的检测与定位;最后还介绍了目前已有的多移动机器人系统实例及其应用。与国外已经出版的同类书籍比较,本书内容全面翔实,几乎包括了多移动机器人的主要研究方面;系统性强,结构严谨,不同于一般的科技或学术论文集;学术思想新颖,反映国内外多移动机器人相关技术研究的最新进展;主编和主要作者具有丰富的科研和编写经验,书稿的内容理论联系实际,具有很强的可读性。

本书由蔡自兴任主编,陈白帆任副主编。蔡自兴、陈白帆、刘丽珏、李仪、余伶俐、刘利枚、文志强、任孝平、卢薇薇、匡林爱、陈爱斌、潘薇等参加了编写工作。在编写和出版过程中得到了国内外许多专家、学者以及国防工业出版社的热情帮助。在此,我们衷心感谢中华人民共和国科技部专著出版基金的资助,十分感谢那些参加了本项目研究而没有参加本著作编写工作的其他博士研究生和硕士研究生,不管是在项目的研究过程中,还是在书稿的整理过程中都得到了他们的支持和帮助。由于时间紧迫,成稿匆促,书中难免存在不妥甚至错误之处。我们诚恳地希望各位专家读者不吝赐教和指正,对此我们表示诚挚感谢。

本书可作为智能机器人研究和教学的参考书,也可供从事人工智能、智能控制和智能系统研究、设计和应用的科技人员和高等学校师生学习和参考。

蔡自兴

2010年6月2日

于中南大学

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 多移动机器人系统简介.....	1
1.1.1 多移动机器人系统的优点 .....	2
1.1.2 多移动机器人系统的应用领域 .....	2
1.1.3 多移动机器人系统的性能衡量指标 .....	3
1.2 多移动机器人研究的主要内容.....	5
1.2.1 多移动机器人协作的体系结构 .....	5
1.2.2 多移动机器人的任务分配 .....	6
1.2.3 多移动机器人协作环境感知与定位 .....	7
1.2.4 多移动机器人团队的重构技术 .....	8
1.2.5 多移动机器人的机器学习 .....	8
1.3 多移动机器人系统研究趋势.....	9
1.3.1 异质多移动机器人系统.....	10
1.3.2 具有容错机制的多移动机器人系统.....	11
<b>第二章 多机器人体系结构</b> .....	12
2.1 多机器人体系结构概述 .....	13
2.2 面向探测任务的单机器人体系结构 .....	15
2.3 协作多机器人体系结构 .....	17

2.4	协作多机器人系统实验平台 .....	20
2.4.1	机器人的驱动与控制系统 .....	20
2.4.2	传感和通信系统 .....	21
2.5	协作多机器人软件平台 .....	22
2.5.1	协作多机器人系统功能结构 .....	22
2.5.2	协作多机器人系统控制平台 .....	24
2.6	小结 .....	25
<b>第三章</b>	<b>多移动机器人通信 .....</b>	<b>27</b>
3.1	多移动机器人通信机制的研究 .....	28
3.1.1	多移动机器人通信系统研究现状 .....	28
3.1.2	通信研究主要内容 .....	31
3.2	多移动机器人通信协议分析 .....	40
3.2.1	多移动机器人通信网络路由协议及其评价标准 .....	40
3.2.2	基于TCP传输的平面路由协议分析 .....	40
3.2.3	复杂环境下的通信协议分析 .....	44
3.3	基于通信的多移动机器人区域覆盖 .....	48
3.3.1	正多边形区域覆盖理论 .....	49
3.3.2	仿真实验 .....	51
3.3.3	网络抗毁性分析 .....	52
3.4	基于簇的按需路由通信机制研究 .....	55
3.4.1	通信网络数据包的截获 .....	56
3.4.2	机器人邻居链表的维护 .....	57
3.4.3	簇结构的建立与维护 .....	58
3.4.4	路由发现 .....	58
3.4.5	两跳拓扑数据结构 .....	59
3.4.6	链路重构 .....	59
3.5	多移动机器人通信系统设计与实验 .....	61
3.5.1	多移动机器人通信系统设计 .....	61
3.5.2	多移动机器人通信系统实验 .....	67
3.6	小结 .....	72

