

# 协作多机器人系统研究进展综述

吴军,徐昕,连传强,贺汉根

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

**摘要:**协作多机器人系统是近年来机器人研究的热点,具有良好的应用前景.针对开展相关研究的迫切需要,总结了协作多机器人系统研究的国内外发展现状,并分别对无意识协作的仿生多机器人系统和有意识协作的异构多机器人系统研究进行论述.重点从系统构建和优化控制的宏观角度出发,对有意识协作异构多机器人系统的体系结构、环境感知以及优化控制3个方面的研究进展分别展开论述;对典型的多机器人验证任务和软硬件实验平台进行了总结;最后对协作多机器人系统的研究方向进行了展望.

**关键词:**多机器人系统;协作协调;系统构建;优化控制;环境感知;实验平台

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2011)01-0013-15

## A survey of recent advances in cooperative multi-robot systems

WU Jun, XU Xin, LIAN Chuanqiang, HE Han'gen

(College of Mechtronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Cooperative multi-robot systems have been a particularly popular topic within robotics because of their potential applications. To meet the demand of promoting relevant study, the current research and development situation of cooperative multi-robot systems were systematically reviewed and summarized. Research concerning the unconscious bionic swarm-cooperation multi-robot and the heterogeneous intentional-cooperation multi-robot was discussed. In particular, to build and optimize heterogeneous intentional-cooperation multi-robot systems, the recent advances in system structure, environment perception, and control optimization were surveyed and analyzed. Moreover, the benchmark tasks and universal software/hardware platforms for a multi-robot were summarized. Finally, future developments in cooperative multi-robot system research were discussed.

**Keywords:** multi-robot system; cooperation and coordination; system modeling; optimization control; environmental perception; experimental platform

早在20世纪40年代中期, Walter、Wiener 和 Shannon 在研究世界上第一种人工生命——龟形机器人时,就发现这些简单的机器人在相互作用中能反映出“复杂的群体行为”<sup>[1]</sup>. 自从80年代末期建立世界上首个基于多智能体的多机器人系统 (cellular robotic system, CEBOT)<sup>[2]</sup>以来,多机器人系统在理论和应用研究上都取得了显著的进展<sup>[3]</sup>. 简而言之,多机器人系统是指通过组织多智能体结构,并协作完成某一共同任务的机器人群体<sup>[4]</sup>. 其中,协

作性是多机器人系统的重要特征和关键指标,并最早由 Noreils 定义为:多个机器人协同工作,完成单个机器人无法完成的任务,或改善工作过程,并获得更优的系统性能<sup>[5]</sup>. 通过适当的协作机制,多机器人系统可以获得系统级的非线性功能增量<sup>[6]</sup>,从而突破单机机器人系统在感知、决策及执行能力等方面受到的限制,从本质上提高系统性能,甚至完成单个机器人无法实现的任务.

此外,相对于单个机器人系统,多机器人系统拥有时间、空间、功能、信息和资源上的分布特性,从而在任务适用性、经济性、最优性、鲁棒性、可扩展性等方面表现出极大的优越性,因此在军事、工业生产、交通控制等领域具有良好的应用前景. 美国国防高

收稿日期:2010-06-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60774076,60703072,90820302).

通信作者:吴军. E-mail:aresnuds@yahoo.com.cn.

级研究计划局(defense advanced research projects agency, DARPA)、美国海军和能源部都对多机器人系统的研究进行了大力资助,美国宇航局和空军也将多机器人的编队控制技术确定为 21 世纪的关键技术. DARPA 涉及到多机器人作战平台的研究计划就包括 MARS-2020、TASK、TMR 和 SDR 等,如 MARS-2020 计划<sup>[7]</sup>,持续时间长(到 2020 年)、支持力度大,其目的是研究战场环境下各种智能武器平台通过通信进行任务制定、规划和协调合作,共同完成任务的组织框架和方法. 美军资助的多机器人研究项目就包括 UGV Demo/II/C<sup>[8]</sup>、CENTIBOTS<sup>[9]</sup>、Swarm Bot<sup>[10]</sup>、SuperBot<sup>[11]</sup>、HUNT(heterogeneous unmanned networked teams)<sup>[12]</sup>等. 欧盟也很早就开展了多机器人协同搬运的 MARTHA 项目研究<sup>[13]</sup>,有代表性的研究工作还包括:瑞士苏黎世大学开展的生物机器人与群体智能研究<sup>[14]</sup>,瑞士联邦工学院开展的多机器人任务分配和规划问题研究<sup>[15]</sup>,意大利 Antonelli 开展的零空间编队控制方法研究<sup>[16]</sup>,比利时布鲁塞尔大学的集群机器人系统研究<sup>[17]</sup>等. 而日本的多机器人研究工作主要集中在仿生多机器人系统上,如名古屋大学的 CEBOT 和日产公司利用鱼类仿生技术开发的多机器人系统“EPORO”<sup>[18]</sup>等. 国内的多机器人系统研究则起步较晚,但发展很快,中科院自动化所、上海交大、哈工大、中南大学、东北大学等科研院所都开展了各具特色的研究工作,并在国际多机器人足球赛上屡创佳绩的事实也证明我国在多机器人技术研究方面取得了巨大进步.

虽然多机器人协作可以提高系统性能,但多个机器人并存也导致了某些新的问题<sup>[19]</sup>,如增加了系统协调管理的难度;增加了系统整体状态的不确定性;增加了系统对通信的依赖性等. 为了克服不利因素,提高系统协作性能,必须对多机器人系统的关键技术开展深入研究. 本文将从系统控制与优化的角度出发,对近年来多机器人系统研究领域的主要进展和部分有代表性的研究成果进行介绍,为国内从事多机器人系统研究的科研人员提供参考.

## 1 多机器人系统分类

根据协作机制不同,多机器人协作包括 2 类<sup>[20]</sup>:无意识协作和有意识协作. 无意识协作多出现在简单同构的多机器人系统中,主要利用突现原理获得高层的协作行为<sup>[21]</sup>;而有意识的协作主要用于异构机器人协作技术的研究<sup>[22]</sup>,并更多地依赖于规划来提高协作效率(参见表 1).

表 1 多机器人系统的协作机制分类

Table 1 Taxonomy of cooperation mechanism in multi-robot systems

| 协作分类  | 特点  | 任务范围                          |
|-------|---|-------------------------------|
| 无意识协作 | 多为同构系统;个体功能简单,数量众多;通过本地交互,得到全局的突现行为;控制器设计简单;系统鲁棒性好;无全局目标,系统性能难于控制;不适用于复杂任务. | 适合于大空间、无时间要求的重复性操作任务,如清扫、采集等. |
| 有意识协作 | 多为异构系统;系统规模较小,个体智能水平较高;拥有全局目标,系统性能易于掌握,可以获得更优化的解;对通信要求较高;对协调控制机制依赖性较大.      | 适合于其他复杂的任务.                   |

无意识协作多机器人系统主要仿生社会性生物群落(蚁群、蜂群等)的运行机制,利用大量简单、无意识的自主个体,通过局部交互和自组织作用,使整个系统呈现协调、有序的状态,并最终达到较高的集群智能<sup>[23]</sup>. 比较典型的系统包括:瑞士联邦理工学院的 Alice<sup>[24]</sup>、日本名古屋大学的 CEBOT<sup>[2]</sup>、美国 MIT 的 Swarm Bot 集群机器人系统<sup>[10]</sup>、美国 Sandia 国家实验室的 MARV<sup>[25]</sup>、美国南加州大学的 Super-Bot<sup>[11]</sup>以及德国斯图加特大学的进化多机器人有机体<sup>[26]</sup>等. 基于仿生的集群机器人系统研究可进一步分为基于突现行为的集群机器人系统研究与可重配置机器人系统研究,二者的差别在于后者需要通过特定的连杆和关节模块实现组合操作,以形成特殊的构型,并完成指定的功能. 基于仿生原理的无意识协作多机器人系统适用于大空间范围内无时间要求的重复性工作,如清扫任务;同时也适用于危险或有害区域内的监测、探索和搜寻任务,如可用许多小型轻便的、可丢弃的、相对廉价的机器人来完成核辐射区域内的监测任务. 由于基于仿生的多机器人系统研究在国内开展较少,下面将重点对有意识协作的异构多机器人系统的研究进展展开论述.

2 有意识协作的异构多机器人系统

在实际应用中,多机器人系统的成员个体往往存在设计、结构、乃至智能上的差异,因此多为异构系统.异构多机器人系统通常数量有限(几个到几十个),但可以达到系统整体的最优配置<sup>[27]</sup>.对于有意识协作的异构多机器人系统,尽管已有多篇文献对协作多机器人系统的研究进行了综述<sup>[28-29]</sup>,但基本都是针对多机器人系统研究中的若干具体问题进行论述,如任务分配、运动规划、合作搬运等.本文将从系统优化控制的宏观角度出发,整体上把多机器人系统视作一个控制对象,对其构建与优化研究展开相关的总结.总的来说,一个优秀的多机器人系统必须有如下特点:合理的系统体系结构、正确的环境感知能力、优化的决策控制策略(具体如图 1 所示).

