

智能机器人先进技术丛书

群机器人 协调控制

Swarm Robotic Coordinated Control

薛颂东 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

智能机器人先进技术丛书

群机器人 协调控制

Swarm Robotic Coordinated Control

薛颂东 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

群机器人协调控制/薛颂东著. —北京: 北京理工大学出版社,
2016. 11

ISBN 978 - 7 - 5682 - 3177 - 0

I. ①群… II. ①薛… III. ①机器人控制-协调控制-研究
IV. ①TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 239792 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 11

字 数 / 177 千字

版 次 / 2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月第 1 次印刷

定 价 / 58.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 张鑫星

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换



序

作为人工群体系统和一类特殊的多机器人,群机器人由大量功能相对简单的自主移动机器人组成,能够通过特定的集体行为设计和协调控制,在分布式机制下自组织地涌现期望的集体行为,执行相对复杂的给定任务。微观层面上,功能同构的成员机器人能对环境产生有限感知,在仅遵循简单行为规则的前提下,通过机器人与机器人之间、机器人与环境之间的局部交互,自主规划自身行为,进而在宏观层面上自组织地涌现群体智能。群机器人学是机器人技术和群体智能计算方法结合的产物,故群机器人较单体机器人和一般意义上的多机器人具有更为理想的柔性、鲁棒性和规模可伸缩性等系统特征。现有的群机器人协调控制方法,多源于但不囿于自然界群居生物的行为研究。本书即从自然启发的角度,以目标搜索任务为载体,阐述群机器人的协调控制方法、策略及算法,期望为群机器人领域和智能控制、智能计算等相关领域的研究人员提供参考和借鉴。

本书取材于作者近年来的相关研究,根据内容组织确定行文逻辑并安排章节。首先,综述群机器人研究,给出群机器人系统特征,明确其与一般意义上的多机器人的区分准则,强调集体行为的自组织涌现控制原则。然后,评述群机器人系统建模方法,重点阐述本书使用的扩展微粒群算法建模和协调控制方法。再后,围绕基于扩展微粒群算法模型的群机器人协调控制涉及的主要环节,包括相对定位机制下的目标搜索、异步通信条件下的目标搜索、运动学特性约束下的目标搜索、多源异类信号融合条件下的目标搜索等问题,在群体智能原则框架内阐述相应的群机器人协调控制方法。最后,针对多目标搜索问题,阐述动态的自组织任务分工和混杂粒度协同条件下的群机器人协调控制方法。

建议读者这样阅读本书:首先,按顺序阅读第1章、第2章和第3章,以明确群机器人研究概貌和群机器人系统建模方法,掌握基于扩展微粒群算法模型的群机器人协调控制工具的基本使用。如果对群机器人的研究动态已有相当了解,也可以跳过第1章,直接从第2章切入。然后,以任意

顺序阅读第4章、第5章、第6章和第7章,进一步理解基于扩展微粒群算法模型的群机器人协调控制过程中主要环节的处理。最后,按顺序阅读第8章和第9章,以理解在考虑动态任务分工和不同粒度行为协同的多目标搜索场景下的群机器人协调控制方法。

本书所涉研究得到很多人的帮助,谨向他们表示诚挚的谢意。首先,感谢导师曾建潮教授的悉心指导,是他带作者进入群机器人学领域,激发了作者对群机器人协调控制研究的兴趣。其次,感谢英国萨里大学(University of Surrey)金耀初教授,在作者访英期间与作者就有关问题进行了启发性讨论。同时,感谢太原科技大学徐玉斌教授和其他同事,在研究和成书过程中得到了他们很多鼓励。另外,感谢参加作者在太原科技大学讲授的《机器人学与控制》《智能机器人》课程学习并接受论文指导的研究生张云正、郭峰、王亚超、咎云龙、张文武、庄全文、李进等,本书的许多内容经过他们验证。尤其是张云正,从本科毕业设计开始,到完成硕士学位论文,全程接受作者的指导,一起进行了许多有趣且有价值的讨论。

