

Multi-robot Systems

多机器人系统

谭民 王硕 曹志强

Tan Min, Wang Shuo, Cao Zhiqiang



清华大学出版社

 Springer



本书由清华大学出版社学术专著出版基金资助出版

Multi-robot Systems

多机器人系统

谭民 王硕 曹志强

Tan Min, Wang Shuo, Cao Zhiqiang



清华大学出版社
北京



Springer

内 容 简 介

全书共分11章。第1章介绍多机器人系统研究的发展概况以及几种典型的多机器人系统;第2章主要介绍多机器人系统的特点、主要研究内容、设计方法及其密切相关的可借鉴的研究领域;第3章介绍多机器人系统体系结构;第4章介绍学习的有关理论和方法;第5章介绍几种多机器人避碰规划的方法;第6章介绍多机器人系统实现队形形成和队形控制的方法,以及实现目标搜索和目标围捕的方法;第7章介绍机器人间信息的共享和地图构建;第8,9章分别从仿真系统设计和多仿生机器鱼实验系统设计的角度论述如何实现多机器人系统;第10章通过船舶制造业中的一个工程应用实例,说明多机器人系统的实现;第11章介绍多机器人系统研究工作和实际应用中尚需解决的关键技术问题、基础理论问题及其发展趋势和应用展望。

本书主要供研究人员、工程技术人员开展多机器人系统理论与应用研究工作时参考,也可作为研究生在多机器人系统方面的课程参考读物。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用清华大学核研院专有核径迹膜防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

多机器人系统/谭民,王硕,曹志强编著. —北京:清华大学出版社,2005.4

ISBN 7-302-10095-0

I. 多… II. ①谭… ②王… ③曹… III. 机器人技术 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 130002 号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

组稿编辑:王一玲

文稿编辑:魏艳春

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:175×245 印张:20 字数:399千字

版 次:2005年4月第1版 2005年4月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-10095-0/TP·1038

印 数:1~2000

定 价:39.00元

前 言

自从 20 世纪 50 年代第一台工业机器人面世以来,随着计算机、通信、电子、传感、控制等技术以及人工智能的飞速发展,集多种先进技术为一体的机器人技术在需求的牵引下已经得到了很大的发展。为了使机器人更好地服务于人类和社会,在目前的机器人技术水平条件下,通过采用多个机器人相互协作来弥补个体能力的不足是一个很好的思路。多机器人系统已受到国内外研究机构和产业界的重视。多机器人系统在工业、军事、航空航天、医学、运输、服务行业等领域具有非常广阔的应用前景。多机器人系统的应用必将带来巨大的经济效益和社会效益。

本书是作者结合自己的研究工作,吸收和借鉴国内外有关的研究成果编著而成的。通过将基础理论、关键技术、实际应用紧密结合在一起,使读者对多机器人系统有一个较全面的认识,并对其基本概念和系统的设计方法有所了解。

本书涉及的知识面较广,既有基础知识的概述,也有国内外最新研究工作的介绍,并有多机器人系统在实际工作中的应用实例。全书共分为 11 章。第 1 章介绍多机器人系统研究的发展概况以及几种典型的多机器人系统;第 2 章主要介绍多机器人系统的特点、主要研究内容、设计方法及其密切相关的可借鉴的研究领域;第 3 章介绍多机器人系统体系结构;第 4 章介绍学习的有关理论和方法;第 5 章介绍几种多机器人避碰规划的方法;第 6 章介绍多机器人系统实现队形形成和队形控制的方法,以及实现目标搜索和目标围捕的方法;第 7 章介绍机器人间信息的共享和地图构建;第 8,9,10 章分别从仿真系统设计、多仿生机器鱼实验系统设计和船舶制造业中的一个工程应用示例三个角度论述如何实现多机器人系统;第 11 章介绍多机器人系统研究工作和实际应用中尚需解决的关键技术问题、基础理论问题及其发展趋势和应用展望。