<b>第四章 多移动机器人协同机制</b> .....	73
4.1 多移动机器人任务规划 .....	73
4.1.1 多移动机器人系统中的任务分配 .....	74
4.1.2 基于异质交互式文化混合算法的机器人路由规划 .....	77
4.1.3 正交混沌蚁群算法在群机器人任务规划中的应用研究 .....	85
4.1.4 多移动机器人负载均衡任务规划算法 .....	90
4.2 协同路径规划及免疫进化算法 .....	96
4.2.1 基于免疫进化的单机器人全局路径规划 .....	97
4.2.2 基于免疫协同进化的多移动机器人全局路径规划 .....	102
4.3 运动协调机制 .....	105
4.3.1 无障碍环境中的停驻 .....	106
4.3.2 有障碍环境下多移动机器人避障与停驻 .....	115
4.3.3 机器人连续避障的实现 .....	119
4.4 小结 .....	123
<b>第五章 多移动机器人协作定位与建图</b> .....	125
5.1 地图创建和定位技术简介 .....	126
5.1.1 环境地图 .....	126
5.1.2 传感器 .....	130
5.1.3 环境建模与定位技术 .....	132
5.2 地图创建方法 .....	137
5.2.1 基于声纳的地图创建 .....	137
5.2.2 基于视觉传感器的地图创建 .....	146
5.2.3 动态环境下的基于激光的地图创建 .....	153
5.3 多移动机器人协作建图策略 .....	163
5.3.1 多移动机器人系统控制结构 .....	164
5.3.2 协作探测方案 .....	165
5.3.3 基于多移动机器人的地图创建的案例 .....	172
5.4 多移动机器人的合作定位和地图创建 .....	175
5.4.1 系统状态 .....	175



5.4.2	基于粒子群优化的 fastSLAM 算法	176
5.4.3	基于 FastSLAM 的多移动机器人的协作定位	180
5.5	小结	184
<b>第六章</b>	<b>多移动机器人的目标协作跟踪</b>	<b>186</b>
6.1	目标跟踪技术	188
6.1.1	目标检测技术的研究概况	188
6.1.2	目标跟踪技术的研究概况	190
6.1.3	目标协作跟踪的研究概况	194
6.2	基于最大后验概率条件下的运动目标检测方法	197
6.2.1	概率框架下目标检测的研究状况	197
6.2.2	最大后验概率方法	199
6.2.3	最大后验概率目标检测方法的实现	202
6.3	基于模糊核直方图的跟踪方法	207
6.3.1	模糊核直方图	207
6.3.2	跟踪方法的实施	211
6.3.3	实验结果及分析	212
6.4	复杂环境中多移动机器人团队协作检测与跟踪技术	215
6.4.1	复杂环境下多移动机器人团队协作方法	218
6.4.2	多移动机器人团队协作检测与跟踪方法	222
<b>第七章</b>	<b>多机器人应用实例</b>	<b>237</b>
7.1	多仿生鱼系统	237
7.1.1	国内外研究进展	238
7.1.2	仿生鱼模型	240
7.1.3	多仿生鱼的系统模型	242
7.1.4	多仿生机器鱼运动控制模型	246
7.2	足球机器人——ROBOCUP	250
7.2.1	ROBOCUP 概述	250
7.2.2	小型 ROBOCUP 足球机器人系统体系结构	252
7.2.3	小型 ROBOCUP 足球机器人系统任务分解与分配	255

7.2.4	小型 ROBOCUP 足球机器人行为控制 .....	260
7.2.5	小型 ROBOCUP 足球机器人合作 .....	263
7.3	多机器人其他应用实例简介 .....	266
7.3.1	分布式微型机器人在军事上的应用 .....	266
7.3.2	多无人机系统 .....	268
<b>第八章</b>	<b>多机器人的研究与应用展望</b> .....	<b>274</b>
8.1	多机器人技术研究展望 .....	275
8.2	多机器人技术应用展望 .....	276
8.3	小结 .....	277
	<b>参考文献</b> .....	<b>278</b>