感谢有关科研基金项目对本书相关研究提供的经费支持,包括国家自然科学基金(No. 60975074),国家自然科学基金委员会-中国工程院工程科技发展战略研究联合基金(No. U0970124),山西省自然科学基金(Nos. 2009011017-1, 2013011019-4),山西省科技攻关计划项目(No. 2015031004)以及山西省回国留学人员科研资助项目(No. 2016-091)等。

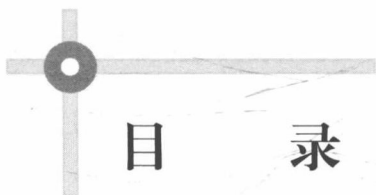
感谢太原科技大学第四期学科建设经费对本书出版提供的支持。

感谢山西省留学人员管理委员会办公室提供的资助,作者因此有机会作为访学学者赴英国进行了一年的相关研究。

感谢北京理工大学出版社编辑张海丽女士的盛情约稿,以及她在本书长达一年半的撰写和出版过程中的耐心协调。

最后,对家人特别是我的妻子钦勇女士表示感谢。为撰写此书,作者过去几年的大多数时间是在实验室中或办公桌前度过的,感谢他们的包容、理解和支持。

作者



目 录

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 群机器人研究综述	1
1.2.1 相关概念	1
1.2.2 系统特征	3
1.2.3 判别准则	4
1.2.4 自然启发	4
1.2.5 通信交互	4
1.2.6 协调控制	5
1.2.7 智能涌现	6
1.2.8 典型应用	6
1.3 本书结构	9
第 2 章 群机器人系统建模	11
2.1 一般性建模要求	11
2.2 常规建模方法	11
2.2.1 基于传感器-执行器建模法	12
2.2.2 微观建模法	12
2.2.3 宏观建模法	15
2.2.4 基于拟态物理学建模法	16
2.2.5 元胞自动机建模法	18
2.3 常规建模法述评	19
2.4 扩展微粒群算法建模法	19
2.4.1 微粒群算法	20
2.4.2 群机器人目标搜索与微粒群算法的映射	22
2.4.3 相关概念	23
2.4.4 扩展微粒群算法模型的形式化表示	25

第3章 理想条件下的群机器人目标搜索	26
3.1 成员机器人控制器结构	26
3.2 扩展微粒群算法模型要素分解	28
3.2.1 搜索环境	28
3.2.2 搜索主体	29
3.3 控制策略	31
3.3.1 系统建模	31
3.3.2 算法描述	32
3.4 仿真	33
3.4.1 参数设置	33
3.4.2 性能指标	33
3.4.3 结果与讨论	35
3.5 总结	45
第4章 相对定位机制下的群机器人目标搜索	46
4.1 自主移动机器人定位研究述评	46
4.1.1 绝对定位	46
4.1.2 相对定位	48
4.1.3 群机器人定位	51
4.2 相对定位机制下的群机器人系统建模	52
4.2.1 有限检测能力与最优认知	53
4.2.2 局部交互与社会最优	53
4.2.3 相对位置描述	54
4.3 控制算法	57
4.3.1 假设	57
4.3.2 算法描述	58
4.4 仿真	60
4.4.1 参数设置	60
4.4.2 结果与讨论	60
4.5 总结	61
第5章 异步通信条件下的群机器人目标搜索	62
5.1 微粒群算法串并行研究述评	62
5.2 微粒群算法特性分析	63
5.2.1 算法概要	63
5.2.2 算法特性	64