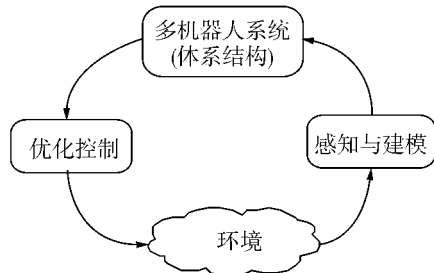


图 1 多机器人系统的控制原理

Fig.1 Control schematic diagram for multi-robot system

所以,在后续论述中,将围绕构建合理高效的多机器人系统这一研究主线,从协作多机器人系统的体系结构、环境感知与优化控制 3 个方面展开论述,并得到协作多机器人系统关键技术研究的树状结构图,如图 2 所示.

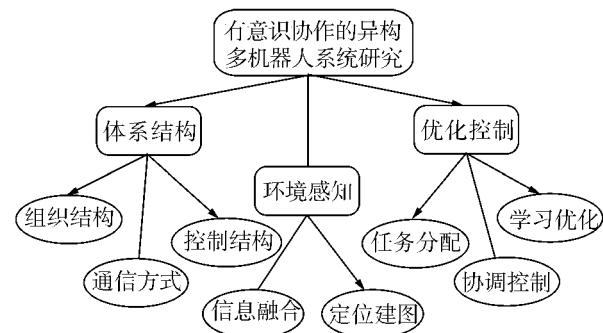


图 2 多机器人系统研究内容的树状结构

Fig.2 Tree-like schematic-diagram for heterogeneous multi-robot system research

2.1 系统体系结构

多机器人体系结构是指系统中各机器人之间的信息关系和控制关系,以及问题求解能力的分布模

式,它定义了整个系统内的各机器人之间的相互关系和功能分配,确定了系统和各机器人之间的信息流通关系及其逻辑上的拓扑结构,决定了任务分解和角色分配、规划及执行等操作的运行机制,提供了机器人活动和交互的框架<sup>[30]</sup>.选择合适的体系结构,是多机器人系统正常、高效运转的关键,也是构建多机器人系统的首要问题,如日本 Asama 等提出 ACTRESS 系统结构<sup>[31]</sup>,美国学者 Beni 等研究的 SWARM 系统结构<sup>[32]</sup>,Le Pape 提出了 GOFER 结构<sup>[4]</sup>,Parker 等提出了 ALLIANCE 结构<sup>[33-34]</sup>,Vidal 等提出了一种混合层次体系结构<sup>[35]</sup>,王醒策等针对多机器人编队提出了分层的体系结构<sup>[36]</sup>,陈卫东等采用递阶混合式结构进行多机器人编队和收集垃圾<sup>[37]</sup>,而崔益安则尝试建立一个通用与开放的、适应于非结构环境的自组织分层式结构 SCLA<sup>[38]</sup>.

虽然特定环境或任务会造成系统结构具有一定的特殊性,但可以从影响体系结构的几个主要系统维(如组织结构、通信方式、控制结构、团队组成和团队规模)入手,决定到底采用何种体系结构,如表 2.

表 2 系统结构中的主要系统维

Table 2 Main dimensions for system structure

| 系统组成 | 具体描述                                   |
|------|--|
| 组织结构 | 指系统内部成员的相互关系和拓扑结构,分为集中式、分布式和混合式结构 3 种. |
| 通信方式 | 通信方式决定了机器人之间的交互方式,分隐式通信和显式通信 2 类.      |
| 控制结构 | 专指多机器人系统的控制结构,是系统决策的方式,分为慎思型和反应型两大类.   |
| 团队组成 | 根据机器人功能异同分为同构/异构机器人团队.                 |
| 团队规模 | 主要由机器人的数量决定.                           |

由于系统规模对有意协作的异构多机器人系统性能影响较大,规模越大,对协同和通信能力要求越高,除了少数特例(如 CENTIBOTS<sup>[9]</sup>由 97 个 Amigo 机器人和 6 个 P2-AT 机器人组成)外,有意协作的异构多机器人系统一般团队规模较小,所以本文将重点讨论其他 3 个系统维:组织结构、通信方式和控制结构.

2.1.1 组织结构

多机器人组织结构可分为集中控制结构和分散控制结构,而分散控制结构又可进一步分为分布控制结构和混合控制结构<sup>[39]</sup>,具体见表 3.

表3 多机器人组织结构分类和对比

Table 3 Taxonomy and comparison for multi-robot system organization

| 类型    | 特点   | 应用实例   |
|-------|--|--|
| 集中式结构 | 适合强协调任务. 分主、从机器人, 主机器人负责系统协调, 具有完全的控制权. 该方式可减少协商通信的开销, 并获得全局最优解, 但实时性和动态性较差, 结构灵活性不足, 鲁棒性较差. | 文献[40], 此外, 大多数的微型足球机器人团队采用的集中式组织结构.   |
| 分布式结构 | 适合弱协调任务. 机器人之间无隶属关系, 通过交互或通信实现协调. 该方式可降低系统复杂性, 提高扩展性和鲁棒性. 对通信要求较高, 不保证目标的全局最优性.              | ROCI <sup>[41]</sup> 、层次化和对象可重构 <sup>[42]</sup> 、多模式交互 <sup>[43]</sup> 、Ad Hoc 网络 <sup>[44]</sup> 、MAC-ROBE 和 ROMAN <sup>[45]</sup> 等. |
| 混合式结构 | 本质上是一种层次结构, 上层的领导机器人动态生成, 且对下层的机器人只有部分控制能力. 该方式可实现集中和分布结构的互补, 提高系统灵活性和协调效率. 但复杂性高, 实现难度大.    | ALLIANCE <sup>[34]</sup> 和文献[5, 46]等.  |

### 2.1.2 通信方式

通信也是多机器人系统的一个重要研究问题, 系统的通信方式决定了机器人之间的相互作用方式<sup>[47]</sup>. 在多机器人系统中, 为了实现机器人的同步或协调, 信息交互是必不可少的. 而且大量的应用实践也证明, 合理的通信可以大大提高系统运行效率. 总的来说, 机器人之间的通信方式可以分为隐式通信和显式通信2类<sup>[48]</sup>.

1) 隐式通信. 隐式通信利用机器人的行为对产生环境的变化来影响其他机器人的行为, 如基于 Stigmergy 机制<sup>[49]</sup>的通信方式, 个体以环境为作用中介, 通过利用或者改变环境中的信息, 来激励自身或者其他个体的行为, 最终达到信息交流和自组织的目的. 隐式通信的特点在于局部交互和简单的信息表示模型, 且不会随着群体数量的增加而产生通信瓶颈问题, 整个通信方式非常简单、有效和可靠. 隐式通信的研究重点在于如何通过环境信息的改变和简单信号的感知进行局部信息交换<sup>[50]</sup>.

2) 显式通信. 显式通信通常需要专用硬件通信设备以及复杂的信息表示模型, 机器人之间可直接进行信息交换, 是一种开销大、不可靠的通信方法. 显式通信可以进一步分为全局通信和局部通信: 全局通信中, 所有机器人之间都具有全局范围内的符号通信能力, 系统通信效率随机器人的数量增加而急剧下降, 通信干扰和延迟将严重影响系统的可靠性, 一般仅适用于小规模的多机器人系统<sup>[51]</sup>; 而局部通信则由于通信距离和通信拓扑的限制, 仅发生在局部范围内, 但通过设计合理的通信机制, 可兼顾效率和可靠性<sup>[52-53]</sup>.

显式通信可利用现有网络技术, 如文献[54]对基于 802.11g 标准的无线局域网 WLAN 在 TCP 协议下的延时特性进行了测试和分析, 并指出了构建基于 WLAN 的多机器人系统时所应该考虑的关键因素. 为了保证通信的有效性和实时性, 可以通过设计多机器人系统专用的通信机制<sup>[55]</sup>和通信语言<sup>[56]</sup>实现; 还可以采用基于强化学习的自适应通信协议<sup>[57]</sup>, 提高系统对不同通信环境的适应性. 此外, 在提高多机器人系统通信的容错性和可靠性等方面可以借鉴文献[58-60].

### 2.1.3 控制结构

这里的控制结构不是单个机器人的控制结构, 而是指整个多机器人系统的控制结构<sup>[61]</sup>. 控制结构可分为反应式和慎思式2种: 当一个团队在应对环境改变时可以根据策略重新组织整个团队的行为, 则为慎思型的控制结构, 具体如文献[62-63]; 而每个机器人在应对环境变化时, 仅仅对自己所采取的策略进行重组, 以更好地完成自身的任务, 则为反应式的控制结构, 具体如文献[64-65]. 所以, 二者的主要差别在于对新状态所采取的不同应对策略, 即在慎思型系统中, 会利用长期规划并充分利用所有可用资源来实现1个全局目标; 而在1个反应式系统中, 每个机器人仅仅考虑当前机器人面临的态势, 并给出独自的规划操作.

## 2.2 环境感知与建模

多机器人系统要实现优化决策, 并获得良好的协调控制性能, 必须依赖于准确可靠的环境感知能力. 随着各种先进传感设备和配套应用软件的开发, 机器人已经大大拓展了自己的感知空间和感知能力, 但如何充分利用多个机器人的传感资源, 提高协同感知精度和能力, 具有很高的研究价值.