# 1

## 第一章

### 绪 论

#### 1.1 多移动机器人系统简介

多移动机器人领域研究始于 1980 年,最初的研究集中在体系结构、运动规划、可重构几个方面。随着应用领域的不断拓展,尤其是水下、空间、危险环境探索、服务及教育领域等场合的应用需求,促使多移动机器人领域的研究课题逐渐深入和广泛。与单机器人相比,多移动机器人系统具有许多优点:可以通过对某些任务进行适当分解,使多个机器人分别并行地完成不同的子任务,从而加快任务执行速度,提高工作效率;可以将系统中的成员设计为完成某项任务的“专家”,而不是设计为完成所有任务的“通才”,使得机器人的设计有更大的灵活性,完成有限任务的机器人可以设计得更完善;可以通过成员间的相互协作增加冗余度,消除失效点,增加解决方案的鲁棒性;可以提供更多的解决方案,降低系统造价与复杂度等。由于这样一些优势,多移动机器人协同技术研究吸引了国内外学术界越来越多的兴趣与关注,出现了大批的文献。

本章对多移动机器人系统的重要研究课题进行了综述,并指出未来的研究趋势,希望能够对本领域的进一步深入研究有所帮助。

### 1.1.1 多移动机器人系统的优点

与单个机器人相比,多移动机器人系统具有许多优点:

(1) 单个机器人不能完成某些任务,必须依靠多个机器人才能完成。例如让移动机器人搬运一个重物,对于这样的任务也许可以设计一个能力特别强的机器人来完成,但从设计的复杂性和成本等方面来考虑,这样的方案不如让多个简单的机器人组成系统来协作搬运。还有一些任务,如执行战术使命、足球比赛等,必须要由一个机器人团队来完成而非单个机器人。

(2) 对于可以分解的任务来说,多个机器人可以分别并行地完成不同的子任务,这比单个机器人完成所有的子任务要快得多。也就是说,多移动机器人系统可以提高工作效率。对未知的区域建立地图、对某区域进行探雷均属于这类任务。

(3) 对于多移动机器人系统来说,可以将其中的成员设计为完成某项任务的“专家”,而不是设计为完成所有任务的“通才”,使得机器人的设计有更大的灵活性,完成有限任务的机器人可以设计得更完善。

(4) 如果成员之间可以交换信息,多移动机器人系统可以更有效和更精确地进行定位,这对于野外作业的机器人尤其重要。

(5) 多移动机器人系统中的成员相互协作可以增加冗余度,消除失效点,增加解决方案的鲁棒性。例如,装配有摄像机的多移动机器人系统要建立某动态区域的基于视觉的地图,那么某个机器人的失效不会对全局任务产生很大影响,因此,这样的系统可靠性更强。

(6) 多移动机器人系统与单个机器人相比,可以提供更多的解决方案,因此可以针对不同的具体情况,优化选择方案。

### 1.1.2 多移动机器人系统的应用领域

由于多移动机器人系统的优点,使得它的潜在应用领域非常广泛。

(1) 远地作业。某些应用要求群体自主机器人系统能够自动完成复杂的工作,而人类可以不时地从远处进行干预,以改变操作过程,弥补机器人的能力不足,与机器人协作共同完成复杂的任务。这类应用领域如行星科学探险,在煤矿、火山口等高危环境下作业以及在水下培育作物等。

(2) 协助军事行动。现代战争中使用移动机器人代替士兵执行危险的任务能最大限度地减少地面部队和非参战人员的伤亡。这类任务有排雷、放哨、搜索、追踪及架设通信设施等。

