

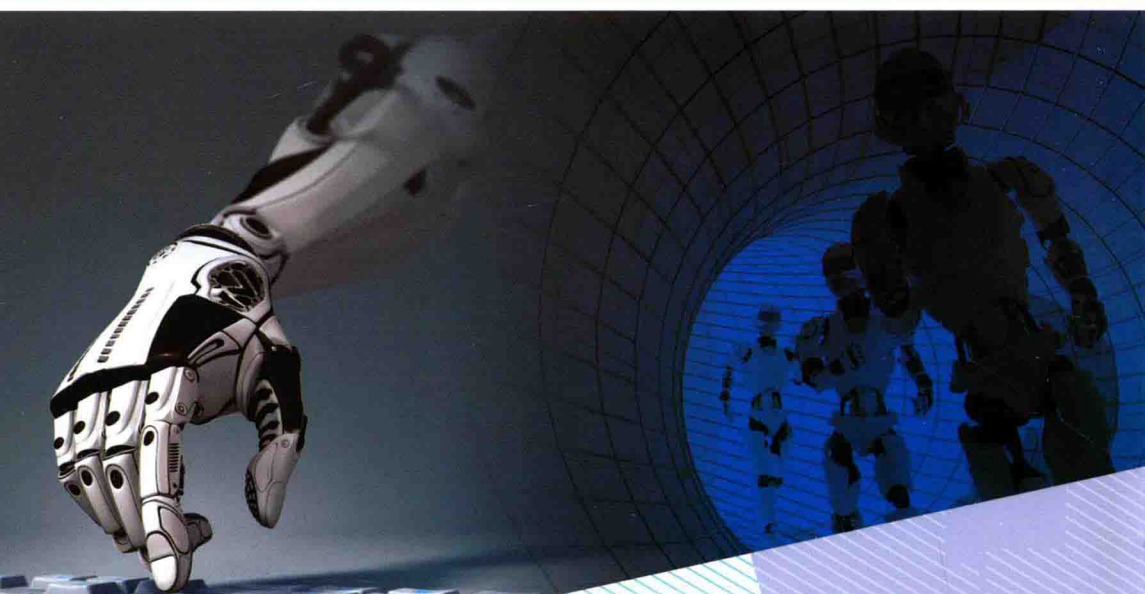


智能

科/学/技/术/著/作/丛/书

多智能体机器人系统 信息融合与协调

范波 张雷 著



科学出版社

智能科学技术著作丛书

多智能体机器人系统 信息融合与协调

范波 张雷 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

多机器人系统是当前机器人技术领域的一个研究热点,具有多学科交叉融合的显著特点。本书以多机器人系统为研究背景,结合多智能体系统的体系结构以及协调与合作技术,针对多机器人系统中的信息融合,对多机器人协调中的任务分配与规划、对抗环境下的多机器人协调等问题进行了深入研究,为提高多机器人系统的信息融合与协调的技术水平、促进相关技术的发展提供了新的思路与理论依据。

本书是作者进行创新研究成果的结晶。本书可供从事分布式人工智能、多机器人系统、信息融合技术和智能系统研究、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

多智能体机器人系统信息融合与协调/范波,张雷著.—北京:科学出版社,2015

(智能科学技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-044762-3

I. ①多… II. ①范…②张… III. ①智能机器人 IV. ①TP242.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 123205 号

责任编辑:张海娜 高慧元 / 责任校对:胡小洁

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 7 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 7 月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:255 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《智能科学技术著作丛书》编委会