### 2.2.1 信息融合

通过协作感知来提高环境感知能力一直是多机

机器人系统研究的重点. 各个机器人可以装载不同种类的传感设备, 可以获取丰富的传感信息, 通过设计高效的信息融合算法, 可以将局部不完整、不确定的多源信息处理成对相对完整的环境感知信息, 从而提高系统的信息获取能力和感知效率. 信息融合包括了单个机器人上不同传感器的信息融合和机器人与机器人间的信息融合. 例如, 当异构团队共同完成环境探测时, 可将视觉信息与激光雷达或声呐信息融合生成单个机器人的局部地图, 然后将多个机器人的局部地图信息融合成一个全局地图. 因此, 多机器人间的信息融合涉及到信息表示、匹配、相关及如何处理不确定性和提高处理速度等难点问题. 文献[66]将多智能体技术与多传感器信息融合技术相结合, 构建基于多智能体的信息融合框架, 并应用到机载航空信息融合系统中. 文献[67]提出了一种基于信息融合的多智能体协作方法, 并将该方法应用在机器人救援仿真系统. 文献[68]对各种适用于多机器人系统的信息融合拓扑结构、融合方法进行了系统的综述, 并分别指出了定性和定量信息融合算法的重要性.

目前, 大多数多机器人团队协作时只能实现同种传感器的信息融合, 而有效实现异种传感器信息融合的环境识别与目标定位实例还很少. 事实上, 各种传感器各具优点, 可以互为补充, 文献[69]融合视觉传感器信息与激光雷达数据进行多机器人的协作建模, 是异种传感信息融合的有益尝试.

### 2.2.2 协同定位与地图创建

从本质上讲, 协同定位和地图创建应该属于多源信息融合的范畴, 但由于其重要性, 得到了较多的研究. 通过多机器人的协同定位操作, 多机器人能够在未知环境中互为路标, 得到比单个机器人定位更精确的位置<sup>[70]</sup>. 多机器人协同定位操作需要应用非线性算法对各个机器人的运动模型和观测模型进行建模, 一种建模方法是扩展卡尔曼滤波算法 (extended Kalman filter, EKF)<sup>[70]</sup>, 它对非线性系统进行局部线性化, 从而间接利用卡尔曼算法进行滤波与估算; 另一种为序列蒙特卡罗算法, 即粒子滤波器 (particle filter, PF)<sup>[71]</sup>. 实践表明, 基于 EKF 和 PF 的多机器人协作定位精度明显高于单个机器人的定位结果, 但在使用时需满足一定条件, 否则会导致过分乐观的位置估计<sup>[72]</sup>; 所以文献[73]提出采用一种改进的粒子滤波器, 即高斯-施密特粒子滤波器 (the Gauss-Hermite particle filter, GHPF), 并在定位精度和鲁棒性方面取得良好的均衡. 其他协作定位和协

同建图方法可参考文献[74-77]等.

### 2.3 优化控制

多机器人系统可以通过相互分工、相互合作来完成复杂任务. 人类社会中合理的生产关系可以促进生产力的发展, 同样, 合理的运行控制机制可以充分发挥多机器人系统的优势, 提高任务完成效率. 下面将从两方面对多机器人系统的优化控制机制进行阐述: 首先阐述如何利用合理的协同运行机制, 从协作和协调2个方面优化系统性能; 其次将阐述如何利用学习优化方法进一步优化系统控制性能.

多机器人系统的协同问题包括多机器人协作和与协调2个方面, 二者互相区别而又紧密联系<sup>[23]</sup>. 当给定多机器人系统的工作任务时, 如何组织多个机器人进行有效地合作, 将总体任务以最优的方案分配给各个成员机器人, 共同完成任务, 是多机器人协作的主要研究问题. 而在合作关系确定后, 如何保证多个机器人工作的协调一致性, 即为多机器人的协调问题, 对于由紧耦合子任务组成的复杂任务而言, 协调问题尤其突出.

图3描述了协同运行机制和学习优化方法之间的关系. 多机器人的协作优化机制作用在高层的系统层面; 而协调优化机制主要处理当前机器人和其他机器人的同步和交互问题; 底层的优化控制层主要解决单个机器人的控制优化, 这不是本文研究的重点. 从图3可以得知, 学习优化方法可以对上述3个层次的控制策略分别进行优化.

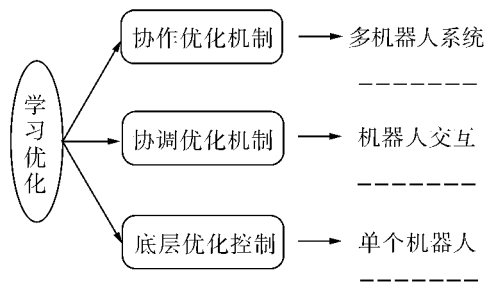


图3 多机器人优化机制的层次关系

Fig.3 Hierarchy of multi-robot optimization mechanism

#### 2.3.1 协作机制

多机器人的协作是从系统整体规划上减小冲突概率, 减少资源浪费, 保证系统的最优性. 协作机制可以存在于机器人的控制结构、通信机制和相互作用中, 并主要表现为任务分配问题. 任务分配决定各个机器人在何时执行何种任务, 体现了系统高层组织形式与运行机制, 直接决定了系统中各机器人能否最大限度地发挥自身的能力, 并提高整个系统的运行效率.

多机器人的任务分配问题在不同情况下可分别看作最优分配问题(optimal allocation problem, OAP)、整数线性规划问题、调度问题、网络流问题和组合优化问题<sup>[78]</sup>,其解决方法主要有基于行为的分配方法、市场机制方法、群体智能方法、基于线性规划的方法、基于情感招募的方法和基于空闲链的方法等<sup>[79]</sup>,具体见表4.

表4 任务分配方法的对比

Table 4 Comparison for task allocation methods

| 分类     | 特点  | 典型方法  |
|--------|---|---|
| 行为方法   | 直接找到具有最大效用的机器人-任务对,将任务分配给指定机器人,分配以后不再考虑.                      | BLE 方法 <sup>[80]</sup> 、Parker 的 ALLIANCE 方法 <sup>[34]</sup> 、L-ALLIANCE 方法 <sup>[81]</sup> 、ASyMTRe 方法 <sup>[82]</sup> 和 ASyMTRe-D 方法 <sup>[83]</sup> .            |
| 市场机制方法 | 基于协商谈判的分布式分配方法.适用于任务和状态可知的中小规模异构系统,可实现全局最优任务分配,资源消耗多,对通信依赖性高. | Smith 的合同网 <sup>[84]</sup> 、Caloud 的集中式拍卖算法 <sup>[4]</sup> 、Behauh 的组合拍卖方法 <sup>[85]</sup> 、Zlot 的基于任务树拍卖方法 <sup>[86]</sup> 、Lovekesh 的 RACHNA 方法 <sup>[87]</sup> . |
| 群体智能方法 | 无集中控制器,不依赖于全局模型,鲁棒性好,间接通信开销小,可扩充性好.                           | 阈值法 <sup>[88]</sup> 、蚁群算法 <sup>[89]</sup> 以及二者的结合方法 <sup>[90]</sup> .   |
| 线性规划方法 | 运算量随系统规模呈指数级增长,需要全局信息和集中管理,扩展性差,效率低.                          | 基于0-1型整数线性规划方法 <sup>[91]</sup> 、基于混合整数线性规划方法 <sup>[92-93]</sup> .   |
| 情感招募法  | 引入情感的分布式分配方法,无需彼此建模.  | Gage 等提出的情感招募方法 <sup>[94]</sup> .   |
| 空闲链方法  | 考虑了机器人的相互作用,能够显式地处理群动态的影响.                                    | Dahl 提出的 TAVC <sup>[95]</sup> .   |

总的说来,当前基于市场机制的任务分配策略研究较多<sup>[96]</sup>,而有待深入研究的问题包括动态、未知环境下的任务动态分配和再分配问题,任务预测与任务分解问题以及异构大规模系统和复杂任务的任务分配问题等.

目前的任务分配主要通过预先手动分解为子任务,再进行任务分配.自动任务分解和求解问题是多机器人系统研究的难题之一,但文献[97]通过将任

务描述为求解所需的能力向量,结合机器人的能力状态,可实现任务的灵活求解;而文献[82-83]提出行为模式的概念,通过传感信息共享,可以实现各种新任务的自动求解,并获得很好的灵活性、鲁棒性和代码可重用性.

### 2.3.2 协调机制

简而言之,多机器人协调问题即是各机器人行动的同步化操作问题<sup>[98]</sup>.多机器人系统在协作完成复杂任务时,应尽量减少相互之间的干扰、冲突,保证在任务的执行上具有目的一致性,否则系统会由于额外增加的复杂性,导致效率下降,最终难以得到优化结果.

