

# 多机器人任务分配的研究与进展

张 裔,刘淑华

(东北师范大学 计算机学院,吉林 长春 130117)

**摘 要:**从多机器人任务分配的类型、任务分配方法、任务的死锁与解除以及各种任务分配算法的对比等4个方面,对多机器人任务分配的最新研究进展进行了概述.分析了多机器人任务分配的发展趋势,指出动态环境和未知环境下大规模异构机器人任务分配问题的研究是必然趋势,在众多研究方法中,群体智能方法是解决该类问题的未来研究方向.

**关键词:**多机器人;任务分配;拍卖算法;群体智能

**中图分类号:**TP242 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-4785(2008)02-0115-06

## Survey of multi-robot task allocation

ZHANG Yu, LIU Shu-hua

(School of Computer Science, Northeast Normal University, Changchun 130117, China)

**Abstract:** This paper summarizes the latest developments in multi-robot task allocation, including categories of task allocation, methods of task allocation, task deadlock, and its elimination. In addition, trends in methodologies for multi-robot task allocation are analyzed and compared. Our analysis shows that large-scale task allocation for heterogeneous robots is a major research area and swarm intelligence will be a good choice to solve this kind of task allocation.

**Key words:** multi-robot; task allocation; auction algorithm; swarm intelligence

多机器人任务分配问题 MRTA (multi-robot task allocation) 是多机器人系统研究的一个基础问题,体现了系统高层组织形式与运行机制,是多机器人系统实现目标的基础.一方面,任务分配的好坏直接影响整个系统的效率,并且直接关系到系统中各机器人是否能最大限度发挥自身的能力,避免占用更多的资源;另一方面,当一个机器人没有能力完成当前任务时,如何在现有机制的基础上,通过有效的对话、协商使多机器人合作完成此项任务已经成为越来越多研究者关注的问题.

多机器人任务分配问题可以看作是最优分配问题(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>[1]</sup>.早期的多机器人任务分配方法多为集中式的,由一个管理者(leader)负责分配任务给系统中其他机器人,虽然可以得到全局最优

解,但是存在着很多缺点,如不能求解未知环境和动态环境下的任务分配问题等.随着分布式人工智能的不断发展,分布式任务分配方法以其突出的柔性、鲁棒性和高效性受到越来越多的关注.与集中式方法相比,分布式任务分配方法能够更快得到解,但是多为近似最优解.

## 1 多机器人任务分配的分类

Gerkey 基于以下3方面来描述 MRTA 问题<sup>[2]</sup>:

1) 单任务机器人(ST)与多任务机器人(MT): ST是指每个机器人最多只能执行一个任务,而 MT是一些机器人可同时执行多个任务.

2) 单机器人任务(SR)与多机器人任务(MR): SR是指每个任务只需要一个机器人完成,MR是指一些任务需要多个机器人完成.

3) 即时分配(IA)与扩展分配(TE): IA是根据机器人、任务和环境可用的信息即时将任务分配给

收稿日期:2007-09-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60573067).

通讯作者:刘淑华. E-mail:liush129@126.com.

机器人,不带有对将来分配的规划.而TE是有更多可用的信息,如要分配的所有任务的集合或如何获得任务的模型等.

基于以上3点将MRTA问题分为8类:1) ST-SR-IA;2) ST-SR-TE;3) ST-MR-IA;4) ST-MR-TE;5) MT-SR-IA;6) MT-SR-TE;7) MT-MR-IA;8) MT-MR-TE.其中ST-SR-IA是最简单的一种情况,可看作是OAP的实例,也是目前研究最多的一类MRTA问题.通常将任务看作是不可分割的原子单元,忽略任务的内部结构,即给定一组任务 $T$ 、一组机器人 $R$ 和每个机器人执行任务的代价函数 $cr$ ,找到一个任务分配方案使全局代价函数值最小<sup>[3]</sup>.

然而,只有少数MRTA问题采用纯粹的ST-SR-IA一次性分配结构,大多数都采用它的2个变形结构:迭代分配(iterated assignment)和在线分配(online assignment).在迭代分配结构下每次迭代中所有任务是同时分配的,其典型代表有ALLIANCE、BLE和M+等.而在线分配是串行分配任务的,典型的代表有MURDOCH、First-price auctions和Dynamic Role Assignment等.

