

多移动机器人系统研究发展近况

原魁¹ 李园¹ 房立新¹

摘要 多移动机器人系统具有广泛的应用前景,也是近年来机器人研究的热门课题之一.本文对国内外近年来关于多移动机器人系统的研究工作进行了总结和分析,重点介绍了多机器人系统的任务规划、运动规划、协调控制等问题的研究发展现状.最后指出了多移动机器人系统研究急需解决的若干重要问题.

关键词 多机器人系统, 移动机器人, 任务规划, 运动规划, 协调控制

中图分类号 TP24

Multiple Mobile Robot Systems: A Survey of Recent Work

YUAN Kui¹ LI Yuan¹ FANG Li-Xin¹

Abstract Multiple mobile robot systems (MMRS) have been a particularly active topic of robotics due to their potential applications. This paper is a survey of the recent researches on such areas of MMRS as motion planning, task planning, coordinate control, etc. Some problems about MMRS are raised.

Key words Multiple robot systems, mobile robot, task planning, motion planning, coordinate control

1 引言

人类社会存在着社会分工与协作,现实生活中的许多工作都需要通过多人的合作才能够完成.同样,当利用机器人完成给定工作时,许多工作也需要通过多个机器人的合作才能够完成.与单个机器人相比,多机器人系统具有很多优点.例如,多机器人系统具有更好的时间和空间分布性;多机器人系统中各台机器人的传感器信息可以有效互补,使整个系统具有更高的数据冗余度和更好的鲁棒性;在完成复杂任务时,多机器人系统中的单台机器人并不需要具有很强的功能和很好的性能,因而具有较低成本和较好的鲁棒性;通过多台机器人的合作,可以完成许多单台机器人所不能完成的复杂任务等等.

近年来,多机器人系统的研究受到越来越多的关注,已成为机器人学的研究热点之一,这一特点和趋势从发表在 ICRA 和 IROS 等国际知名学术会议上相关论文数量的增长就可以看出.1997 年以来,一些机器人研究工作者曾对多机器人系统的研究进展进行了全面深入的总结^[1~3].尤其是文献 [3] 从生

物学的启示、通信、体系结构、任务分配和控制等 7 个方面,对多机器人系统的研究进展作了介绍,讨论了多机器人系统的发展趋势,并且列出了许多有代表性的参考文献.此外,文献 [4~9] 也分别从不同角度对多机器人系统的发展进行了阐述.文献 [4] 从系统结构、合作根源、冲突消解、学习等几个方面对多机器人系统之前的研究进行了总结,指出了多机器人系统研究所面临的技术难题和可能的解决方法;文献 [5] 从不同角度对多机器人系统进行了分类;文献 [6] 按是否通信和是否同构把多智能体系统分为四类,并介绍了这四类多智能体系统所面临的问题和主要解决方法;文献 [7] 主要侧重于对多机器人的协调与合作方面的研究工作进行分析,并对多机器人系统进行了分类;文献 [8] 对多机器人系统的任务分配方法进行了概括和分析;而文献 [9] 则对 2003 年之前多机器人系统研究的进展情况给出了比较详细的介绍.

近年来,多机器人系统的研究有了很大进展,也取得了许多新的研究成果.本文将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.

本文后续部分的安排如下:第 2 节介绍了多机器人系统任务规划、运动规划等问题的研究发展现状,基于规划方式的多机器人系统任务分类;第 3 节介绍了多机器人协调控制研究中的主要内容与发展现状,并重点介绍了动态环境下多机器人队形保持、多机器人合作进行定位、探索环境与建立地图、合作完成物体搬运工作等方面的内容;第 4 节则介绍

收稿日期 2006-6-20 收修改稿日期 2006-12-11
Received June 20, 2006; in revised form December 11, 2006
国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2006AA04Z242, 2006AA04Z258) 和中国科学院自动化研究所青年科技创新基金资助

Supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2006AA04Z242, 2006AA04Z258), Institute of Automation Chinese Academy of Sciences Innovation Fund For Young Scientists

1. 中国科学院自动化研究所高技术创新中心 北京 100080
1. Hi-Tech Innovation Centre, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080
DOI: 10.1360/aas-007-0785

了多机器人系统面临的挑战,并给出了一些作者认为应该尽快解决的重要问题,供读者参考和思考。

2 任务规划与运动规划

多机器人系统规划主要包括任务规划和运动规划两个方面,涉及到任务的分解与分配、资源分配、如何避免机器人之间或机器人与环境之间产生冲突等重要问题,也是多机器人系统研究的一个非常重要的分支。本节将介绍多机器人系统规划研究的发展现状。

2.1 任务规划

多机器人系统的任务规划问题主要包括任务分解和任务分配两个方面,而任务本身又可以分为可分解任务和不可分解任务两种类型。到目前为止,多机器人系统的任务规划问题的研究主要集中在任务分配问题的研究,而对任务分解问题的研究工作则相对较少。在大多数情况下,任务分解工作是由系统设计者根据任务的具体特点和自己的经验完成,缺乏具体的理论框架指导;而在某些情况下,任务分解工作则被融合在任务分配工作中完成。早期的任务分配方法主要集中在基于经验或者专家知识的多机器人系统任务分配的思路和框架上,并主要采用了基于分布式人工智能和多智能体研究中的任务分配方法。Gerkey^[8,10] 试图对任务分配问题进行形式化的理论分析。他将任务分配问题描述为一个最优化问题,目标是为机器人分配任务使效用函数之和最大。Gerkey 把任务分配问题分为六种类型,并从计算复杂度、通信和解决效果等三个方面对 ALLICANCE (1998)、BLE (2001)、M+ (1999)、MURDOCH (2002)、First-price auctions (2001)、Dynamic role assignment (2002) 等任务分配结构进行了对比。