在本书的编写过程中得到了许多人的支持和帮助,在此表示诚挚的谢意。

由于笔者的水平所限,本书的内容尚存在一些不足之处和错误,恳请广大读者批评指正。

作 者

2004 年 4 月于中国科学院自动化研究所

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 多机器人系统研究的发展	1
1.2 一些典型的多机器人系统	2
1.2.1 群智能机器人系统.....	2
1.2.2 自重构机器人系统.....	3
1.2.3 协作机器人系统.....	3
1.2.4 机器人足球赛.....	4
1.3 小结	5
第 2 章 多机器人系统中的基本问题	6
2.1 引言	6
2.2 多机器人系统研究的主要内容	7
2.2.1 群体体系结构.....	7
2.2.2 感知.....	9
2.2.3 通信	10
2.2.4 学习	12
2.2.5 协调协作机制	14
2.3 多机器人系统的设计.....	16
2.3.1 设计方法及其流程	16
2.3.2 需要考虑的因素	17
2.4 相关的研究领域.....	17
2.4.1 控制理论	17
2.4.2 复杂系统科学	18
2.4.3 人工智能理论	19
2.5 小结.....	20
第 3 章 多机器人系统体系结构	21
3.1 引言.....	21
3.2 机器人体系结构.....	21
3.2.1 传统结构	22
3.2.2 包容式结构	23
3.2.3 反应式控制结构	25

3.2.4	分层递阶式体系结构	26
3.2.5	混合式体系结构	26
3.3	面向多机器人系统的机器人体系结构	27
3.3.1	ALLIANCE 结构	28
3.3.2	面向多机器人协作系统的一种分层式控制体系结构	29
3.3.2.1	体系结构设计	29
3.3.2.2	机器人基本模型的建立	34
3.3.2.3	MRCS 实例分析	35
3.3.3	基于行为的混合分层体系结构	37
3.3.4	面向多机器人系统任务级协作的机器人控制体系结构	38
3.3.4.1	任务级协作	38
3.3.4.2	具体设计	42
3.3.5	基于多 DSP 并行处理的混合式体系结构	45
3.3.5.1	体系结构	45
3.3.5.2	硬件实现	47
3.4	小结	50
第 4 章	多机器人系统中机器人的学习	51
4.1	引言	51
4.2	行为控制参数的学习	52
4.2.1	基于遗传算法的行为控制参数学习	52
4.2.1.1	遗传算法	52
4.2.1.2	基于参数学习的多机器人协作避碰	55
4.2.1.3	多机器人队形控制的行为参数学习	62
4.2.2	基于案例的空间时间推理的行为参数学习	62
4.3	增强式学习	65
4.3.1	基本概念	65
4.3.2	增强函数分类	67
4.3.3	优化模型	68
4.3.4	学习算法	69
4.3.4.1	探索策略	69
4.3.4.2	算法介绍	70
4.3.5	算法收敛度量评价	71
4.3.6	增强学习举例——搜集任务	72
4.4	学习分类器系统	74
4.4.1	基本的 LCS 方法	74

4.4.2	改进的 LCS 方法	76
4.4.3	仿真实验及其结果	78
4.5	小结	81
第 5 章	多机器人避碰规划	83
5.1	引言	83
5.2	基于行为的避碰规划	84
5.2.1	Avoid_obstacle 行为设计	85
5.2.2	Follow_wall 行为设计	88
5.2.3	Avoid_robot 行为设计	93
5.3	交通规则法	98
5.3.1	规则的建立	99
5.3.2	利用交通规则的多机器人系统示例	100
5.4	基于协商和意愿强度的避碰规划	102
5.4.1	基本行为设计	102
5.4.2	意愿强度与磋商策略	103
5.4.3	基于意愿强度的多移动机器人协调的实现	104
5.4.4	仿真结果	107
5.5	小结	108
第 6 章	多机器人队形问题研究	109
6.1	引言	109
6.2	队形形成问题	110
6.3	队形控制问题	114
6.4	未知环境下多机器人队形控制的研究	117
6.4.1	机器人结构设计	118
6.4.1.1	动态障碍物预测模块	118
6.4.1.2	行为库	120
6.4.1.3	控制参数产生函数模块	121
6.4.1.4	决策模块	123
6.4.2	仿真	124
6.5	动态环境下多移动机器人协作围捕	127
6.5.1	围捕任务	128
6.5.2	围捕行为	129
6.5.3	任务建模	129
6.5.4	机器人策略设计	130
6.5.5	Invader 策略设计	135