名誉主编：吴文俊

主 编：涂序彦

副 主 编：钟义信 史忠植 何华灿 何新贵 李德毅 蔡自兴 孙增圻
谭 民 韩力群 黄河燕

秘 书 长：黄河燕

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

蔡庆生（中国科学技术大学）

蔡自兴（中南大学）

杜军平（北京邮电大学）

韩力群（北京工商大学）

何华灿（西北工业大学）

何 清（中国科学院计算技术研究所）

何新贵（北京大学）

黄河燕（北京理工大学）

黄心汉（华中科技大学）

焦李成（西安电子科技大学）

李德毅（中国人民解放军总参谋部第六十一研究所）

李祖枢（重庆大学）

刘 宏（北京大学）

刘 清（南昌大学）

秦世引（北京航空航天大学）

邱玉辉（西南师范大学）

阮秋琦（北京交通大学）

史忠植（中国科学院计算技术研究所）

孙增圻（清华大学）

谭 民（中国科学院自动化研究所）

谭铁牛（中国科学院自动化研究所）

涂序彦（北京科技大学）

王国胤（重庆邮电学院）

王家钦（清华大学）

王万森（首都师范大学）

吴文俊（中国科学院数学与系统科学研究院）

杨义先（北京邮电大学）

于洪珍（中国矿业大学）

张琴珠（华东师范大学）

赵沁平（北京航空航天大学）

钟义信（北京邮电大学）

庄越挺（浙江大学）

《智能科学技术著作丛书》序

“智能”是“信息”的精彩结晶，“智能科学技术”是“信息科学技术”的辉煌篇章，“智能化”是“信息化”发展的新动向、新阶段。

“智能科学技术”(intelligence science&technology, IST)是关于“广义智能”的理论方法和应用技术的综合性科学技术领域,其研究对象包括:

- “自然智能”(natural intelligence, NI),包括“人的智能”(human intelligence, HI)及其他“生物智能”(biological intelligence, BI)。

- “人工智能”(artificial intelligence, AI),包括“机器智能”(machine intelligence, MI)与“智能机器”(intelligent machine, IM)。

- “集成智能”(integrated intelligence, II),即“人的智能”与“机器智能”人机互补的集成智能。

- “协同智能”(cooperative intelligence, CI),指“个体智能”相互协调共生的群体协同智能。

- “分布智能”(distributed intelligence, DI),如广域信息网、分散大系统的分布式智能。

“人工智能”学科自 1956 年诞生以来,在起伏、曲折的科学征途上不断前进、发展,从狭义人工智能走向广义人工智能,从个体人工智能到群体人工智能,从集中式人工智能到分布式人工智能,在理论方法研究和应用技术开发方面都取得了重大进展。如果说当年“人工智能”学科的诞生是生物科学技术与信息科学技术、系统科学技术的一次成功的结合,那么可以认为,现在“智能科学技术”领域的兴起是在信息化、网络化时代又一次新的多学科交融。

1981 年,“中国人工智能学会”(Chinese Association for Artificial Intelligence, CAAD)正式成立,25 年来,从艰苦创业到成长壮大,从学习跟踪到自主研发,团结我国广大学者,在“人工智能”的研究开发及应用方面取得了显著的进展,促进了“智能科学技术”的发展。在华夏文化与东方哲学影响下,我国智能科学技术的研究、开发及应用,在学术思想与科学方法上,具有综合性、整体性、协调性的特色,在理论方法研究与应用技术开发方面,取得了具有创新性、开拓性的成果。“智能化”已成为当前新技术、新产品的发展方向和显著标志。

为了适时总结、交流、宣传我国学者在“智能科学技术”领域的研究开发及应用成果,中国人工智能学会与科学出版社合作编辑出版《智能科学技术著作丛书》。需要强调的是,这套丛书将优先出版那些有助于将科学技术转化为生产力以及对社会和国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大智能科学技术工作者的积极参与和大力支持,以及编委们的共同努力,《智能科学技术著作丛书》将为繁荣我国智能科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

祝《智能科学技术著作丛书》出版,特赋贺诗一首:

**智能科技领域广
人机集成智能强
群体智能协同好
智能创新更辉煌**

涂序彦

中国人工智能学会荣誉理事长

2005年12月18日

前 言

随着机器人技术的发展,单个机器人的工作能力、鲁棒性、可靠性、效率都有很大的提升。一个给定任务的解决方案是建立一个单独具备处理问题能力的自动机器人去实现任务。众多应用表明,在小尺度范围里,单机器人方案是可行的,但是面对一些复杂的、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化更高、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。多机器人系统作为一种协作的群体多机器人系统,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做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的内在优势。

与单机器人相比,多机器人系统具有很多优点,多机器人系统具有更好的空间分布、功能分布、时间分布、信息分布、资源分布等特性。系统中的各机器人可以实现多种信息共享,使整个系统具有更好的数据冗余性和更好的鲁棒性。多机器人通过相互协作的方式完成任务,使得系统具有并行性、容错性、灵活性、高效性等优势。多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。