早期的协调控制研究主要是载荷分配、运动分解、避碰轨迹规划、操作柔性体或大型物体等,近年来研究逐渐转向目标搜索、多机器人停驻等问题.如文献[37]在一个递阶混合式协调结构中采用离散事件动态系统理论中的有限状态机(finite state automaton, FSA)方法实现行为的协调;而文献[99]也采用 FSA 实现任务执行的协调操作.动态环境的多机器人协调路径规划已有基于“空间-时间”的规划方法和人工势场法2种基本解决方法,但当问题复杂时,都无法保证能得到协调无冲突的解. Sapharishi 等进一步提出基于统计运动状态估计的动态权限分配策略进行协调路径规划<sup>[100]</sup>.此外,也有不少人提出了采用基于遗传算法的协调求解方法,但收敛速度慢、计算复杂<sup>[39]</sup>.

在同一环境中运行的多个机器人经常会发生资源共享冲突,对于可预见的冲突,可通过协作机制中的规划操作加以避免.但是仅依靠规划的方法避免冲突,系统的适应性非常有限,因为系统动态运行的状况常常无法事先准确预测,故文献[101-102]考虑采用强化学习算法获取多机器人系统的冲突消解策略.此外,死锁也是多机器人系统经常遇到的问题,其源于机器人顽固地执行一件自己“力所不及”的任务,从而丧失了完成其他任务的机会.对于多机器人任务协作时的死锁问题,文献[89]中提出了自适应衰减因子的方法,而文献[103]中则使用人工协调场来解决,但动态环境中的死锁检测与消解,仍是极具挑战性的难题<sup>[30]</sup>.

### 2.3.3 学习优化

实际的多机器人系统所处工作环境瞬息万变,具备高度的复杂性和难于建模的特性,不可能在研制期间就完全预知未来的环境变化情况并给出对应策略,因此需要研究具有自适应能力的学习方法来

提高系统性能<sup>[104]</sup>. 通过学习,多机器人系统可以适应外界环境变化,优化合作策略,增加系统弹性和自主性. 近年来,多机器人平台的机器学习研究已取得了明显进展,尤其是基于多智能体的增强学习理论和算法研究<sup>[105-106]</sup>,为复杂和未知环境中的多机器人协作信息提取、环境理解、任务规划与行为决策等提供了有效的解决途径. 当前多机器人增强学习主要基于 Markov 对策模型进行自主决策框架理论与方法的研究<sup>[107-108]</sup>. 尤其是 Hu 在 1998 年证明了 Markov 对策模型下应用在线 Q-学习的多智能体协作能收敛到 Nash 平衡点,为多智能体系统中使用增强学习提供了理论基础<sup>[109]</sup>.

多机器人增强学习研究的典型任务包括共同搬运、共同探索、觅食和多目标跟踪等. Mataric<sup>[104]</sup>将增强学习方法同一个基于行为结构的多机器人觅食任务结合起来. Inoue 提出将增强学习方法应用在 2 个类人机器人协同搬运的任务中<sup>[110]</sup>,以保证机器人的紧密合作. Ito 在文献[111]中将遗传算法和增强学习算法结合起来,用来在一个集群机器人系统中学习协作搬运的动作策略. 文献[112]通过将顺序 Q 学习方法和遗传算法结合起来,既可以有效解决多机器人协作搬运中的资源和行为冲突问题,又可以解决本地极小问题. 在文献[113]中,利用增强学习使得 2 个工业机器人能够学习协作抓取策略. 文献[114]证明一个合作任务可以映射为单智能体强化学习问题,并可以通过感知和强化信号提高学习性能,最后在多目标观测任务中进行了验证. 文献[115]的提出了一种结合行为控制和隐式协作的分布式增强学习方法,并在多目标跟踪问题中进行了验证. 国内开展的多机器人增强学习研究还比较少,主要停留在仿真研究层面上<sup>[23,36,98,116-117]</sup>,采用实物验证的多机器人增强学习算法现在还很少.

将增强学习应用于多机器人领域,能够提升系统性能<sup>[118]</sup>,但是,增强学习的应用面临诸多困难. 首先,多个机器人共同学习,将导致学习过程的非马尔可夫性<sup>[119]</sup>,此时再简单地移植应用单智能体增强学习方法,将得到次优或周期性的控制策略. 但有如下 2 种应对方法:一种是估计其他机器人的影响或者转换为部分可观测马氏决策过程(partially observable Markov decision process, POMDP)进行学习;另外还可以对分布式的学习过程进行协调,以降低各个学习过程之间的相互干扰<sup>[120-121]</sup>,但协调规则需要专门设计,且要求清晰的通信操作,从而使其适用度大打折扣. 此外,在多机器人学习中,连续状

态问题和状态组合爆炸导致的维数灾难问题更加严重,如何合理利用逼近和泛化技术,并引入学习加速技术,提高算法的适用性也是多机器人增强学习研究的重点.

此外,近年来进化机器人技术也受到了极大的关注<sup>[122]</sup>,但是进化算法在机器人的应用中难以实现交叉复制等操作<sup>[123]</sup>,而最近出现的实体进化方法则为进化机器人技术带来了新的曙光<sup>[124]</sup>.

### 3 多机器人系统实验平台

由于多机器人系统面向的任务各异,使得各种多机器人系统的硬件平台差别较大. 下面根据系统中机器人平台的机械、物理和功能等方面的特点,将多机器人系统的硬件平台分为如下 4 类(见表 5).

表 5 典型的多机器人硬件实验平台  
Table 5 Typical experimental platforms for multi-robot systems

| 类别             | 特点  | 典型平台  |
|----------------|---|---|
| 可重<br>构平<br>台  | 简单、同构、模块化,具有特殊机械和电气连接装置,可灵活组合,多由研究机构自行设计和制作.      | CEBOT <sup>[2]</sup> 、S-bot 机器人 <sup>[17]</sup> 、SuperBot <sup>[11]</sup> 、进化多机器人有机体 <sup>[26]</sup> 等.   |
| 微型<br>移动<br>平台 | 结构和功能简单、同构、形体较小,移动能力有限,多需结构化实验场地.                 | Kheperal II 型微小机器人 <sup>[125]</sup> 、Swarm Bot 机器人 <sup>[10]</sup> 、MARV <sup>[25]</sup> 等.   |
| 中型<br>移动<br>平台 | 最常见,具有较强的处理能力和丰富的接口资源,扩展性好,移动能力较强,具备独立完成较复杂任务的能力. | 先锋系列机器人 PX-AT、PX-DX、Amigobot <sup>TM</sup> 及 PowerBot <sup>TM</sup> <sup>[126]</sup> 、iRobot <sup>[127]</sup> , Segway RMP <sup>[128]</sup> , LAGR 机器人 <sup>[129]</sup> 和 Labmate 机器人 <sup>[130]</sup> 等. |
| 大型<br>移动<br>平台 | 移动能力强,甚至具备越野能力,其装载的各种资源也很丰富,体型较大.                 | UGV Demo/II/C 中使用的 HMMWV <sup>[8]</sup> 、MobileRobots 公司的 Seekurs 机器人 <sup>[126]</sup> .  |

国内的多机器人系统研究平台多基于 MobileRobots 公司的先锋系列机器人进行构建,但也有部分研究机构开发了自己的多机器人平台,如上海交通大学的 Frontier-I<sup>TM</sup>、Frontier-II<sup>TM</sup>机器人、国防科技大学开发的 NuBot 机器人<sup>[131]</sup>等.

在多机器人系统的协同控制研究中,仿真环境的建立和算法测试对于提高开发效率具有重要的作用.当前国内外已经建立了若干多机器人系统的仿真环境,具备较好的通用性和灵活性.例如,有的仿真系统支持算法软件的物理系统移植和实物实验,如 MSRS<sup>[132]</sup>、MissionLab7.0<sup>[133]</sup>、Player/Stage<sup>[134]</sup>;有的则是纯软件仿真环境,如 SoccerServer<sup>[135]</sup>、Team-Bots<sup>[136]</sup>和 MultiSim<sup>[137]</sup>等,均不支持实物实验.

## 4 多机器人系统的应用任务

为了评估协同技术,需要在合适的应用任务上进行验证,下面将对常见的典型应用任务进行描述.

1) 聚集、觅食和编队.在聚集任务中,机器人的目标是像羊群一样聚集起来.聚集行为可以增加动物找到食物的机会,提高生存机率等,所以在多机器人系统中实现该行为非常必要<sup>[138]</sup>.觅食任务可以看作一种带约束的聚集任务,需要各个成员捡拾散布在环境中的目标物体并避免冲突<sup>[65,139]</sup>,主要模拟废物清理、排雷等任务<sup>[140]</sup>.编队任务也可以看作是聚集任务的一个特例,只是最终聚集的形式需要保持预定的几何配置形式,并要求在行进中保持多机器人系统的特定编队队形<sup>[141-143]</sup>.

2) 探索和覆盖.在探索任务中,机器人必须遍历环境以搜集尽可能多的环境信息,如常见的 SLAM<sup>[144-145]</sup>,就要求机器人在环境中移动时,同时实现定位和建图工作.探索任务的一个具体实例是 RoboCup 的机器人团队营救任务<sup>[146]</sup>,即在灾难后的废墟中寻找受害者.覆盖任务要求机器人遍历环境中的所有自由空间<sup>[147-148]</sup>,其应用包括清雪、除草、汽车车身喷漆等.

