

异构多机器人协作系统研究进展

石志国,王志良,刘冀伟

(北京科技大学 信息工程学院,北京 100083)

摘要:异构多机器人系统可以发挥单一结构机器人在某个领域的优点而达到整体的最优配置,机器人的功能和接口协议对协作系统影响很大.IGRS协议是我国在信息设备协作领域中惟一的国际标准,为异构多机器人协作提供了有效的支持.对国内外相关研究进行系统地归纳和总结,找出需要解决的问题,并在课题组研制的多种机器人平台上,从3个方面阐述了基于IGRS协议的异构多机器人协作系统:异构机器人的定位、通信以及感知方案;异构机器人协商策略和分组方案;机器人的功能分类和规划,提出了细粒度可控的任务委托分配方案.

关键词:多机器人;异构;IGRS协议;协作

中图分类号:TP12 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-4785(2009)05-0377-15

Developments in heterogeneous multi-robot cooperation systems

SHI Zhi-guo, WANG Zhi-liang, LIU Ji-wei

(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Heterogeneous multi-robot cooperation systems can create globally optimal configurations by taking full advantage of single-structure robots in some areas. The capabilities and protocols available for robot interaction have significant effects on their ability to act cooperatively. The integrated GPS radio system (IGRS) protocol is an international standard used for positional data in China. It provides effective communication for heterogeneous multi-robot cooperation systems. The current research and development situation was systematically reviewed and summarized, allowing problems remaining to be solved to be outlined. On the basis of several robot platforms made by our research group, the advantages of heterogeneous multi-robot cooperation systems based on the IGRS protocol were elaborated. This shows up in three areas: locating robots through an IGRS communication and spatial perception scheme; dynamic grouping and negotiation strategies; functional classification and planning. A scheme for grain control of the tasks of a principal-agent was then developed.

Keywords: multi-robot; heterogeneous; IGRS protocol; cooperation

多机器人研究始于20世纪80年代末,之前的研究主要集中在单机器人系统或者分布式多任务系统,内容主要包括3个方面^[1]:1)可装配机器人系统;2)多机器人运动规划;3)多机器人协作框架.近年来,多机器人系统研究取得了很大进展,在很多领域取得了不错的研究成果^[2].例如:多机器人的体系结构、感知与多传感器的信息融合、通信与协商、学习、运动规划、任务分配、冲突消解、碰撞规划以及系统实现^[3]等等.

协作是多机器人系统的一个重要特征,也是评价多机器人系统的一个关键指标^[4].多机器人系统通过协作,可以完成单个机器人无法实现的功能;并且不再是物理意义上的单机器人作用的线性求和,还包括一个“线性和”之外的基于个体交互的增量^[5],从而提高了系统的整体性能.

本文对国内外相关研究进行系统地归纳和总结,找出需要解决的问题,并在课题组研制的多种机器人平台上,从3个方面对基于IGRS协议的异构多机器人协作系统进行阐述.第1节介绍IGRS协议;第2节从总体上分析面临的困难与挑战;第3节对国内外相关研究进行归类与比较;第4节从3方面提出一些研究方案;第5节归纳总结全文.

收稿日期:2009-04-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60903067);国家“863”计划资助项目(2007AA01Z160,2007AA04Z218).

通信作者:石志国. E-mail: szg@ies.ustb.edu.cn.

1 IGRS 协议

在多机器人研究领域,异构机器人协作技术特别受关注^[6].从实际应用的角度来讲,构成一个机器人团队的单个机器人往往存在设计上、结构上、传感器配置上乃至智能上的差异,因此多机器人系统不可能是同构系统,工业生产线上机器人更是如此.异构机器人可以发挥单一结构机器人在某个领域的优点而达到整体的最优配置^[7].对于异构机器人,目前的研究主要包括^[8]:个体机器人测度的差异性、个体机器人对异构体的兼容程度、异构机器人之间的通讯问题、异构机器人硬件系统的快速配置、个体机器人的定位等.

机电一体化领域和控制领域已经开发了一些通用的接口设备作为机器人的控制器和执行机构,但是仍然缺乏一种更柔性、更方便的开放接口设备.目前绝大部分的机器人伺服系统还使用专用的伺服控制器和伺服接口板^[7],在设计制造这种封闭式结构系统时,一般不会考虑系统的柔性和开放性,也不会考虑多机器人的集成协作问题,因此要进行多机器人协作将会非常复杂.随着对高质量的集成机电系统的需求不断增加,目前已经出现许多柔性非常好、性能也非常高的机电一体化设备,如数据采集和信号处理板、伺服控制器、多轴控制器和位置控制器等设备,这些设备以及它们所提供的设备驱动程序,使得在使用这些设备时非常直接和简单.但是,不同的控制器由于缺少统一的接口协议,协作系统的可扩展性受到了很大的限制^[9].

在协作系统接口协议以及标准方面,我国一直

落后于世界的发展水平,大多采用由国外制定的协议和标准.如果实行规模化商业应用,要花费高额的专利使用费,从而影响了民族自主产业的发展.闪联(intelligent grouping and resource sharing, IGRS)协议^[10]的诞生填补了我国在协同领域的标准空白.2003年7月17日,由原信息产业部科技司批准,“信息设备资源共享协同服务(IGRS)”工作组正式成立,并制定相应的标准规范.2005年6月,IGRS标准正式获得批准成为国家推荐性行业标准,成为我国第一个3C协同技术标准.2008年7月《信息设备资源共享协同服务测试验证》(ISO/IEC 14543-5-4)通过ISO/IEC JTC1 SC25的FDIS阶段投票,正式成为国际标准^[11].2008年10月,IGRS基础协议(ISO/IEC 14543-5-1)和应用框架协议(ISO/IEC 14543-5-22)通过了ISO/IEC草案阶段的投票.IGRS体系是未来信息产业发展的一项基础和关键性标准,也是我国自主研发的并具有自主知识产权的技术标准体系,也是我国在协同技术领域惟一的国际标准.

IGRS协议的目的是实现各种信息设备在办公室、家庭和公共区域环境中的自动组网、资源共享及协同服务中的应用.通过定义一系列的协议标准,支持多种异构智能信息设备、家用电器和通讯设备之间的自动发现、动态组网、资源共享和协同服务;从而提高设备的互操作性和易用性,发挥不同设备的功能特点并创造新的应用模式.IGRS协议为异构多机器人协作提供了有效的途径,同时还支持机器人、电子设备和通信设备之间协作,如图1所示.

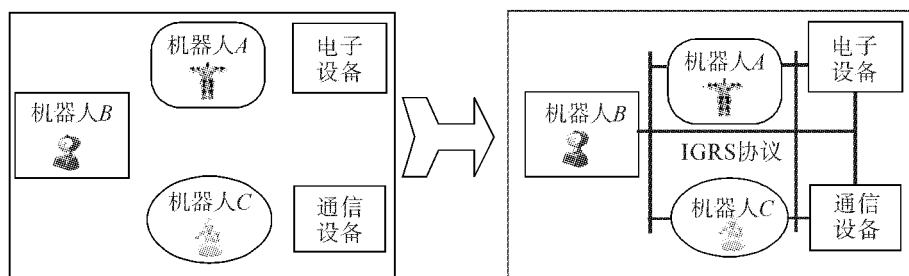


图1 基于IGRS协议的协作系统

Fig. 1 Cooperation system based on IGRS protocol

IGRS协议可以为异构多机器人系统提供一致的通信规范,提高了资源和计算能力在异构系统中的可扩展性.在IGRS协议基础上研究异构多机器人系统,有利于促进异构多机器人协作系统的发展.

2 面临的问题与挑战

经历了20多年的研究,多机器人协作依然面临

众多问题,尤其是异构机器人的协作问题.例如:如何对多机器人进行有效地组织、对不同功能的机器人进行区分、按照异构机器人的特长进行相应的资源和任务分配.系统需要解决如下问题:系统的可扩展性^[12]、通信协议异构性问题、功能异构性问题、异构多机器人协作问题、空间感知和任务分配问题^[13]等等.

2.1 异构性问题

传统的机器人通常根据封闭结构系统的原则来构建,根据需求或者机器人本身的基本功能配置来制造机器人系统^[7]. 通信协议异同和机器人功能异同使得异构机器人系统存在以下问题^[14]:1) 机器人系统柔性不足;2) 机器人工作对象改变时需要太多的准备和系统时间的重新设置;3) 机器人在复杂的制造系统中使用困难;4) 非开放的系统与通信结构.