自 20 世纪 70 年代后期以来,多智能体系统(multi-Agent system, MAS)研究逐渐成为分布式人工智能的研究热点,并在机器人、人工生命和知识获取等领域展开广泛研究。多机器人系统是一类典型的 MAS,通过组织成 MAS 结构,机器人能够相互协作,最终提高任务求解能力。近年来,随着多 Agent 强化学习算法和理论研究的深入,应用强化学习方法实现协作多机器人系统的自适应控制和优化逐渐成为研究应用的热点。

全书共 8 章。第 1 章介绍了多机器人系统中的信息融合以及多机器人协调与合作的研究现状;简要描述了多 Agent 信息融合与协调的研究现状,对机器人足球及其研究进展进行了概述。第 2 章给出了 Agent 与 MAS 的定义与特性,描述了信息融合技术及其发展现状;通过分析 Agent 和 MAS 的模型与体系结构,将多 Agent 引入信息融合中,提出了基于多 Agent 的信息融合模型架构。第 3 章描述了多 Agent 协调的基本理论与方法;在单 Agent 的学习模型与方法中,概述了强化学习、Markov 决策过程与 Q 学习;对多 Agent 协调模型进行了简要的介绍;重点讨论了 MAS 协调的对策与学习方法,在对 Markov 对策概述的基础上,重点对

冲突博弈、多 Agent 强化学习进行了分析与讨论。第 4 章从分析和研究多 Agent 的体系结构入手,提出了一种多 Agent 的分布式决策方法,构建了基于证据推理的 Agent 信息模型和基于可传递置信模型的多 Agent 决策框架,并给出了相应的算法;通过在机器人足球赛中的应用,对赛场环境信息及对手态势进行分析,得出有效的决策结论。第 5 章针对强化学习在实际系统应用的特点,提出了一种基于知识的强化函数设计方法。在实际应用系统中对强化学习算法进行了改进,将经验信息和先验知识引入强化函数中,构建了综合终极目标的奖惩信息和 Agent 动作策略的奖惩信息的强化函数。第 6 章分析了多 Agent 协作学习的特点,提出此学习既要具备 Agent 个体能力的学习,又要有 Agent 之间相互协调的学习;提出了一种基于分布式强化学习的多 Agent 协调方法,协调 Agent 将复杂的任务进行分解处理,通过中央强化学习选择适当的策略对子任务进行分配,任务 Agent 采用独立强化学习选择有效的行为,相互协作完成系统任务。第 7 章研究了 Agent 之间存在着竞争和合作的关系,发现多 Agent 学习如果忽视 Agent 之间的对策和协调,就很难取得满意的效果,学习过程可能会暴露出 Agent 相互冲突的诸多因素,使 MAS 难以有效地完成最终任务;基于 Markov 对策,提出了一种分层的多 Agent 对策框架,Team 级利用零和 Markov 对策解决与对手 Agent 群体的竞争;Member 级利用团队 Markov 对策处理群体内部 Agent 的合作。第 8 章讨论了 Agent 技术在机器人智能控制系统的应用情况,分析了机器人智能控制研究问题,提供了多机器人系统应用的实例;总结本书的主要研究结果,并对需要进一步研究的问题提出了一些看法。

基于 Agent 技术的多机器人系统研究是一个新兴的研究热点,必将推动人工智能技术与信息融合技术的进步与发展。通过机器人技术研究的不断深入,会涌现出更多的新理论与应用;Agent 技术的不断发展以及与机器人系统的相互渗透,会获得更丰富的解决综合问题的思路与方法。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,欢迎广大读者提出宝贵意见。

目 录

《智能科学技术著作丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 多机器人系统中的信息融合	2
1.2.1 机器人传感器系统	2
1.2.2 机器人多传感器信息融合	2
1.3 多机器人协调与合作研究现状	4
1.4 多 Agent 信息融合与协调的研究现状	6
1.4.1 多 Agent 信息融合	7
1.4.2 多 Agent 协调与合作	7
1.5 机器人足球及其研究进展	9
1.5.1 机器人足球的发展概况	9
1.5.2 FIRA 机器人足球比赛系统	10
1.5.3 机器人足球的关键技术和研究热点	11
1.6 本书的结构和内容安排	13
参考文献	14
第 2 章 多 Agent 的信息融合模型与方法	16
2.1 引言	16
2.2 Agent 与 MAS 的概念及特性	17
2.2.1 Agent 的由来及定义	17
2.2.2 Agent 的特性	18
2.2.3 MAS 的概念与特性	21
2.2.4 MAS 与复杂系统	21
2.2.5 MAS 与智能系统	23
2.3 信息融合技术概述	25
2.3.1 信息融合的概念与定义	26
2.3.2 信息融合的模式	27
2.3.3 信息融合应用与发展现状	31
2.4 多 Agent 信息融合模型	33

