

一个面向复杂任务的多机器人分布式协调系统*

陈卫东¹, 席裕庚¹, 顾冬雷², 董胜龙²

(1. 上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030; 2. 中国科学院 机器人学开放研究实验室, 沈阳 110003)

摘要: 基于多智能体系统理论, 研究在非结构、不确定环境下面向复杂任务的多机器人分布式协调系统的实现原理、方法和技术. 提出的递阶混合式协调结构、基于网络的通讯模式和基于有限状态机的规划与控制集成方法, 充分考虑了复杂任务和真实自然环境的特点. 通过构建一个全实物的多移动机器人实验平台, 对规划、控制、传感、通讯、协调与合作的各关键技术进行了开发和集成, 使多机器人分布式协调技术的研究直接面向实际应用, 编队和物料搬运的演示实验结果展示了多机器人协调技术的广阔应用前景.

关键词: 多机器人; 协调与合作; 多智能体; 分布式自治系统; 递阶混合式协调结构

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A

Complex task oriented multi-robot distributed coordination system

CHEN Wei-dong¹, XI Yu-geng¹, GU Dong-lei², DONG Sheng-long²

(1. Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Robotics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110003, China)

Abstract: Based on the multi-agent system theory, we studied the theory, method and technology of the multi-robot distributed coordination systems performing complex tasks in uncertain environment. Focusing on the fundamental theories and key technologies of multi-robot distributed coordination systems, we proposed some novel ideas, including hierarchical & hybrid coordination architecture, network-based communication as well as integration of planning and reactive control based on the finite state automata (FSA). Particular focus is placed on the task complexity and environment uncertainty. Building a full physical experimental system of the multi-robot system composed of four autonomous mobile robots, a number of key techniques have been developed and integrated such as distributed planning, control, sensing, communication, coordination and cooperation strategies, etc. Using the real multi-robot experimental testing platform, our research faced the practical application problems directly. The experiment results demonstrate the application of our distributed coordination approach for a group of mobile robots performing different tasks such as multi-robot formation and cooperative object transport.

Key words: multi-robot; coordination and cooperation; multi-agent; distributed autonomous systems; hierarchical & hybrid coordination architecture

1 引言 (Introduction)

随着机器人应用领域的扩展, 非结构环境下的作业机器人已成为机器人研究和开发领域中新的热点. 在这些环境中使用的多机器人系统应能适应任务的复杂多变和环境的不确定性, 必须具有高层决策的智能, 因而, 对多机器人协调的研究已不单纯是控制的协调, 而是整个系统的协调. 当前, 国内外在多机器人系统的研究中, 普遍借鉴了人工智能领域中的多智能体系统理论, 其要点是把系统中的每一机器人看作独立的智能体. 多智能体系统理论是一种抽象层次较高的普遍理论, 它可追溯到 70 年代的

分布式人工智能及以后的分布式问题求解, 其概念、体系结构、协调与合作方式和策略等的研究已取得大量成果^[1], 但大部分都是在抽象层次上. 尽管如此, 多智能体系统理论的核心是把整个系统分成若干智能、自治的子系统, 它们在物理和地理上分散, 可独立地执行任务, 同时又可通过通信交换信息, 相互协调, 从而共同完成整体任务, 这无疑对完成大规模和复杂的任务是富有吸引力的, 因而很快在军事、通信及其他应用领域得到了广泛的重视.

近年来, 多机器人协调已成为机器人学中一个新的研究热点, 在著名的 IEEE 机器人和自动化国际

* 基金项目: 国家自然科学基金(69889501, 60105005)和国家 863 计划(2001AA422140)资助项目.

收稿日期: 2000-09-12; 收修改稿日期: 2001-04-16.

年会上,已越来越多地涌现出这方面的论文.以多机器人系统研究为主题的国际会议“分布式自治机器人系统(DARS)”,今年已经是第五届.出现了一些比较有代表性的典型系统,如:自重构机器人系统(self-reconfigurable robotic systems)、群智能机器人系统(swarm robotic systems)、和足球机器人系统(soccer robots)等^[2].虽然目前这些研究还都在实验室阶段,而且任务的复杂度还不够高,但通过这些研究,探索多机器人系统从任务、规划到控制层次协调的普遍模式和包括通信、传感检测等的具体实现方法,对于不久的将来非结构化环境下完成复杂任务的智能机器人系统的应用是有重要意义的.

