

文章编号 1004-924X(2001)02-0099-05

多机器人协调与合作系统的研究现状和发展

高志军, 颜国正, 丁国清, 颜德田, 陈忠泽
(上海交通大学电子信息学院 820 所, 上海 200030)

摘要: 随着机器人的应用方式正在由部件式单元应用向系统式应用方向发展, 提出了由多机器人构成的群体或社会的组织与控制问题, 说明了多机器人协调与合作系统中, 协调与合作的区别与联系, 对多机器人协调与合作系统的研究现状进行了综述, 并就基于MAS(Multi-Agent-System)的多机器人协调与合作系统的发展提出了一些看法, 指出基于MAS的多机器人协调与合作系统是多机器人学发展的一个重要方向。

关键词: 多机器人; 协调系统; 合作系统; 多智能体系统
中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A

1 引言

机器人技术的发展使机器人的能力不断提高, 机器人应用的领域和范围正不断扩展。从自动化工厂的装配工作到深海作业乃至核工业的故障处理、太空中操作任务等都迫切需要机器人进入角色。一方面, 由于任务的复杂性, 在单机器人难以完成任务时, 人们希望通过多机器人之间的协调与合作来完成。另一方面, 人们也希望通过多机器人间的协调与合作, 来提高机器人系统在作业过程中的效率, 进而当机器人工作环境发生变化或系统局部发生故障时, 多机器人之间仍可通过本身具有的协调与合作关系完成预定的任务。多机器人协调与合作作为一种新的机器人应用形式日益引起国内外学术界的兴趣与关注。

本文首先说明了多机器人协调与多机器人合作系统的发展、主要研究的问题以及它们之间的区别与联系, 接着说明了以MAS(Multi-Agent-System)为基础的多机器人系统, 并就它的发展提出了一些看法。

2 多机器人协调和合作系统

2.1 多机器人协调系统的主要研究问题

80年代以来, 多机器人协调作为一种新的机

器人应用形式日益引起国内外学术界的兴趣与关注, 1987年在美国圣地亚哥召开的多机器人协调研讨会上, 着重提出了多机器人协调研究的主要问题。1989年, 国际杂志《Robotics and Autonomous System》专门推出了多机器人协调研究专辑, 此外, IEEE的机器人与自动化国际会议从1986年起已将多机器人协调研究列为一个专题组, 足见对该问题的重视。在过去的10多年里, 人们对多机器人协调控制中的协调和集中、负载分配、运动分解、避碰轨迹规划、操作柔性体等问题进行了大量的研究^[1-3]。由于多机器人(主要是多机器人臂)操作物体时形成的闭链系统, 存在受限运动以及冗余度控制问题, 因此多机器人协调控制问题十分复杂, 但它基本上不涉及系统组织与合作机制等高层的控制问题。在多机器人协调控制中, 机器人之间的组织与合作关系已经人为的事先确定了。

从研究的角度看, 多机器人协调研究比单机器人来说出现了许多本质上全新的问题, 主要有^[4-5]:

- (1) 复杂协调任务的描述
- (2) 同一工作空间中多机器人协调和集中
- (3) 多机器人协调系统的自适应控制
- (4) 多机器人协调系统的负载分配
- (5) 以多传感器为基础的数据检测和障碍描述

(6) 多机器人协调系统的建模和控制结构的模式

(7) 多机器人坐标间的标定

(8) AI 技术和控制系统与多机器人协调系统的结合

然而,多机器人系统协调的实施,仍然需要人加以控制,即在协调控制中,机器人系统的组织与合作关系是事先由设计者人为指定的,在协调运动过程中一般不变。其次,多机器人协调控制通常采用集中规划与控制方式,要求主计算机系统的能力必须足够强,以应付大量的在线运算。这样,当机器人数量不多时,集中控制方式尚可应付,一旦机器人数量增多,必将产生瓶颈作用。另外,从多机器人的应用背景来看,在许多情况下机器人面对的是动态的非结构环境,很多情况下不可能建立精确的环境模型,当机器人外部环境或动作条件发生变化时,人们不得不根据变化环境或条件对多机器人协调系统的组织与合作关系进行调整或重新制定,因此实时性很差。