IGRS 协议定义了设备协同服务的规范,适用于在一定范围内通过有线或无线的方式进行协作,可以解决传统异构机器人系统中的柔性不足和非开放结构的问题. 但是,协作系统依然面临新的挑战:1) 如何设计 IGRS 协议的机器人接口模块;2) 如何规划异构多机器人的体系结构和协作模型;3) 如何建立验证与测试平台.

2.2 空间感知问题

协作系统中的机器人应当能够根据空间的变化,应用某种策略做出相应的行为决策^[15]. 若没有空间感知能力,机器人的行为就会失去基础和依靠. 机器人的空间感知问题包括“感觉”和“知道与理解”2个方面^[16]. 其中:与“感觉”对应的研究涉及灵敏、快速和可靠的传感器系统;与“知道与理解”对应的研究是如何更有效融合、利用传感器信息以及将传感器信息与控制系统相结合的问题. 早期机器人装备的传感器主要采用声呐仪、红外传感器、里程计和激光测距仪等. 这些传感器获得的信息都比较单一,应用这些传感器信息建立的模型,其信息内容

不够丰富,实现多机器人之间的数据校准比较困难.

随着网络技术的发展,无线传感器网络技术开始在机器人系统中获得了较为广泛的应用. 机器人可以比较容易地实现相互之间的数据校准,进而较易实现多机器人的全局空间感知,并且无线传感器网络节点组还可以用作机器人的空间定位^[17]. 然而,目前依然面临的挑战主要有:1) 无线传感器数据通信带宽很窄;2) 位精度与传感器节点个数选取问题,需要在精度、计算量与通信量之间寻找平衡;3) 空间感知的协作模型等.

2.3 任务规划问题

任务规划问题是异构多机器人协作系统研究的一个重要内容^[18],根据机器人的不同功能,进行合理的任务规划. 它应考虑一些指标,例如:实时性、鲁棒性、可靠性、性能优化、通信需求、计算需求和规模能力等^[19]. 规划系统面临的挑战包括^[20]:1) 如何分类定义异构机器人的功能;2) 任务控制问题,例如:在某机器人出现了故障、被障碍物阻挡或者电能不足的情况下,需要及时回收任务,如果超出了完成期限,任务需要延迟或撤销;3) 任务再分配问题,机器人接受的任务,如果不在能力范围之内,可以依据一定的规则进行再分配等等.

3 国内外研究现状与发展趋势

文献[21]把多机器人系统前期的研究分成7个方面,如图2所示.

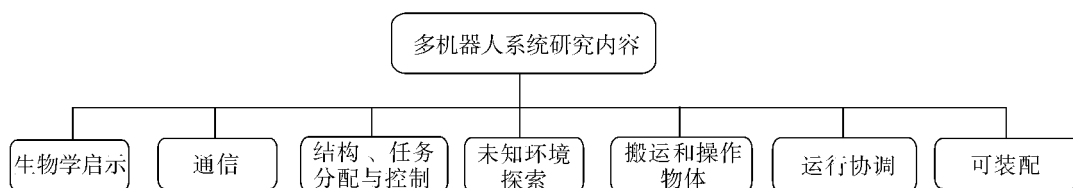


图2 多机器人系统研究内容

Fig. 2 The research content of multi-robot system

同时指出了研究中存在的一些问题^[21]:1) 如何识别和验证多机器人系统的优点和缺点;2) 如何让人更容易地控制多机器人组;3) 如何规划几十到上百个机器人;4) 如何让多机器人在有严格实时性限制的系统中工作;5) 环境任务复杂性如何影响多机器人系统的设计.

近5年来,多机器人系统研究有了很大的进展,例如:任务规划、运行规划、规划策略、队形保持、定

位探索以及合作搬运等方面^[2]. 研究分为两大类:系统规划与协调控制,层次如图3所示. 然而还有很多问题有待解决,主要包括^[2]:1) 基于多机器人信息融合的环境感知与任务规划;2) 非完整运动约束对运动规划的影响;3) 协调控制策略的选择;4) 多机器人系统的远程操作控制;5) 降低系统对通信速度的依赖;6) 基于实际系统的协调控制策略验证.

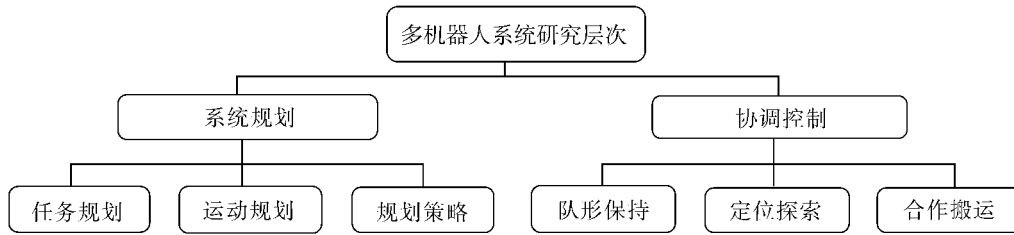


图3 研究的层次结构

Fig.3 The hierarchy of the research

3.1 多机器人协作研究进展

通过多机器人协作可以提高系统的总体性能。除了在性能方面的要求外,多机器人协作系统应当满足4个基本要求^[22]:1)鲁棒性和容错性,出现局部差错和失误时,系统性能不会剧烈降低,系统能够辨别这些失误并做出补偿;2)可靠性,如果机器人多次运行同一任务,能保证绝大多数情况下完成的效果接近;3)灵活性和适应性,根据外部环境的动态变化,系统能够实时地调整自身的行为选择和协调模式;4)一致性,系统作为一个整体运作。

根据协作机制不同,多机器人协作包括2类^[5, 22]:无意识协作和有意识协作。无意识协作是指一群同构机器人,通常是功能简单而数量众多的

机器人,在没有外部特定干预的情况下,通过个体的工作系统涌现出的合作行为或智能行为。在有意识协作的系统中,个体智能水平相对比较高,所掌握的环境、任务以及机器人的知识也比较全面,机器人的行为更优,同时个体会有一个全局目标,并能根据目标规划自己的行为,因此,有意识协作也称为基于规划的协作。

有意识协作研究方法包括2类^[5]:协商反应式方法和多智能体(multi-Agent system, MAS)方法。协商反应式方法针对多机器人的协作问题,设计控制算法,并将算法在真实或模拟机器人系统上加以实现。MAS方法源自分布式人工智能和多智能体系统理论。它们的优缺点比较如表1所示。

表1 无意识协作和有意识协作的优缺点比较

Table 1 The comparison of intentional and unintentional cooperation system

异构机制	方法	优点	缺点
无意识协作		配置简单,多机器人之间不需要通信,机器人设计简单。	只能做简单重复的工作,不能适应复杂的工作环境。
有意识协作	协商反应式方法	控制器简单分明,设计简单。	对通信量要求相对较高,只适用简单任务。
	MAS方法	理论比较成熟,体系结构、组织方式和策略的理论基础好。	受到传统多 Agent 理论约束,发展受限。

协商反应式方法包括基于协商的方法和基于行为的方法。基于协商的方法借鉴传统人工智能的理论模型^[5],将机器人控制器划分为感知、世界建模、规划和动作4个模块,例如最早的分布式多机器人系统 ACTRESS^[23],另外还有大量文献^[24-27]都进行了相关研究。基于行为的多机器人协作代表性架构是 ALLIANCE^[22],它通过协调不同激励行为的输出,实现对多机器人系统的容错控制以及顺序任务分配。基于行为的方法对环境变化有快速的反应能力,但只适合比较简单的任务。

MAS方法理论比较成熟,体系结构、组织方式和策略的理论基础好;但受到传统多 Agent 理论约束,发展受限。MAS系统与多机器人系统之间虽然在研究对象上存在一定的差别,但两者有着本质的

联系,多机器人系统与 MAS 系统有非常类似的拓扑结构、组织方式和运行机制,两者只是在行为方式和生存环境上不一样^[28]。用多智能体系统理论进行多机器人协作研究,特点是把系统中的每个机器人看成独立的智能体,这样的多机器人系统就成为多智能体机器人系统,可以借鉴多智能体的体系结构、组织方式和协商策略等方面的研究成果,并将它们应用到多机器人系统中^[5]。

3.2 异构多机器人系统研究进展

针对异构多机器人的代表性研究是 L. E. Parker 的工作。1994 年她在 MIT 的博士论文^[22]中对异构多机器人协作做了深入的研究,随后 Parker 一直在 University of Tennessee 从事异构多机器人系统的研究工作,并继续她博士期间对 ALLIANCE 异构多

机器人协作的研究.