本文基于多智能体系统理论,研究了在非结构、不确定环境下面向复杂任务的多机器人分布式协调系统的实现原理、方法和技术,并通过构建一个基于开放式多智能体结构的全实物多移动机器人实验平台,对规划、控制、传感、通讯、协调和合作的各关键技术进行了开发和集成,并通过典型任务的实验研究探索了多机器人协调理论与技术的应用前景.

2 递阶混合式协调结构(Hierarchical & hybrid coordination architecture)

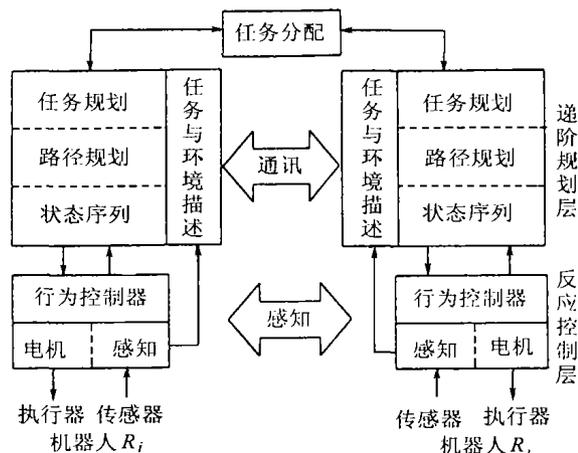


图1 多机器人分布式协调系统的递阶混合式结构

Fig. 1 Hierarchical & hybrid coordination architecture

把在体系结构^[2,3]、基于多智能体的任务分解与协调^[4]、基于不同信息模式的分布式规划和分散控制方面的研究工作纳入一个统一的系统框架中,本文提出了一种基于递阶混合结构的分布式协调方法,如图1所示.所谓递阶是指这一系统结构具有多层次性,下层是反应控制层的连续变量动态系统,上层递阶规划层是离散事件动态系统(DEDs),在智能体内部的上下层之间以及不同智能体的各个层次上具有多种模式的信息交互;所谓混合即表明这一系

统包含了连续和离散两种被控变量,也是指该系统结合了基于模型的规划和基于行为的反应式控制两种不同的控制体系.

每个机器人的控制系统内部包括任务规划、路径规划、状态序列和行为控制的递阶式结构,实现了基于任务与环境描述的规划和基于行为的反应式控制的有机结合.任务规划包括复杂任务在不同机器人之间的分工,以及每个机器人对各自任务的分解与细化,进而产生一系列子任务,然后对完成各任务的作业路径进行优化规划,最后利用有限状态机(finite state automata, FSA)确定完成上述任务和路径的一系列动作的状态序列,实现行为的调度.每一个状态(state)内部包含若干个基本行为,这些行为的集合描述了当前状态的特征,状态之间的变迁(transition)是由事件触发器(event trigger)实现.这样某一任务的执行过程可被描述为以状态为节点,以事件触发实现变迁的一个网络化的 DEDs,如图2所示.在控制系统的底层是行为控制器,这是一种基于行为的反应式控制器,包括多种基本行为(avoid-obstacle, avoid-collision, move-to-goal 等等)并行工作,各行为接收传感器的输入,根据各自的控制算法产生控制输出,各行为的控制输出依据优先级加权求和实现行为融合,进而把控制信号发给执行器,实现机器人的运动动作.同时,行为控制器还将传感器得到的传感信息传送给规划层,刷新和维护环境描述模型.该体系结构支持在控制系统的各层次实现多机器人之间的协调.在递阶规划层,各机器人通过网络通讯实现信息的交互和共享,根据其它机器人的规划结果进一步调整自我的规划,实现基于理性原则的分布式规划;而在反应式控制层,各机器人通过各种传感器感知对方的存在和状态,进而调整自己的行为,实现基于感知的行为级协调,同时也可将感知的信息逐级反馈,支持递阶规划层的协调机制.