5.2.3	时间经济性与算法效率分析	67
5.3	群机器人的并行异步控制	69
5.3.1	系统建模	69
5.3.2	群机器人异步并行控制特点	70
5.3.3	基于进化位置的异步通信策略	72
5.3.4	算法描述	73
5.4	仿真	73
5.4.1	参数设置	75
5.4.2	基于固定通信周期原则的异步通信策略	75
5.4.3	基于绝对进化位置原则的异步通信策略	76
5.4.4	结果与讨论	76
5.5	总结	78
第6章	运动学特性约束下的群机器人目标搜索	79
6.1	机器人避碰规划研究述评	79
6.2	机器人的运动控制	80
6.2.1	机器人建模	80
6.2.2	群机器人建模	84
6.3	群机器人避碰规划	86
6.3.1	人工势场法	86
6.3.2	群机器人避碰规划	87
6.3.3	人工势场法与微粒群算法的集成	88
6.3.4	算法描述	90
6.4	仿真	92
6.4.1	机器人的局部坐标系	92
6.4.2	性能指标	92
6.4.3	环境构建	92
6.4.4	参数设置	93
6.4.5	结果与讨论	93
6.5	总结	95
第7章	多源信号融合条件下的群机器人目标搜索	96
7.1	复杂搜索环境与信号传播	96
7.2	系统建模	96
7.2.1	机器人行为规则	97
7.2.2	绝对定位机制下的系统模型	97

7.3 信号感知	98
7.3.1 瓦斯气体信号	98
7.3.2 射频电磁波信号	99
7.3.3 呼救声音信号	100
7.3.4 信号传播环境建模	100
7.4 异类信号融合	102
7.4.1 虚拟通信	102
7.4.2 信息熵	104
7.4.3 加权融合	106
7.4.4 算法描述	107
7.5 仿真	108
7.5.1 信号发生	108
7.5.2 测点布置	108
7.5.3 参数设置	109
7.5.4 结果与讨论	109
7.6 总结	115
第8章 要求动态任务分工的群机器人目标搜索	116
8.1 多目标搜索研究述评	116
8.2 问题描述	117
8.3 基于响应阈值的任务分工原理	118
8.3.1 多任务分工模型	118
8.3.2 任务激励	118
8.4 带闭环调节的动态任务分工	119
8.4.1 个性化任务集构造	119
8.4.2 个性化任务集维护	120
8.4.3 意向目标生成	121
8.4.4 子群联盟缔结	122
8.4.5 子群联盟框架内的机器人协同	122
8.4.6 机器人位置评估	123
8.4.7 机器人资源配置水平度量	123
8.4.8 子群联盟内优势地位评估	124
8.4.9 任务分工的动态调节	124
8.4.10 任务分工的鲁棒性	126
8.5 算法描述	127

8.6 仿真	129
8.6.1 结果	129
8.6.2 讨论	132
8.7 总结	134
第9章 考虑行为协同的群机器人目标搜索	135
9.1 群机器人行为协同研究述评	135
9.2 粗粒度协同模式	136
9.2.1 合作协同	136
9.2.2 竞争协同	139
9.3 协同策略	140
9.3.1 粗粒度协同	140
9.3.2 细粒度协同	141
9.4 算法描述	143
9.5 仿真	143
9.5.1 参数设置与评价指标	144
9.5.2 结果与讨论	145
9.6 总结	149
参考文献	150

第1章 引言

群机器人是由数量众多、结构和功能相对简单的自主移动机器人组成的人工群体系统。在协调控制作用下,成员机器人在个体层面上自主决策自身行为,群机器人在系统层面上涌现群体智能。这样,群机器人能够在有限感知和局部交互的自组织机制下生成特定模式,协同完成超出成员机器人能力的规定任务。由于分布式的群机器人协调控制方法源于自然启发,故以目标搜索为载体,研究群机器人协调控制问题。

1.1 研究背景

将单体机器人、多机器人用于灾难搜救,国内外已有研究^[1,2]。基于行为涌现^[3]的群机器人灾难救援的应用价值也随之突显。研究基于以下假设:针对震后市内搜救^[4,5]、矿难搜救、化学品泄漏源定位^[6,7]等目标搜索与定位任务,研究群机器人执行此类任务的协调控制方法。