近几年来,Parker 设计的异构多机器人协作系统包括 SDR^[29]、ASyMTRe^[30-31] 和 ASyMTRe-D^[32]. SDR(software for distributed robotics)是 DARPA/IP-TO 的异构多机器人项目^[29],实现了 100+ 的异构机器人组执行室内可控制的任务. ASyMTRe^[30] 系统支

持异构机器人组在紧密的协作任务中共享传感器信息,它基于图式理论(schema theory),拥有不同能力的机器人组可以产生不同的策略来完成同样的任务^[31]. ASyMTRe-D^[32] 在 ASyMTRe 机制上增加了分布式系统的支持. 它们的优缺点如表 2 所示.

表 2 几种异构机制的优缺点比较
Table 2 The comparison of heterogeneous mechanisms

异构机制	优 点	缺 点
SDR 异构协作机制	使用机器人小组提高执行任务的效率,并由小组领导控制成员机器人. 小组领导的功能较强,例如有“看”的功能.	缺少形式化验证,而且 SDR 是一个软件项目,对其在实际环境系统中的性能评估,并没有过多的涉及.
SyMTRe 异构协作机制	有形式化模型、融合了各类传感器信息,有良好的可靠性和快速解决问题的能力.	没有运动限制,工作环境在室内.
SyMTRe-D 异构协作机制	运算复杂度低,鲁棒性高,需要维护少.	只作了局部的优化处理,对全局优化不够.

Parker 在异构多机器人定位探索领域也做了大量的研究工作. 例如,她的课题组设计了 80 个异构机器人^[33],在 600 m² 的室内环境中进行实验,机器人能够发现和追踪入侵者,并能够将信息传递给远方的操作者;对于室外未知环境,她设计了一组自主移动异构机器人^[34],通过差分 GPS 进行机器人组定位,使用产生的地图信息来规划多机器人的路径并完成任务.

此外,针对异构多机器人的研究,还有大量的工作成果. 文献[35]提出了一种基于知识模型的方法构建异构多机器人系统,这种方法作为自主机器人系统的一个原型,能够使用人类的特点对异构机器人进行知识建模. 文献[36]提出异构多机器人系统高效通信动态任务分配算法,为了实现不同机器人组的可伸缩性,设计了分布式“共享全局单元”的通信机制. 文献[37]针对轮子滑行机器人、四足机器人等软硬件不同的异构机器人设计方案,使机器人系统能够在未知环境下针对自身的特性进行导航协作. 文献[38]提出一种基于“层”架构的多机器人运动协调系统,设计了集中控制系统框架,该系统由一名领导机器人规划其他机器人的运动,并使它们同步.

针对异构机器人的三维空间定位的研究相对较少,文献[39-40]提出了异构多机器人组的三维定位策略,对地上移动机器人和爬墙机器人安装各种传感器,核心目标是让包含 4 个机器人的小组在一个三维环境中协同工作,例如:在地上移动、爬墙或者粘在屋顶上,机器人之间通过协作视觉技术进行动

态定位.

3.3 空间感知研究进展

支持多机器人空间感知的协作环境研究包括定位技术、数据融合、空间信息建模和时空事件订阅与发布等^[16].

1) 定位技术的研究. 由于应用领域、系统环境和精度需求不同,这就需要研究不同类型的定位技术^[41]以便满足不同的需求. 根据定位的位置划分,分为室外定位(基于 GPS 和雷达^[42]等)与室内定位(基于 WLAN、传感器和声音^[43]等);根据定位的方式划分,分为绝对定位和相对定位,目前大部分定位系统都采用绝对定位技术. 为了提高定位精度,还需要研究各种误差补偿技术^[44],常用的定位方法比较如表 3 所示.

2) 多数据源融合研究^[46]. 从多种定位设备获取的对某个目标的定位数据进行综合处理,以便得到更高精度的定位信息.

3) 空间信息建模^[47-49]. 主要研究如何表示和计算空间信息,即如何提供一个与定位技术无关的统一的空间信息模型,使得应用不用关心具体的定位技术.

4) 事件的订阅发布^[50]. 在支持空间位置感知的协作环境中,协作者之间空间位置的变化会产生一些时空事件,时空事件对协作的进行有重要影响,这就需要让用户能够订阅时空事件,系统能够分析、计算和发布时空事件给用户.

表3 机器人定位方法比较
Table 3 The comparison of the robot location

定位方法	优点	缺点
惯性导航	不依赖外界信息,也不向外界辐射能量,不易受到干扰.	需要运动,依赖加速度,得到的是瞬时速度和瞬时位置.
测程法	定位稳定,红外激光技术成熟.	外部环境要求高,成本高.
标识匹配定位 ^[45]	容易安装,维护成本低.	障碍物影响较大.
GPS 定位	适用范围广,服务免费.	到达地面时较弱,不能穿透建筑物,定位器终端的成本较高.
无线传感器定位	通信效率高,低功耗.	需要大范围布置网络节点,初期的成本相对较高.
红外线室内定位	较高的室内定位精度.	容易被荧光灯或者房间内的灯光干扰,仅能视距传播.
超声波定位	定位精度较高,结构简单.	多径效应和非视距传播影响很大,成本太高.
蓝牙	设备体积小,不受视距的影响.	稳定性差,受噪声信号干扰大.
射频识别	体积比较小,造价比较低.	作用距离短.
无线超宽带(UWB)	穿透力强、功耗低、抗多径效果好、安全性高和定位精度高.	适用于局部环境,实现大范围定位,成本高.
WiFi	易于安装,需要很少基站.	易受信号干扰,定位器能耗高.

3.4 任务规划问题研究进展

多机器人系统的任务规划(multi-robot task allocation, MRTA)问题^[2]主要包括任务分解和任务分配2个方面.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思路和框架上,主要采用基于分布式人工智能和多智能体中的任务分配方法^[51-52].

基于市场经济^[53]的任务分配方法来源于早期的合同网^[54](contract net protocol, CNP)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.根据规划策略的不同,多机器人系统可以分为以下4种类型^[2]:1)弱任务规划弱运动规划;2)弱任务规划强运动规划;3)强任务规划弱运动规划;4)强任务规划强运动规划.对任务分配进行形式化理论分析的代表人物是 Gerkey^[55],他将任务分配问题描述成一个最优化问题,目标是使机器人的分配任务效用函数之和为最大.

此外还有很多对任务分配问题的研究工作.文献^[56]提出了一种基于排斥信息素型蚁群算法的多机器人自主任务分配方法,并将该方法应用在一

种具有聚集特征的多机器人搜集任务中.文献^[57]提出了基于 VC(vacancy chains)方法的任务分配方法.文献^[58]依据系统论和非线性科学理论,在分析了现有协同进化模型的局限性及其成因的基础上,基于局部交互的协同进化适应性机制,构造了群体复杂协作行为方案.文献^[59]提出了一种动态任务分配方法,有效地实现了机器人之间的合作,在减少总体任务完成时间的基础上有效降低了系统的通信量,并解决了运行过程中发生的任务死锁现象.文献^[60]提出了一种无竞争多机器人系统的任务分配方法,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他的机器人,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.2008年MIT的McLurkin^[61]总结了4种给机器人分配任务的算法:随机、顺序、同时和基于树分配算法,比较如表4所示.

一些研究工作还针对个性机器人^[62]和家用服务机器人^[63]的规划问题展开了研究,虽然目前这方面

的研究还不多,但可能是未来的一个重要研究方向.