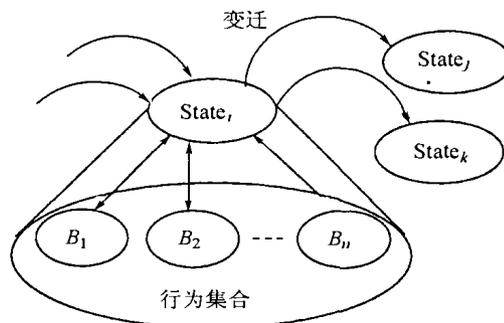


图2 基于FSA的行为调度

Fig. 2 FSA-based behavior schedule

基于递阶混合结构的分布式协调方法集成了机器人任务、规划和控制以及多智能体方面的成熟理论和方法,实现了上层理性规划和底层反应式控制的有机互补,既保持了规划方法的理性和优化特点,又兼容了反应式控制的鲁棒性和实时性,并且建立了不同层次和不同信息模式下的多机器人协调机制,支持任务级、规划级和行为级各个层次的协调算法。

3 实验平台构建(Experiment platform setup)

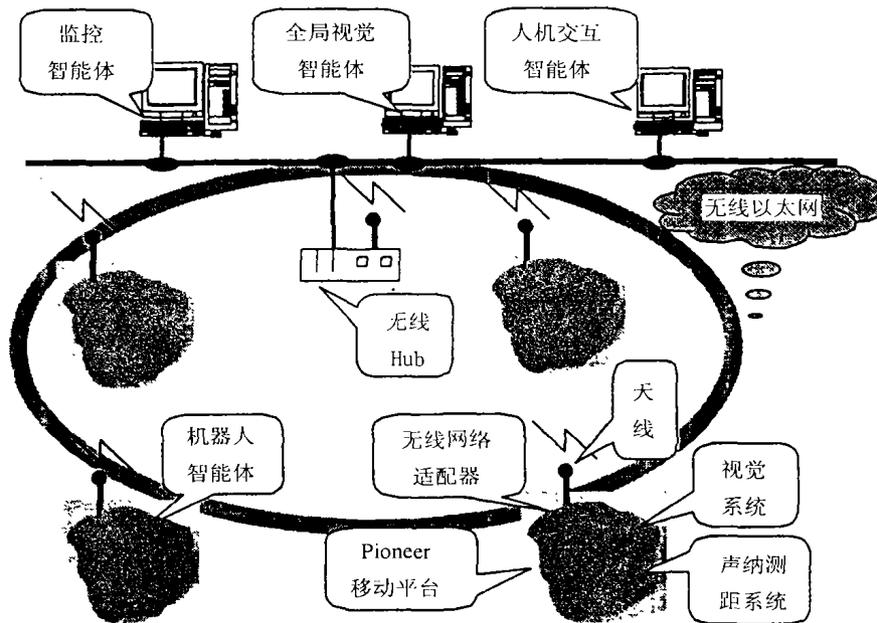


图3 多移动机器人实验平台结构图

Fig. 3 System structure of experimental platform

实验系统的结构如图3所示.根据上述的HH-CA设计思想,系统中每台机器人既要具有较强的自治性,又要具有较高的协调性,它能根据其传感器的感知信息和通过无线网络获得其它机器人发送的消息,独立决策自身行为,并实现机器人之间的协调作业.其中的关键技术包括:Non-holonomic移动平台的运动控制技术、传感器技术涉及声纳测距、机器人视觉以及包括声纳、视觉和触觉在内的多传感器融合技术、无线网络通讯技术、基于网络的分布式控制技术以及集传感、控制与通讯于一体的系统集成技术.该实验系统的组成如下:

1) 移动平台及其控制系统.机器人的移动平台包括两个可独立驱动的驱动轮和一个被动的支撑轮,可实现平面 X, Y 平动及 θ 角转动,直线最大运动速度为 1.7m/s ,利用内部联动的光电码盘实现定位,即所谓的dead reckoning定位法,定位精度较低.系统采用机载PC104+总线Pentium 266计算机

采用4台Pioneer 2/DX型轮式移动机器人(美国SRI人工智能中心开发,ActivMedia公司制造),经过进一步的开发和集成,建立了一个具有较高开放性、通用性的多机器人实验平台.对多机器人协调系统的体系结构、规划、控制、通讯、协调策略等关键技术进行了开发,并针对具体作业任务,如多机器人编队和物料搬运任务,进行了系统集成和实验研究.下面简要介绍该实验平台的开发情况.