1.2 群机器人研究综述

群机器人属于人工群体系统,由数量众多的同构自主机器人组成,具有典型的分布式系统特征。与单体机器人^[8]研究不同,群机器人学源于自然启发^[9-15]的群体智能方法和多机器人^[16]的结合体^[17,18],主要研究能力有限的成员机器人在协调控制作用下,通过有限感知和局部交互,在自组织机制下涌现智能行为并完成相对复杂的规定任务。

1.2.1 相关概念

要理解群机器人及其协调控制,须结合群、群体优化、群体智能^[19]、群体工程^[17]等概念,回顾智能机器人学的发展^[20,21]。

(1) 群。学界用元胞机器人表示如下系统:一组(group)机器人如机体细胞般按照一定模式自组织成复杂结构。后来用swarm取代group^[3],该术语较单纯生物学意义具有更丰富的内涵。



(2) 群体优化。现有群体优化主要有蚁群算法和微粒群算法等，以离散方式异步执行。从生物学角度看，群体优化可以构建有序模式；对机器人来说，群体优化可自组织为一定模式。故智能的特征之一就是生成有序模式^[22]。

(3) 群体智能。组成群体系统的个体相对简单，但是从宏观层面看，群体却是复杂的^[23]。在看似混沌的个体交互过程中，智能行为导致了有序产生，但该结果具有不可预测性。可见，群体智能是一组具有通用计算能力的非智能机器人的涌现性特征^[24-26]。

(4) 群机器人。群机器人 (Swarm Robotics) 与一般意义上的多机器人的主要差异，是协作背后隐藏的群体智能原则。无论规模大小，群机器人协调控制均应建立在有限感知、局部交互和自组织基础上^[3]。

以上概念的相互关系如图 1-1 所示。

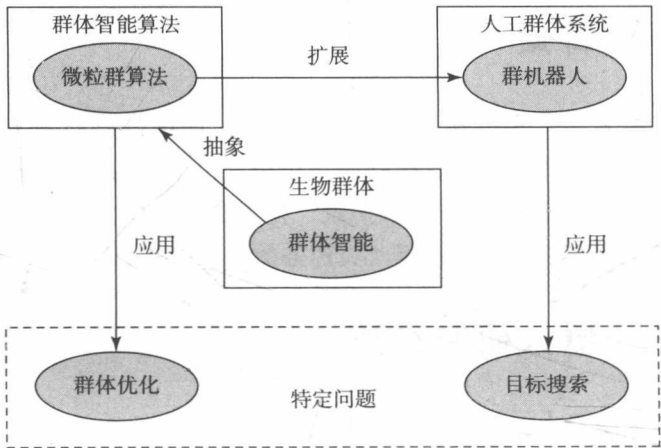


图 1-1 相关概念及其关系

群机器人学已引起学界关注，以下为部分研究机构^[3]：

- ①Massachusetts Institute of Technology, USA 麻省理工学院, 美国。
- ②California Institute of Technology, USA 加州理工学院, 美国。
- ③Carnegie Mellon University, USA 卡内基梅隆大学, 美国。
- ④École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland 洛桑联邦理工学院, 瑞士。
- ⑤Georgia Institute of Technology, USA 佐治亚理工学院, 美国。
- ⑥Hughes Research Labs, USA 休斯研究实验室, 美国。
- ⑦Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Turkey 中东技术大学, 土耳其。

- ⑧Teaxas A&M, USA 德克萨斯农工大学, 美国。
- ⑨东京工业大学, 日本。
- ⑩名古屋大学, 日本。
- ⑪University of Alberta, Canada 阿尔伯塔大学, 加拿大。
- ⑫Universität Karlsruhe (TH), Germany 卡尔斯鲁厄理工学院, 德国。
- ⑬Université Libre de Bruxelles, Belgium 布鲁塞尔自由大学, 比利时。
- ⑭University of Southern California, USA 南加州大学, 美国。
- ⑮University of West England, UK 西英格兰大学, 英国。
- ⑯ University of Surrey, UK 萨里大学, 英国。
- ⑰University of Wyoming, USA 怀俄明大学, 美国。
- ⑱Washington University, USA 华盛顿大学, 美国。

.....