(3) 协助震后搜索与营救。城市搜寻和营救人员只有 48h 在倒塌的建筑物中寻找被困的幸存者。否则,他们存活的可能性几乎为零。近来发生在一些地区的地震,造成的城市环境的破坏程度超过了现有的营救资源(搜寻和营救专家、狗和探测器等)的能力。由于难以知道大型建筑物破坏的程度,影响了营救人员对该建筑物进行安全、有效的搜索。有时由于人和狗的体积太大,不能到达要搜索的空间。如果能使多移动机器人协助进行这方面的工作,那么将会产生很大的影响。

(4) 自动建造。该应用领域涉及大规模结构的装配,如高楼大厦、行星居住区或空间设备。将来,多异质机器人系统将会在空间组装大型空间设备,而这对于人类来说是非常困难的。

(5) 教育及娱乐系统。机器人玩具、教育工具及娱乐系统越来越风行,许多这样的系统(如机器人足球)要求多移动机器人之间进行协调。

(6) 自动化工厂。工厂实现自动化是发展趋势,为了增加产量、减少劳动成本,提高效率、安全性及总体质量,越来越多的产业在寻求生产自动化设备。这要求有高效、高鲁棒性的异质多移动机器人系统的协作。

(7) 清除危险区域。这样的例子有移动机器人扫雷、清扫核废料及清扫灾区。

(8) 农业机器人。在艰苦条件下的重体力劳动、单调重复的工作,如喷洒农药、收割及分选作物等有望由多农业机器人系统完成,以解放出大量的人力资源。

### 1.1.3 多移动机器人系统的性能衡量指标

各个应用领域要求多移动机器人系统要有很高的性能,这些性能由下列指标衡量:

(1) 鲁棒性(Robustness):对机器人出现故障具有鲁棒性。因为许多应用要求连续的作业,即使系统中的个别机器人出现故障或被破坏,这些应用要求机器人利用剩余的资源仍然能够完成任务。

(2) 最优化(Optimization):对动态环境有优化反应。由于有些应用领域涉及的是动态的环境条件,具有根据条件优化系统的反应的能力成为能否成功的关键。

(3) 速度(Speed):对动态环境反应要迅速。如果总是要求将环境信息传输到别的地方进行处理才能做出决策,那么当环境条件变化很快时,决策系统就有可能不能及时提供给机器人如何行动的指令。

(4) 可扩展性(Extensibility): 根据不同应用的要求易于扩展以提供新的功能,从而可以完成新的任务。

(5) 通信(Communication): 要有处理有限的或不太好的通信的能力。要求应用领域为机器人之间提供理想的通信,这在许多情况下是不现实的,因此,协调体系结构对通信失效要具有很强的鲁棒性。

(6) 资源(Resource): 合理利用有限资源的能力。优化利用现有的资源,是优化多移动机器人协调的重要因素。

(7) 分配(Allocation): 优化分配任务。多移动机器人系统中一个主要难点就是确定个体机器人的任务,这是设计体系结构时要考虑的重要因素。

(8) 异质性(Heterogeneity): 能够应用到异质机器人团队的能力。为了易于规划,许多体系结构以同质机器人为假设条件,如果是异质机器人的情况,协调问题将更困难。成功的体系结构应当对同质机器人和异质机器人都适用。

(9) 角色(Roles): 优化指定角色。许多体系结构将机器人限于完成一种角色的功能,但机器人拥有的资源可以完成多种任务。优化指定角色可以使机器人根据当时可以利用的资源尽可能地完成多个角色的功能,并且随着条件的变化而变化。

(10) 新输入(New Input): 有处理动态新任务、资源和角色的能力。许多动态性应用领域要求机器人系统能够在运行过程中处理一些变化,如处理新分配的任务、增加新资源或引进新角色。所有这些都由体系结构支持。

(11) 灵活性(Flexibility): 易于适应不同的任务。由于不同的应用,有不同的要求,因此通用的体系结构需要有针对性不同的问题可以轻松重新配置的能力。

(12) 流动性(Fluidity): 易于适应在操作过程中增加或减少机器人。一些应用要求可以在系统运行过程中添加新的机器人成员。同样,在执行任务的过程中系统也要具有适应减少成员或成员失效的现象,合理的体系结构可以处理这些问题。