基于市场经济的任务分配方法来源于早期的合同网方法,也是近年来多机器人系统任务分配问题研究中的一个热点^[11~18],已经被用于协调多机器人系统完成环境探索^[11~13]、机器人足球^[15]、救援^[16]、推箱子^[17] 等很多应用问题的研究。文献 [19] 对基于市场经济方法的多机器人协调问题的研究进行了详细的总结和分析。关于任务分配方法的其它工作还有,文献 [20] 改进了文献 [11] 中的联合拍卖方法,提出一种联合竞价的任务分配方法:当一个机器人拥有一个不可分解而且自己无法单独完成的任务时,它将通知周围的机器人。文献 [21] 则提出了一种新的 ASyMTRe (Automated synthesis of multi-robot task solutions through software re-configuration, pronounced "Asymmetry") 任务解

决方法:这种方法适用于异构多机器人系统,各个机器人之间通过传感器、执行器和行为的组合来完成搬运和推箱子等任务。文献 [22] 提出了基于 VC (Vacancy chains) 方法的任务分配方法;文献 [23] 提出了一种无竞争多机器人系统任务分配方法:多个机器人的竞价顺序是由一个同步伪随机数生成器产生,获得竞价顺序第一位的机器人选择自己的最优任务并告知其它机器人,然后,竞价顺序排在其后的机器人再根据自己的代价函数在剩下的任务中选择最优任务,依此类推一直到所有任务分配完成。文献 [24] 提出了基于分布式传感器网络的任务分配方法。

当多机器人系统工作于动态环境时,由于环境的不可预知性和不确定性,任务的代价函数将很难确定。此外,当多机器人系统工作于动态环境时,任务分解本身也往往非常困难。因此,如何解决未知环境下难以确定代价函数的问题和不可分解任务的分配问题已成为近年来多机器人系统任务分配问题研究的热点。文献 [12] 提出了完成探索任务时的一种多机器人合作方式。在完成探索任务的过程中,每个机器人都可以分享其它机器人所获得的局部地图信息,并将这些信息应用于自己的代价函数,从而得到更加理想的结果。文献 [25] 把每个机器人的局部地图与其它机器人的竞价信息相融合,通过这种方法提高代价函数估计的准确性,并且相对文献 [12] 减少了通信信息量。文献 [26] 提出了四种考虑任务不确定性的多机器人系统的任务分配策略,并把这四种策略在仿真环境下和实际环境下的效果进行了对比,但它的主要研究对象是集中式控制系统。文献 [27] 对分布式系统进行了比较深入的研究,将不确定情况下的任务分配工作分为两个阶段进行:第一阶段,每个机器人根据自己的标准选择自己的任务;第二阶段,通过拍卖机制来协调各个机器人之间的任务。

2.2 运动规划

对于单个机器人来说,运动规划的任务是使机器人按照理想轨迹从初始位置运动到目标位置,并在运动过程中不与环境中的任何障碍物发生碰撞。而对于多移动机器人系统来说,除了需要保证每个机器人在完成任务的整个过程中都不与其它机器人或环境中的障碍物发生碰撞之外,还常常需要使各个机器人的运动保持给定的位置关系(如完成队形保持和合作搬运物体等任务时)。因此,其运动规划任务更加困难和复杂。

运动规划是多机器人系统的一个非常重要的研究课题。按照系统的集中程度,多机器人系统的运动

规划方法可以分为以下四种类型^[28]: 1) 完全集中的规划: 由一个集中的规划器来规划所有机器人的运动; 2) 不完全集中的规划: 每个机器人规划自己的路径, 但是有一个集中的规划器来规划这些机器人如何走自己的路径以保证不发生冲突; 3) 不完全分散的规划: 每个机器人规划各自的路径以及如何走自己规划的路径, 在紧急情况下才由集中规划器进行规划; 4) 完全分散的规划: 每个机器人的运动完全由自己规划, 不存在集中规划器. 而文献 [29] 则按照时间特性把多机器人系统的运动规划分为在线规划和离线规划, 并对多机器人系统的运动规划问题的方法进行了分类和总结.

多机器人系统运动规划的难点在于: 为了完成特定任务, 系统中的各个机器人常常需要在避开障碍的同时仍然保持相互之间的协作关系. 多机器人系统在动态环境下保持队形和合作搬运物体是这类任务的代表问题, 因而也一直是近年来多机器人系统的研究热点之一. 关于这方面的内容, 将在后面的章节进行介绍.

用于多机器人系统运动规划的方法很多, 其中主要有有人工势场法^[30~33]、动态窗口法^[34]、Voronoi 图法^[35]、随机路标法 (PRM)^[36, 37]、RRT 方法 (Rapidly-exploring Random Trees)^[38~40]、神经网络方法^[41, 42]、模糊逻辑法^[43] 等等. 其中许多方法是从单机器人的研究成果扩展而来, 而且大部分方法都是只考虑了移动机器人的运动学约束^[30, 31, 33, 35]. 而文献 [34, 44] 则同时考虑了机器人的运动学和动力学约束. 此外, 非完整约束特性的研究也是多移动机器人运动规划研究的热点问题之一^[45~47].

为了解决多机器人系统在实际环境中遇到的通讯受限、环境复杂等问题, 一些研究者提出了基于无线传感网络的多机器人系统路径规划的方法. 文献 [48, 49] 通过设置传感器网络或者网络节点来实现多机器人系统导航和运动规划. 文献 [50] 将在一定通信和感知范围内的多机器人系统组成动态变化的机器人网络, 网络内的机器人可以共享信息, 每个机器人可以根据网络提供的全局信息规划各自的路径, 从而有效地提高了各个机器人的环境感知能力.

总的来说, 多机器人系统的运动规划在理论和方法上已经得到很大发展, 许多算法也通过计算机仿真得到了验证. 但是, 由于实验条件限制等方面的原因, 通过实际的多机器人系统对理论和算法进行验证的工作还并不是很多, 许多研究成果的有效性还有待通过实际系统进行验证.