2.4.1	Agent 体系结构	33
2.4.2	MAS 体系结构	35
2.4.3	基于多 Agent 的信息融合模型	36
2.5	小结	37
	参考文献	38
第 3 章	多 Agent 协调的学习与对策	41
3.1	引言	41
3.2	多 Agent 协调的理论与方法	42
3.2.1	协调的基本概念	42
3.2.2	MAS 协调及其理论	43
3.3	Agent 的学习模型与方法	46
3.3.1	强化学习	47
3.3.2	Markov 决策过程	49
3.3.3	Q 学习算法	50
3.4	多 Agent 的协调模型	52
3.4.1	黑板模型	52
3.4.2	合同网	53
3.4.3	通用部分全局规划	55
3.5	多 Agent 协调的对策与学习方法	55
3.5.1	Markov 对策概述	56
3.5.2	冲突博弈	59
3.5.3	多 Agent 强化学习	60
3.6	小结	61
	参考文献	61
第 4 章	基于证据推理的多 Agent 分布式决策	63
4.1	引言	63
4.2	证据推理理论	64
4.2.1	概率的几种解释及其性质	64
4.2.2	证据理论的数学基础	64
4.2.3	证据推理的基本概念	67
4.2.4	Dempster 组合规则	68
4.2.5	证据决策规则	71
4.2.6	Dempster 组合规则存在的问题	72
4.3	Agent 信息模型	73
4.3.1	单支置信函数	73

4.3.2 基于证据推理的 Agent 信息模型	73
4.4 可传递置信模型	74
4.4.1 可传递置信模型的基本结构	74
4.4.2 辨识框架的粗分和细化	75
4.4.3 Pignistic 概率转换	75
4.5 基于多 Agent 的分布式决策融合框架及算法	76
4.5.1 系统框架	76
4.5.2 融合中心	77
4.5.3 决策中心	78
4.6 仿真算例	79
4.6.1 赛场状态信息	79
4.6.2 对手的策略	81
4.7 多 Agent 分布式决策融合策略	83
4.7.1 异构融合	83
4.7.2 可靠性分配	84
4.7.3 融合处理	84
4.7.4 在机器人足球中的应用	84
4.8 小结	88
参考文献	89
第 5 章 强化函数设计方法及其在学习系统的应用	91
5.1 引言	91
5.2 强化学习应用中的关键问题	92
5.2.1 泛化方法	92
5.2.2 探索与利用的权衡	94
5.2.3 强化函数与算法结构设计	95
5.3 强化学习的奖惩函数	95
5.4 基于平均报酬模型的强化学习算法	98
5.4.1 报酬模型	98
5.4.2 最优策略	99
5.4.3 基于平均报酬模型的强化学习主要算法	99
5.5 一种基于知识的强化函数设计方法	101
5.5.1 强化函数的基本设计思想	101
5.5.2 基于知识的强化函数	103
5.5.3 仿真实验	103
5.6 小结	107