与Pioneer 2/DX微控制器通过RS232串行通讯构成Server/Client模式,实现低层的运动控制和传感器数据采集与高层的规划与协调控制的交互.自身携带电池,可实现全无缆化操作.

2) 两自由度手爪.为了实现操作任务,配置两自由度电动手爪,其手面上包括光电传感器,以感知手中物体的存在及位置,通过软件可控制抓取力.

3) 多传感器系统.传感系统是让机器人能对外界情况有所感知,作出合理反应的必选项.该系统配置的传感器包括由16个声纳传感器组成的声纳环、避碰触觉环、数字罗盘.其中,声纳测距系统是能够以较大的测距范围对周围物体的距离进行感知.触觉系统可以弥补声纳测距系统在近距离测距时的死区.电子罗盘实现运动时机器人定向,全局视觉系统可以模仿GPS进行定位和定向,我们用这两种手段来弥补码盘定位的累计误差,以更好地进行运动控制.也可以通过声纳和视觉对环境的识别和匹配进

行相对定位.

4) 视觉系统. 每台机器人均配置由彩色 CCD 摄像机、2 自由度云台和图象处理系统构成的视觉系统. 借助视觉信息, 机器人可以识别环境中的物体与其它机器人, 判断机器人与参照物的相对位置, 判断其他机器人的相对位置和运动方向. 我们自行开发的“快速跟踪视觉系统”, 可以在视频速率下, 实时识别操作物体和其它机器人, 并给出其相对位置信息.

5) 无线网络通信系统. 为了实现机器人的无缆运行, 实验系统采用了无线局域网(WLAN)通讯, 以实现机器人之间以及机器人与台式机之间的双向信息交互. 网络的速度以及拓扑结构关系到通信实时性和分布式控制结构的实现. 本系统采用 3Mbps 的无线以太网网络设备, 较高的通信速度和普遍支撑

的以太网协议(TCP/IP)为机器人间协调算法的实现提供了相对宽松的信息通道. 同时我们还实现了无线网络与有线网络的无缝联接, 实现了基于网络的多机器人遥操作以及程序开发与调试.

6) 软件开发环境. 机器人开发环境的开放性、程序设计语言与人机界面, 将影响二次开发的效率和进度. Pioneer 机器人配套的开发工具和程序设计语言如(Saphira, PAI 等开发环境和函数库^[3])对单机器人的控制系统开发是比较理想的, 还没有考虑多机器人协作的任务需要, 此外, 由于我们采用了较丰富的传感器配置, 也增大了系统集成的难度. 通过针对多机器人编队和物料搬运实验的两轮技术开发, 已经建立起一套较为完整的多机器人系统软件开发工具, 包括基于通讯网络的多机器人协调程序函数库以及编译和调试工具.