2.3 规划策略与多机器人系统分类

任何任务的完成都包括任务的分解、分配、执

行三个部分, 多机器人系统也是如此. 在多机器人系统中, 规划工作通常被分为任务规划和运动规划两个层次: 任务规划层完成任务的分解和分配, 运动规划层则负责生成具体的运动控制指令. 根据规划策略的不同, 多机器人系统可以被分为以下四种类型.

1) 弱任务规划、弱运动规划

这类多机器人系统在完成任务的过程中没有或者只进行很少的任务规划和运动规划, 主要面向比较简单任务, 如废料的收集等. 早期的多机器人系统和一些基于生物学启示的多机器人系统属于这一类别.

此类多机器人系统一般采用基于反应式的运动规划, 能够实现简单的避障功能, 但并不要求优化路径. 由于系统中各个机器人之间没有明确的任务分配, 因而机器人之间容易出现任务冲突的情况, 即容易出现多个机器人同时去执行相同任务的情况. 此类多机器人系统一般是一组大数目的同构机器人, 虽然只能完成一些特别简单的任务, 但在执行一些特定的任务时往往也能取得很好的效果.

2) 弱任务规划、强运动规划

这类多机器人系统在完成任务的过程中没有或者只有很少的任务规划, 主要的规划工作是在各个机器人的运动控制方面. 在这类多机器人系统中, 各个机器人的任务基本相同或需要配合完成一个不可分解的任务. 在完成任务的过程中, 各个机器人的运动轨迹具有相似性, 但由于不同机器人所处环境不同, 各自的运动轨迹又各不相同, 因而需要对各个机器人的运动轨迹进行规划. 此类多机器人系统研究的典型问题包括队形保持问题和合作搬运物体问题等.

在完成多机器人保持队形任务时, 系统中的机器人需要按照规定的队形保持固定的空间关系进行运动. 跟随领航者的方法是多机器人保持队形的常用方法, 此时, 一台机器人作为领航者, 而其它机器人则按照规定的队形保持一定距离关系跟随领航者运动^[51]. 在完成此类任务时, 多机器人系统本身的任务比较简单, 但为了使每台机器人都能够在完成任务的整个过程中紧密跟随领航者, 并能够在因为需要避开障碍物而暂时改变队形后仍然能够重新形成和保持队形, 则要求每台机器人都具有很强的实时运动规划能力.

多机器人合作搬运物体实际上是一种带有约束的多机器人队形保持问题, 因此同样具有弱任务规划, 强运动规划的特点. 文献 [52, 53] 中介绍了多机器人系统通过保持队形完成推箱子和搬运物体的工作; 文献 [54] 介绍了多机器人系统通过保持队形完成探索环境任务; 文献 [55] 介绍了多个机器人通过

相互协调运动,用同一根绳子牵引一个物体前进的工作.在完成此类任务时,多机器人系统本身的任务规划相对简单,因此其研究重点是如何协调多个机器人之间的运动.

3) 强任务规划、弱运动规划

对于这类的多机器人系统来说,如何对系统整体进行合理、有效的任务规划是完成给定任务的关键.完成探索环境和建立地图等任务的多机器人系统大多属于这一类型^[11~13].这类多机器人系统对各个机器人的运动规划要求不高,机器人的运动对于任务完成的影响在任务分配的过程中往往被研究者忽略.但对于一些容易分解的任务以及对系统中各个机器人的运动协调性要求不高的任务来说,这种多机器人系统也能够很好地完成^[56,57].

4) 强任务规划、强运动规划

这类多机器人系统对于完成动态未知环境下的复杂任务具有重要的意义.因为对整个多机器人系统和系统中的单个机器人都有较高要求,因而此类系统在具体实现上难度较大.尤其是对于一些无法分解的任务,或者任务的执行需要多个机器人之间具有明确的协调和合作才能完成的情况,仅从任务规划或者运动规划的角度来制定多机器人系统的协调控制策略都很难圆满完成任务.因此,如何有效地将任务规划和运动规划相结合,使得多机器人系统能够应用到更加复杂的环境和任务中去,是今后多机器人系统研究的一个具有挑战性的课题.近年来,这类多机器人系统已经开始受到研究者的关注.如文献[14]在任务分配的过程中考虑了机器人运动的不确定性,文献[21]把任务规划和运动规划放在一起研究,从整体上考虑完成一个任务的解决方法.

这里需要说明的是,在本文介绍的多机器人系统分类方法中,所谓的“强”和“弱”只是一种相对概念,二者之间并没有非常明确的界限.

3 多移动机器人系统的协调控制

对多机器人系统进行深入研究的目的在于,如何根据任务的具体特点,寻求适合多机器人系统中单个机器人的设计方法和整个系统的控制方法,使整个多机器人系统能够在复杂环境中高效、可靠地完成给定任务.多机器人系统的研究涉及到多机器人的群体体系结构、感知与多传感器信息融合、通信与协商、学习、运动规划、任务分配、冲突消解、系统实现等许多方面.如何根据给定任务对多机器人系统进行协调控制,使整个多机器人系统能够高效、可靠地完成给定任务也是一个非常重要的研究课题.

多移动机器人协调控制的代表性问题主要包括:

动态环境下多机器人队形保持、多机器人定位、探索环境和建立地图以及多机器人合作搬运物体等等.这些问题也是多机器人系统研究的主要问题.本节将重点介绍近年来这些问题的研究发展现状.

3.1 动态环境下多机器人队形保持

动态环境下的队形保持问题是多机器人系统研究的热点方向之一.该问题的相关研究工作很多,并取得了一些卓有成效的研究成果.多机器人系统队形保持问题的研究主要包括以下几个方面^[58]:

- 1) 如何形成队形;
- 2) 如何在行进过程中保持队形;
- 3) 如何在行进过程中避开障碍物;
- 4) 如何根据需要随时改变队形的形状;
- 5) 能否实现任意形状的队形.