参考文献	107
第 6 章 基于分布式强化学习的多 Agent 协调方法	109
6.1 引言	109
6.2 多 Agent 强化学习基本理论	110
6.2.1 基于局部合作的 Q 学习	111
6.2.2 基于区域合作的 Q 学习	111
6.2.3 算法的收敛性	113
6.3 多 Agent 强化学习方法的特性	114
6.3.1 多 Agent 强化学习理论及假设的不同	114
6.3.2 多 Agent 强化学习模型及框架的差异	115
6.3.3 多 Agent 强化学习内容的区别	115
6.3.4 多 Agent 强化学习算法设计的迥异	116
6.4 多 Agent 强化学习算法的分类与比较	116
6.4.1 绝对合作型多 Agent 强化学习算法	116
6.4.2 绝对竞争型多 Agent 强化学习算法	117
6.4.3 混合型多 Agent 强化学习算法	117
6.4.4 平衡型多 Agent 强化学习算法	117
6.4.5 最佳响应型多 Agent 强化学习算法	118
6.4.6 分析与比较	118
6.5 MAS 中的分布式强化学习模型及结构	118
6.5.1 中央强化学习结构	119
6.5.2 独立强化学习结构	119
6.5.3 群体强化学习结构	120
6.5.4 社会强化学习结构	120
6.6 基于分布式强化学习的多 Agent 协调模型及算法	120
6.6.1 协调级	121
6.6.2 行为级	121
6.6.3 强化信息的分配	121
6.6.4 仿真实验	122
6.7 小结	129
参考文献	130
第 7 章 基于 Markov 对策的多 Agent 协调	132
7.1 引言	132
7.2 多 Agent 交互的协调与博弈分析	133
7.2.1 多 Agent 协调与博弈的性质	133

7.2.2 多 Agent 协调失败的处理	134
7.3 多 Agent 冲突博弈强化学习模型	136
7.3.1 多 Agent 冲突博弈	136
7.3.2 最优策略	137
7.3.3 基于后悔值的 Q 学习模型	138
7.4 Nash-Q 学习	140
7.5 零和 Markov 对策和团队 Markov 对策	141
7.5.1 零和 Markov 对策	141
7.5.2 团队 Markov 对策	143
7.6 基于 Markov 对策的多 Agent 协调策略	144
7.6.1 对策框架	144
7.6.2 Team 级对策	144
7.6.3 Member 级对策	145
7.6.4 仿真实验	145
7.7 小结	155
参考文献	155
第 8 章 Agent 技术在机器人智能控制系统的应用	157
8.1 引言	157
8.2 智能机器人系统应用研究	158
8.2.1 概况	158
8.2.2 传统研究方法的缺陷	160
8.2.3 智能机器人系统的共性	160
8.3 开放式机器人智能控制系统应用研究	161
8.3.1 开放式控制系统的典型特征	161
8.3.2 基于 PC 的开放式控制系统的实现	162
8.4 多机器人系统应用研究	162
8.4.1 多机器人队形控制	163
8.4.2 机器人救援	165
8.4.3 多机器人追捕问题	166
8.5 总结与展望	168
8.5.1 总结	168
8.5.2 未来工作展望	169
参考文献	170

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

随着现代科学技术,特别是计算机技术、通信技术、电子技术、传感器技术、控制技术以及人工智能技术的飞速发展,机器人的开发与应用成为当前的一个热点,已出现了各种各样的具有某种智能的机器人或仿人机器人,其应用也从自动化生产线发展到海洋资源的探索乃至太空作业以及家庭服务等许多领域。然而,就目前的机器人技术水平而言,单体机器人在信息的获取、处理及控制能力等方面还十分有限,对于不同的工作任务和不同的工作环境,尤其是一些大型复杂的工作任务及环境,单体机器人的能力更显不足。于是人们自然会想到利用多机器人协作来提高它的工作能力。

多机器人系统在时间、空间、功能、信息和资源等方面具有分布性,尤其是在信息、资源、功能方面具有冗余性及互补性。这给多机器人系统带来了明显的优越性:工作效率大幅度提高,工作能力大幅度增强,功能及工作范围明显扩大,系统的可靠性、鲁棒性、容错能力明显增强。

多机器人系统并不是将多个机器人简单合并到一起就能自然形成,而是需要将多个机器人视为一个整体,组成一个机器人社会,相互协调,避免冲突,即从组织、系统的角度来进行研究^[1]。20世纪80年代末,受到分布式人工智能(distributed artificial intelligent, DAI)^[2]、分布式系统研究的启发,针对集中式控制的不足,一些从事机器人学研究的学者提出了基于分散化(decentralized)和分布式(distributed)思想的多机器人系统,并研究了它的协作组织策略、方法及协调机制^[3]。这些研究从社会学角度出发来考察、分析机器人群体的合作机制,充分发挥多机器人系统中各个机器人的智能,根据环境和任务的变化,快速、灵活地组织多机器人系统;其中基于多智能体系统(multi-agent systems, MAS)概念的多机器人系统研究受到广泛关注。在多机器人系统中,每个机器人都被视为一个具有一定智能和基本行为能力的 Agent,通常只处理与自身相关的局部目标和本地信息,并进行自主运动,各机器人不是由集中控制器进行统一控制,而是利用自身的智能来动态地规划各自的行为,并通过与其他机器人进行合作,体现机器人群体行为。多机器人系统的研究目前尚处于初级阶段,有大量的理论及实际问题需要研究,对机器人学的发展具有重要的理论和实际意义。