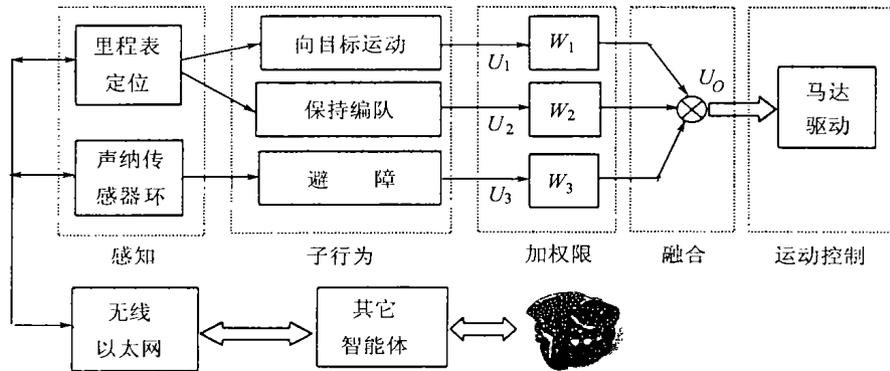


图 4 编队控制算法方块图

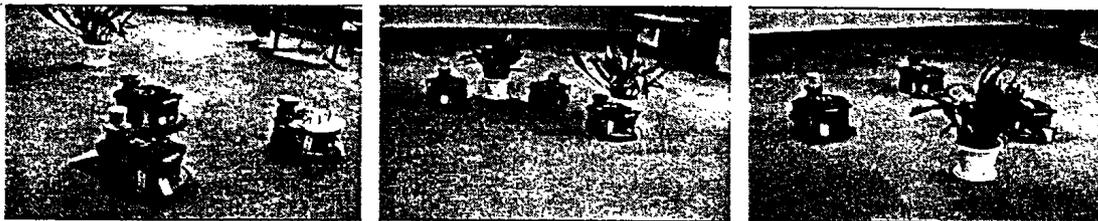
Fig. 4 Block diagram of formation control

4 实验研究(Experimental study)

4.1 多机器人编队(Multi-robot formation)

多机器人编队是机器人协调系统的典型任务^[5]. 在 HHCA 框架下, 本文采用了基于行为的多机器人编队控制策略, 在行为融合中采用了各行行为矢量的加权求和算法, 如图 4 所示, $U_o = \sum w_i U_i$, 式中 U_o 为马达控制矢量, w_i 为权系数, U_i 为子行为

输出矢量, $i = 1, 2, 3$. 在障碍物环境下的多机器人编队控制实验中, 通过利用 WLAN 传递定位和声纳数据, 实现了基于传感器信息共享的运动协调. 这是一种处于低层次的反应控制层的协调策略, 没有采用递阶规划层的通讯协调方式, 控制算法简单, 实时性高, 鲁棒性强. 实验结果证明了控制策略的有效性, 如图 5 所示.



(a) 机器人团队出发后形成三角编队 (b) 机器人编队在行进中避障 (c) 机器人团队通过障碍物区域后恢复编队

图 5 由三台机器人组成的机器人团队在障碍物环境中执行三角编队任务

Fig. 5 The 3-robot team executes triangle formation task in obstacle environment

4.2 多机器人协作清运垃圾(Multi-robot cooperative trash collection)

蚂蚁等昆虫在搬运物体过程中表现出的高度群体性和协作特点,给多机器人研究以启示^[7].为了在真实环境中高效地执行这一比编队控制复杂得多的任务,将 HHCA 框架中的协调层次从反应控制层扩展到递阶规划层,其系统成员也由同构(homogeneous)发展到异构(heterogeneous),机器人的结构和功能有所不同,机器人之间不仅有协调还有分工与合作关系.

采用 4 台 Pioneer 2/DX 机器人组成多机器人物体搬运团队,进行了多机器人协作物体搬运实验研究,为了使实验更为生动和拟人化,将实验内容设计为机器人清洁队清除垃圾的任务.实验场地为 10m × 10m,随机放置 10 个作为垃圾的罐头,具有特定的颜色和形状,环境中摆放有固定障碍物,实验人员在场内走动则视为动态障碍物,将所有垃圾搬运到垃圾场为完成任务.本实验是在完全真实的实验室环境下进行的,存在人员的走动、光线的变化等干扰因素,多个目标物体(垃圾)的摆放也是随机的,实验环境具有非结构化、不确定性和未知的特点,各机器人的控制是全自治的,并通过通讯和观察与其它机器人交互,系统不存在全局控制器,是完全分布式的协调模式,上述因素增加了任务的复杂度.因此如何能协调一致、高效率地完成清理任务,对多机器人团队各项性能都是一种挑战.

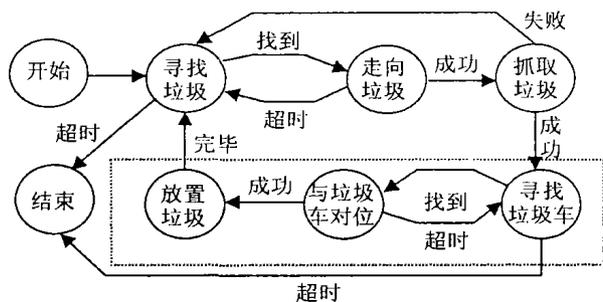


图 6 “清洁工”机器人的 FSA 图
Fig. 6 FSA diagram of trashman robot

将 4 个机器人分为两组,每组内两个机器人分配不同的任务,一个机器人捡拾垃圾(称其为清洁工),另一个执行搬运任务(称其为清洁车),清洁工将捡拾来的垃圾放入到清洁车上,当清洁车中的垃圾达到一定数量后,清洁车将垃圾运回处理场,然后再返回,开始下一次作业.根据机器人性能的差异,在任务规划层引入任务分工与合作机制;在行为规划和调度层采用基于事件驱动的事件序列器方法,实现了目的性行为的时间和事件的混合规划,并将