早期的多机器人系统队形保持问题研究主要集中在如何形成队形和如何在行进过程中保持队形两个方面.队形保持方法中主要有基于领航者的方法、基于行为的方法和虚拟结构法,而很多研究工作也都致力于对这些方法进行改进以提高系统的稳定性.

近年来,多机器人系统队形保持问题的研究主要集中在如何在动态未知环境下保持队形,如何利用保持队形的多机器人系统来完成给定任务,以及如何在保持队形的同时避开环境中的各种障碍等方面^[31,34,35].文献[31]利用人工势场法构造了多机器人系统的导航函数并完成了多机器人系统的队形保持和避障任务,其队形可以是一些特殊队形,而且算法全局收敛.虽然该算法是针对集中式系统提出的,但也适用于分布式系统.文献[34]讨论了已知部分环境的多机器人系统避障问题,其避障规划器包括两个部分:一部分是慎思式的,用于避开已知地图中的障碍物,另一部分是反应式的,用于避开新出现的障碍物.该方法采用了基于领航者的方法保持队形,并采用了动态窗口法实现避障功能.文献[35]利用Voronoi图方法解决多机器人系统的避障问题,使用该方法时每个机器人只需要知道与其相邻的机器人的位置,而不需要所有机器人之间的相互通信和集中控制,因而适用于分布控制的多机器人系统.

在队形的表示和建模方面,也有一些研究者做出了一些很有参考价值的工作.如文献[59]提出一种新的运动学模型,用笛卡儿坐标建模完成多机器人系统的队形控制;文献[28,60]利用复杂多项式来表示队形,用多项式的根表示机器人的位置,系数表示队形,利用工作空间和队形空间来构造和求解多项式,并把多机器人系统看成一个整体来进行各个机器人的路径规划.文献[61]把 N 个多机器人系统队形问题看成是 $N-1$ 个机器人跟踪领航器

人的问题,采用基于图论的方法保持队形;该方法不需要全局知识,具有较好的适应性,但由于机器人的视野是180度,因此不能形成凹的队形。

近年来一些研究工作者提出了很多新的多移动机器人系统结构用于专门保持队形来完成一些特定的任务。文献[62]讨论了如何通过多机器人系统保持树状队形完成室内环境遇难者的救援工作;文献[63,64]通过多机器人系统保持一定的队形来完成搬运工作;文献[65]提出一种四层混合结构的多机器人系统完成保持队形的任务,这四层结构分别是:任务规划层、队形层、局部控制层和实体层。文献[64]提出一种由航空母舰和其它多个机器人组成的多机器人协作系统,用于保持队形和协作搬运。该系统是分布式和集中式的混合系统,当多个机器人能看到航空母舰时,这些机器人由航空母舰控制,当机器人看不到航空母舰时就采用自主控制策略。

关于队形保持方面具有代表性的工作还有,文献[58]提出一种两层结构的分布式多机器人保持队形系统;文献[66]研究了在多机器人系统保持队形实现定位时,队形形状对定位精度的影响,并通过实验证明圆形的队形定位精度最高;文献[67]阐述了如何通过动态改变信息交互的方式来提高多机器人系统保持队形的稳定性。文献[68]讨论了多机器人系统保持相对队形和绝对队形到达指定目标的时间最优性,而文献[69]则对基于行为的多机器人队形保持方法进行了严格的分析,并提出了基于行为的队形保持方法以保证系统稳定。

3.2 多机器人定位、探索环境和建立地图

多机器人系统覆盖并探索未知动态环境,建立环境地图,并且在完成任务中具有准确的定位能力是对高性能多机器人系统的要求,也是近年来多机器人系统研究的重点和热点。这些问题的研究具有许多潜在的应用前景,如危险环境探索、军用机器人编队攻击、侦察、探雷、清扫核废料、喷洒农药等。在这些领域内,多机器人系统具有单机器人系统所无法比拟的优点。首先,多机器人之间可以彼此交换位置信息,为定位算法提供更丰富的定位参考信息;其次,因为不同的机器人可以装备不同类型的传感器,而且机器人之间可以分享信息,因此,多机器人系统可以获得更多的环境信息,从而提高整个系统的环境探测能力和自定位能力。

文献[70]对前期的多机器人系统环境探索的覆盖问题进行了总结。早期研究主要集中在探索的完全性和无重复性上,而近年来对该问题的研究则开始更多地考虑探索的鲁棒性以及更苛刻条件下的环境探索。如文献[71]着重考虑了多机器人系统

覆盖环境时的鲁棒性,提出了一种MSTC (Multi-robot spanning-tree coverage)算法;文献[72]提出了一种动态连通环境的完全探测方法,该算法尽可能地探索到障碍物附近的一些难以到达的区域,并且充分考虑了如何减少重复探测和时间浪费;但该算法在障碍物间的路径宽度小于机器人探索范围宽度的两倍时可能出现重复探测的现象。文献[73~75]考虑了在有限制的通信情况下的多机器人探索问题。此外,文献[76]提出了一种新的基于边界的协调探索方法,该方法利用K-Means方法把未知区域分成不连接的小区域,每个机器人分别探索自己分配到的区域,在局部探索上具有快速性。

早期的多机器人探索环境和建立地图问题的研究只限于二维室内环境的探索。近年来,已有部分研究工作者开始进行室外环境和三维环境探索问题的研究,而这样的问题也更具有挑战性和使用价值。文献[77,78]考虑了行星探索中可能遇到的如悬崖之类地形的探索问题,并且针对这类任务开发了专用的机器人本体。文献[79,80]提出了多机器人系统在室外环境中利用分布式EKF方法建立环境地图和定位的方法。文献[81]研究了室外无人驾驶车的地图建立问题。

大多数多机器人系统在进行环境探索时都需要机器人具有自定位功能,而只有少数系统不要求机器人具有自定位能力^[82,83]。在多机器人系统定位方面,EKF方法受到了广泛的重视^[79,84~88],还有一些方法采用了粒子滤波方法^[89,90]。文献[79,84]和文献[86]分别介绍了异构传感器结构和同构传感器结构的多机器人系统环境探索问题研究。文献[84]通过机器人之间的相互观察实现定位,是对文献[85]工作的拓展;而文献[87]则研究了运动轨迹对多机器人协调定位精度的影响。