2.2 基于 Agent 的多机器人协调系统

随着人工智能技术的发展,为了解决上述问题,人们提出了基于 Agent 的多机器人协调体系结构,典型的体系结构是递阶分层式结构和包容式结构,由于包容式结构由多个并发行为产生器组成,直接对环境变化作出反应,系统的实时反应性加强^[6]。考虑到多机器人协调系统的实时性,一般采用包容式结构,即将系统中单一的机器人视为一个机器人 Agent。

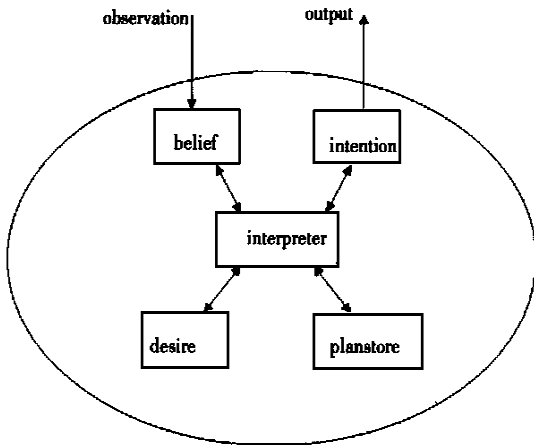


Fig 1 BD I model

机器人 Agent 模型的建立是以 BD I (Belief, Desire, Intention) 模型为基础的。其结构如图 1 所示。BD I 模型的概念始于 1987 年。它的主要思想是依靠定义一组精神类型来描述 Agent 的内部处理状态和建立控制结构。它包括信念、愿望

意图。其中信念即 Agent 对其所处环境的认识,这种认识应尽可能全面和正确。愿望是 Agent 希望达到的状态,这通常是人们交给 Agent 的任务。而意图描述了 Agent 为达到愿望而计划采取的动作步骤,意图在 Agent 的动作过程中可能会由于环境的改变而需要决定新的动作步骤。

这样我们不仅可以把机器人的知识、能力和目标都“封装”到机器人 Agent 中,还可以让机器人 Agent 象人一样具有心智,并赋予其行动推理及规划能力,引入协调合作机制,从而构造出适合于合作的机器人 Agent 模型。

基于以上思想的机器人 Agent,当任务分配后,不但能完成各自的局部问题求解,解决集中式控制方式中存在的瓶颈问题,而且当外部环境发生变化时,能够自主的利用自身所具有的心智作出调整,并通过 Agent 通讯与其他机器人 Agent 通过协作求解全局问题。

2.3 多机器人合作系统

多机器人协调技术的发展,使多机器人系统的合作问题也日益引起人们的重视。当一个多机器人系统给定一个任务时,首先面临的问题是如何组织多个机器人去完成该任务。这时要解决的问题是多机器人间怎样进行有效地合作。当经过某种机制确定了各自任务与关系后,问题变为如何保持机器人间的运动协调一致,即多机器人协调。因此多机器人协调和多机器人合作是多机器人系统研究中的两个不同而又有联系的概念。前者研究的重点是机器人之间合作关系确定后具体的运动控制问题,后者则是高层的组织与运行机制问题,重点是实现系统可以快速组织与重构的柔性控制机制^[7-9]。

实现多机器人的合作所要解决的问题主要有:

(1) 多机器人系统的结构

系统结构是系统的最高层部分,多机器人之间的合作机制就是通过它来体现的,它决定了多机器人系统在任务分解、分配、规划、决策及执行等过程中的运行机制及系统各机器人个体所担当的角色,如各机器人个体在系统中的相对地位如何?是平等自主的互惠互利式协作还是有等级差别的统筹规划协调?任务分解、分配、规划、决策及执行等对某个体而言是义务(即没有做与不做的决定权)还是权力(特权)?总之,正如社会制度之作用于人类社会,它决定了多机器人系统的运作机制,事关协作效率的高低。从系统设计的角度而