6.5.6	仿真实验	136
6.6	小结	140
第7章	多机器人系统信息融合与环境构建	141
7.1	引言	141
7.2	信息融合	142
7.3	环境构建	144
7.4	多机器人协作与信息融合在地图构建中的应用	148
7.4.1	机器人传感器模型	148
7.4.2	基于 Dempster-Shafer 证据推理理论的信息融合	150
7.4.2.1	基本定义和传感信息融合	151
7.4.2.2	多机器人系统传感信息融合与地图构建	152
7.4.3	地图构建过程中的多机器人协作	153
7.4.4	仿真结果	153
7.5	环境探测策略	157
7.5.1	多机器人协作地图构建的动态分区法	157
7.5.1.1	基本行为设计	158
7.5.1.2	多机器人构建未知环境地图的算法	158
7.5.1.3	分区算法	159
7.5.1.4	仿真结果	160
7.5.2	基于虚拟力的探测算法	163
7.5.2.1	算法描述	164
7.5.2.2	仿真实验	165
7.6	小结	167
第8章	多机器人仿真系统	168
8.1	引言	168
8.2	TeamBots	173
8.3	Soccer Server	174
8.4	MissionLab	175
8.5	MultiSim 仿真系统	178
8.5.1	仿真系统的总体设计	178
8.5.2	面向对象的建模	180
8.5.3	仿真平台 MultiSim 的对象模型	180
8.5.4	仿真平台 MultiSim 的动态模型	183
8.5.5	仿真平台 MultiSim 的功能模型	188
8.5.6	仿真系统介绍	193

8.5.7 仿真实验举例	195
8.6 MulBotsSim 多机器人仿真系统	197
8.7 小结	199
第9章 多仿生机器鱼系统	200
9.1 引言	200
9.2 系统体系结构	201
9.3 仿生机器鱼的设计	204
9.3.1 仿生机器鱼的设计原则及步骤	204
9.3.2 鱼类游动的运动学模型简化	205
9.3.3 运动学模型的数值仿真	208
9.3.4 仿生机器鱼的设计与实现	210
9.3.4.1 机器鱼的基本结构	210
9.3.4.2 控制系统和控制性能	211
9.4 视觉子系统的设计与实现	214
9.4.1 视觉子系统的框架及工作过程	214
9.4.2 基于颜色信息的图像识别算法	215
9.4.3 并行图像处理方法及实现	220
9.4.4 视觉子系统的图像处理效果	223
9.5 仿生机器鱼运动控制与路径规划算法	225
9.5.1 速度控制算法	225
9.5.2 游动方向控制算法	227
9.5.3 点到点(PTP)控制算法	231
9.5.4 基于改进的 DT 方法的路径规划	233
9.5.5 实验结果	235
9.6 多仿生机器鱼协调的行为设计及行为策略	237
9.6.1 机器鱼的基本行为设计	237
9.6.2 基于行为选择机制的策略	241
9.6.3 多仿生机器鱼系统实验	243
9.7 系统的集成与实现	245
9.8 小结	248
第10章 多机器人协调搬运、焊接系统	250
10.1 引言	250
10.2 用于对中合拢的多机器人系统平台	251
10.2.1 机器人结构	251
10.2.2 多机器人协调系统结构及协调行为	252