我国不少科研院所也已介入群机器人的研究。

1.2.2 系统特征

生物群体控制的背后并不存在中心协调机制, 然而从系统层面来看却具有理想的鲁棒性、柔性、规模可伸缩^[27,28]等系统特征, 这也是群机器人系统所期望的^[29,30]。

(1) 鲁棒性。要求群机器人系统在性能较低时也不失控, 即便个体发生故障或受到外界扰动时亦然。自然界中, 很难阻止一群蚂蚁进入厨房就是最好的例子。社会性昆虫的鲁棒性可归结为以下因素:

①冗余。个体的功能缺失可由其他个体补充, 意味着相对于群体而言, 个体是非必需的。

②分散协调。系统的某一部分遭到破坏不能阻止系统控制。协调是整个系统涌现的特性。

③个体的简单性。与一个复杂的能够完成同样任务的单体机器人相比, 群的成员结构和功能要相对简单。个体简单则不易发生故障。

④感知的多样性。大量成员机器人将分布感知融合后可增加群机器人系统的总信噪比。

(2) 柔性。要求群机器人能针对不同任务生成类似蚁群面对觅食、围猎等任务的模块化解决方案。觅食时, 蚂蚁独立搜索食物, 并通过排放的信息素与其他蚂蚁协调; 围猎则要求蚂蚁合作搬运猎物。

(3) 规模可伸缩性。要求群体系统规模发生剧烈变化时也能自如控制, 通过性能指标的优雅降级使系统保持运行而不致崩溃^[31]。



1.2.3 判别准则

群机器人强调通过机器人与机器人、机器人与环境之间进行局部交互,从中涌现期望的集体行为。这是群机器人与一般意义上的多机器人的主要区别,可视为群机器人的判别准则^[29,30]。

(1) 自治性。组成群机器人的成员机器人应是能与环境交互的物理实体。传感器网络虽具有分布式感知能力,但因不具备运动能力,不能视为群机器人^[32]。不过必须承认,传感器网络和群机器人的研究高度相关。

(2) 数量。群机器人研究涉及个体协调。因此,仅仅对规模很小的多机器人系统控制可行,但不考虑规模的伸缩性,不属于群机器人范畴。尽管明确给出系统边界尚不可行,但一般认为至少应维持在 10~20 的水平^[29]。考虑大规模群机器人组群的费用,可开展较小规模群机器人研究,如 Balch 只用了 1~8 个^[33],但是必须考虑规模的伸缩性。

(3) 同构性。群机器人规模虽大,角色分工却不宜多^[33]。一般认为,机器人足球不属于群机器人范畴,因为每个机器人都被一个凌驾于系统的 Agent 赋予了不同角色,造成角色的高度异构^[34,35]。

(4) 个体能力。与规定任务相比,成员机器人的能力相对较弱,表现为机器人须合作完成给定任务。同时,机器人应仅具有有限感知和局部通信能力,以保证机器人协调是分布式的。

1.2.4 自然启发

群机器人要完成规定任务,有赖于群体行为涌现,涉及产生新算法的生物群体的行为模型、群体智能系统的底层机制等^[18]。生物群体为研究提供了启发,Schmickl 根据昆虫交哺,提出一个基于点对点交互、无须中央单元的群机器人通信策略^[36]。生物研究显示,自组织的产生利用了正反馈,但也利用负反馈机制使其受控,模式生成是两个机制相互作用的结果^[29]。

1.2.5 通信交互

通信是群机器人协同的基础^[37]。生物群体中,个体之间存在间接接触通信,一般用信息素(Stigmergy)描述这种机制:个体感知环境并反作用于环境,环境是个体交互的媒介^[38-40]。按照个体的交互方式可将通信分为三类^[41]:

(1) 借助环境交互。以环境作为通信媒介,这是简单的交互方式,机

机器人之间不存在明确的通信。机器人随任务进程改变环境,进而帮助其他机器人完成任务。

(2) 通过感知交互。机器人位于传感器感知范围时,可相互感知对方,机器人之间无明确通信。这要求机器人具有区分机器人与环境的能力。由于机器人配置了各自独立的传感器,整个系统的信息融合^[42]是重要的。

(3) 显式通信。显式通信包括直接型和广播型等具有明确通信协议的通信形式。群机器人作为典型的分布式控制系统,尽管网络通信提供了机器人通信的基本解决方案,但因为群机器人系统的通信与面向数据处理和信息共享的计算机网络通信有很大差异,适合群机器人实时性要求的通信协议、网络拓扑结构及通信方式尚待研究^[27,38]。

1.2.6 协调控制

协调控制属于群机器人系统的高级控制任务。在群机器人中,个体和群体都要协调行为以实现群体功能。群机器人研究对象包括个体行为、群体行为两个层次。前者包括个体对环境的感知、学习、响应及自适应动作的协调。个体机器人控制系统是实现个体行为的基础,它要求个体具有较强的协作性与自治性^[41,43]。群体行为是建立在局部感知和交互基础上的智能涌现,典型的群体行为包括集中行为、分散行为和编队行为等^[27]。

(1) 体系结构。体系结构提供了机器人活动和交互的框架,决定着机器人之间的信息关系和控制关系。其中,群体体系结构有分层式和分布式两类^[41],主要研究如何根据任务类型、机器人个体能力等确定群机器人的规模及相互关系,是实现协作行为的基础。对于单机器人来说,主要有分层递阶和基于行为两种体系结构^[38]。一般地,个体应具有以下功能:感知能力、局部规划能力、通信能力、任务分解能力、任务分配能力、学习能力和控制与决策能力等^[41,44]。机器人的物理实现应着重考虑控制器设计、传感器布置等,使机器人通过与环境交互有效学习。

(2) 定位。群体模式通过个体间的交互涌现出来,而群中并不存在全局的协作控制系统,这便意味着每个机器人都有自己的局部协作控制系统,要具备在各自的局部协作系统框架内定位相邻个体的能力,所以机器人对相邻个体的快速准确定位极为重要^[45,46]。单体机器人定位技术主要有绝对定位和相对定位两类,传统的多机器人定位技术有的直接将单体定位技术用于多机器人情形,但多数通过卡尔曼滤波或粒子滤波等复杂的运算



将内部传感器和外部传感器信息进行融合估计^[47-50]。所用的检测手段则呈多元化：超声波、光线、声音等不一而足^[51]。严格来说，这些定位技术对于未知环境中工作的群机器人系统并不理想，因为其复杂的计算开销严重挑战有限的机器人资源。因此，侧重于相对定位技术的开发和控制算法设计值的探索。Cui 使用多个能力有限的简单移动 Agent 协同搜索和定位范围很大的区域中数量不确定的有害气体泄漏源^[52]。Martinson 通过应用分离、凝聚和编队^[53]等群体行为的三个特性，提出了一个偏置扩展群方法。Pugh 用三边定位技术开发了一个相对定位模块，并将该系统用在基于微粒群算法的群机器人搜索问题研究中^[54,55]。Rothermich 研究了群机器人的分布式定位问题^[56]。Spears 使用三角法研究了机器人的定位问题^[57]。Kelly 开发的群机器人定位系统，用板上红外线探测技术感知机器人的相对位置^[58]。