(13) 学习(Learning): 在线适应特定的任务。虽然通用的系统非常有用,但将它用于特定应用上时,通常需要调整一些参数。因此具有在线调整相关参数的能力是非常吸引人的,这在将体系结构转移到其他应用时可以节省许多工作。

(14) 实现(Implementation): 能够在物理系统上实现和验证。和其他问题一样,用实际的系统证实更能令人信服。然而要想成功实现物理系统需要解决那

些在仿真软件系统上不能发现的细节问题。

表 1-1 是目前多移动机器人系统在一些应用领域的性能指标实现情况。其中,“√”表示对应的指标已实现或达到。

表 1-1 多移动机器人系统的应用领域和性能指标

应用领域	鲁棒性	最优化	速度	可扩展性	通信	资源	分配	异构性	角色	新输入	灵活性	流动性	学习	实现
自主群体	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
城市侦察	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√		√
城市搜索与营救	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√		√
自动建造	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√			√
教育与娱乐	√	√	√	√				√			√		√	√
自动工厂	√	√	√	√		√	√	√	√		√		√	√
探索危险区域	√	√	√	√	√	√		√		√	√	√		√
清除危险地点	√	√	√	√	√	√		√		√	√	√		√
农业机器人	√	√	√	√	√	√		√			√	√	√	√

## 1.2 多移动机器人研究的主要内容

多移动机器人的主要研究内容包括体系结构、通信、任务分配、环境感知与定位、可重构机器人以及多移动机器人的学习理论等。本节从其中上述与协同相关的几个研究课题出发,介绍目前在这些方面的研究理论及方法。

### 1.2.1 多移动机器人协作的体系结构

目前多移动机器人协作的体系结构主要有三种:

(1)集中式,其代表是基于黑板的多 Agent 系统以及 SRI 的 OAA 软件体系。OAA 设计一个代理助手作为控制与协作的中心与各种功能 Agent 组成 C/S 系统结构,其功能远远超过黑板。代理助手负责管理通信、数据、任务分配等,并且将用户当作具有特权的 Agent,即支持异质 Agent 的集成。但该结构灵活性不足,过分依赖协调中心将可能使系统失去该中心时完全瘫痪。

(2)分布式,其代表是 UPENN 提出的 ROCI 以及基于网格、层次化和对象可重构、多模式交互以及 Ad Hoc 网络等软件框架。ROCI 基于已封装的功能模块组成特定任务的 Agent,进而组成团队。软件体系的核心称为 ROCI 核,每个

Agent上都存在一个 ROCI 核的副本,负责管理网络和维护网络上 Agent 组成的数据库,以实现分布式控制。分布式结构具有结构灵活等优点,但在协调机制上,如任务分配、运动规划等方面开销很大。

(3)混合式,是集中式与分布式的折中。系统中多 Agent 组成层次结构,上层的监控 Agent 对下层的受控 Agent 有部分控制能力。该结构既灵活又能够有效协调,其思想与一些应用的实际情况较接近。

早期的多移动机器人系统的研究中,如 ACTRESS 由计算机、机器人和其他专用设备构成,采用合同网进行任务分配和协商。L. E. Parker 提出的 ALLIANCE 与 ACTRESS 相比,可以在某个机器人任务失败后由其他机器人来接替。其缺点在于它只能处理可以被分解成独立的子任务的情况,并且没有明显的协商机制,每个机器人通过广播把自身的状态和行为通知其他机器人。Vidal 等提出一种混合层次体系结构,将机器人置于不同的抽象层次,通过层次间通信实现机器人的互操作。该方法在无人地面/空中移动体的追击—逃避游戏中取得了较好的应用效果。