1.2 多机器人系统中的信息融合

1.2.1 机器人传感器系统

机器人传感器系统是机器人信息输入的窗口。要使机器人拥有智能,能对环境变化作出反应,首先,必须使机器人具有感知环境的能力,用传感器采集环境信息是机器人智能化的第一步;其次,就是如何采用适当的方法,将多个传感器获取的环境信息加以综合处理,控制机器人进行智能作业。所以传感器及其信息处理系统,两者相辅相成,为机器人智能作业提供依据^[4]。

机器人技术的发展大致经历了三个时期^[5]。

第一代为示教再现型机器人。它不配备任何传感器,一般采用简单的开关控制、示教再现控制和程序控制,机器人的作业路径或运动参数都需要示教或编程给定。在工作过程中,它通常无法感知环境的改变。

第二代为感觉型机器人。此种机器人配备了简单的内外部传感器,能感知自身运行的速度、位置、姿态等物理量,并以这些信息的反馈构成闭环控制。此种机器人由于具有简单的外部传感器如简易视觉、力觉传感器等,因而具有简单的环境适应能力。

第三代为智能型机器人。目前正在研究和发展之中,它配备多种内外部传感器,通常,它还拥有自己的知识库、多信息处理系统,可在一定的环境中工作,并具有一定的环境应变能力。但是,即使是目前世界上智能等级最高的机器人,它对外部环境变化的应变能力也非常有限,远远没有达到人们预想的目标。为了解决这一问题,机器人研究领域的学者,一方面开发研究机器人的各种内外部传感器,以获取更多的信息;另一方面,发展多源信息处理技术,即多源信息融合技术,使机器人能得到更准确、更全面、更及时的内外信息,尤其是外部环境的最新信息,以便及时作出新的决策。

1.2.2 机器人多传感器信息融合

随着科学技术的不断发展,多种新型敏感材料和传感器不断涌现,传感器种类的增多、性能的提高以及精巧的结构都促进了多传感器系统的发展。多传感器系统的出现,使得机器人获得的信息类型及数量急剧增加,而这些信息在时间、空间、可信度、输出方式上各不相同,这对信息的处理和管理工作提出了新的要求。若对各种不同传感器采集的信息进行单独、孤立地加工不仅会导致信息处理工作量的增加,而且可能会割断各传感器信息间的内在联系,丢失信息有机组合可能蕴涵的有关特征,从而造成信息资源的浪费。由于传感器感知的是同一环境下不

同(或相同)侧面的有关信息,所以这些信息通常是相关的。因此,多传感器系统要求采用合适的信息综合处理技术,并协调各传感器彼此间的工作。

在以往机器人智能的研究中,人们把更多的注意力集中到研究和开发机器人的各种外部传感器上,尽管在现有的智能机器人系统中,大多数使用了多个不同类型的传感器,但它们更像是一个多传感器的拼合系统,即没有将所有信息作有效的融合处理及综合利用,这无疑对提高各种智能机器人系统的性能带来了不利影响。同样,在多机器人系统中,如果机器人之间过分依赖通信进行信息获取,那么,当机器人数量较多时,系统通信的负担将使系统的运作效率下降。因此如何有效利用智能机器人本身的传感器检测信息显得至关重要。

1. 机器人多传感器信息融合的发展

信息融合是20世纪70年代初由美国最早提出来的^[6]。近来,随着计算机技术、通信技术的发展,特别是军事上的迫切要求,该技术引起了世界范围内的普通关注。

20世纪80年代初,机器人学界提出非结构化环境的机器人研究,并开始研究自主车、建筑机器人、消防机器人、水下机器人、火山探险机器人、空间机器人等,开发这些在非结构化环境工作的机器人,其核心的关键技术之一是多传感器信息融合。