10.2.3	对中合拢工艺	253
10.2.4	系统逆运动学分析	255
10.3	用于环缝焊接的多机器人平台	261
10.3.1	机器人结构	261
10.3.2	多机器人焊接平台结构及协调行为	262
10.3.3	操作圆柱形船体模块逆运动学分析	263
10.4	环缝焊接中多机器人系统防轴窜控制	266
10.4.1	轴向窜动产生的机理	267
10.4.2	多机器人焊接平台防窜方法	269
10.4.2.1	船体模块轴向窜动模型	269
10.4.2.2	用于防窜的多机器人系统自抗扰控制器	271
10.4.2.3	防窜系统的控制与仿真	272
10.5	环缝焊接多机器人系统的载荷分配	274
10.5.1	压力平衡要求	275
10.5.2	基于典型模拟电路的非线性规划方法	276
10.5.3	多机器人系统载荷分配方法	278
10.5.3.1	船体模块一端偏重	280
10.5.3.2	船体模块一侧偏重	281
10.5.3.3	船体模块一端、一侧同时偏重	281
10.5.4	仿真	282
10.6	模块化造船中多机器人控制系统的实现	284
10.6.1	多机器人协调系统硬件结构	284
10.6.1.1	硬件系统总体结构	284
10.6.1.2	高精度的液压伺服系统	285
10.6.2	多机器人协调系统软件设计	287
10.6.2.1	上位机控制软件设计	287
10.6.2.2	下位机控制软件设计	288
10.7	小结	289
第 11 章	多机器人系统的研究与应用展望	290
参考文献		295

第1章 绪 论

随着计算机技术、超大规模集成电路、控制理论、人工智能理论、传感器技术等不断成熟和发展,由多学科交叉而形成的机器人学研究也进入了一个崭新的阶段。从可编程的、示教再现型的工业机器人到具有一定传感能力、一定适应能力的机器人,再到配备多种先进传感器,具有较强的适应能力的智能机器人,机器人学的研究工作经历了一个从简单到复杂,从功能单一到功能多样,从工业制造领域到军事侦察、核工业、航空航天、服务业、医疗器械、基因工程等诸多领域的过程。可以预见,在不久的将来,机器人技术在各个领域的应用将会更加广泛和深入。而各种机器人系统在实际工作中的广泛应用又为机器人学提出了新的要求和新的研究课题。多机器人系统的研究就是在这些新的应用需求驱动下提出,并随着机器人学的不断发展而逐渐成为机器人学研究的一个重要分支。

1.1 多机器人系统研究的发展

在机器人研究的早期,单机器人的结构、运动学、控制和信息处理是研究的重点。随着机器人技术的发展,单个机器人的能力、鲁棒性、可靠性、效率等都有很大的提升。但面对一些复杂的、需要高效率的、并行完成的任务时,单个机器人则难以胜任。为了解决这类问题,机器人学的研究一方面进一步开发智能更高、能力更强、柔性更好的机器人;另一方面在现有机器人的基础上,通过多个机器人之间的协调工作来完成复杂的任务。

从20世纪80年代中期到90年代,分布式人工智能和复杂系统的研究工作逐渐开展并活跃起来,一些学者开始研制各种多机器人系统,并将其作为实验平台以进行相关的理论研究和仿真。这些研究的出现将分布式人工智能、复杂系统、社会学、管理学等其他研究领域的理论及方法引入机器人学的研究中,丰富了机器人学研究的内容。而且,这方面的研究通常从系统的角度出发,探讨机器人群体乃至机器人社会的各种组织方式、信息交互方式、进化机制的基本问题,为机器人学的发展提供了一条新的思路。

机器人学的理论和技术与其在不同领域中日趋广泛深入的应用密切相关。在工业领域,制造业进入90年代后开始面对用户对个性化产品的需求,从而导致对新一代制造系统理论的探讨和研究^[1]。工业机器人作为现代制造系统中不可或缺

的重要组成部分必须适应这种变革的要求^[2],而对工业机器人群体之间协调协作的研究为工业机器人适应这一变革提供了基础。在军事领域,军用机器人已被用来替代士兵完成一些危险任务,如侦察、排雷等。对于这些危险的工作,通过不同功能的价格低廉的军用机器人协作将提高完成任务的效率和成功率。在航空航天领域,很多学者已经针对多个太空机器人、外星探索机器人的协调协作开展研究工作。在服务业,清洁机器人、擦窗机器人、搬运机器人等服务机器人的应用也对协调工作提出了更高的要求。