### 1.2.2 多移动机器人的任务分配

多 Agent 团队中由于各自能力不同,对协作提出了特殊要求。尤其是当多个成员都能完成某任务只是效果不同的情况下,如何合理有效地进行任务分配和调度是一个挑战性的问题。Parker 提出一种 L-ALLIANCE 机制使多机器人团队能够适应成员能力差异、环境状态变化等,保证团队能够长期工作。Murphy 等提出利用情感计算模型在传感—电动机级(反应式)修改主动行为,从而无需集中规划即可产生团队的社会行为,并极大降低了通信需求。基于市场机制的任务分配策略有利于包容异质成员。各机器人根据自己的局部环境信息对某任务的执行效果做出估计,并将估计值向团队中的成员通报,同时所有得到该通报信息的成员根据各自的局部信息也对该任务做出估计且在团队中通报。如果估计的结果是以效用值表示,则团队中对该任务的效用估计值大者获得该任务的执行权。

对于协调问题,近年来该领域研究逐渐从多移动机器人路径规划、编队等传统研究课题转向目标搜索、多移动机器人停驻等问题。Saptharishi 等提出通过检查站和基于统计运动状态估计的动态权限分配策略进行路径规划,并开发出基于视觉的监视及复杂环境中跟踪多运动目标的实验系统。异质多移动机器人团队中由于各个体具有不同的运动、规划等能力,使得协调问题更加复杂。ALLIANCE 基于行为集合支持异质移动体的集成,但构造基本行为本身就比较困



难,而且没有明显的协商机制。此外,还需要关注动态环境的多移动机器人协调路径规划问题。目前解决这个问题的基本方法有两种:一种是基于“空间—时间”的规划方法,它通过给各个机器人设置优先级的思想或交通规则的思想而把问题简化为单个机器人的路径规划问题;另一种是人工势场法,它基于各个机器人的局部信息而确定其当前运动路线。但当机器人的工作空间比较复杂,或者障碍物的形状比较复杂时,上述两种方法都无法保证一定能够产生出无碰撞的运动路线,也保证不了各个机器人一定能够达到各自相应的目的地。此外,也有不少人提出了采用遗传算法来解决这一问题,但遗传算法包括复杂的交叉运算,并采用无记忆的进化模式,收敛速度较慢,计算复杂。

### 1.2.3 多移动机器人协作环境感知与定位

多移动机器人协作的环境感知与定位需要考虑选择何种控制结构、如何实现协作及相互间的定位、协作创建全局地图等单机器人不需要考虑的问题。目前研究包括采用一种完全分布式的控制结构,多机器人间通过无线网络进行通信,每个机器人通过广播方式把自己的局部地图信息发送到所有机器人。另外一种分散探索,然后集中环境建模,即各机器人使用相同的算法处理自己的感知数据并创建局部地图,存在一个中央模块将所有的局部环境模型集成为全局环境模型。而对于多个机器人间相互定位问题,一种方法是多移动机器人在待探索的环境中行动时,某个时刻至少有一个机器人是静止的。其他机器人将该静止机器人作为路标,相对其进行自身定位。另一种方法是某时刻只有一个机器人可以行动,其他机器人则组成等边三角形的信标供移动机器人进行定位。这两种方法具有共同的局限性,即某时刻只能有部分机器人可以移动,机器人与作为信标的机器人间必须保持视觉或距离传感方面的“接触”。

在环境建模与定位算法方面,将单机器人的算法扩展到多机器人领域,取得了较高的定位精度,但算法在适应性等方面仍存在很大的问题。S. I. Roumeliotis 和 G. A. Bekey 将 Kalman 滤波算法扩展到多机器人协作建模领域,将一个 Kalman 滤波估计器分解为多个具有通信能力的小滤波器,存在于每个机器人上,相互之间共享内部传感器信息。多机器人团队行动中,各滤波器根据各自外部传感器信息进行位置估计和修正,并相互交流位置信息。实践表明,协作定位精度明显高于单个机器人使用 Kalman 滤波的定位结果。但该方法在估计与更新阶段都忽略了方向不确定性的影响,因而简化了实际环境的噪声分布。Monte Carlo 定位是近年来单机器人建模与定位领域非常流行的热门技术,之后又被扩展到多机器人领域,具体应用于两个机器人协作探索环境的场合。当两个机器