近年来,多机器人探索环境问题的研究中还有很多工作集中在探索任务的分配上^[11~14],而探索环境问题也成为任务分配问题研究的一个重要的实验平台。由于篇幅限制,这里不再介绍。

3.3 多移动机器人合作搬运物体

现实生活中,有许多任务是难以由一个人单独完成的。例如,较长的杆状物体通常需要两个人搬运;长度和重量更大的杆状工件或材料需要三个或更多的人共同搬运;而尺寸较大的板状工件或材料则往往需要四个人共同搬运。同样,当采用移动机器人代替人类完成上述物体的搬运工作时,通常也需要同样数量的机器人进行有效的合作。因此,多机器人合作搬运物体问题研究也是多机器人系统研究的重要组成部分。

多移动机器人合作搬运物体的问题实际上是一个具有约束条件的动态环境下多机器人系统的队形保持问题. 在该问题中对多机器人系统的约束条件是, 参与搬运工作的各个机器人的空间相对位置保持不变, 每个机器人必须具有相同的运动速度和运动方向. 而未知狭窄空间中的多移动机器人合作物体搬运问题则除了上述约束之外, 还需要多机器人系统具有很好的环境感知能力以及根据环境感知信息对各个机器人的路径进行正确规划的能力, 因此难度很大. 尤其是与机器人系统相比, 多机器人合作搬运物体所需通过的空间比较狭窄时, 由于物体的搬运过程中机器人或物体有可能与环境发生碰撞, 因此完成搬运工作的难度更大.

与动态未知环境中多机器人队形保持问题相比, 由于多机器人合作搬运物体问题增加了对各个机器人空间相对位置、运动轨迹等方面的约束, 因此问题的难度也相应增加. 目前国内外关于多机器人合作搬运物体问题的研究并不多见, 其中比较有代表性的主要有以下工作. 文献 [91] 中提出了一种多机器人协调搬运一个物体的分布式控制算法. 当将命令发给某一个机器人时, 该机器人即成为 Leader, 而其它机器人则成为 Followers. Followers 通过力传感器感知物体的运动并跟踪 Leader 的运动. 文献 [92] 对两台机器人合作搬运物体的问题进行了研究, 但研究工作主要集中在两台机器人之间基于柔顺控制的同步方法方面, 而并未考虑环境感知与路径规划的问题. 文献 [63] 提出了一种由一个航空母舰和多个机器人组成的多机器人协作系统, 用于保持队形和协作搬运. 文献 [93] 研究了安装有不同类型机械手的多个移动机器人来共同完成搬运工作的问题, 构造了两种类型的多机器人实验平台用于完成搬运任务, 并同时考虑了简单的避障问题. 文献 [94] 提出了一种能够在未知静态环境下实现多机器人搬运的任务分配结构, 具有能够适应多种不断变化的任务, 并且具有比较好的实时性. 该论文中采用了两个实时规划器: 一个基于优先级的任务分配规划器和一个基于实时估计的运动规划器, 并将所有的任务都分解为单个机器人能够在短时间内完成的子任务. 文献 [95] 介绍了一种船体分段对接系统, 可以很好地实现多段船体的对接并在此基础上进行高精度焊接工作. 但该系统完全工作于结构化环境, 在完成任务的整个过程中采用集中式控制方式, 各个机器人完全按照事先规划好的轨迹运动, 而不需要根据环境感知信息对各个机器人的轨迹进行实时规划.

虽然多机器人系统在狭窄空间中完成搬运工作的研究也非常重要, 但到目前为止, 国内外对工作于狭窄空间中的多机器人系统的研究还很少, 其中有

代表性的研究工作主要是美国南加州大学 Richard T. Vaughan 所在的研究组的工作 [96, 97]. 其主要集中在如何解决多机器人系统在狭窄空间中工作时的相互影响问题. 由于在工作过程中并没有全局知识, 因此各个机器人在进入能够相互感知到的范围内时开始进入竞争过程, 竞争函数取值较大的机器人将赢得竞争. 该研究组的工作重点是竞争函数的选取和设计, 并通过合理设计竞争函数而解决多机器人系统的死锁和机器人之间的路径冲突等问题.

4 多移动机器人系统有待解决的若干重要问题

近年来, 多移动机器人系统的研究得到了迅速发展. 但是, 由于多机器人系统的研究涉及到多个领域和学科, 因此其发展也受到相关学科和技术发展的限制. 除了感知能力、控制系统实现等硬件方面上的限制之外, 多机器人系统的一些问题在理论上也还没有得到很好的解决. 多机器人系统作为一个研究领域, 其理论框架和实现方法均需要得到进一步完善.

作者认为, 目前多移动机器人系统研究中有待解决的几个主要问题如下:

1) 基于多机器人信息融合的环境感知与任务规划

多机器人系统可以利用分布式控制的特点, 较好地解决单台机器人无法完整地感知自身所处环境的问题. 但是, 因为系统中每一台机器人自身的环境感知能力仍然有限, 因此, 如何构建合理的信息框架, 对各个机器人所感知到的环境信息进行合理融合, 并在此基础上进行任务规划和运动规划, 是多机器人系统必须解决的重要问题.

2) 非完整运动约束对运动规划的影响

在实际应用中, 大多数移动机器人具有非完整运动约束特性. 因此, 机器人的运动轨迹控制将受到限制, 而不可能像进行计算机仿真时那样使机器人按照任意给定的轨迹运动. 因此, 当多机器人系统中存在具有非完整运动约束特性的移动机器人时, 必须充分考虑机器人自身的运动学特性对任务规划和运动规划带来的影响和限制, 并在此基础上找到最佳方案.