表4 几种任务分配算法比较

Table 4 The comparison of task allocation algorithms

分配方式	通信量	故障率	运行时间	规模数量	网络结构
随机分配	非常少	高	很短	中小规模	依赖性弱
顺序分配	少	中等	比较长	中等	依赖性弱
同时分配	非常大	中等	很短	中等	依赖性弱
基于树分配	中等	中等	中等	中大规模	依赖性强

3.5 IGRS 协议研究进展

随着各种信息设备功能越来越强大以及网络技术特别是无线网络技术的飞速发展,设备间如何更加方便、智能地互联以及更好地协同工作逐步成为人们关注的焦点. 2002 年 11 月 25 日,原信息产业部科技司召集国内各界权威专家在北京召开了智能互联标准研讨会,会上对“智能互联标准,资源共享,协同服务协议”的科学性和必要性进行研讨. 与会专家一致认为,该协议已基本具备了立项的条件. 2003 年 7 月 17 日,IGRS 工作组正式成立,并制定相应的标准规范. 2005 年 6 月,IGRS 标准正式获得批准成为国家推荐性行业标准,并成为我国第一个 3C 协同技术标准^[10].

2006 年 2 月,IGRS 研究列入国家中长期科技发展规划,并于 2006 年 7 月正式获得国际 ISO/IEC 组织立项;2006 年 10 月,IGRS 在国家质量监督检验检疫总局、国家标准化管理委员会首次设立的“中国标准创新贡献奖”评选中,获得信息产业领域一等奖;2007 年 IGRS 标准被列为我国八大重大科技创新事件;2008 年 7 月在 ISO/IEC 最终标准草案的投票中,IGRS 验证规范顺利通过,正式成为国际标准^[11],同年 10 月,基础协议和应用框架协议也通过了 ISO/IEC 草案阶段的投票.

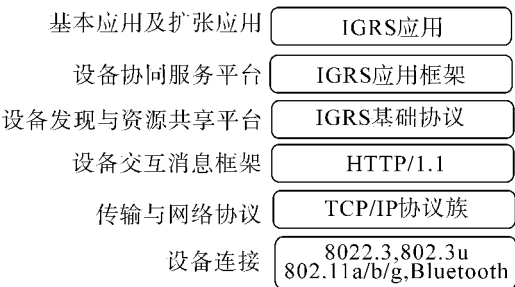


图4 IGRS 的层次结构

Fig. 4 Hierarchy of IGRS

IGRS 协议体系的内涵是智能互联、资源共享和协同服务. IGRS 基础协议定义了交互协议、应用框架、设备交互模式、消息结构、设备服务描述、设备组网、资源共享以及互操作等内容^[10]. 层次结构与基础协议结构

分别如图 4 和图 5 所示. 针对无线泛在网络环境,目前正在制定的 IGRS 2.0 协议体系包括:基础协议、网络设备基础协议、网关协同协议(设备注册、发现和穿越)和低速网络设备基础协议.



图5 基础协议结构

Fig. 5 Structure of basic protocol

IGRS 核心协议的基本功能包括:1) 设备的注册、发现和连接;2) 服务的注册、发现和调用;3) 事件的订阅;4) 设备和服务状态的动态更新和监控;5) 设备和服务描述方法;6) 资源组织管理结构;7) 安全接入方法. IGRS 是我国自主研发的、具有自主知识产权的技术标准体系,其核心发明专利已经在美国、日本和欧洲注册. 预计在 2009 年将有 6 个协议升级为国家标准,并有希望通过投票成为国际标准,如表 5 所示,预计在 2010 年至少有 2 个协议有望升级为国家标准,如表 6 所示.

表5 现有的行标升级为国标

Table 5 Upgrading to national standards

标准草案名称	完成时间
《信息设备资源共享协同服务(IGRS)基础协议》	2009
《信息设备资源共享协同服务(IGRS)应用框架》	2009
《信息设备资源共享协同服务(IGRS)基础应用》	2009
《信息设备资源共享协同服务(IGRS)测试验证》	2009
《信息设备资源共享协同服务(IGRS)设备类型》	2009
《信息设备资源共享协同服务(IGRS)服务类型》	2009

表6 新申请的行标和国标

Table 6 New industrial and national standards

标准草案名称	完成时间
《信息设备资源共享协同服务(IGRS)服务质量协议》	2010
《信息设备资源共享协同服务(IGRS)离线互联接口协议》	2010

在 IGRS 协议基础上研究异构多机器人协作理论,利用 IGRS 智能互联、资源共享的标准以及 IGRS 的自动发现、动态组网、资源共享和协同服务的机制,可以解决机器人通信协议异构的问题,同时可以扩展 IGRS 协议的应用范围,并推进 IGRS 协议体系

的发展.

3.6 小结

从上面的论述可以看出,多机器人协作系统的研究主要集中在任务规划、运动规划、规划策略、队形保持、定位探索以及合作搬运等方面.针对异构多机器人协作的研究主要集中在软件应用层面、室内的无线传感器定位、室外的GPS定位以及信息融合等方面,同时IGRS协议的研究还处于起步阶段.

虽然目前已经取得了一些研究成果,但是在异构多机器人通用接口协议、异构多机器人的功能规划和空间感知建模等方面依然存在很多问题,具体表现在3方面:

1)空间感知问题.目前无论是基于GPS还是基于无线传感器网络的空间定位方法,大多将定位与通信分开.用无线传感器网络进行定位相对较好,但是数据通信带宽很窄,在通信量比较大的场合,例如视频信号的传输,需要借助其他的通信方式.使用新兴的无线超宽带技术UWB(ultra wideband)可以实现定位与通信的一体化,可提供空间15 cm的定位精度和300 Mbps以上的通信带宽.使用IGRS作为定位和通信的接口协议,可以解决接口协议的异构性问题.但是UWB网络节点组的部署以及异构机器人集成还缺乏有效的理论模型的支持和实际系统的指导.

2)动态分组问题.由于异构机器人的功能不同,为了达到特定的目标,可以在一段时间内联合附近的部分机器人形成协作小组.除了功能上的不同,每个机器人的活动范围和感知范围不同,动态分组可以发挥团队中各个机器人的优势,分组机制提高了异构机器人的能力、活动范围和感知范围,从而提高了整体的协作效率.但是目前还没有有效的机器人动态分组理论模型作为实际系统的指导.

3)任务分配问题.异构机器人的功能不同,任务分配时需要考虑机器人具备的功能.由于任务分配者的活动范围以及感知范围有限,不可能与每个机器人直接通信,因此如果允许接受任务的机器人对任务进行再分配,将可以提高任务的执行成功率.然而这样将增加系统的复杂性,对于任务的分配、回收、撤销和确认都需要有力的理论支持.

4 异构多机器人协作系统研究方案

本课题组研制的陪护机器人、双足机器人、解说机器人和玩伴机器人等异构机器人平台,在区域范围内,部署16个固定的UWB网络节点,每个机器人都配置有UWB通信模块,机器人之间、UWB网络

节点之间、机器人与UWB网络节点可以通信,如图6所示.

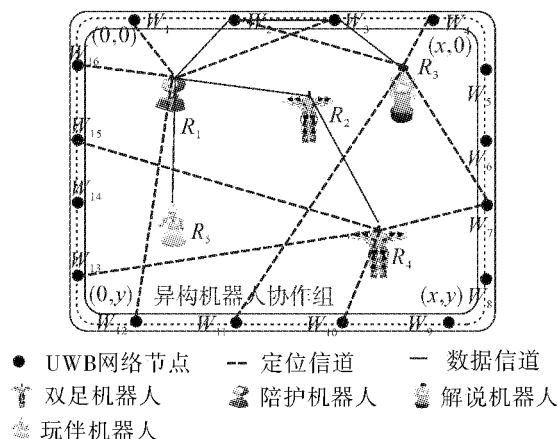


图6 异构多机器人协作简图

Fig. 6 Cooperation of heterogeneous multi-robot system

对于三维空间的定位需求,可以在两侧空间区域部署网络节点,如图7所示.通过增加网络节点的个数,可以扩大覆盖面积,从而增加协作区域的范围.UWB网络节点可以通过相邻的节点与其他节点通信,当2个机器人距离超出直接通信范围时,可以通过网络节点与目标机器人通信.