观测到的其它机器人的状态和由通讯得到的对话消息作为事件触发器,实现多机器人之间的行为协调;在行为层采用基于行为的反应式控制,实现机器人的各个基本行为,提高了机器人反应的实时性,并在此层实现机器人之间的避碰行为.清洁工的 FSA 状态序列如图 6 所示(图中虚线框内的状态中包括与其它机器人的协调行为).为了提高系统的作业效率,我们还采用了基于视觉的地域回避方法,以减小机器人之间的干扰.

在该实验中采用了基于两种不同信息模式的协调策略:一种是基于通讯的协调.这种协调主要是同组的两个机器人通过通讯对话从而确定状态变迁的时机(比如清洁工与清洁车的对位状态);另一种是基于感知的协调.机器人之间利用声纳信息实现避碰,通过视觉完成耦合与回避的行为.耦合存在于同组的两个机器人之间(即识别伙伴),而地域回避则存在于不同组的机器人之间.作业过程照片如图 7 所示:(a) 寻找垃圾.“清洁工”漫游捡拾垃圾,“清洁车”利用视觉实现跟随,并利用声纳保持距离;(b) 寻找队友.“清洁工”与“清洁车”利用视觉实现相互寻找和准确对位;(c) 放置垃圾.“清洁工”利用视觉将垃圾放入垃圾箱,通过声纳实现与“清洁车”的近距离避碰;(d) 运输垃圾.“清洁工”继续寻找垃圾,“清洁车”寻找“处理场”并运输垃圾达到,通过观察操作员的捡拾动作转入新的工作流程.

在协调控制的基础上还引入了两种合作方式,一种是主从式的合作,一种是区域性的合作.主从式的合作存在于清洁工与清洁车之间,清洁工为主,而清洁车为从,是利用视觉与对话来实现的,主要完成寻找、跟踪和对位行为.而区域性的合作存在于两组机器人之间,是利用视觉来实现的,在地域回避行为中得到体现.这种合作主要完成了区域分工(也就是不同组清除不同区域的垃圾,以提高效率).

实验中发现,由于光线为从一侧窗户照入的自然光和屋顶的荧光灯灯光,光照条件随时间在变化,其不一致性对机器人的识别准确率影响很大,为了适应室外光照的变化以及阴影、逆光和背光等不同光照条件,在视觉系统中采用训练学习方法,对不同光照条件下的被识别物体的特征参数进行学习和叠加记忆,并在学习后对特征参数阈值进行微调,以减少其它非目标物的干扰.实验结果证明上述方法效果明显.机器人清洁队完成任务的平均时间约为 12 分钟.在 2000 年 7 月召开的第三届亚洲控制会议期间,“机器人清洁队”进行了成功的现场演示.