3) 协调控制策略的选择

移动机器人的控制策略可以分为反应式和慎思式两种类型. 反应式控制方式具有较好的实时性, 但难以完成复杂任务; 慎思式控制方式可以完成复杂任务, 但往往实时性较差. 而对于多机器人系统来说, 因为在大多数情况下系统中各个机器人处于不同环境, 如果仅仅依靠反应式控制方式, 各机器人之

间很容易出现相互冲突的情况. 因此, 如何根据任务的具体特点, 将反应式和慎思式这两种控制方式进行合理结合, 并在此基础上进行任务规划和运动规划, 将是多机器人系统研究必须解决的重要问题.

4) 多机器人系统的遥控操作控制

由于机器人自身的智能程度难以达到完成复杂任务的水平, 因此, 对于许多复杂任务来说, 采用遥控操作控制方式将是一种很好的选择. 虽然单机器人的遥控操作控制问题已经取得了许多研究成果, 但是, 对于多机器人系统来说, 由同样数量的操作人员同时进行操作显然不是一种很好的控制方式 (虽然在某些情况下可以由多个操作人员同时进行操作). 因此, 如何解决由一个 (或几个) 操作人员对多机器人系统进行遥控操作控制, 使其能够很好地完成给定任务也是一个重要问题.

5) 降低系统对通信速度的依赖

高性能多移动机器人系统应当具有良好的内部通信能力. 理想的情况是, 系统中所有的机器人之间都可以实现实时通信, 从而使每台机器人都可以根据自身和其它机器人的信息实时进行任务规划和运动规划. 但是, 虽然近年来无线通讯技术已经得到很好发展, 但在目前的技术条件下, 在多机器人系统中实现所有机器人之间的点对点实时通讯还有较大困难. 这也是大多数多机器人系统仍然采用集中通讯方式的主要原因. 因此, 如何降低多机器人系统对通信速度的依赖程度也是一个非常重要的问题.

6) 基于实际系统的协调控制策略验证

多机器人系统协调控制策略理论研究方面已经得到了许多研究成果. 由于实验条件的限制, 许多理论和算法难以通过实际的多机器人系统进行验证. 因此, 研究人员往往在自己提出的假设条件下, 通过计算机仿真对所提方法进行验证. 但是, 由于这些假设往往过于理想, 在目前的技术条件下, 实际的机器人系统很难满足这些假设. 因此, 如何根据机器人的实际情况, 有效地利用已有的多机器人系统理论和算法, 也是一个急待解决的重要问题.

以上列举的只是多机器人系统领域内急需解决的部分问题. 多机器人系统研究涉及到的领域和学科很多, 在科研工作者的共同努力下, 许多问题将随着其它相关学科和技术的发展得到解决, 多机器人系统也将在更多领域得到实际应用.

References

- 1 *Autonomous Robots*, 1997, 4(1): 1~153
- 2 *Autonomous Robots*, 2000, 8(3): 207~383
- 3 Arai T, Pagello E, Parker L. *IEEE Transactions on Robotics and Automation (Special Issue on Advances in Multirobot Systems)*, 2002, 18(5): 655~864
- 4 Cao Y, Fukunaga A, Khang A. Cooperative mobile robotics: antecedents and directions. *Autonomous Robots*, 1997, 4(1): 7~27
- 5 Dudek G, Jenkin E, Wilkes D. A taxonomy for swarm robots. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 1993. 441~447
- 6 Stone P, Veloso M. Multiagent systems: a survey from a machine learning perspective. *Autonomous Robotics*, 2000, 8(3): 345~383
- 7 Farinelli A, Iocchi L, Nardi D. Multirobot systems: a classification focused on coordination. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B: Cybernetics*, 2004, 34(5): 2015~2028
- 8 Gerkey B P, Mataric M J. Multi-robot task allocation: analyzing the complexity and optimality of key architectures. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2003. 3862~3868
- 9 Tan Min, Wang Shuo, Cao Zhi-Qiang. *Multi-robot Systems*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005
(谭民, 王硕, 曹志强. 多机器人系统. 清华大学出版社, 2005)
- 10 Gerkey B P, Mataric M J. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems. *The International Journal of Robotics Research*, 2004, 23(9): 939~954
- 11 Berhault M, Huang H, Keskinocak P, Koenig S, Elmaghraby W, Griffin P, Kleywegt A. Robot exploration with combinatorial auctions. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2003. 1957~1962
- 12 Zlot R, Stentz A, Dias M B, Thayer S. Multi-robot exploration controlled by a market economy. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2002. 3016~3023
- 13 Martinez V F, Sklar E, Parsons S. Exploring auction mechanisms for role assignment in teams of autonomous robots. *RoboCup 2004: Robot Soccer World Cup VIII (Lecture Notes in Computer Science)*. Berlin: Springer, 2005. 532~539
- 14 Kalra N, Ferguson D, Stentz A. Hoplitest: a market-based framework for planned tight coordination in multirobot teams. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2005. 1182~1189
- 15 Kose H, Tatlidede U, Mericli C, Kaplan K, Akin H L. Q-learning based market-driven multi-agent collaboration in robot soccer. In: *Proceedings of the Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks*. Izmir, Turkey, 2004. 10~21
- 16 Zlot R, Stentz A. Complex task allocation for multiple robots. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2005. 1527~1534
- 17 Gerkey B P, Mataric M J. Sold!: auction methods for multi-robot coordination. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(5): 758~768
- 18 Dias M B, Ghanem B, Stentz A. Improving cost estimation in market-based coordination of a distributed sensing task. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2005. 240~245
- 19 Dias M B, Zlot R, Kalra N, Stentz A. Market-based multi-robot coordination: a survey and analysis. *Proceedings of the IEEE: Special Issue on Multi-robot Systems*, 2006, 94(7): 1257~1270