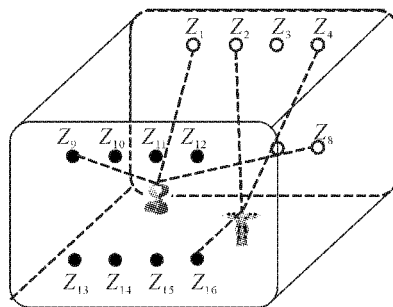


图7 另一种部署方法

Fig. 7 Another method of deployment

采用IGRS作为基础协议对设备信息、空间位置以及机器人功能等信息进行编码,根据可互操作的机器人功能,决定协作的内容和方式.基于IGRS协议的UWB网络节点组不仅能够保证空间定位的可靠性,还解决了异构通信的问题.在此基础上研究3个解决方案:1)异构多机器人空间感知方案;2)异构多机器人动态分组方案;3)基于能力列表的任务委托分配方案.

4.1 异构多机器人空间感知方案

定位算法使用到达时间差的定位技术TDOA (time difference of arrival),该方法基于UWB无线信号传输的时间差来求解机器人与基站之间的距离,进而算出机器人的位置.

在机器人系统中设立定位测量处理单元,测距单元的位置与时钟为系统已知量.机器人与UWB

发射点的距离基于5个变量值算出. 1) T_{lot} : 测距单元接收发射点信号的时间, 以测距单元的时钟为准; 2) T_{mot} : 机器人接收发射点信号的时间, 以机器人的时钟为准; 3) T_e : 机器人内部时钟与测距单元内部时钟之差; 4) L_{dmb} : 机器人与发射点的地理间距; 5) L_{dlb} : 测距单元与发射点的地理间距. 则机器人与发射基站之间距离 L_{dmb} 满足以下公式:

$$L_{\text{dmb}} - L_{\text{dlb}} = V(T_{\text{mot}} - T_{\text{lot}} + T_e).$$

测量出与2个以上发射点的距离就可以计算出机器人位置. 机器人的位置是分别以发射点为圆心, 距离加权误差为半径的同心圆的重叠区域, 这个区域也称为置信椭圆, 如图8所示.

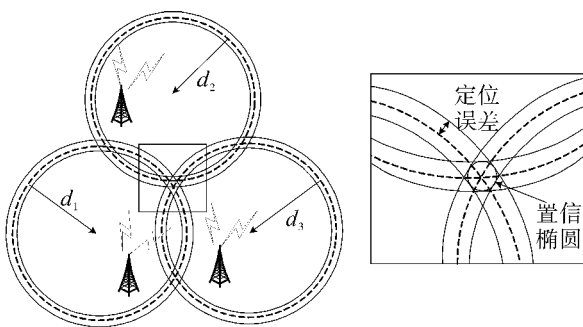


图8 机器人定位以及误差

Fig. 8 Error and robot location

由于无线信号的传输特性, 测量的距离存在一定的误差. 对于实时性要求不高的场合, 可以采用多次计算取平均值的方法降低误差; 如果实时性要求比较高, 可以采用软件补偿的方法降低误差.

使用IGRS协议封装基础数据 T_{lot} 、 T_{mot} 和 T_e , 例如: 机器人 R_1 要将数据发送给机器人 R_2 , IGRS 编码的消息格式为

HOST: R_2

CharSet: utf-8

Content-Length: 128

MAN: "http://www.igrs.org/spec1.0"

01-IGRSVersion: IGRS/1.0

01-IGRSMessageType: IGRS_ROBOT_LOCATION

01-SourceDeviceId: R_1

01-TargetDeviceId: ROBOT

01-ReturnCode: rtnOK

01-AcknowledgeId: 2

MAN: "http://schema.xmlsoap.org/soap/envelop/"

02-SoapAction: LOT

02-SoapAction: MOT

02-SoapAction: E

< SOAP-ENV:Body >

< schema xmlns:IGRS = "http://www.igrs.org/"

spec" targetNamespace = "http://www.igrs.org/spec1.0" >

< element name = "Session" type = "IGRS:SessionType" minOccurs = "0" maxOccurs = "3" >

< complexType name = "Session" >

< type name = "LOT" value = "2.12345" >

< type name = "MOT" value = "2.12344" >

< type name = "E" value = "0.00002" >

</complexType >

</SOAP-ENV:Body >

对于所有遵守IGRS协议的设备, 无论是机器人还是普通的电子设备, 都可以通信和协作, 因此异构概念的外延可以进一步扩大. 根据定位系统得到的位置信息称为实际位置, 实际位置集合用 L_{doc} 表示. 使用逻辑位置域定义机器人的逻辑空间边界, 逻辑位置域组成的集合表示为 L_{ldom} . 位置映射函数为 $f: L_{\text{doc}} \rightarrow L_{\text{ldom}}$, 表示给定一个真实位置 L_{tp} , 返回相应的逻辑位置域. 机器人空间角色 $s_r = (r, l_{\text{ldom}}) \in R \times L_{\text{ldom}}$, 其中 r 表示机器人名称, l_{ldom} 表示机器人的逻辑位置域. 由空间角色组成的集合称为空间角色集, 记为 S_R . 用 T 、 U 、 R 、 S_R 、 O_P 、 O 、 S 、 L_{rloc} 和 L_{ldom} 分别表示协作系统的时间、机器人、角色、空间角色、操作、对象、会话、物理位置和逻辑位置域. 具备空间感知的模型表示为元组 $(T, U, R, S_R, O_P, O, S, L_{\text{rloc}}, L_{\text{ldom}})$.

4.2 异构多机器人动态分组方案

2个以上的机器人可以组成一个协作小组, 在协作小组的存在期间, 其他异构机器人可以通过IGRS协议和组内的机器人进行协商, 并提交加入请求, 当前协作组的管理者, 需要对机器人的能力进行验证, 检查其是否拥有完成目标任务的能力, 并确定是否让它加入. 除此之外, 管理者也可以通过传感器获得感知范围内的机器人列表, 并对具备任务能力的机器人进行邀请.

一个区域环境中, 可能存在多个协作组, 机器人可能同时在2个协作组中. 除了机器人之间可以进行协商, 协作组之间也可以组成新的组. 基于这种机制组成的协作系统, 具备很强的伸缩性和扩展性, 分组框架如图9所示. 图9中协作组1包括多个小组, 协作组2是由3个机器人组成, 协作组3由7个异构机器人组成. 机器人C正在与协作组3的管理者进行协商, 试图加入该组. 组的动态创建、加入包括5个步骤: 1) 创建者首先建立一个组的标识 G ; 2) 机器人C通过IGRS协议向创建者提供自己的能力列表, 并请求加入当前组; 3) 创建者对机器人C的能

力进行验证,通过验证则颁发标识 G ;4) 机器人 C 加入后,组内机器人之间可以共享特定信息和进行协

作,机器人可以请求另外一个机器人;5) 机器人可以对其进行应答。

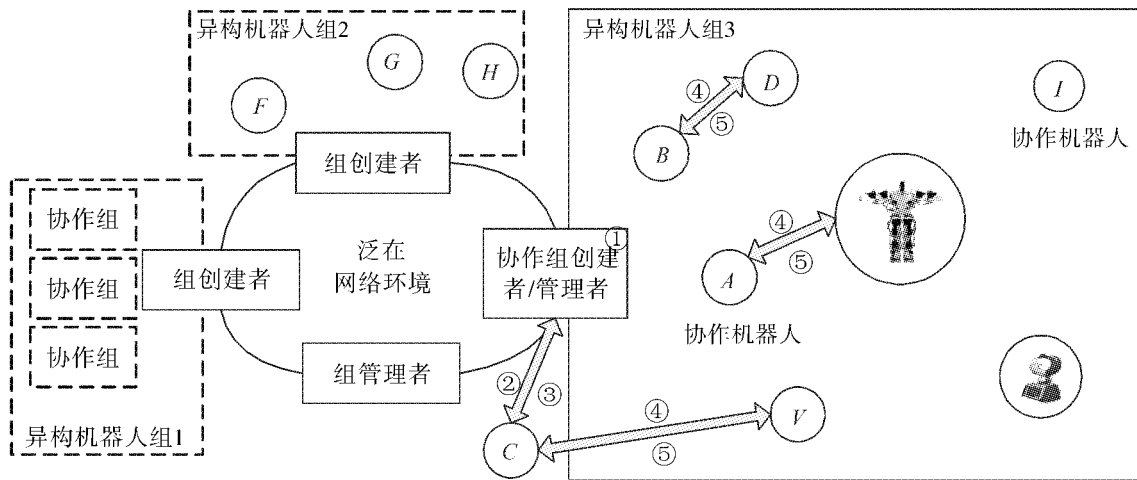


图9 异构多机器人动态分组框架

Fig.9 Dynamic grouping framework of robots

例如,一个具备能力 α 、 β 和 γ 机器人 R_c 请求管理者 R_L 加入该组,IGRS交互协议的消息格式为:

HOST: R_L

CharSet: utf-8

Content-Length: 128

MAN: "http://www.igrs.org/spec1.0"

01-IGRSVersion: IGRS/1.0

01-IGRSMessageType: IGRS_ROBOT_GROUP_JOIN

01-SourceDeviceId: R_c

01-TargetDeviceId: ROBOT

01-ReturnCode: rtnOK

01-AcknowledgeId: 4

MAN: "http://schema.xmlsoap.org/soap/envelop/"

02-SoapAction: ROBOT_CAPABILITY

< SOAP-ENV: Body >

< schema xmlns: IGRS = "http://www.igrs.org/spec" targetNamespace = "http://www.igrs.org/spec1.0" >

< element name = "Session" type = "IGRS: Session-Type" minOccurs = "0" maxOccurs = "3" >

< complexType name = "Session" >

< type name = "ROBOT_CAPABILITY" value = " α " >

< type name = "ROBOT_CAPABILITY" value = " β " >

< type name = "ROBOT_CAPABILITY" value = " γ " >

< /complexType >

< /SOAP-ENV: Body >

机器人通过协商系统实现动态加入并进行协

作. 协商系统由6个部分组成: 标识库、策略库、协商机制、IGRS协议、信息封装机制以及通信载体. 协商过程通常由2个机器人交互完成, 一个协作请求方, 称之为 Requester (记为 R), 另一个是被请求方, 称之为 Mediator (记为 M). 如果有多个请求机器人, 使用下标进行区分, 例如: R_1, R_2, \dots, R_N . 如果有多个被请求机器人, 使用下标进行区分, 例如: M_1, M_2, \dots, M_N . 这里的请求机器人 R 与被请求机器人 M 只针对1次协商过程, 在不同的协商过程中, 一个节点可以是请求方 R , 也可以是被请求方 M .

协商过程中的机器人主体由1个四元组 $\langle \kappa, \tau, \varepsilon, U \rangle$ 构成, 其中: κ 是机器人主体集, 由惟一的标识识别, 使用下标来区分不同的机器人主体; τ 是属性的有限集, 每个属性用 t 表示, 由属性主体与属性名组成, 一个协商主体 κ 唯一对应一个属性集, 包括1个以上的属性; ε 是可以合法颁发标识的有限集; U 是能力的有限集合.

协商系统由2个机器人 R 和 M 组成, 通过IGRS通信协议, 经过不断的协商进行信息交互, 得到协商的最终结果. 协商系统是一个元组 $\langle R, M, S, T, P \rangle$, 其中: R 和 M 分别是协商的2个机器人主体, R 的组成为 $\langle \kappa_R, \tau_R, \varepsilon_R, U_R \rangle$, M 的组成为 $\langle \kappa_M, \tau_M, \varepsilon_M, U_M \rangle$; $S: \varepsilon \rightarrow \kappa$ 是一个函数, $S(e) \in \kappa$ 称为 e 是 κ 的标识; $T: \varepsilon \rightarrow 2^\tau$ 是一个函数, 每个 $T(e)$ 是有限并且非空的.

假设机器人 R 和 M 的响应延迟均在一定的范围之内, 协商的最终结果只能是成功或者失败, 不存在其他的妥协情况. 在此基础上对各个元素的关系进行形式化分析, 创建异构多机器人的动态分组

模型.

4.3 基于能力列表的任务委托分配方案

异构机器人的一个主要特点是每个机器人具备的功能不同,对每个机器人功能进行分类划分得到能力列表.将能力列表分为3类: A 类能力包括听觉、视觉和运动等基本属性,根据每个指标特征使用下标标识再进行细分,例如 A_3 和 A_{41} ; B 类能力包括通信带宽、计算速度和电力储备等内在能力,可以对每个具体指标再进行细分,例如 B_2 和 B_{43} ; C 类能力包括 A 类和 B 类之外的能力,例如友好程度和协作意愿等.

仅依靠传统集中式任务管理不能满足多机器人系统的构建,如果处理复杂庞大的系统,集中式的管理将变得不堪重负.委托作为协调控制的重要组成

部分能够较好地解决这些问题,委托可以有多种形式,例如人-人、人-机器人和机器人-机器人的委托.

例如:异构机器人组 $G_{11}(R_1, R_2, R_3)$ 要完成任务集 T ,执行任务的机器人需要具备 $(A_{12} B_{21} C_{13})$ 能力,机器人 R_1 和 R_3 距离比较远,不能直接通信,系统如图10所示.机器人 R_1 接受任务集 $T(T_1, T_2, T_3)$,将按照能力列表拆解为 $(T_1 \leftarrow A_{12}, T_2 \leftarrow B_{21}, T_3 \leftarrow C_{13})$,机器人 R_1 具备完成 T_2 的能力, R_1 将余下的任务全部委托给机器人 R_2 , R_2 接受的任务为 $(T_1 \leftarrow A_{12}, T_3 \leftarrow C_{13})$,机器人 R_2 具备完成 T_1 的能力,将余下的任务委托给机器人 R_3 .如果某机器人不能完成任务,同时感知范围内也没有能完成该任务的机器人,则将任务交还给任务的原委托人.

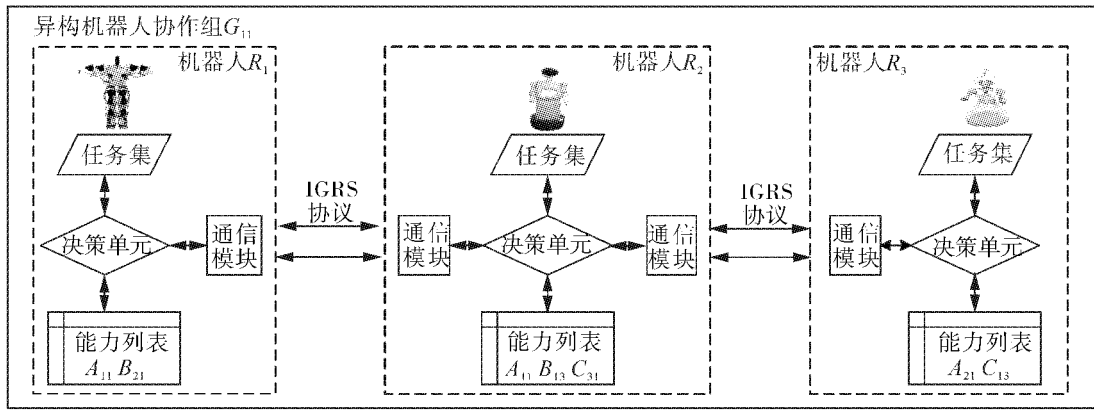


图10 基于能力列表的任务委托分配方案

Fig. 10 Task delegation allocation scenario based on capability lists

在委托过程中,需要提供一种委托约束来有效地限制任务分配权的传播,同时确定任务委托权可适用的时间范围、时序依赖、使用次数以及粒度粗细等.机器人除了需要遵守静态的全局强制性委托限制以外,还能够自主地将其拥有的任务委托给其他机器人.

机器人任务委托系统记为 T_{coop} ,形式化表示为六元组 (s, x, o, g, l, w) ,其中, $s \in R$ 表示任务的接受者, $x \in P$ 是被授予的执行任务的权限, $o \in O$ 是被委托机器人的目标任务集合, $g \in R$ 是表示任务的授予者, $l \in \{1, 0\}$ 表示任务的接受者 s 能(1)否(0)对所获得的任务再进行传播与分配, $w \in \{1, 0\}$ 表示任务授予者 g 是否为任务 o 的所有者.由任务分配组成的集合称为分配集,记为 D .函数 $f_{xo}(T_{coop})$ 和 $f_{sxo}(T_{coop})$ 分别返回 (x, o) 元组和 (s, x, o) 元组.