1.2 一些典型的多机器人系统

随着多机器人系统研究的深入,ALLIANCE^[3],MARTHA^[4],CEBOT^[5],SWARM^[6],GOFER^[7],ACTRESS^[8],MRCAS^[9]等实验仿真系统逐步建立起来。下面介绍几类有代表性的多机器人系统。

1.2.1 群智能机器人系统

群智能机器人系统是由许多无差别的自治机器人组成的分布式系统,它主要研究如何使能力有限的个体机器人通过交互产生群体智能。在自然界的蚂蚁、蜜蜂等昆虫群体中,个体的能力有限,但从它们的交互中却呈现出了智能行为。这种行为对于生态群体中个体的生存是必要的。通过人工模拟昆虫社会,有助于群智能机器人系统的研究。加拿大 Alberta 大学开发的 Collective Robotics 实验系统^[10]是一个典型例子,如图 1-1 所示。该系统将许多简单的机器人组织成一个团体来完成一些有意义的工作。另一个有代表性的系统是美国 USC 大学开发的 The Nerd Herd 系统^[11],如图 1-2 所示。它由 20 个机器人组成,机器人上装有助于抓取、堆放物品的抓手,抓手上装有红外传感器和接触传感器。机器人本体上装有碰撞传感器、无线-声呐定位系统及通信系统。该系统可用于大规模机器人行为实验。

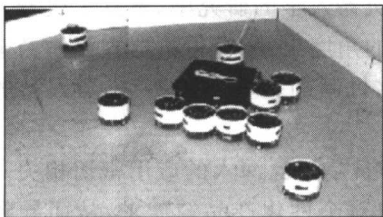


图 1-1 Collective Robotics 系统

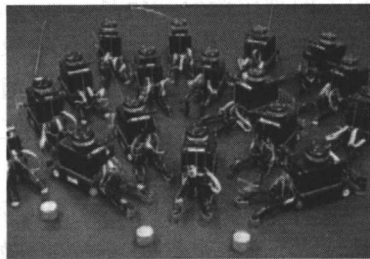


图 1-2 The Nerd Herd 实验系统

1.2.2 自重构机器人系统

自重构机器人系统(self-reconfigurable robotic systems, SRRS)以一些具有不同功能的标准模块为组件,根据目标任务的需要,对这些模块进行相应的组合,进而形成具有不同功能的系统。日本 Nagoya 大学的 T. Fukuda 教授领导的研究小组在生物细胞结构的启发下研究的 CEBOT (Cellular roBOTic System)系统就是一个典型的示例。

CEBOT 系统将系统中众多相同或不同功能的机器人视为细胞元,这些细胞元机器人可以移动、寻找和组合。根据任务或环境的变化,这些细胞元机器人可以自组织成器官化机器人,多个器官化机器人可以进一步自组织形成功能更加复杂的机器人系统,如图 1-3 所示。细胞结构机器人系统强调的是单元体的组合如何根据任务和环境的要求动态重构。因此,系统具有多变的构型,可以具有学习和适应的群智能(group intelligence),并具有分布式的体系结构。对 CEBOT 系统的研究,涉及系统的体系结构、通信等许多方面。文献[12]讨论了系统的体系结构,并针对分层式结构提出一种选择“Master Cell”的方法。文献[13]通过使用自适应学习算法调整优先级矩阵和利益矩阵来改进 CEBOT 中机器人的多种行为合成策略。Fukuda 等通过引入任务矩阵和基于知识结构的矩阵来描述 CEBOT 系统中各单元机器人之间连接和知识分配的各种不同状态,从而使系统能够进行知识的自动分配^[14]。在文献[15]中还给出一种计算机器人之间信息交换量的方法。

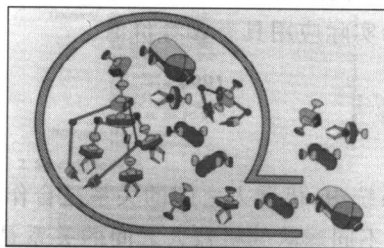
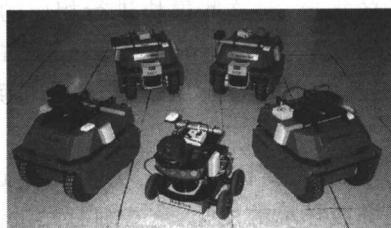