- 20 Lin L, Zheng Z Q. Combinatorial bids based multi-robot task allocation method. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005. 1157~1162
- 21 Tang F, Parker L E. ASyMTR: automated synthesis of multi-robot task solutions through software reconfiguration. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005. 1513~1520
- 22 Dahl T S, Mataric M J, Sukhatme G S. Multi-robot task-allocation through vacancy chains. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2003. 2293~2298
- 23 Palmer D, Kirschenbaum M, Murton J, Zajac K, Kovacina M, Vaidyanathan R. Decentralized cooperative auction for multiple agent task allocation using synchronized random number generators. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2003. 1963~1968
- 24 Batalin M A, Sukhatme G S. Using a sensor network for distributed multi-robot task allocation. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004. 158~164
- 25 Zhang F, Chen W D, Xi Y G. Improving collaboration through fusion of bid information for market-based multi-robot exploration. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005. 1169~1174
- 26 Ostergaard E H, Mataric M J, Sukhatme G S. Multi-robot task allocation in the light of uncertainty. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2002. 3002~3007
- 27 Hanna H. Decentralized approach for multi-robot task allocation problem with uncertain task execution. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2005. 538~543
- 28 Kloder S, Hutchinson S. Path planning for permutation-invariant multi-robot formations. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2005. 1809~1814
- 29 Todt E, Raush G, Suarez R. Analysis and classification of multiple robot coordination methods. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2000. 3158~3163
- 30 Lee L F. Decentralized Motion Planning within an Artificial Potential Framework (APF) for Cooperative Payload Transport by Multi-robot Collectives [Ph.D. dissertation], State University of New York, 2004
- 31 Herbert G, Kumar T M. Towards decentralization of multi-robot navigation functions. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005. 4143~4148
- 32 Ren J, Mclsaac K A. A hybrid-systems approach to potential field navigation for a multi-robot team. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2003. 3875~3880
- 33 Tews A D, Sukhatme G S, Mataric M J. A multi-robot approach to stealthy navigation in the presence of an observer. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004. 2379~2385
- 34 Ogren P, Leonard N E. Obstacle avoidance in formation. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2003. 2492~2497
- 35 Lindhe M, Ogren P, Johansson K H. Flocking with obstacle avoidance: a new distributed coordination algorithm based on voronoi partitions. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005. 1797~1802
- 36 Li T Y, Chou H C. Motion planning for a crowd of robots. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2003. 4215~4221
- 37 Kamphuis A, Overmars M H. Motion planning for coherent groups of entities. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004. 3815~3820
- 38 Kamio S, Iba H. Random sampling algorithm for multi-agent cooperation planning. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2005. 1676~1681
- 39 Bruce J, Veloso M. Real-time randomized path planning for robot navigation. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2002. 2383~2388
- 40 Okada K, Inaba M, Inoue H. Walking navigation system of humanoid robot using stereo vision based floor recognition and path planning with multi-layered body image. In: Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2003. 2155~2160
- 41 Luo C M, Yang S X, Stacey D A. Real-time path planning with deadlock avoidance of multiple cleaning robots. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2003. 4080~4085
- 42 Yang S X, Luo C M. A neural network approach to complete coverage path planning. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B: Cybernetics*, 2004, **34**(1): 718~725
- 43 Bahvev S, Momtahan O, Meybodi M R. Multi mobile robot navigation using distributed value function reinforcement learning. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2003. 957~962
- 44 Peng J F, Akella S. Coordinating the motions of multiple robots with kinodynamic constraints. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2003. 4066~4073
- 45 Loizou S G, Dimarogonas D V, Kyriakopoulos K J. Decentralized feedback stabilization of multiple nonholonomic agents. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004. 3012~3017
- 46 Tanner H G, Loizou S G, Kyriakopoulos K J. Nonholonomic navigation and control of cooperating mobile manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, **19**(1): 53~64
- 47 Bhatt R, Tang C P, Krovi V. Geometric motion planning and formation optimization for a fleet of nonholonomic wheeled mobile robots. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004. 3276~3281
- 48 O'Hara K J, Bigio V L, Dodson E R, Irani A J, Walker D B, Balch T R. Physical path planning using the GNATs. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005. 721~726
- 49 Batalin M, Sukhatme G S, Hattig M. Mobile robot navigation using a sensor network. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004. 636~641