委托的任务通常要有执行的时间范围,支持时

间限制的委托系统表示为 T_{tcoop} ,由 $([t_b, t_e], p, T_{coop})$ 构成,其中: t_b 表示一个日期, t_e 可以为无穷大常量或者大于、等于 t_b 的日期表达式, p 是周期表达式, $T_{coop} \in D$.由带周期时间限制的协作组成的集合记为 D_t ,把 D_t 划分为 D_{td} 和 D_{ti} ,分别表示任务所有者直接分配的任务和由其他机器人间接分配的任务.其中, $t_b(T_{tcoop}), t_e(T_{tcoop}), p(T_{tcoop}), g(T_{tcoop}), l(T_{tcoop}), w(T_{tcoop})$ 分别返回带周期时间的委托 T_{tcoop} 的 t_b, t_e, p, g, l, w 分量. $f_{sxo}(T_{tcoop})$ 返回接受者信息,即 (s, x, o) 元组. $f_{xo}(T_{tcoop})$ 返回 (x, o) 元组, $f_{tconr}(T_{tcoop})$ 返回周期时间约束 $([t_b, t_e], p)$.

5 结束语

本文针对协作系统的空间感知能力、可扩展能力、高效性和鲁棒性的要求,从3个方面重点探讨了面向通信和功能异同的机器人,研究了它们的协作

问题,使用 IGRS 协议解决通信异构问题,使用能力列表来规划功能异构问题,逐层深入提出 3 个方案:1) 解决异构多机器人空间感知问题,部署多 UWB 节点组解决通信定位一体化问题,并建立空间感知模型;2) 解决异构多机器人动态分组问题,构建基于 IGRS 的协商策略与分组模型;3) 解决基于能力列表的任务委托分配问题,实现能力列表和带限制的委托分配模型. 针对对目前多机器人协作、异构多机器人协作系统进行了系统归纳和比较,提出了研究方案以及未来研究策略. 未来相关的一些研究包括:1) 异构多机器人协作系统的体系结构;2) 针对异构机器人的特点的定位算法、融合算法以及空间感知融合等;3) 更有效并且结合了异构机器人能力特点的任务规划方案;4) 一个完整的实验平台和一套原型系统的建立;5) 在实验平台基础上进行细致的性能评估,并以基础理论为指导进行有效性分析.

参考文献:

- [1] ARAI T, PAGELLO E, PARKER L. Advances in multi-robot systems[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(5): 655-661.
- [2] 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.
- [3] 谭 民, 王 硕, 曹志强. 多机器人系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [4] 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.
- [5] 董煊斌. 多机器人系统的协作研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
DONG Yangbin. A study on multi-robot cooperation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [6] PARKER L, KANNAN B, TANG F, et al. 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.
- [7] 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, 2004.
HU Xudong. Study of the web-based integration of heterogeneous robotic manipulators[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [8] BALCH T, PARKER L E. Special issue on heterogeneous multi-robot systems[J]. Autonomous Robots, 2000, 8(5): 207-208.
- [9] DAVID J, ALEXANDER Z. Grounded symbolic communication between heterogeneous cooperating robots[J]. Autonomous Robots, 2000, 8(3): 269-292.
- [10] IGRS Organization. IGRS protocol[EB/OL]. [2009-01-23]. <http://www.igrs.org>.
- [11] ISO Organization. IGRS protocol[EB/OL]. [2009-01-23]. <http://www.iso.org>.
- [12] LEBLANC K, SAFFIOTTI A. Cooperative anchoring in heterogeneous multi-robot systems[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Pasadena, USA, 2008: 3308-3314.
- [13] BOONPINON N, SUDSANG A. Constrained coverage for heterogeneous multi-robot team [C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Sanya, China, 2007: 799-804.
- [14] PUGH J, MARTINOLI A. Parallel learning in heterogeneous multi-robot swarms[C]//IEEE Congress on Evolutionary Computation. Singapore, 2007: 3839-3846.
- [15] 范 波. 基于 Agent 的多机器人信息融合与协调研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
FAN Bo. A study of multi-robot information fusion and coordination based on Agent[D]. Xi'an: North Western Polytechnical University, 2004.
- [16] 崔修涛. 支持位置感知的协作环境及其关键技术研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
CUI Xiutao. Research on location awareness supported collaborative work environment and key issues[D]. Shanghai: East China Normal University, 2008.
- [17] ROBERT G, LUIS E, NAVARRO S, et al. Heterogeneous teams of modular robots for mapping and exploration[J]. Autonomous Robots, 2000, 8(3): 293-308.
- [18] KIAN H L, LEOW W K, ANG M H. Autonomic mobile sensor network with self-coordinated task allocation and execution[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2006, 36(3): 315-327.
- [19] 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, 2006.
LIU Lin. Research on multi-robot system task allocation and formation control[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [20] STROUPE A, HUNTSBERGER T, OKON A, et al. Behavior-based multi-robot collaboration for autonomous construction tasks [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Alberta, Can-

- ada, 2005: 1495-1500.
- [21] 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.
- [22] PARKER L. Heterogeneous multi-robot cooperation[D]. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [23] ASAMA H, OZAKI K, MATSUMOTO A, et al. Development of task assignment system using communication for multiple autonomous robots[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 1992, 4(2): 122-127.
- [24] 祖丽楠. 多机器人系统自主协作控制与强化学习研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- ZU Linan. Study on autonomous cooperation control and reinforcement learning for multi-robot systems[D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [25] KANNAN B, PARKER L. Metrics for quantifying system performance in intelligent, fault-tolerant multi-robot teams[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). San Diego, USA, 2007: 951-958.
- [26] 陈余庆. 多移动机器人的协作运动控制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- CHEN Yuqing. Research on the cooperative motion control of multiple mobile robots[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [27] 程 磊. 多移动机器人协调控制系统的研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- CHENG Lei. Research and implementation on multiple mobile robots coordination control system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [28] 陈忠泽. 基于 MAS 的多机器人协作系统若干问题的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2001.
- CHEN Zhongze. Study on several issues of cooperative robotics which is based on MAS(multi-Agent system)[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2001.
- [29] PARKER L E. The effect of heterogeneity in teams of 100 + mobile robots[M]//SCHULTZ A, PARKER L E, SCHNEIDER F. Multi-robot systems: from swarms to intelligent automata, Volume II. Berlin: Kluwer, 2003: 205-215.
- [30] 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.
- [31] TANG F, PARKER L E. ASyMTRe: automated synthesis of multi-robot task solutions through software reconfiguration[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Barcelona, 2005: 1501-1508.
- [32] TANG F, PARKER L E. Distributed multi-robot coalition through ASyMTRe-D[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Alberta, Canada, 2005: 2606-2613.
- [33] HOWARD A, PARKER L E, SUKHATME G. Experiments with a large heterogeneous mobile robot team: exploration, mapping, deployment, and detection[J]. International Journal of Robotics Research, 2006, 25(5/6): 431-447.
- [34] PARKER L E, FREGENE K, GUO Yi, et al. Distributed heterogeneous sensing for outdoor multi-robot localization, mapping, and path planning[M]//SCHULTZ A C, PARKER L E. Multi-robot systems: from swarms to intelligent automata. Berlin: Kluwer, 2002: 21-30.
- [35] ZHANG T, HASANUZZAMAN M, AMPORNARAMVETH V, et al. Construction of heterogeneous multi-robot system based on knowledge model[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Hong Kong, China, 2005: 274-279.
- [36] SHAH K, YAN M. Communication-efficient dynamic task scheduling for heterogeneous multi-robot systems[C]//International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA). Jacksonville, USA, 2007: 230-235.
- [37] WANG Qining, XIE Guangming, WANG Long, et al. Integrated heterogeneous multi-robot system for collaborative navigation[C]//Proceedings of the 2007 Frontiers in the Convergence of Bioscience and Information Technologies (FBIT). Jeju Island, Korea, 2007: 651-656.
- [38] MARCHESE F. A multi-threads architecture for the motion coordination of a heterogeneous multi-robot system[C]//Proceedings of the 2007 Sixth Mexican International Conference on Artificial Intelligence. Aguascalientes, Mexico, 2007: 418-428.
- [39] FENG Yi, ZHU Zhigang, XIAO Jizhong. Heterogeneous multi-robot localization in unknown 3D space[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Beijing, China, 2006: 4533-4538.
- [40] FENG Yi, ZHU Zhigang, XIAO Jizhong. Self-localization of a heterogeneous multi-robot team in constrained 3D space[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). San Diego, USA, 2007: 1343-1350.
- [41] HIGHTOWER J, BORRIELLO G. Location systems for ubiquitous computing[J]. IEEE Computer Supported Cooperative Work, 2001(33): 57-66.