## 2 任务分配方法

目前,多机器人任务分配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、基于空闲链的方法等.

### 2.1 基于行为的分配方法

基于行为的任务分配算法一般分为3步<sup>[4]</sup>:

- 1) 找到一个具有最大效用的机器人——任务对 $(i, j)$ ;
- 2) 将任务 $j$ 分配给机器人 $i$ ,并不再考虑它们;
- 3) 回到第1)步.

其典型代表有ALLIANCE<sup>[5]</sup>和Broadcast of Local Eligibility (BLE)<sup>[6]</sup>这2种方法都是通过行为抑制来实现任务分配的,每个机器人对每个任务有一定的期望度,并且在行为层直接抑制其他机器人的活动.在2005年Parker又提出一个基于行为的任务分配机制ASyMTRe<sup>[7]</sup>,将环境和感知信息映射到行为模式获得所需的信息流,自动地在机器人间重构各种模式间的连接,综合得到完成任务的行为.

该方法的特点是实时性、容错性和鲁棒性好,但只能求得局部最优解.

### 2.2 市场机制方法

它是一种基于协商主义的任务分配方法,多机器人系统在某种协议基础上通过机器人之间的相互协商、谈判来完成分配.这种方法适合于在任务和机器人状态可知的中小规模异构机器人中进行分布式问题的协作求解,能够实现全局最优任务分配,缺点是机器人必须通过显式的通信有意图的协作,资源消耗较多,一旦通讯中断性能将明显下降<sup>[8]</sup>.其典型代表是R. Smith提出的合同网<sup>[9]</sup>.合同网模型(CNP)由多个可以互相传递信息的结点组成,基本思想是按照市场中的招标—投标—中标机制来完成各结点间的协商过程.

传统合同网模型存在许多缺点,而且对于什么时候发布任务,如何评价“标的”值从而得到全局最优解,哪些已分配的任务应该再进行拍卖来保持解的质量,什么时候进行再分配和由谁决定再分配,这些任务分配中不可避免的问题CNP并未解决.

近年来各种基于合同网的改进方法被广泛应用到多机器人任务分配中,目前研究最多的是拍卖算法.拍卖算法因其具有可扩展性而特别适合于分布式机器人领域,而且理论上能够保证得到任务的最优分配.但通讯开销大,多次循环方可收敛到平衡.早期的拍卖算法是集中式的,系统中由一个集中的管理者进行任务拍卖和任务分配,如Caloud等设计的GOPHER<sup>[10]</sup>.目前多采用分布式拍卖算法,系统中每个机器人作为自利的agent参与虚拟市场,通过拍卖和投标任务进行任务分配.基于拍卖的任务分配问题一般分为3步<sup>[11]</sup>:

- 1) 每个机器人根据自身执行指定任务的适合度对任务进行投标;
- 2) 拍卖机制决定将任务分配给哪个机器人;
- 3) 投标获胜的机器人控制器通过执行一个或多个动作来完成任务.

#### 2.2.1 单物品拍卖

所谓单物品拍卖算法就是对于一个目标点,向所有的机器人进行拍卖,参与拍卖的机器人根据它目前所在的位置和目标点之间的距离出价,距离最短的机器人将获得任务,并开始执行,其他机器人继续参加剩下目标点的拍卖.如First-price auctions<sup>[12]</sup>,Dynamic role assignment<sup>[13]</sup>和GAO Ping-an<sup>[14]</sup>等.

#### 2.2.2 组合拍卖

Behauh提出了组合拍卖的方法<sup>[15]</sup>,采用一个简单的例子证明单物品竞拍有得不到全局最优路径

的缺陷,而组合拍卖的方法相比单物品拍卖更容易产生全局较优解.在组合拍卖算法中,机器人不仅可以对一个目标进行投标,还可以将多个目标看作一个标来竞标.这种方法不仅能够提高拍卖的效率,而且还能降低竞标机器人的风险.典型代表是 Traderbots<sup>[16]</sup>.