- 50 Clark C M, Rock S M, Latomebe J C. Motion planning for multiple mobile robots using dynamic networks. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2003. 4222~4227
- 51 Fredslund J, Mataric M J. A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, **18**(5): 837~846
- 52 Brown R G, Jennings J. A pusher/steerer model for strongly cooperative mobile robot manipulation. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 1995. 562~568
- 53 Mataric M, Nilsson M, Simsarian K. Cooperative multi-robot box-pushing. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Pittsburgh. IEEE, 1995. 556~561
- 54 Wagner A, Arkin R. Multi-robot communication-sensitive reconnaissance. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004. 578~586
- 55 Donald B, Garipey L, Rus D. Distributed manipulation of multiple objects using ropes. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2000. 450~457
- 56 MacKenzie D C. Collaborative tasking of tightly constrained multirobot missions. *Multi-Robot Systems*, 2003, **2**: 39~50
- 57 Lemaire T, Alami R, Lacroix S. A distributed tasks allocation scheme in multi-UAV context. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004. 3622~3627
- 58 Lemay M, Michaud F, Letourneau D, Valin J M. Autonomous initialization of robot formations. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005. 3018~3023
- 59 Li X H, Xiao J Z, Cai Z J. Backstepping based multiple mobile robots formation control. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2005. 1313~1318
- 60 Kloder S, Bhattacharya S, Hutchinson S. A configuration space for permutation-invariant multi-robot formations. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004. 2746~2751
- 61 Shao J Y, Xie G, Yu J Z, Wang L. A tracking controller for motion coordination of multiple mobile robots. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2005. 1331~1336
- 62 Matsuo Y, Tamura Y. Tree formation multi-robot system for victim search in a devastated indoor space. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2004. 1071~1076
- 63 Wang Z D, Hirata Y, Kosuge K. Control a rigid caging formation for cooperative object transportation by multiple mobile robots. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2004. 1580~1585
- 64 Yamakita M, Saito M. Formation control of SMC with multiple coordiante systems. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2004. 1023~1028
- 65 Chio T S, Tarn T J. Rules and control strategies of multi-robot team moving in hierarchical formation. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2003. 2701~2706
- 66 Hidaka Y S, Mourikis A I, Roumeliotis S I. Optimal formations for cooperative localization of mobile robots. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005. 4137~4142
- 67 Li Y M, Chen X. Stability on multi-robot formation with dynamic interaction topologies. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2005. 1325~1330
- 68 Furukawa T. Time-optimal cooperative control of multiple robot vehicles. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2003. 944~950
- 69 Lawton J, Young B, Beard R. A decentralized approach to elementary formation manoeuvres. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2000. 2728~2733
- 70 Choset H. Coverage for robotics: a survey of recent results. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 2001, **31**(1): 113~126
- 71 Hazon N, Kaminka G A. Redundancy, efficiency and robustness in multi-robot coverage. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005. 747~753
- 72 Ge S Z, Fua C. Complete multi-robot coverage of unknown environments with minimum repeated coverage. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005. 727~732
- 73 Rekleitis I, Shue V L, New A P, Choset H. Limited communication, multi-robot team based coverage. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004. 3462~3468
- 74 Burgard W, Moors K, Stachniss C, Schneider F E. Coordinated multi-robot exploration. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, **21**(3): 376~386
- 75 Sheng W H, Yang Q Y, Song C, Xi N. Multi-robot area exploration with limited-range communications. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2004. 1414~1419
- 76 Solannas A, Garcia M A. Coordinated multi-robot exploration through unsupervised clustering of unknown space. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2004. 717~721
- 77 Paulsen G L, Farritor S, Huntsberger T L, Aghazarian H. All terrain exploration with the cliff-bot system. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005. 733~738
- 78 Mumm E, Farritor S, Pirjanian P, Leger C, Schenker P. Planetary cliff descent using cooperative robots. *Autonomous Robots*, 2004, **16**(3): 259~272
- 79 Madhavan R, Freegene K, Parker L E. Distributed cooperative outdoor multirobot localization and mapping. *Autonomous Robots*, 2004, **17**(1): 23~29
- 80 Gning A, Bonnifait P. Dynamic vehicle localization using constraints propagation techniques on intervals: a comparison with Kalman filtering. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005. 4155~4160
- 81 Fregene K, Madhavan R, Kennedy D. Coordinated control of multiple terrain mapping UGVs. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004. 4210~4215

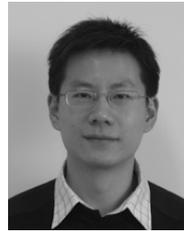
- 82 Cheng C K, Leng G. Cooperative search algorithm for distributed autonomous robots. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2004. 394~399
- 83 Batalin M A, Sukhatme G S. Efficient exploration without localization. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2003. 2714~2719
- 84 Martinelli A, Pont F, Siegwart R. Multi-robot localization using relative observations. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005. 2808~2813
- 85 Roumeliotis S I, Bekey G A. Distributed multirobot localization. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 2002, **18**(5): 781~795
- 86 Roumeliotis S I, Rekleitis I M. Analysis of multirobot localization uncertainty propagation. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2003. 1763~1770
- 87 Trawny N, Barfoot T. Optimized motion strategies for cooperative localization of mobile robots. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004. 1027~1032
- 88 Schneider F E, Widermuth D, Moors M. Methods and experiments for hazardous area activities using a multi-robot system. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004. 3559~3564
- 89 Rekleitis I M, Milios G D E. Experiments in free space triangulation using cooperative localization. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2003. 1777~1782
- 90 Montesano L, Montano L, Burgard W. Relative localization for pairs of robots based on unidentifiable moving features. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2004. 1537~1543
- 91 Kosuge K, Oosumi T. Load sharing of decentralized-controlled multiple mobile robots handling a single object. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1997. 3373~3378
- 92 Wang Z D, Hirata Y. Control a rigid caging formation for cooperative object transportation by multiple mobile robots. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004. 1580~1585
- 93 Yamamoto Y, Hiyama Y, Hujita A. Semi-autonomous reconfiguration of wheeled mobile robots in coordination. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004. 3456~3461
- 94 Natsuki M, Jun O, Tamio A. Cooperative transport by multiple mobile robots in unknown static environments associated with real-time task assignment. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, **18**(5): 769~780
- 95 Wang Yue. Research on Coordination and Control of Multi-robot System in Modular Shipbuilding [Ph. D. dissertation]. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2003 (王跃. 船体模块化建造中多机器人协调与应用研究 [博士学位论文]. 中国科学院自动化研究所, 2003)
- 96 Vaughan R, Stoy K, Sukhatme G, Mataric M. Go ahead, make my day: robot conflict resolution by aggressive competition. In: Proceedings of International Conference on Simulation of Adaptive Behaviour. Paris, France, 2000
- 97 Brown S, Zuluaga M, Zhang Y N, Vaughan R T. Rational aggressive behaviour reduces interference in a mobile robot team. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005. 741~748



原 魁 中国科学院自动化研究所研究员。主要研究方向为机器人技术、智能控制和人机交互。本文通信作者。

E-mail: kui.yuan@mail.ia.ac.cn

(**YUAN Kui** Professor at Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers robotics, intelligent control, and human computer interaction. Corresponding author of this paper.)



李 园 中国科学院自动化研究所博士研究生。主要研究方向为多机器人系统和智能控制。E-mail: yli@hitc.ia.ac.cn

(**LI Yuan** Ph. D. candidate at Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers multi-robot systems and intelligent control.)



房立新 中国科学院自动化研究所博士研究生。主要研究方向为多机器人系统和智能控制。

E-mail: lxfang@hitc.ia.ac.cn

(**FANG Li-Xin** Ph. D. candidate at Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers multi-robot systems and intelligent control.)