言, 系统结构要有利于个体能力最大程度的发挥和任务的最高效完成。另外, 协作机器人系统面向的是动态变化的环境, 因而系统结构要对环境有自组织适应能力。

(2) 建模与规划

机器的智能大致可以通过两种形式实现: 其中一种是基于行为的方式, 采用这种方式时不用建立协作对象、环境及自身的状态及行为方式的模型, 其智能表现为一个反应式行为驱动规则基; 另一种方式则是建立在形式化模型的基础之上, 个体根据它建立的其协作个体和自身的心智状态及行为能力模型进行决策和实现协作。

规划则包括从全局任务级至局部(个体)行为动作级规划, 这些规划应能在自主个体之间动态进行, 以适应动态变化的系统和环境。避免资源冲突也是规划过程中所要考虑的。

(3) 通信和商议

多机器人系统不是因为个体之间的信息交互而发生了相互作用, 是因为相互作用的需要而产生了个体之间的信息交互。它是实现多机器人合作的一种手段。多机器人系统作为一种分布式信息及决策系统, 网络结构是其重要结构特征。通信是个体信息的交换, 而商议是有目的的信息交互。商议是建立在信息交互的基础上的。

(4) 感知及学习

感知是指机器人通过它的传感系统获取信息并经信息融合后加以利用。不论是基于行为方式还是基于模型方式的协作, 感知都是必不可少的。感知作为机器人与局部外界的一种交互, 对机器人而言与通信一样是机器人获取信息的一种方式。

制定控制策略对人而言是比较方便的, 但要确定控制参数, 机器做起来就快而且准, 因此为了系统获取理想协作行为的控制参数并使它适应动态变化的环境, 在系统中引入学习机制是非常重要的。

从上可知, 传统意义上的多机器人合作系统研究的还是具体的问题, 即对每一个特定的任务, 都要有自己特定的体系、建模与规划、协商与通讯等等。当任务改变时, 它的体系结构、组织与运行机制等都要随之改变。这给多机器人合作系统的应用带来很大的不便, 人们因此想到能否从理论上找到一个通用的方法, 即不局限于每一个具体的问题而从总体上考虑一个解决方法, 使多机器人合作系统在这种理论的指引下, 能够完成各种

任务而无需改变体系结构、组织运行机制等。

3 基于MAS的多机器人系统

近年来, 随着机器人Agent模型在多机器人协调中的应用以及为了解决多机器人合作所存在的问题, 基于分布式人工智能中多智能体理论(MAS)的多机器人合作已成为机器人学研究领域的热点^[10-13], 受到各国专家学者的普遍关注。依据MAS的特性组织和控制多个机器人, 使之能合作完成单个机器人无法完成的复杂任务, 其主要考察的是系统的智能行为, 因此它不同于一般的控制系统而必须具有实时智能, 即要在满足时间与资源约束的同时, 具有传统实时系统所没有的适应能力和推理能力, 这是对现有AI技术和实时控制系统的挑战。

从2.2我们知道, 对于基于机器人Agent模型的多机器人协调, 还存在着一些缺点, 如当环境条件变化时, 尽管Agent之间可以进行协调及通讯, 但是它们仅仅局限于局部问题的解决, 即对于多Agent机器人系统而言, 光其中单个Agent有知识、心智、能力还不够, 单个的Agent不可能从全局从集体的层面上理解、预测及支配系统所有行为的全局及综合效果, 它们之间还需要一种合作机制和一个社会结构, 这些机制或结构可能是系统随机应变而生成, 并随着系统协作过程的推进, 通过进化选择机制或某种形式的学习而不断得到自组织优化。

3.1 基于MAS的多机器人系统的研究现状

自80年代末以来, 基于多智能体系统理论研究多机器人合作受到了普遍的关注。近年来, 在IEEE R&A、ROS等著名的国际机器人学术会议上, 几乎每次会议都有多智能体合作机器人系统的专题。一些机器人学术刊物出版了有关多智能体机器人的专刊, 下面是几个有代表性的研究项目:

细胞机器人系统(CEBOT)是分散、分层的自重构机器人系统^[14]。它将众多功能简单的机器人视为细胞元, 研究细胞元机器人自组织构成器官体机器人, 再将器官体机器人组成更为复杂的系统, 系统中的细胞机器人可以根据目标进行动态重组。基于CEBOT人们又作了许多深入专门的研究如系统组织结构、细胞机器人的建模、交互信息量的估计及通讯、行为选择机制等。

ACTRESS^[15]把机器人、设备和计算机连接起来,通过在线通讯进行多智能体的调度。基于该系统,也有智能体之间的谈判、通讯及避碰等方面的专题研究。

GO FER^[16]系统中存在一个任务规划与调度中心,它产生一规划模板并把该模板及未决目标通知所有可通知到的机器人。机器人则根据任务分配算法决定它们自己的角色。ALLANCE/L-ALLANCE 结构适合于异构的中小规模的多机器人的合作控制,它要求各智能体有较强的感知和广播通讯能力。

此外,欧洲一些大学及研究机构的机器人学者也在对多机器人合作系统进行研究。在合作机器人研究中,目前以移动机器人背景进行研究的文献比较多,包括规划、避碰、行进编队、推箱问题、搜索问题等,而基于系统全局的高层组织及合作机制等方面的文献较为少见。可见,合作机器人要真正走向人类的生产和生活还有很长的一段路要走。

3.2 基于MAS多机器人系统的主要研究问题

3.2.1 MAS的体系结构

实现合作行为必须依赖于某种系统的体系结构。体系结构的首要任务是寻求准确的推理和快速反应之间的最佳折衷。目前主要是集中和分散结构,普遍的看法是分散式结构在某些方面,如故障冗余、可靠性、并行开发的自然性和可伸缩性等,比集中式结构要好。

3.2.2 Agent间的通信与协商

在MAS中,多Agent之间要进行通信与协商。因为对于每一个Agent来说,本身具有的智能一方面使其能够自主求解局部问题,另一方面在与其他Agent合作时,有可能“固执己见”,影响全局问题的解决。因此Agent间的通信与协商是合作机器人动态运行时的关键^[17-18]所在。目前Agent通信技术已成为Agent领域的研究热点之一。在Agent系统中有两种主要的通信策略,直接交换信息或通过存取一个公用数据区以达到交

换信息的目的。在多Agent规划中,Georgeff使用“原语通信”避免计划间的冲突;Hewitt提出的Actor语言是消息传递的典型应用。近来,一些研究者提出了以Speech-act(言语-行为理论)为基础的非自然语言,并将其作为Agent间通信的语言,其中以KQML(Knowledge Query and Manipulation Language)最为成功。

3.2.3 多传感器信息融合技术

在多机器人系统中,如果机器人之间过分依赖通信进行信息获取,那么,当机器人数量过多时,系统通信的负担将使系统的运作效率下降。因此如何有效利用智能体机器人本身的传感器检测信息显得至关重要。

3.2.4 防止死锁与碰撞

多个智能体机器人在共同的环境中运行时,会产生资源冲突问题。碰撞实际上就是一种资源冲突。在解决资源冲突的过程中,如果没有适当的策略,系统会造成一种运行的动态停顿。通过规划,可以避免一部分死锁和碰撞。多智能体系统在事先难以预料的重组后,其死锁回避问题仍是富有挑战性的题目,需要充分利用系统的通信及传感器设施和精心策划的策略^[19-20]。

4 结 论

基于MAS的多机器人协调与合作系统研究是近年来发展起来的重要领域,协调与合作在今后的发展中是相辅相成的。它集机器人学、控制理论、刚体力学、系统工程、计算机与电子科学、认知心理学和经典AI规划理论为一体,是属于多学科相互渗透知识密集型的交叉性高科技领域,也是我国863高技术自动化领域跟踪项目中的重要课题。随着研究与实际工程应用的不断深入发展,必会不断出现新问题和新理论方法的产生。总之,基于MAS的多机器人协调与合作系统是一个有待进一步开拓的广阔领域。

参考文献:

- [1] Fernandez Juan A, Gonzalez J. Mobile robot path planning: a multicriteria approach[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 1999, 12(4): 543- 554
- [2] Yamachi Brian. Decentralized coordination for multirobot exploration[J]. Robotics and Autonomous Systems, 1999, 29(1): 111- 118
- [3] AMATO Nancy M, Wu Yan. A randomized roadmap method for path and manipulation planning[A]. Proc 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation[C]. Minneapolis: Minnesota, 1996

- [4] Koivo A J, Bekey G A. Report of workshop on coordinated multiple robot manipulators: planning, control, and application[J]. *Robotics and Automation*, 1988, 14(1): 91- 93
- [5] Kazerooni H. Compliance control and unstructured modeling of cooperation robots[A]. *Proc 1988 IEEE Int Conf on Robotics and Automation*[C]. Philadelphia, 1988
- [6] Xu H. A behavior-based blackboard architecture for reactive and efficient task execution of an autonomous robot [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1997, 22(1): 115- 132
- [7] Li Chun. A decentralized approach to the conflict-free motion planning for multiple mobile robots[A]. *Proc 1999 IEEE Int Conf on Robotics and Automation*[C]. Detroit, Michigan: 1999
- [8] Pagello Enrico, D'Angelo Antonio. Cooperative behaviors in multi-robot systems through implicit communication [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1999, 26(1): 65- 77.
- [9] HorMaw-Kae. Coordinating multiple groups of robots for gating process[J]. *Robotics Systems*, 1996, 13(8): 499 - 513
- [10] He Kezhong, Sun Haihang. Research of intelligent mobile robot key techniques[A]. *Proc 1996 IEEE Int Conf on Industrial Technology*[C]. Minnesota: 1996
- [11] Kuff H J. Software agent will make life easy[J]. *Fortune*, 1994, 24(1): 72- 73
- [12] Lee K C, Bellcore A P S A framework for controlling cooperative agents[J]. *IEEE Trans Computer*, 1993, 42 (7): 8- 15
- [13] Arkin R C. Cooperative multi-agent robotic systems[EB/OL]. <http://www.cc.gatech.edu/aimosaic/robotlab>
- [14] Fukuda T, et al. Structure decision method for self organizing robots based on cell structure-CEBOT[A]. *Proc IEEE ICRA '89*[C]. 1989 695- 700
- [15] Asama H, et al. Design of an autonomous and distributed robot system: ACTRESS[A]. *Proc IEEE/RJRSI ROS'89*[C]. Tsukuba: 1989, 283- 286
- [16] Caloud P, et al. Indoor automation with many mobile robots[A]. *Proc IEEE Int Conf on Robotics and Automation*[C]. Michigan: 1999
- [17] 吴伟蔚, 杨叔子. 基于智能 Agent 的故障诊断系统研究[J]. *模式识别与人工智能*, 2000, 13(1): 78- 81
- [18] 李智军, 等. 基于群体协作的分布式多机器人通信系统的设计与实现[J]. *机器人*, 2000, 22(4): 300- 304
- [19] 李春, 郑志强. 多移动机器人无碰合作的行为规划[J]. *机器人*, 1999, 21(7): 720- 724
- [20] 宋宇, 孙茂相, 等. 网络环境下基于 Agent 的多机器人协调与路径规划[J]. *机器人*, 2000, 22(1): 48- 54

Current status and development of multi-robot coordinative and cooperative systems

GAO Zhi-jun, YAN Guo-zheng, DING Guo-qing, YAN De-tian, CHEN Zhong-ze

(No. 820 Lab, College of Electronics and Information,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract With the application mode of robots changing from cell to system, the cooperation and coordination of robot systems are more important. In the paper, the relationship between cooperation and coordination, and the trend in this field are discussed. Finally, the authors put forward some opinions based on the concept of a multi-agent system and also point out that the multi-agent system is an important direction of multi-robot systems in the future.

Key words multi-robots; coordination systems; cooperation systems; multi-agent systems

作者简介: 高志军(1972-), 男, 河南人, 上海交通大学电子信息学院在读博士, 方向: 多机器人协调与合作, 人工智能领域。

颜国正(1961-), 男, 湖南人, 上海交通大学电子信息学院博士生导师, 国家 863 计划自动化领域智能机器人主题专业专家, 电子信息学院副院长。