2.2.3 单层拍卖

在单层拍卖中,任务被建模成原子单元,不考虑任务的结构性和复杂性.单层拍卖分为 3 类:1) 目标层拍卖(Goal point-level allocation);2) 区域层拍卖(Area-level allocation);3) 任务层拍卖(Mission-level allocation).现存的 MRTA 算法多为单层拍卖机制,如 First-price auctions<sup>[12]</sup>、Dynamic Role Assignment<sup>[13]</sup>、Traderbots<sup>[16]</sup>、M + 系统<sup>[17]</sup>、MURDOCH<sup>[18]</sup>和 DEMiR-CF<sup>[19]</sup>等.

2.2.4 任务树拍卖

Zlot 和 Stentz 提出一种基于任务树拍卖的分配方法<sup>[3]</sup>,打破了以往的“单层”任务拍卖模式.由于任务树具有结构性,因此能够表示复杂的任务.参与拍卖的机器人可对树中不同层的节点进行拍卖.这种方法的优点在于将任务分解和规划有效地融入分配过程中.

2.2.5 逆转拍卖

现存的拍卖算法都是机器人投标任务,所谓逆转拍卖是任务发起拍卖并投标机器人具有的服务.引入服务智能体(service Agents)和任务智能体 2 个软件智能体辅助完成拍卖过程.Lovekesh 和 Julie 提出的 RACHNA<sup>[20]</sup>就是一种基于逆转拍卖的联盟形成系统.

2.3 群体智能方法

近几年来,一些研究者受到社会性昆虫行为的启发,通过对社会性昆虫的模拟产生了一系列对于传统问题的新的解决方法,即群智能算法.群体智能指的是“无智能的主体通过合作表现出智能行为的特性”.

群体智能在没有集中控制并且不提供全局模型的前提下,为寻找复杂的分布式问题的解决方案提供了基础.由于群体中相互合作的个体是分布的,没有中心的控制与数据,这样系统更具有鲁棒性,不会由于某一个或者某几个个体的故障而影响整个问题的求解,而且个体之间通过非直接通信(stimergy)进行合作,所以当系统中个体增加时系统通信开销增加得十分小,使系统具有更好的可扩充性.因此群体智能方法非常适合于分布式多机器人系统,而且

也有越来越多的研究者将群体智能方法应用到多机器人任务分配中,特别是在动态环境下进行任务分配的情况.比较典型的方法有阈值法和蚁群算法.

2.3.1 阈值法

阈值法<sup>[21]</sup>的基本思想是通过感知任务的激励或需求调节机器人的选择和此任务的反应阈值.其中每个任务  $j$  都有一个激励值  $s_j$ ,当机器人  $i$  感知到任务  $j$  的  $s_j$  超过它的反应阈值  $\tau_{ij}$  时,开始执行该任务.当  $s_j$  低于  $\tau_{ij}$  时,机器人停止执行任务.

2.3.2 蚁群算法

根据昆虫学家的观察,蚂蚁通过在走过的路径上释放一种信息素来影响其他蚂蚁的运动,当信息素越强,吸引其他蚂蚁走这一路径的概率就越大,从而增加该路径的信息素浓度,这样就会有更多的蚂蚁走这条路径.丁滢颖等设计了一种基于蚁群算法的多机器人协作任务分配策略<sup>[22]</sup>,成功地解决了多机器人系统在未知环境工作时自主协作规划问题.

Dandan Zhang 等将阈值法和蚁群算法相结合提出一种基于群体智能方法的自适应任务分配策略<sup>[23]</sup>,通过高层简单的自增强学习模型,对不同类型的任务产生稳定、灵活的劳动分工.底层通过应用蚁群算法使机器人协作完成同种类型的任务.

2.4 基于线性规划的方法

Gerky 和 Mataric 将 MRTA 问题看作是 0-1 型整数线性规划问题<sup>[24]</sup>:

找到  $n^2$  个非负整数  $u_{ij}$ ,最大化

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij} U_{ij}$$

满足

$$\sum_{j=1}^n u_{ij} = 1, 1 \leq i \leq n,$$
$$\sum_{i=1}^n u_{ij} = 1, 1 \leq j \leq n.$$

它是针对单机器人单任务(single-robot tasks and single-task robots)而言,即一个机器人只能完成一个任务,而一个任务只需一个机器人完成,这是 MRTA 中最简单的情况.它不能处理一个任务需要多个机器人协作完成的情况(multi-robot tasks).早期解决线性规划问题的方法主要是单纯型法和匈牙利法,这 2 种方法本质上都是矩阵的运算,当系统中机器人和任务数增多时,运算量呈指数级增长.一些基于混合整数线性规划的 MRTA 方法<sup>[25-28]</sup>虽然能够成功找到最优解,但是通常需要收集所有机器人和任务的信息,并通过一个集中管理者来处理这些信息,因此扩展性差效率也低.为了提高系统的可扩

展性和效率,Atay 和 Bayazit 提出了一种基于混合整数线性规划的紧急(emergent)任务分配方法<sup>[29]</sup>.