图 1-3 CEBOT 系统示意图

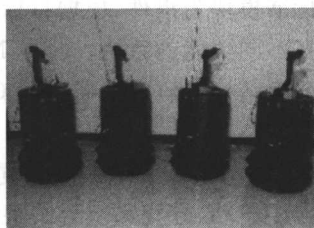
1.2.3 协作机器人系统

协作机器人系统是由多个具有一定智能的自治机器人组成,机器人之间通过通信实现相互间的协作以完成复杂的任务。美国 Oak Ridge 国家实验室的 Lynne E. Parker 及其研究小组在协作机器人学方面做了许多工作,并建立了实验平台 (CESAR Emperor 和 CESAR Nomads 机器人系统)进行理论的验证,如图 1-4 所

示^[16]。前者用于户外,在机器人上安装激光测距仪摄像头、声呐传感器以及无线以太网等;后者用于室内应用,机器人上安装多种传感器,包括测距仪、接触传感器、声呐、红外、视觉、罗盘以及基于激光的 2D 定位系统,机器人还装有无线以太网以实现机器人之间的通信以及机器人和工作站之间的通信。



(a) CESAR Emperor



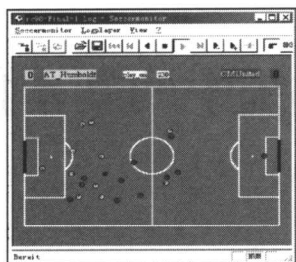
(b) CESAR Nomads

图 1-4 CESAR 实验系统

中科院沈阳自动化研究所制造环境应用多机器人装配为背景,建立了一个多机器人协作装配系统(multi-robot cooperative assembly system, MRCAS)^[9,17,18]。该系统采用集中与分散相结合的分层体系结构,分为合作组织级和协调作业级。合作组织级的协作控制 HOST 由一台 PC 机构成,协调作业级则由 PUMA562, PUMA760, Adept I 和全方位移动车 ODV 组成。HOST 机的 ISA 总线上安装一块四串口板,分别与 PUMA562, PUMA760, Adept I 和 ODV 车进行通信。利用 MRCAS 进行多机器人协作装配工件的实验结果表明:MRCAS 系统为深入研究多机器人协作理论与方法提供了一个良好的实验平台,并对多机器人协作系统的实际应用具有参考价值。

1.2.4 机器人足球赛

前述的几类机器人系统中,机器人之间的关系是合作的、互助的。而在机器人足球赛(robot soccer)中,不同球队的机器人之间的关系是对抗的、竞争的;同队的机器人之间则是合作的、互助的。由于机器人足球赛的对抗性强,对个体间协作的实时性要求高,因而它成为一个具有挑战性的课题^[19]。机器人足球赛主要有计算机仿真比赛和实体足球机器人比赛两种形式。主要的足球机器人比赛有两个分支。一是韩国 Jong-Hwan Kim 教授发起并每年举行一次的微型机器人足球赛 MiroSot。它采用集中式结构,由球场外的计算机根据球场上方摄像机提供的信息进行决策并指挥机器人运动。二是日本的机器人世界杯足球锦标赛 RoboCup。其机器人具有各自独立的进程自主决策,除了实体机器人比赛外,还开展仿真组比赛。



(a) 仿真机器人足球赛



(b) 实体机器人足球赛

图 1-5 足球机器人系统

1.3 小结

在研究和应用双重需求的推动下,多机器人系统、多机器人协调协作的研究已经成为机器人学研究中的一个充满活力、具有良好应用前景的研究方向。针对多机器人系统结构、多机器人协调协作等基础理论开展研究是一项具有重要的理论和现实意义的、充满挑战性的工作。本章简要介绍了多机器人领域研究的发展过程,通过对一些比较典型的多机器人系统的介绍,初步阐述了多机器人系统的研究工作。