- [42] GANGADHAR D. Emergence of spatial awareness in self configuring sensor networks[C]//International Symposium on Communications and Information Technologies. Sydney, Australia, 2007: 960-965.
- [43] 姜 健, 赵 杰, 李力坤. 面向群智能机器人系统的声音协作定向[J]. 自动化学报, 2007, 33(4): 385-391.
JIANG Jian, ZHAO Jie, LI Likun. Sound-based collaborative direction estimation for swarm robotic systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(4): 385-391.
- [44] 季秀才, 郑志强, 张 辉. SLAM 问题中机器人定位误差分析与控制[J]. 自动化学报, 2008, 34(3): 323-331.
JI Xiucui, ZHENG Zhiqiang, ZHANG Hui. Analysis and control of robot position error in SLAM[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(3): 323-331.
- [45] 郑 睿, 原 魁, 李 园. 一种用于移动机器人室内定位与导航的二维码[J]. 高技术通讯, 2008(4): 369-374.
ZHENG Rui, YUAN Kui, LI Yuan. A 2D code for mobile robot localization and navigation in indoor environments [J]. Chinese High Technology Letters, 2008(4): 369-374.
- [46] MYLLYMAKI J, EDLUND S. Location aggregation from multiple sources [C]//Proceedings of the Third International Conference on Mobile Data Management. Singapore, 2002: 131-138.
- [47] 张 宏, 贺也平, 石志国. 一个支持空间上下文的访问控制形式模型[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2007, 37(2): 254-271.
ZHANG Hong, HE Yeping, SHI Zhiguo. A formal model for access control with supporting spatial context[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2007, 37(2): 254-271.
- [48] BURGARD W, MOORS M, STACHNISS C, et al. Coordinated multi-robot exploration[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(3): 376-386.
- [49] 彭 军. 多智能体系统协作模型及其在足球机器人仿真系统中的应用[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
PENG Jun. Cooperation models of the multi-agent system and application to the RoboCup soccer simulator [D]. Changsha: Zhongnan University, 2005.
- [50] CHEN Y, CHEN X Y, RAO F Y, et al. LORE: an infrastructure to support location-aware service[J]. IBM Journal Research and Development, 2004, 48(5/6): 601-615.
- [51] 严勇杰. 多机器人系统协调与控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
YAN Yongjie. Coordination and control of multi-robot system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.
- [52] 李淑琴. 面向任务的多机器人系统的组织设计研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
LI Shuqin. Study on organization of task-oriented multi-robot system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.
- [53] KALRA N, FERGUSON D, STENTZ A. Hoplites: a market-based framework for planned tight coordination in multi-robot teams[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Barcelona, 2005: 1182-1189.
- [54] SMITH R. The contract net protocol: high level communication and control in a distributed problem solver[J]. IEEE Transactions on Computers, 1980, C29(12): 1104-1113.
- [55] GERKEY B, MATARIC M. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems[J]. The International Journal of Robotics Research, 2004, 23(9): 939-954.
- [56] 姜 健, 臧希喆, 闫继宏, 等. 基于一种蚁群算法的多机器人动态感知任务分配[J]. 机器人, 2008, 30(3): 254-263.
JIANG Jian, ZANG Xizhe, YAN Jihong, et al. Multi-robot dynamically perceived task allocation based on an ant colony algorithm[J]. Robot, 2008, 30(3): 254-263.
- [57] DAHL T, MATARIC M, SUKHATME G. Multi-robot task allocation through vacancy chains[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Taipei, China, 2003: 2293-2298.
- [58] 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.
- [59] 罗 杰, 段建民, 陈建新. 一种引入局部交互的群体协作行为协同进化机制[J]. 机器人, 2007, 29(4): 313-319.
LUO Jie, DUAN Jianmin, CHEN Jianxin. A mechanism of cooperative coevolution with local interaction for collective cooperation behaviors [J]. Robot, 2007, 29(4): 313-319.
- [60] PALMER D, KIRSCHENBAUM M, MURTON J, et al. Decentralized cooperative auction for multiple agent task allocation using synchronized random number generators [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Las Vegas, USA, 2003: 1963-1968.
- [61] MCLURKIN J. Analysis and implementation of distributed algorithms for multi-robot systems[D]. Cambridge, USA:

Massachusetts Institute of Technology, 2008.

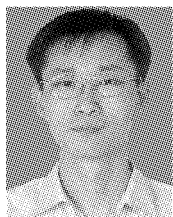
- [62] 丁滢颖. 基于个性的多机器人协作研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.

DING Yingying. Multi-robot cooperation based-on personality[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.

- [63] 郝宗波. 家庭移动服务机器人的若干关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.

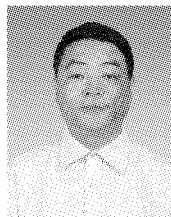
HAO Zongbo. Research on several key technologies of home mobile service robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

作者简介:



石志国,男,1978年生,博士、讲师。中国人工智能学会会员,中国计算机学会会员(E20-0008616M),IGRS通用智能控制(GICP)技术小组成员,IGRS智能设备互联(IAIP)技术小组成员。主要研究方向为协同计算、多机器人系统和

可信技术。作为技术骨干参与完成国家高技术研究发展计划、国家自然科学基金、中国科学院重点项目以及横向课题多项。获图书奖2项。在国内外期刊和学术会议上发表学术论文12篇,其中被SCI收录1篇,EI收录8篇,出版编著5部。



王志良,男,1956年生,博士、国家二级教授、博士生导师。享受国务院特殊津贴专家,北京科技大学电子信息系主任,中国人工智能学会人工心理与人工情感专业委员会主任,第一届国际情感计算和智能交互学术大会主席。主要

研究方向为机器人技术、和谐人机交互理论与方法、人工心理和生物特征识别。近年来主持完成国家“863”计划、国家自然科学基金、国家科技攻关和国家“973”计划子项目等多项科研项目。发表学术论文180余篇,其中被SCI、EI检索60余篇,出版专著5部。



刘冀伟,男,1962年生,博士、副教授,北京科技大学信息工程学院自动化系副主任,IEEE会员,中国人工智能学会、人工心理与情感计算专业委员会理事。主要研究方向为机器人技术和图形图像处理。作为负责人与主要参与人员

完成国家自然科学基金、国家“863”计划以及军工“863”计划多项科研项目。发表学术论文50余篇,其中被SCI、EI检索30余篇。

中文核心期刊——《计算机工程与应用》2010年征订启事

《计算机工程与应用》杂志是由信息产业部华北计算技术研究所主办的、面向中高级计算机专业工作者的学术刊物,系中国计算机学会会刊、中国电子学会一级会刊,计算机工程与应用学会学报,计算机类中文核心期刊,中国期刊方阵双效期刊,被列为“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”,《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》、英国 Inspec/SA、俄罗斯《文摘杂志》、美国剑桥科学文摘(CSA)及《乌利希期刊指南》、波兰《哥白尼索引》、《日本科学技术社中国文献数据库》收录期刊。

本刊是一本面向计算机全行业的综合性学术刊物,覆盖面宽、信息量大、报道及时是本刊的服务宗旨。主要栏目:博士论坛;理论研究;产品、研发、测试;网络、通信与安全;数据库、信号与信息处理;图形图像、模式识别;工程与应用。

多年来,本刊坚持走学术与实践相结合的道路,在内容上既注重理论的先进性又兼顾实用技术的广泛性,在促进学术交流的同时,推进了科技成果的转化。计算机科技工作者的良师益友,计算机工程技术人员的必备手册。

读者对象:计算机相关专业科研人员,工程项目决策、开发、设计及应用人员,大专院校师生。

订阅方式:本刊为旬刊,大16开,每期信息量60余万字,每月1日、11日、21日出版,邮局订阅代号:82-605,每期定价27.5元,全年36期总订价990元,全国各地邮局均可订阅。

通讯地址:北京市619信箱26分箱 邮 编:100083

联系电话:010-51615542

咨询信箱:tjit@public2.bta.net.cn

主 页:http://www.ceaj.org

户 名:《计算机工程与应用》杂志社

账 号:805903228608094001

开户银行:中国银行北京北极寺支行