2.5 基于情感招募的方法

情感(emotion)是自控制(self-regulation)中一种有效的机制,已被应用于智能体控制中,但是很少将其应用到机器人群体控制中.情感招募法不需要机器人对彼此建模,是一个分布式的分配方法.在机器人学中应用情感的方式主要有 3 种:1)使用情感建模机器人群体的行为;2)使用情感产生单个机器人的行为;3)作为人—机器人接口. Aaron Gage 等提出一种基于情感招募的分配方法<sup>[30]</sup>,主要采用的是前 2 种方式.

2.6 基于空闲链的方法

现存的多机器人任务分配算法通常不考虑机器人间相互作用的影响,如干扰(interference)等,而假设任务是独立的. Dahl 将系统中机器人间的相互作用考虑在内,提出一种基于空闲链(vacancy chains)的分布式 MRTA 模型 TAVC<sup>[31]</sup>,通过在一个组织中创建和填充空位模型化空闲链,该模型能够显式地处理群动态(group dynamics)的影响,引入任务处理频率决定哪些机器人可无干扰地同时工作.

3 任务死锁与解除

3.1 任务死锁

在多机器人系统中,随着机器人数目的增加,受系统中有限资源的制约,机器人间的冲突呈指数级增长,严重影响系统的整体性能,甚至发生死锁.目前多机器人领域中的“任务死锁”并未有统一的定义,一般根据具体的任务域和任务分配方法给出不同的定义和解除方法.

3.2 死锁的解除

若机器人间通过协商来解决任务死锁问题,将会产生较大的通信量,增加机器人的通信负载,而且对机器人硬件要求很高,且容易受到外界环境的干

扰;同时大量的计算往往无法满足多移动机器人系统任务实时性较高的要求.因此,许多研究者提出了一些更为有效的方法.

祖丽楠等<sup>[31]</sup>针对系统运行过程中,由于机器人和任务的相对数量、位置分布关系以及机器人状态发生转换等原因,而出现的任务死锁情况,在上级人机交互计算机中设计了一个基于黑板结构的监控机构,负责监控任务的死锁并进行协调.

柳林等<sup>[32]</sup>给出了任务执行中存在的死锁情况,并通过将任务的偏序关系作为任务分配顺序的方法有效地避免了死锁的发生.丁滢颖等<sup>[21]</sup>针对基于蚁群算法求解任务分配的方法给出了机器人的任务死锁定义,针对这种情况在算法中引入衰减因子,有效防止了任务死锁的发生.

Dandan ZHANG 等<sup>[22]</sup>给出了任务死锁发生的条件,而且引入等待时间和容忍时间,当等待时间大于容忍时间时通过降低“感知”信息素避免死锁的产生.

4 任务分配算法的比较

4.1 影响算法的因素

对于现存的任务分配方法一般从以下 4 个方面进行评价<sup>[2]</sup>.

- 1) 计算需求:重要操作重复的次数.对于 MRTA,累加效用值和效用值的比较等都为重要操作.
- 2) 通讯需求:机器人间通过网络发送消息的总数,不考虑消息的大小.
- 3) 任务分配情况(task consideration).
- 4) 解的质量:采用竞争因子(competitive factor)评价,竞争因子给出了一个算法在最坏情况下的解.

4.2 算法比较

假设有  $n$  个机器、 $m$  个任务,上述各种方法的性能比较如表 1、2 所示.