3) 多目标观测.多目标观测(cooperative multi-robot observation of multiple moving targets, CMOM-MT)是较新的多机器人系统测试问题,其要求机器人团队检测和跟踪一组移动的目标<sup>[149-150]</sup>,而每一个目标至少受到某一个机器人的监视,并最终通过优化控制策略来最大化正常监视的时间.多机器人的多目标观测和安保、监视和识别问题等都有密切联系<sup>[151]</sup>.

4) 推箱子和物体搬运任务.推箱子的任务要求机器人合作推箱子来达到期望的配置<sup>[152]</sup>,基本上所有的推箱子任务都是固定在一个平面上进行.但物体搬运任务则要完成抬起和运送物体2个子任务,且多假定单个机器人无法独立抬起物体,从而大大增加了问题的复杂度<sup>[153-154]</sup>,如工业环境中大型

物体的搬运任务<sup>[46]</sup>等.

5) 机器人足球.机器人足球是研究多机器人协作任务的常见平台<sup>[155]</sup>,不确定的动态环境,加上对抗性的任务场景,使得机器人足球比赛极具挑战性,如何通过协同操作提高系统能力是其研究重点<sup>[156-157]</sup>.

6) 多机器人的动态追捕.未知环境下的多机器人动态追捕问题也是多机器人合作与协调的典型问题,这缘于该问题牵涉到多机器人合作与协调的多个方面,如环境探索、信息共享与融合、自适应与学习、动作决策和冲突消解等问题,该问题的典型应用和分析有文献<sup>[158-161]</sup>等.

## 5 存在的问题及发展趋势

总的说来,近30年以来,多机器人系统研究已经取得长足进展,但是还面临诸多的技术挑战.

1) 建立更为高效和紧凑的多机器人系统结构,开发更为合理的组织和协调策略,仍然是需要进一步研究的基础性问题;提高系统的适应性和鲁棒性,并使多机器人系统适合于大规模运行的情况,也是需要深入研究的问题.

2) 利用多机器人系统和人的交互,可以充分结合人的高层决策智能和多机器人系统的底层协同能力,提高系统的性能.但是,如何设计合理的人机交互接口,加强人与多机器人系统的理解是将来的一个研究方向.

3) 如何在软、硬件异构的机器人之间实现相互通信和相互协调,真正建立具备跨语言、跨平台的多机器人分布式系统.在现有 CORBA 基础上,进一步研究面向 Agent 设计的互操作技术,是将来研究的重要方向.

4) 基于突现行为的集群机器人系统虽然控制简单,配置灵活,但是如何合理设计本地局部交互规则和控制规律,以可控的方式生成期望的高层突现行为,是非常值得研究的问题.

5) 加强实物形式的多机器人系统研究.在积极开展仿真系统研究的基础上,重视利用实物系统验证提出的算法和理论是将来发展的必然方向.

总之,多机器人系统代表了机器人发展的明天,研究价值重大,前景光明;但极富挑战性,要求广大研究人员在理论上、技术实现上进行更为深入的研究.

## 参考文献:

[1] DORF R C, NOF S Y. Concise international encyclopedia

- of robotics: applications and automation[M]. New York: Wiley-Interscience, 1990.
- [2] FUKUDA T, NAKAGAWA S. A dynamically reconfigurable robotic system: concept of a system and optimal configurations [C]//Proceedings of IECON. Cambridge, USA, 1987: 588-595.
  - [3] ARAI T, PAGELLO E, PARKER L E. Guest editorial: advances in multi-robot systems [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(5): 655-661.
  - [4] CALOUD P C. Indoor automation with many mobile robots [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Ibaraki, Japan, 1990, 1: 67-72.
  - [5] NOREILS F R. Toward a robot architecture integrating co-operation between mobile robots: application to indoor environment [J]. International Journal of Robotics Research, 1993, 12(1): 79-98.
  - [6] TUCI E, GROß R, TRIANNI V, et al. Cooperation through self-assembly in multi-robot systems [J]. ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, 2006, 1(2): 115-150.
  - [7] MARS2020 [EB/OL]. [2010-06-11]. <http://www.static.cc.gatech.edu/ai/robot-lab/mars2020/>.
  - [8] SPOFFORD J R, RIMEY R D, MUNKEBY S H. Overview of the UGV/Demo II Program [EB/OL]. [2010-06-11]. [http://ray.rimey.org/publications/1997\\_RSTA\\_book\\_1\\_1\\_Program.pdf](http://ray.rimey.org/publications/1997_RSTA_book_1_1_Program.pdf).
  - [9] KONOLIGE K, ORTIZ C, VINCENT R, et al. Centibots: large scale robot teams [R]. Menlo Park, USA: SRI International, Stanford University, 2002.
  - [10] MCLURKIN J. Analysis and implementation of distributed algorithms for multi-robot systems [D]. Cambridge, USA: Department of Electrical Engineering and Computer Science, MIT, 2008.
  - [11] SHEN W M, KRIVOKON M, CHIU H, et al. Multimode locomotion via SuperBot reconfigurable robots [J]. Autonomous Robots, 2006, 20(2): 165-177.
  - [12] ULAMA P, KIRA Z, ARKIN R C, et al. Mission specification and control for unmanned aerial and ground vehicles for indoor target discovery and tracking [C]//Proceedings of SPIE 2010. Orlando, USA, 2010, 7694: 39.
  - [13] ALAMI R, FLEURY S, HERRB M, et al. Multi-robot co-operation in the MARTHA project [J]. Robotics and Automation Magazine, 1998, 5(1): 36-47.
  - [14] PFEIFER R, SCHEIER C. Embodied cognitive science: a novel approach to the study of intelligence in natural and artificial systems [M]//GOMI T. Evolutionary robotics, Vol. II: from intelligent robots to artificial life, ER'98. Ontario, Canada: Applied AI Books, 1998: 1-35.
  - [15] FLOREANO D, GODJEVAC J, MARTINOLI A, et al. Design, control and application of autonomous mobile robots [EB/OL]. [2010-06-11]. <http://infoscience.epfl.ch/record/63893/files/aiaa.pdf>.
  - [16] ANTONELLI G, ARRICHIELLO F, CHIAVERINI S. The null-space-based behavioral control for autonomous robotic systems [J]. Intelligent Service Robotics, 2008, 1: 27-39.
  - [17] MONDADA F, PETTINARO G C, GUIGNARD A, et al. SWARM-BOT: a new distributed robotic concept [J]. Autonomous Robots, Special Issue on Swarm Robotics, 2004, 17(2/3): 193-221.
  - [18] NISSAN. Nissan EPORO robot car "Goes to School" on collision-free driving by mimicking fish behavior [EB/OL]. [2010-06-11]. [http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2009/\\_STORY/091001-01-e.html](http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2009/_STORY/091001-01-e.html).
  - [19] PARKER L E. Distributed intelligence: overview of the field and its application in multi-robot systems [J]. Journal of Physical Agents, 2008, 2(1): 5-14.
  - [20] 董炀斌. 多机器人系统的协作研究 [D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2006.  
DONG Yangbin. A study on multi-robot cooperation [D]. Hangzhou: College of Electrical Engineering, Zhejiang University, 2006.
  - [21] MARTINOLI A. Swarm intelligence in autonomous collective robotics: from tools to the analysis and synthesis of distributed collective strategies [D]. Lausanne, Switzerland: EPFL, 1999.
  - [22] PARKER L E, KANNAN B, TANG F. Tightly-coupled navigation assistance in heterogeneous multi-robot teams [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Sendai, Japan, 2004: 1016-1022.
  - [23] 杨东勇. 多机器人协作的学习与进化方法 [D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2004.  
YANG Dongyong. Multi-robot cooperation based-on learning and evolution [D]. Hangzhou: College of Electrical Engineering, University of Zhejiang, 2004.
  - [24] CAPRARI G, SIEGWART R. Design and control of the mobile micro robot alice [C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Edutainment. Brisbane, Australia, 2003: 23-32.
  - [25] What may be world's smallest mini-robot being developed at Sandia [EB/OL]. [2010-06-11]. <http://www.news-wisec.com/articles/worlds-smallest-mini-robot-being-developed-at-sandia>.
  - [26] KORNIENKO S, KORNIENKO O, NAGARATHINAM A, et al. From real robot swarm to evolutionary multi-robot organism [C]//Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation. Singapore, 2007: 1483-1490.
  - [27] 胡旭东. 基于网络的异构工业机器人集成技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学机械与能源学院, 2004.  
HU Xudong. Study of the web-based integration of hetero-