1.2.7 智能涌现

群体工程理论认为，应该使用形式化描述方法，进行复杂系统工程与群体智能的融合，把握群体涌现性这一重要属性，期望实现群机器人系统的可靠控制^[17,59,60]。自组织是一种动态机制，由底层单元交互呈现出系统的全局性结构。交互的规则仅依赖于局部信息，而不依赖于全局模式。自组织并不是外部作用于系统的结果，而是系统自身涌现的性质。系统中没有中心控制模块，也不存在一部分控制另一部分的现象。譬如，作为群居生物的蚂蚁筑巢过程中，与环境的交互分为连续和离散两种。离散的交互指刺激因素类别不同而产生不同反应；连续交互指刺激量不同而产生不同的反应。基于离散交互的一个例子，机器人在三维空间运动，依据其周围砖块的排布决定是否放下背负的砖块，结果显示，可以产生类似于黄蜂巢穴的结构^[18,61]。群体中的个体行为会遵循已有的结构或信息指引，并且释放信息素，这种反馈能使得某种行为强化。尽管系统开始运行时个体的行为随机，但是大量个体遵循正反馈的结果生成了特定模式。

1.2.8 典型应用

群机器人研究有若干基准任务。基于模式形成的任务，包括聚合、自组织网格、分布式传感器部署、区域覆盖、环境地图绘制等；集中于环境实体的任务，包括目标搜索^[4]、归航、觅食等；涉及更为复杂的群体行为的任务，包括合作搬运、采掘等。这些任务可进行如下划分^[29]：

(1) 区域遍历类任务。群机器人是分布式系统，可用于干预空间状

态,环境检测如化学品泄漏即为一例。工作时,机器人朝泄漏源运动以便集中定位,然后自组装为补丁堵上泄漏点。

(2) 高危险性任务。因为个体的同构性要求,对于某个机器人而言,它在群体系统中是非必需的,这使得群机器人适合执行危机四伏的任务。譬如,清理采掘面上的巷道。不像单体机器人那样构造复杂、成本高昂,群机器人中的成员机器人可以在极端危险的境地以自杀式的方式通过。

(3) 群体规模可变的任务。群机器人系统有能力根据任务及时伸缩群体规模。例如,油船倾覆后,油液泄漏的范围会急剧扩大,这时,可部署群机器人在特定区域吸收溢出的油液,并可根据需要将更多机器人投入该区域以扩大群体规模。

(4) 有冗余性要求的任务。群机器人系统的鲁棒性源于群体隐含的冗余,这使群机器人通过优雅降级降低系统失控的可能。

针对以上需求,国外研究机构进行了若干具有指标意义的研究。

(1) Swarm-Bots 是比利时布鲁塞尔自由大学的 Dorigo 教授主持的欧盟项目,构建具有自组织、自组装能力的群机器人系统后用于执行合作搬运任务^[62],图 1-2 所示为合作搬运重物的 Swarm-Bots 群机器人。

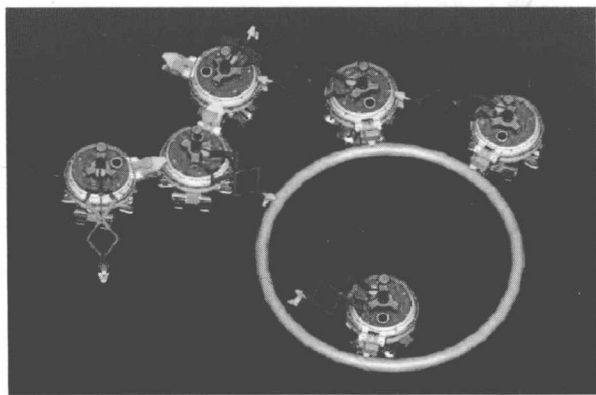


图 1-2 合作搬运重物的 Swarm-Bots 群机器人^①

(2) 群体智能检测系统是瑞士洛桑联邦理工学院的 Martinoli 教授主持开发的,可用来检测汽轮机喷气涡轮叶片^[63-67]。

图 1-3 所示为用于叶片检测的群机器人。

^① <http://www.swarm-bots.org/>.