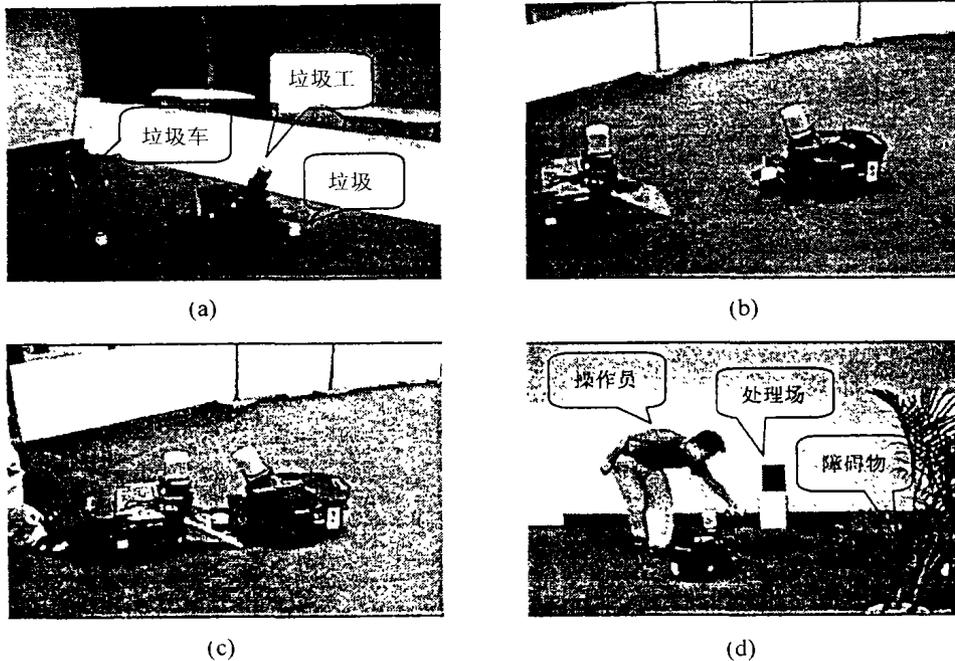


图7 机器人“清洁队”作业场景

Fig. 7 Trash collection experiment in progress

5 结论(Conclusion)

多机器人分布式协调技术将是未来机器人应用的关键技术之一. 当前, 机器人应用领域迅速扩展, 机器人的作业环境由人工环境走向自然环境, 所执行的任务也更为复杂, 其工作方式也由单机独干向群体协作方向发展. 本文的研究工作面向机器人应用工程的需求, 所取得的成果可以为多机器人系统的开发和应用提供有效的技术支持, 该技术可以推广到制造业中自动化工厂的多机器人联合作业、危险环境下(如核工厂、海洋、太空、军事、采矿等)的机器人化无人作业等应用环境, 其理论与技术还可扩展应用到其它分布式自治系统(如交通、电力和通讯系统等).

虽然本文给出了多机器人协调系统的一种理论和技术框架, 但针对这一复杂系统的相关理论和技术的研究还处于起步阶段, 面向非结构化的自然环境和多样化的复杂任务, 如何保证系统的效率, 如何提高系统的自组织、自适应和自学习性能, 都还有待深入研究.

参考文献(References)

- [1] Asama H, Fukuda T, Arai T, et al. Distributed Autonomous Robotic Systems [M]. Tokyo: Springer-Verlag, 1994
- [2] Connell J. SSS: A hybrid architecture applied to robot navigation

[A]. Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation [C]. Nice, France, 1992, 2719 - 2724

- [3] Arkin R C, Balch T R. AuRA: Principles and practice in review [J]. Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, 1997, 9(2): 175 - 189
- [4] Martin D L, Cheyer A J, Moran D B. The open agent architecture: A framework for building distributed software systems [J]. Applied Artificial Intelligence, 1999, 13(1): 91 - 128
- [5] Balch T R, Arkin R C. Behavior-based formation control for multi-agent robot teams [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation [M]. 1998, 14(6): 926 - 939
- [6] Werger B B. Ayllu-Distributed Behavior-based Control for Pioneer Mobile Robots [M]. Peterborough: ActivMedia Inc., 1998
- [7] Balch T R, Boone G, Forbes T, et al. Io, Ganymede and Callisto - a multiagent robot trash-collecting team [J]. AI Magazine, 1995, 16(2): 39 - 51

本文作者简介

陈卫东 1968年生. 1996年于哈尔滨工业大学获工学博士学位. 现为上海交通大学自动化研究所副教授. 目前主要从事智能机器人和多智能体协作等方面的研究. Email: wdchen@sjtu.edu.cn

席裕庚 1946年生. 1984年获德国慕尼黑工业大学工学博士学位. 现为上海交通大学自动化研究所教授, 博士生导师. 主要研究领域包括预测控制理论与应用和智能机器人等.

顾冬雷 1972年生. 博士研究生. 研究方向为多机器人和机器学习.

董胜龙 1975年生. 博士研究生. 研究方向为多机器人和分布式规划.