显然,多传感器信息融合技术已经成为近年来机器人领域非常热门的研究课题。Kluwer Academic Publishers先后出版了牛津大学Durrant-Whyte所著的文献^[7]和哥伦比亚大学Allen所著的文献^[8]。*International Journal of Robotics Research*在1988年推出了Sensor Data Fusion专辑。同年,SPIE主持召开有关信息融合的学术会议,IEEE主办的学术会议“Robotics & Automation”从1986年开始均有专门关于信息融合的专题,Luo在*IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*上发表了著名的综述性文章^[9]。与此同时,很多研究机构在实验室设计了各种可移动机器人或各种环境下的自动驾驶装置^[10],来探讨多传感器数据融合技术在机器人领域的应用。HILARE是第一个应用多传感器信息来创建世界模型的可移动机器人,它充分利用视觉、听觉、激光测距传感器所获得的信息,以确保其能稳定地工作在未知环境中。卡内基·梅隆大学机器人研究所在20世纪90年代中期研究了一种可移动机器人RANGER,它包括一个状态空间控制器、一个基于卡尔曼滤波的导航中心和一个自适应感知中心,通过融合各种传感器获得的信息来确保模型的可靠性。LIAS是美国德莱克西尔大学研究的具有多个传感器模块的移动机器人,该系统通过融合不同种类的传感器信息得到效果更好的机器人周围的精确图景^[11]。ANFM是瑞典于默奥大学于近期开发的野外自治导航车,该系统采用层次化结构和远程控制的方案,利用不同传感器得到的

互补信息和冗余信息,采用模糊逻辑和神经网络的进行多传感器信息融合^[12]。

国内在多传感器信息融合领域的研究相对较晚,但发展势头十分迅猛,特别是在机器人多传感器信息融合方面开展了理论和实验研究。目前在这一领域开展研究工作的主要为高校和研究机构,并已取得不少成果^[4-6,13-18]。

2. 多机器人的多传感器信息融合

随着计算机技术和通信技术的发展,在智能机器人系统中,环境感知与定位、路径规划和运动控制等功能模块也趋向于分布式的解决方案,从而各个功能模块并行执行,提高系统的实时性和鲁棒性。因此,环境感知与定位模块必须以直接通信的方式向路径规划模块传送信息。在多机器人系统中,为了实现协调与合作,个体机器人的感知系统必须提供足够的环境描述及自身位置信息。由于目前使用的各种传感器还不能达到这个要求,因此机器人之间或机器人与控制中心必须进行通信以获得上述信息^[18]。

多机器人系统要在各种变化的、不确定的环境中工作,其首要任务是要了解其所处环境,给出其尽可能全面的、符合实际的描述。目前多机器人系统中的通信还存在许多瓶颈问题。因此,机器人的感知模块必须对传感器测得的原始环境信息进行局部处理和融合,提取局部环境特征信息并进行交互,以减少通信量,提高系统的动态性能。

多机器人系统中分布的各种传感器可以获得环境的多种特征信息,包括局部的、间接的环境知识。基于这些知识,利用多传感器信息融合技术,可得到环境全面、统一的描述。所以,一个高效的具有很强适应能力的多信息融合系统是反映机器人智能水平的重要条件之一。正如前面所述,在多机器人系统中使用多传感器信息融合技术,充分利用信息的互补性及冗余性,可以使系统具有容错功能,提高系统的精度,改善系统的决策能力,扩大功能范围。

1.3 多机器人协调与合作研究现状

多机器人系统在自动化加工、柔性制造、复杂装配等领域具有广阔的应用前景。德国多特蒙德大学的 Freund 教授等从系统角度研究机器人和自动化,他们采用分层递阶协调原理,研制出用于在空间实验室环境执行任务的多机器人系统。Freund 教授以分层协调合作为理论框架,重点研究了防撞、协调操作、自动任务规划和基于传感器的控制。日本名古屋大学的 Fukuda 教授等将每个机器人视为一个单元,研究单元自组织构成体,即组成多机器人系统^[19]。单元体可以根据任务和环境动态重构,可以具有学习和适应的群体智能(group Intelligence),具有分布式的体系结构。美国学者 Jin 和 Beni 等研究和实现了 SWARM 系统,这一系