表 1 迭代任务分配算法  
Table 1 Iterated task allocation algorithm

名称	计算需求/迭代	通讯需求/迭代	任务分配情况	解的质量
ALLIANCE <sup>[5]</sup>	$O(mn)$	$O(m)$	同时分配,可重分配	至少 2-competitive
BLE <sup>[6]</sup>	$O(mn)$	$O(mn)$	同时分配,可重分配	2-competitive
M+ <sup>[17]</sup>	$O(mn)$	$O(mn)$	同时分配,不可重分配	2-competitive
ASyMTRe <sup>[17]</sup>	$O(mn)$	$O(mn)$	同时分配,可重分配	至少 2-competitive

表 2    在线任务分配算法  
Table 2    Online task allocation algorithm

名称	计算需求/ 任务	通讯需求/ 任务	任务分配情况	解的质量
MURDOCH <sup>[18]</sup>	$O(1)$ / 投标者 $O(n)$ / 拍卖者	$O(n)$	串行分配,不可重分配	3-competitive
First-price auctions <sup>[12]</sup>	$O(1)$ / 投标者 $O(n)$ / 拍卖者	$O(n)$	串行分配,可重分配	至少 3-competitive
Dynamic role assignment <sup>[13]</sup>	$O(1)$ / 投标者 $O(n)$ / 拍卖者	$O(n)$	串行分配,可重分配	至少 3-competitive
DEMiR-CF <sup>[19]</sup>	$O(1)$ / 投标者 $O(n)$ / 拍卖者	$O(n)$	串行分配,可重分配	至少 3-competitive

5    结束语

本文综述了国内外学者提出的各种 MRTA 方法,并将各种方法进行比较.随着多机器人被应用到越来越多的领域中和任务难度的不断加大,静态环境下的 MRTA 方法已不能满足实际应用.在未来工作中还有许多方面的问题有待于更深入地研究.主要包括:

- 1) 动态环境和未知环境下的任务分配,以及随之而来的任务动态分配和再分配问题;
- 2) 完成任务过程中机器人之间相互干扰、冲突等因素;
- 3) 复杂任务的 MRTA 方法;
- 4) 异构大规模 MRTA 方法;
- 5) 在通讯阻塞或失效的情况下,MRTA 方法的研究;
- 6) 群动态对 MRTA 方法的影响;
- 7) MRTA 建模.

参考文献:

[1] GERKEY B P. On multi-robot task allocation[D]. Los Angeles: University of Southern California , 2003.

[2] GERKEY B P, MATARIC M J. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems[J]. International Journal of Robotics Research , 2004 , 23 (9) :939-954.

[3] ZLOT R, STENTZ A. Complex task allocation for multiple robot [C]// Proc IEEE Int Conf Robot Autom (ICRA). [S.l. ]. 2005 : 1515-1522.

[4] GERKEY B P, MATARIC M J. Multi-robot task allocation: analyzing the complexity and optimality of key architectures[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taiwan, China , 2003 : 3862-3868.

[5] PARKER L E. ALLIANCE:an architecture for fault tolerant multirobot cooperation[J]. IEEE Transactions on

Robotics and Automation ,1998 ,14 (2) :220-240.

[6] 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 :21-22.

[7] TANG Fang , PARKER L E. ASyMTRe: automated synthesis of multi-robot task solution through software reconfiguration[C]// Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. [S.l. ]. 2005 : 1501-1508.

[8] KALRA N, MARTINOLI A. A comparative study of market-based and threshold-based task allocation [C]// Distributed Autonomous Robotic Systems (DARS). Minneapolis ,USA ,2006.

[9] SMITH R G. The contract net protocol: high level communication and control in a distributed problem solver [J]. IEEE Trans on Computers ,1980 (6) : 1104-1113.

[10] CALOUD P, CHOI W, LATOMBE J C, et al. YIM M. Indoor automation with many mobile robots[C]// Proceedings of the IEEE/ RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. [S.l. ]. 1990 : 67-72.

[11] MATARIC M J , SU KHATME G S, OSTERGAARD E H. Multi-robot task allocation in uncertain Environments[J]. Autonomous Robots ,2003 ,14 (2) : 255-263.

[12] ZLOT R, STENTZ A, DIAS M B , et al. Multi-robot exploration controlled by a market economy[C]// Proc of the IEEE Intl Conf on Robotics and Automation (ICRA). Washington ,USA ,2002 :3016-3023.