- geneous robotic manipulators [D]. Hangzhou: College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University, 2004.
- [28] 原魁, 李园, 房立新. 多移动机器人系统研究发展近况[J]. 自动化学报, 2007, 33(8): 785-795.
- YUAN Kui, LI Yuan, FANG Lixin. Multiple mobile robot systems: a survey of recent work [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(8): 785-795.
- [29] 石志国, 王志良, 刘冀伟. 异构多机器人协作系统研究进展[J]. 智能系统学报, 2009, 4(5): 377-391.
- SHI Zhiguo, WANG Zhiliang, LIU Jiwei. Developments in heterogeneous multi-robot cooperation systems [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2009, 4(5): 377-391.
- [30] 陈卫东. 微型移动机器人集群系统研究进展[J]. 上海电机学院学报, 2007, 10(2): 81-85.
- CHEN Weidong. The state of the art in swarm systems of micro mobile robots [J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2007, 10(2): 81-85.
- [31] ASAMA H, MATSUMOTO A, LSHIDA Y. Design of an autonomous and distributed robot system: ACTRESS [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tsukuba, Japan, 1989: 283-290.
- [32] BENI G, WANG J. Swarm intelligence [C]//Proceedings of the 7th Annual Meeting of the Robotics Society of Japan. Tokyo, Japan: RSJ Press, 1989: 425-428.
- [33] PARKER L E. ALLIANCE: an architecture for fault tolerant, cooperative control of heterogeneous mobile robots [C]//Proceedings of the 1994 International Conference on Intelligent Robots and Systems. Munich, Germany, 1994: 776-783.
- [34] PARKER L E. ALLIANCE: architecture for fault tolerant multi-robot cooperation [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(2): 220-240.
- [35] VIDAL R, SHAKERNIA O, KIM H J, et al. Multi-agent probabilistic pursuit-evasion games with unmanned ground and aerial vehicles [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(5): 662-669.
- [36] 王醒策, 张汝波, 顾国昌. 多机器人动态编队的强化学习算法研究[J]. 计算机研究与发展, 2003, 40(10): 1444-1450.
- WANG Xingce, ZHANG Rubo, GU Guochang. Research on dynamic team formation of multi-robots reinforcement learning [J]. Journal of Computer Research and Development, 2003, 40(10): 1444-1450.
- [37] 陈卫东, 席裕庚, 顾冬雷, 等. 一个面向复杂任务的多机器人分布式协调系统[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 505-510.
- CHEN Weidong, XU Yugen, GU Donglei, et al. Complex task oriented multi-robot distributed coordination system [J]. Control Theory & Applications, 2002, 19(4): 505-510.
- [38] 崔益安, 蔡自兴, 李潇晨. 自组分层式多机器人体系结构[J]. 小型微型计算机系统, 2008, 29(7): 1263-1267.
- CUI Yian, CAI Zixing, LI Xiaochen. Self-configurable and layered architecture of multi-robot [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2008, 29(7): 1263-1267.
- [39] 蔡自兴, 陈白帆, 王璐, 等. 异质多移动机器人协同技术研究的进展[J]. 智能系统学报, 2007, 2(3): 1-7.
- CAI Zixing, CHEN Baifan, WANG Lu, et al. The progress of cooperative technology for heterogeneous multiple mobile robots [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2007, 2(3): 1-7.
- [40] SUH I H, YEO H K, KIM J H, et al. Design of a supervisory control system for multiple robotics systems [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Osaka, Japan, 1996: 332-339.
- [41] CHAIMOWICZ L, COWLEY A, SABELLA V E A. ROCI: a distributed framework for multi-robot perception and control [C]//Proceedings of the 2003 IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, USA, 2003, 1: 266-271.
- [42] ALUR R, DAE A. A framework and architecture for multi-robot coordination [C]//International Symposium on Experimental Robotics. London, UK: Springer-Verlag, 2001: 303-312.
- [43] 陈卫东, 顾冬雷, 席裕庚. 基于多模式交互的多移动机器人分布式合作系统[J]. 自动化学报, 2004, 30(5): 671-678.
- CHEN Weidong, GU Donglei, XU Yugen. Distributed cooperation for multiple mobile robots based on multi-modal interactions [J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(5): 671-678.
- [44] DAS A, SPLETZER J, KUMAR V, et al. Ad Hoc networks for localization and control [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Las Vegas, USA, 2002, 3: 2978-2983.
- [45] AZARM K, SCHMIDT G. A decentralized approach for the conflict free motion of multiple mobile robots [J]. Advanced Robotics, 1997, 11(4): 323-340.
- [46] SIMMONS R, SINGH S, HERSHBERGER D, et al. First results in the coordination of heterogeneous robots for large-scale assembly [C]//Proceedings of the International Symposium on Experimental Robotics (ISER). Honolulu, USA, 2000: 323-332.
- [47] CAO Y, FUKUNAGA A, KAHNG A. Cooperative mobile robotics: antecedents and directions [J]. Autonomous Robots, 1997, 4(1): 7-27.
- [48] FARINELLI A, IOCCHI L, NARDI D. Multi-robot systems: a classification focused on coordination [J]. IEEE

- Transactions on System, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, 2004, 4(5): 2015-2028.
- [49] HOLLAND O, MELHUISH C. Stigmergy, self-organization, and sorting in collective robotics[J]. Artificial Life, 1999, 5(2): 173-202.
- [50] 蓝艇,刘士荣. 受生物群体智能启发的多机器人系统研究[J]. 机器人, 2007, 29(3): 298-304.  
LAN Ting, LIU Shirong. Research on multi-robot system inspired by biological swarm intelligence [J]. Robot, 2007, 29(3): 298-304.
- [51] NOREILS F R. An architecture for cooperative and autonomous mobile robots[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nice, France, 1992: 2703-2709.
- [52] ARAI T, YOSHIDA E, OTA J. Information diffusion by local communication of multiple mobile robots[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Le Touquet, France, 1993, 4: 535-540.
- [53] WANG Jing. On sign-board based inter-robot communication in distributed robotic systems[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Diego, USA, 1995: 1045-1050.
- [54] 李园,原魁,郑睿. 基于无线局域网的多机器人通信系统性能分析[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(8): 2219-2223.  
LI Yuan, YUAN Kui, ZHENG Rui. Performance analysis of multi-robot communication system based on wireless local area networks [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(8): 2219-2223.
- [55] YOSHIDA E, ARAI T, OTA J, et al. Effect of grouping in local communication system of multiple mobile robots [C]//Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems. Munich, Germany, 1994: 808-815.
- [56] JUNG D. Grounded symbolic communication between heterogeneous cooperating robots [J]. Autonomous Robots, 2000, 8(3): 269-292.
- [57] YANCO H, STEIN L A. An adaptive communication protocol for cooperating mobile robots[C]//Proceedings of the Second International Conference on From Animals to Animats 2: Simulation of Adaptive Behavior. Cambridge, USA: MIT Press, 1993: 478-485.
- [58] WINFIELD A F T. Distributed sensing and data collection via broken ad hoc wireless connected networks of mobile robots[C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems. Knoxville, USA, 2000: 273-282.
- [59] STARKE P M. Communication fault tolerance in distributed robotic systems [C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems. Knoxville, USA, 2000: 99-108.
- [60] RYBSKI P E, STOETER S A, GINI M, et al. Performance of a distributed robotic system using shared communications channels[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation; Special Issue on Multi-Robot Systems, 2002, 18(5): 713-727.
- [61] IOCCHI L, NARDI D, SALERNO M. Reactivity and deliberation: a survey on multi-robot systems [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2001, 2103: 9-32.
- [62] SIMMONS R, APFELBAUM D, FOX D, et al. Coordinated deployment of multiple, heterogeneous robots [C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Takamatsu, Japan, 2000, 3: 2254-2260.
- [63] HOWARD A, MATARIC M J, SUKHATME G S. An incremental deployment algorithm for mobile robot teams [C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Lausanne, Switzerland, 2002, 3: 2849-2854.
- [64] WAGNER I A, LINDENBAUM M, BRUCKSTEIN A. MAC vs. PC—determinism and randomness as complementary approaches to robotic exploration of continuous unknown domains [J]. International Journal of Robotics Research, 2000, 19(1): 12-31.
- [65] PASSINO K. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2002, 22(3): 52-67.
- [66] 赵妮,柳毅,顾中国,等. 基于多智能体技术的信息融合系统[J]. 探测与控制学报, 2005, 27(1): 19-22.  
ZHAO Ni, LIU Yi, GU Zhongguo, et al. A multi-agent information fusion system[J]. Journal of Detection & Control, 2005, 27(1): 19-22.
- [67] 张晓勇,吴敏,彭军. 基于信息融合的多智能体协作方法的研究与应用[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(22): 27-30.  
ZHANG Xiaoyong, WU Min, PENG Jun. Research and application on MAS collaboration mechanism based on information fusion[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(22): 27-30.
- [68] 王远,徐华,贾培发. 多机器人系统中的信息融合技术综述[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(12): 150-152.  
WANG Yuan, XU Hua, JIA Peifa. A survey of information fusion in multi-robot systems[J]. Microelectronics & Computer, 2007, 24(12): 150-152.
- [69] BURGARD W, MOORS M, FOX D, et al. Collaborative multi-robot exploration [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, USA, 2000, 1: 476-481.
- [70] MARTINELLI A, PONT F, SIEGWAR R. Multi-robot localization using relative observation [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Auto-