第2章 多机器人系统中的基本问题

2.1 引言

多机器人系统作为一种人工系统,实际上是对自然界和人类社会中群体系统的一种模拟。多机器人协作与控制研究的基本思想就是将多机器人系统看作是一个群体或一个社会,从组织和系统的角度研究多个机器人之间的协作机制,从而充分发挥多机器人系统各种内在的优势。

多机器人系统的研究是从单个机器人系统的研究展开来的,但区别于单个机器人系统,多机器人系统的特点可以概括如下:

- (1) 空间分布 多个机器人可以在工作空间的不同区域同时工作。
- (2) 功能分布 功能不同的机器人或具有不同任务(目标)的多机器人可以协同工作。
- (3) 时间分布 多个机器人可以执行时间分布的任务。
- (4) 信息分布 多个机器人可以具备相同的知识或不同的知识,通过通信,协作机器人可以进行知识的交换和学习。
- (5) 资源分布 多机器人系统中各机器人可以具有不同的传感器和执行器。

由于多机器人系统具备上述特点,因此应充分利用它们以达到以下目的:

- (1) 利用多机器人系统的空间分布特性,通过多个机器人并行工作以提高完成任务的效率。
- (2) 利用多机器人系统内各种资源(信息、知识、物理装置等)的共享来弥补个体能力的不足,扩大完成任务的能力范围。
- (3) 利用系统内机器人资源的冗余性、各机器人功能的互补性提高完成任务的可能性,增强系统的容错性、鲁棒性和灵活性。
- (4) 利用多机器人系统功能分布、资源分布的特点来降低单个机器人系统的成本和系统设计的难度,减少执行危险任务过程中机器人系统的损失。

虽然多机器人系统在功能、结构及应对复杂环境、任务等方面比单个机器人的优势明显,但它也存在以下一些问题:

- (1) 分布式的结构使多机器人系统在进行全局优化时存在一定困难或无法找到最优解。
- (2) 多机器人系统中各机器人之间由于资源的分配和使用不合理可能发生冲

突或死锁现象。

(3) 随着多机器人系统中机器人数量的增加,多个机器人之间进行组织和相互协调协作的困难也随之以指数倍数增长。

(4) 多机器人系统中,功能、信息和资源的分布在增强机器人系统灵活性、适应性的同时,也增加了机器人对可用功能、信息、资源进行搜索和信息交换的时间。多机器人系统由此而产生的通信问题为系统快速响应外界环境的变化造成了一定的困难。

结合上述多机器人系统的特点和问题,多机器人系统、多机器人协调协作研究工作的目标就是尽量发挥系统的优势,解决系统中存在的问题或降低其不利影响,使系统能够灵活、快速地响应环境和任务的变化,从而在复杂环境中高效、可靠地完成任务。

2.2 多机器人系统研究的主要内容

2.2.1 群体体系结构

多机器人系统的群体体系结构是多机器人系统研究的一个重要课题。多机器人系统依靠几个机器人的简单组合并不能充分发挥其优势,只有通过某种形式的合作才能实现其对复杂任务的处理。而多个机器人要实现相互间的合作就必须确定机器人之间逻辑上的和物理上的信息关系和控制关系,以及问题求解能力如何分布等问题。针对这些问题而进行的群体体系结构研究可以将多机器人系统的结构与控制有机地结合起来,保证多机器人系统中信息流与控制流的畅通,为机器人之间的活动、交互作用提供框架。合理的群体体系结构可以使多机器人之间进行有效的合作。

多机器人系统的群体体系结构可以分为集中式(centralized)和分散式(decentralized)两种。分散式结构又可以进一步划分为分层式(hierarchical)和分布式(distributed)结构^[20]。

集中式结构如图 2-1(a)所示,它通常有一个主控单元掌握全部环境信息及各受控机器人的信息,运用规划算法和优化算法,主控单元对任务进行分解和分配,向各受控机器人发布命令,并组织多个受控机器人共同完成任务。集中式结构的优点在于,理论背景清晰,实现起来较为直观,但存在以下缺点:

- (1) 容错性差 一个机器人的简单的错误可能会造成整个系统的瘫痪。
- (2) 灵活性差 系统中机器人的个数增加或减少时,原有的规划结果无效,需重新进行规划。