[13] CHAIMOWICZ L , CAMPOS M, KUMAR V. Dynamic role assignment for cooperative robots[C]// In Proc of the IEEE intl Conf on Robotics and Automation (ICRA). Washington ,USA ,2002 : 293-298.

[14] GAO Ping an. Multi-robot task allocation for exploration[J]. Journal CSU T ,2006 ,13 (5) :548-551.

[15] BETHAUH M, HUANG H, KESKINECAD P. Robot exploration with combinatorial auctions[C]// Proceedings of IEEE/ RSJ International Conference on Intelli-

- gent Robots and Systems. Las Vegas, Nevada, 2003: 1957-1962.
- [16] DIAS M B. TraderBots: a new paradigm for robust and efficient multirobot coordination in dynamic environments[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2004.
- [17] BOTELHO S, ALAMI R. M+: a scheme for multi-robot cooperation through negotiated task allocation and achievement[C]// Proc IEEE Int Conf Robot Automat. Detroit, USA, 1999: 1234-1239.
- [18] GERKEY B P, MATARIC M J. Sold!: auction methods for multirobot coordination[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(5): 758-786.
- [19] SARIEL S, BALCH T. A distributed multi-robot cooperation framework for real time task achievement[C]// Distributed Autonomous Robotic Systems. Minneapolis, USA, 2006: 187-196.
- [20] VIGL, 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.
- [21] OLIVERA D, FERREIRA P R, BAZZAZ A L C. A swarm based approach for task allocation in dynamic agents organizations[C]// Autonomous Agents and Multiagent Systems. New York, 2004: 1252-1253.
- [22] 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 Jingping. Multi-robot cooperation method based on the ant algorithm[J]. Robot, 2003, 25(5): 414-418.
- [23] ZHANG Dandan, XIE Guangming, YU Junzhi, WANG Long. Adaptive task assignment for multiple mobile robots via swarm intelligence approach[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2007, 55: 572-588.
- [24] GERKEY B P, MATARIC M J. A framework for studying multi-robot task allocation[C]// Proceedings of the Multi-Robot Systems. Washington, USA, 2003: 15-26.
- [25] BELLINGHAM J, TILERSON M, RICHARDS A, et al. Multi-task allocation and path planning for cooperating uavs[C]// Conference on Coordination, Control and Optimization. Gainesville, USA, 2001: 1-19.
- [26] SCHUMACHER C, CHANDLER P, PACHTER M, et al. Uav task assignment with timing constraints[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Conference and Exhibit. Arlington, Texas, 2003.
- [27] ALIGHANBARI M, KUWATA Y, JONATHAN J H. Coordination and control of multiple uavs with timing constraints and loitering[C]// The American Control Conference. Denver, Colorado, 2003: 5311-5316.
- [28] ATAY N, BAYAZIT B. Mixed-integer linear programming solution to multi-robot task allocation problem, WUCSE 54[R]. Dept of Computer Science and Engineering, Washington University in St Louis, 2006.
- [29] ATAY N, BAYAZIT B. Emergent task allocation for mobile robots through intentions and directives, WUCSE 2[R]. Washington: Washington University in St Louis, 2007.
- [30] GAGE A, MURPHY R, VALAVANIS K P, LONG M. Affective task allocation for distributed multi-robot teams, CRASAR-TR 26[R]. Center for Robot Assisted Search & Rescue, 2004.
- [31] DAHL T S, MATARIC M, SUKHATME G S. Multi-robot task-allocation through vacancy chains[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. [S.l.]. 2003: 2293-2298.
- [32] 祖丽楠, 田彦涛, 梅昊. 大规模多移动机器人合作任务的分布自主协作系统[J]. 机器人, 2006, 28(5): 470-477.  
ZU Linan, TIAN Yantao, MEI Hao. Distributed autonomous cooperation system for the large-scale cooperation task of multiple mobile robots[J]. Robot, 2006, 28(5): 470-477.
- [33] 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 Xiucui, ZHENG Zhiqiang. Multi-robot task allocation based on market and capability classification[J]. Robot, 2006, 28(3): 338-343.

#### 作者简介:



张 蓊, 女, 1983 生, 硕士研究生, 主要研究方向为多移动机器人。



刘淑华, 女, 1970 生, 副教授, 博士, 主要研究方向为多移动机器人、智能规划。