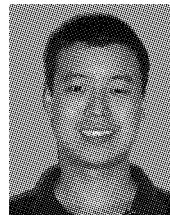
- mation. Barcelona, Spain, 2005: 2797-2802.
- [71] REKLEITIS I M, DUDEK G, MILLOS E E. Multi-robot cooperative localization: a study of trade-off between efficiency and accuracy[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Lausanne, Switzerland, 2002, 3: 2690-2695.
- [72] ROUMELIOTIS S I, REKLEITIS I M. Propagation of uncertainty in cooperative multirobot localization: analysis and experimental results[J]. *Autonomous Robots*, 2004, 17(1): 41-54.
- [73] 邵金鑫, 王玲, 魏星. 基于高斯-施密特粒子滤波器的多机器人协同定位[J]. *计算机工程与科学*, 2007, 29(6): 117-120.  
SHAO Jinxin, WANG Ling, WEI Xing. Multi-robot cooperative localization based on the Gauss-Hermite particle filter[J]. *Computer Engineering & Science*, 2007, 29(6): 117-120.
- [74] 张洪峰, 王硕, 谭民, 等. 基于动态分区方法的多机器人协作地图构建[J]. *机器人*, 2003, 25(2): 156-162.  
ZHANG Hongfeng, WANG Shuo, TAN Ming, et al. A dynamic region decomposition approach to cooperative multi-robot map-building[J]. *Robot*, 2003, 25(2): 156-162.
- [75] 潘薇, 蔡自兴, 陈白帆. 一种非结构环境下多机器人构建地图的方法[J]. *高技术通讯*, 2009, 19(5): 506-510.  
PAN Wei, CAI Zixing, CHEN Baifan. An approach to multi-robot map building in unstructured environments[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2009, 19(5): 506-510.
- [76] GRABOWSKI R, NAVARRO L E, PAREDIS C J, et al. Heterogeneous teams of modular robots for mapping and exploration[J]. *Autonomous Robots*, 2000, 8(3): 293-308.
- [77] REKLEITIS I M, DUDEK G, MILIOS E E. Multi-robot collaboration for robust exploration[J]. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 2001, 31(1/2/3/4): 7-40.
- [78] GERKEY B P. On multi-robot task allocation[D]. Los Angeles: Computer Science Department, University of Southern California, 2003.
- [79] 张崧, 刘淑华. 多机器人任务分配的研究与进展[J]. *智能系统学报*, 2008, 3(2): 115-120.  
ZHANG Yu, LIU Shuhua. Survey of multi-robot task allocation[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2008, 3(2): 115-120.
- [80] WERGER B, MATARIC M J. Broadcast of local eligibility: behavior-based control for strongly cooperative multi-robot teams[C]//Proceedings of Autonomous Agents. Barcelona, Spain, 2000: 2-22.
- [81] PARKER L E. Lifelong adaptation in heterogeneous multi-robot teams: response to continual variation in individual robot performance[J]. *Autonomous Robots*, 2000, 8(3): 239-267.
- [82] PARKER L E, CHANDRA M, TANG F. Enabling autonomous sensor-sharing for tightly-coupled cooperative tasks[M]//PARKER L E, SCHNEIDER F, SCHULTZ A. Multi-robot systems: from swarms to intelligent automata volume III. Berlin: Kluwer, 2005: 119-230.
- [83] TANG F, PARKER L E. Distributed multi-robot coalition through ASyMTRe-D[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Alberta, Canada, 2005: 2606-2613.
- [84] SMITH R G. The contract net protocol: high level communication and control in a distributed problem solver[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1980, C-29(12): 1104-1113.
- [85] BETHAUH M, HUANG H, KESKINECAD P. Robot exploration with combinatorial auctions[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, USA, 2003: 1957-1962.
- [86] ZLOT R, STENTZ A. Complex task allocation for multiple robot[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robot and Automation. Barcelona, Spain, 2005: 1515-1522.
- [87] VIG L, ADAMS J A. Market-based multi-robot coalition formation[C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems. Minneapolis, USA, 2006: 227-236.
- [88] De OLIVEIRA D, FERREIRA P R, BAZZAN A L C. A swarm-based approach for task allocation in dynamic agents organizations[C]//Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. New York, USA, 2004: 1252-1253.
- [89] 丁滢颖, 何衍, 蒋静坪. 基于蚁群算法的多机器人协作策略[J]. *机器人*, 2003, 25(5): 414-418.  
DING Yingying, HE Yan, JIANG Jingpin. Multi-robot cooperation method based on the ant algorithm[J]. *Robot*, 2003, 25(5): 414-418.
- [90] ZHANG Dandan, XIE Guangming, YU Junzhi, et al. Adaptive task assignment for multiple mobile robots via swarm intelligence approach[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2007, 55: 572-588.
- [91] GERKEY B P, MATARIC M J. A framework for studying multi-robot task allocation[C]//Proceedings of the 2003 International Workshop on Multi-Robot Systems. Washington, DC, USA, 2003: 15-26.
- [92] ATAY N, BAYAZIT B. Mixed-integer linear programming solution to multi-robot task allocation problem, WUCSE-2006-54[R]. St Louis, USA: Department of Computer Science and Engineering, Washington University in St Louis, 2006.
- [93] ATAY N, BAYAZIT B. Emergent task allocation for mo-

- mobile robots through intentions and directives, WUCSE-2007-2[R]. St Louis, USA: Department of Computer Science and Engineering, Washington University in St Louis, 2007.
- [94] GAGE A, MURPHY R, VAIAVANIS K P, et al. Affective task allocation for distributed multi-robot teams[EB/OL]. [2010-06-11]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=385F88F37ABE5E4C19B6556477D5A36B?doi=10.1.1.59.1107&rep=rep1&type=pdf>.
- [95] DAHI T S, MATARIC M J, SUKHATME G S. Multi-robot task-allocation through vacancy chains[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei, China, 2003: 2293-2298.
- [96] DIAS M B, STENTZ A. A market approach to multi-robot coordination, TR CMU-RI-TR-01-26[R]. Pittsburgh, USA: The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 2001.
- [97] 柳林, 季秀才, 郑志强. 基于市场法及能力分类的多机器人任务分配方法[J]. 机器人, 2006, 28(3): 338-343.
- LIU Lin, JI Xiucan, ZHENG Zhiqiang. Multi-robot task allocation based on market and capability classification[J]. Robot, 2006, 28(3): 338-343.
- [98] 任斌. 基于强化学习算法的机器人系统觅食任务研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学信息科学技术学院, 2005.
- [99] BALCH T R, ARKIN R C. Behavior based formation control for multi-robot teams[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 926-939.
- [100] SAPTHARISHI M, OLIVER C S, DIEHL C P, et al. Distributed surveillance and reconnaissance using multiple autonomous ATVs: cyberscout[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(5): 826-836.
- [101] 洪炳镕, 朴松昊. 基于冲突消解的群体智能机器人协作研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(9): 1053-1055.
- HONG Bingrong, PU Songhao. Multi-robot cooperation based on conflict resolution[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(9): 1053-1055.
- [102] 任斌, 陈宗海. 基于强化学习算法的多机器人系统的冲突消解策略[J]. 控制与决策, 2006, 21(4): 430-434.
- REN Yi, CHEN Zonghai. Interference solving strategy in multiple robot system based on reinforcement learning algorithm[J]. Control and Decision, 2006, 21(4): 430-434.
- [103] 景兴建, 王越超, 谈大龙. 基于人工协调场的多移动机器人实时协调避碰规划[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(5): 757-764.
- JING Xingjian, WANG Yuecao, TAN Dalong. Artificial coordinating field based real-time coordinating collision-avoidance planning for multiple mobile robots[J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(5): 757-764.
- [104] MATARIC M J. Reinforcement learning in the multi-robot domain[J]. Autonomous Robots, 1997, 4(1): 73-83.
- [105] STONE P, VELOSO M. Multiagent systems: a survey from a machine learning perspective[J]. Autonomous Robots, 2000, 8(3): 345-383.
- [106] BALCH T, PARKER L E. Robot teams: from diversity to polymorphism[M]. Natick, USA: A. K. Peters Publishers, 2002.
- [107] LITTMAN M L. Markov games as a framework for multiagent learning[C]//Proceedings of the Eleventh International Conference on Machine Learning. San Francisco, USA, 1994: 157-163.
- [108] LITTMAN M L. Value-function reinforcement learning in Markov games[J]. Journal of Cognitive Systems Research, 2001, 2(1): 55-66.
- [109] HU Junling. Learning in Markov game with incomplete information[C]//Proceedings of the 15th National Conference on Artificial Intelligence. Madison, USA, 1998: 1176-1177.
- [110] INOUE Y, TOHGE T, IBA H. Object transportation by two humanoid robots using cooperative learning[C]//Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC 2004). Portland, USA, 2004: 1201-1208.
- [111] ITO K, GOFUKU A. Hybrid autonomous control for multi mobile robots[J]. Advanced Robotics, 2004, 18(1): 83-99.
- [112] WANG Y, De SILVA C W. A machine-learning approach to multi-robot coordination[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2008, 21: 470-484.
- [113] FERCH M, ZHANG J. Learning cooperative grasping with the graph representation of a state-action space[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2002, 38: 183-195.
- [114] FERNANDEZ F, PARKER L E. Learning in large cooperative multi-robot domains[J]. International Journal of Robotics Automation, 2001, 16(4): 217-226.
- [115] LIU Z, ANG M H, SEAH J, et al. Reinforcement learning of cooperative behaviors for multi-robot tracking of multiple moving targets[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Edmonton, USA, 2005: 1220-1225.
- [116] 张芳. 面向多移动机器人系统的再学习方法研究[D]. 上海: 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 2002.
- ZHANG Fang. Multiple mobile robots system oriented reinforcement learning method study[D]. Shanghai: School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 2002.

- [117] 仲宇. 学习理论及在多机器人中的应用研究[D]. 哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院, 2003.  
ZHONG Yu. Research on distributed reinforcement learning theory and its applications in multi-robot systems [D]. Harbin: College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, 2003.
- [118] FERNANDEZ F, BORRAJOA D, PARKER L E. Reinforcement learning algorithm in cooperative multi-robot domains[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2005, 43: 161-174.
- [119] YANG E, GU D. Multiagent reinforcement learning for multi-robot systems: a survey[EB/OL]. [2010-06-11]. <http://www.essex.ac.uk/csee/research/publications/technicalreports/2004/csm404.pdf>.
- [120] IKENOUE S, ASADA M, HOSODA K. Cooperative behavior acquisition by asynchronous policy renewal that enables simultaneous learning in multiagent environment [C]//*Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Lausanne, Switzerland, 2002: 2728-2734.
- [121] ASADA M, UCHIBE E, HOSODA K. Cooperative behavior acquisition for mobile robots in dynamically changing real worlds via vision-based reinforcement learning and development[J]. *Artificial Intelligence*, 1999, 110(2): 275-292.
- [122] NOLFI S, FLOREANO D. *Evolutionary robotics: the biology, intelligence and technology of self-organizing machines*[M]. Cambridge, USA: MIT Press, 2000.
- [123] MATARIC M J, CLIFF D. Challenges in evolving controllers for physical robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1996, 19(1): 67-83.
- [124] WATSON R A, FICICI S G, POLLACK J B. Embodied evolution: distributing all evolutionary algorithm in a population of robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, 39(1): 1-18.
- [125] K-Team S A. Khepera II user manual[EB/OL]. [2010-06-11]. <http://ftp.k-team.com/khepera/documentation/Kh2UserManual.pdf>.
- [126] MobileRobots. Pioneer 3 operations manual[EB/OL]. [2010-06-11]. [http://www.ist.tugraz.at/\\_attach/Publish/Kmr06/pioneer-robot.pdf](http://www.ist.tugraz.at/_attach/Publish/Kmr06/pioneer-robot.pdf).
- [127] iRobotSoft. IRobot system advanced user's guide[EB/OL]. [2010-06-11]. <http://irobotsoft.com/help/irobot-manual-advanced.pdf>.
- [128] Segway Robotics. Segway robotic mobility platform (RMP)[EB/OL]. [2010-06-11]. <http://rmp.segway.com/>.
- [129] National Robotics Engineering Center. Learning applied to ground robots (LAGR)[EB/OL]. [2010-06-11]. <http://www.rec.ri.cmu.edu/projects/lagr/index.php>.
- [130] ZHANG X F. Handbook for the use of the labmate-robot [EB/OL]. [2010-06-11]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.16.6408&rep=rep1&type=pdf>.
- [131] 柳林. 多机器人系统任务分配及编队控制研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2006.  
LIU Lin. Research on multi-robot system task allocation and formation control[D]. Changsha: Graduate School of National University of Defence Technology, 2006.
- [132] Microsoft Robotics. Microsoft robotics studio[EB/OL]. [2010-06-11]. <http://www.surveyor.com/MSRS.html>.
- [133] MissionLab v7.0[EB/OL]. (2006-12-07) [2010-06-11]. <http://www.cc.gatech.edu/ai/robot-lab/research/MissionLab/>.
- [134] GERKEY B P, VAUGHAN R T, HOWARD A. The player/stage project: tools for multi-robot and distributed sensor systems[C]//*Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics*. Coimbra, Portugal, 2003: 317-323.
- [135] CHEN M, FOROUGHI E, HEINTZ F. RoboCup soccer server user manual: for soccer server version 7.07 and later[EB/OL]. (2002-08-02) [2010-06-11]. <http://wwfc.cs.virginia.edu/documentation/manual.pdf>.
- [136] TeamBots. TeamBots home page[EB/OL]. [2010-06-11]. <http://www.teambots.org>.
- [137] 谭民, 王硕, 曹志强. 多机器人系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [138] GAZI V. Swarm aggregations using artificial potentials and sliding mode control[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(6): 1208-1214.
- [139] LIU Y F, PASSINO K M. Stable social foraging swarms in a noisy environment[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(1): 30-44.
- [140] MURPHY R R, LISETTI C, TARDIF R, et al. Emotion-based control of cooperating heterogeneous mobile robots [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Special Issue on Multi-robot Systems, 2002, 18(5): 744-757.
- [141] BALCH T R, ARKIN R C. Behavior-based formation control for multi-robot systems[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, 14(2): 926-939.
- [142] DESAI J P, OSTROWSKI J P, KUMAR V. Modeling and control of formations of non-holonomic mobile robots [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17(6): 905-908.
- [143] DUNBAR W B, MURRAY R M. Model predictive control of coordinated multi-vehicle formations[J]. *Automatica*, 2006, 42(4): 549-558.
- [144] FENWICK J W, NEWMAN P M, LEONARD J J. Cooperative concurrent mapping and localization [C]//*Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington, DC, USA, 2002, 2:

- 1810-1817.
- [145] WANG C. Simultaneous localization, mapping, and moving object tracking, CMU-RI-TR-04-23[R]. Pittsburgh, USA: Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 2004.
- [146] KITANO H, TADOKORO S. RoboCup rescue: a grand challenge for multi-agent and intelligent systems[J]. AI Magazine, 2001, 22(1): 39-52.
- [147] CHOSET H. Coverage for robotics—a survey of recent results[J]. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, 2001, 31(1/2/3/4): 113-126.
- [148] CORTES J, MARTINEZ S, KARATAS T, et al. Coverage control for mobile sensing networks[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(2): 243-255.
- [149] PARKER L E. Cooperative robotics for multi-target observation[J]. Intelligent Automation and Soft Computing, Special Issue on Robotics Research at Oak Ridge National Laboratory, 1999, 5(1): 5-19.
- [150] PARKER L E. Distributed algorithms for multi-robot observation of multiple moving targets[J]. Autonomous Robots, 2002, 12(3): 231-255.
- [151] WERGER B B, MATARIC M J. Broadcast of local eligibility for multi-target observation[C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems. Daugavpils, Latvia, 2000: 347-356.
- [152] YAMADA S, SAITO J. Adaptive action selection without explicit communication for multi-robot box-pushing[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2001, 31(3): 398-404.
- [153] MIYATA N, OTA J, ARAI T, et al. Cooperative transportation by multiple mobile robots in unknown static environment associated with real-time task assignment[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(5): 769-780.
- [154] WANG Y, De SILVA C W. An object transportation system with multiple robots and machine learning[C]//Proceedings of the 2005 American Control Conference. Portland, USA, 2005: 1371-1376.
- [155] KITANO H, ASADA M, KUNIYOSHI Y, et al. Robocup: a challenge problem of AI[J]. AI Magazine, 1997, 18(1): 73-86.
- [156] KOSE H, TATLIDEDE U, MERICLI C, et al. Q-learning based market-driven multi-agent collaboration in robot soccer[C]//Proceedings of the Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks. Izmir, Turkey, 2004: 219-228.
- [157] BROWNING B, BRUCE J, BOWLING M, et al. STP: skills, tactics and plays for multi-robot control in adversarial environments[J]. IEEE Journal of Control and Systems Engineering, 2005, 219(1): 33-52.
- [158] VIDAL R, SHAKERNIA O, KIM H J, et al. Probabilistic pursuit-evasion games: theory, implementation, and experimental evaluation[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 18(5): 662-669.
- [159] 周浦成, 洪炳熔, 王月海. 动态环境下多机器人合作追捕研究[J]. 机器人, 2005, 27(4): 289-295.  
ZHOU Pucheng, HONG Bingrong, WANG Yuehai. Multi-robot cooperative pursuit under dynamic environment[J]. Robot, 2005, 27(4): 289-295.
- [160] 罗真, 曹其新. 基于短期预测的追捕方法[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(7): 1069-1078.  
LUO Zhen, CAO Qixin. A pursuing method based on short-term prediction[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2006, 40(7): 1069-1078.
- [161] BORIE R, TOVEY C, KOENIG S. Algorithms and complexity results for pursuit-evasion problems [C]//Proceedings of International Joint Conferences on Artificial Intelligence. Pasadena, USA, 2009: 59-66.

#### 作者简介:



吴军,男,1980年生,博士研究生,主要研究方向为多机器人系统、机器学习与智能控制,发表学术论文10余篇。



徐昕,男,1974年生,研究员、硕士生导师,主要研究方向为机器学习、数据挖掘和机器人控制等,发表学术论文近50篇,其中被SCI检索16篇,EI检索30余篇。



连传强,男,1986年生,硕士研究生,主要研究方向为机器学习、多智能体系统和机器人控制等,发表学术论文5篇。



贺汉根,男,1943年生,教授、博士生导师,主要研究方向为模式识别、智能系统和机器人控制等,发表学术论文100余篇。