

文章编号: 1001-0920(2001)02-0133-09

多智能体技术应用综述

刘金琨, 尔联洁

(北京航空航天大学 自动控制系, 北京 100083)

摘要: 多智能体技术通过采用各智能体间的通讯、合作、协调、调度、管理及控制来表达实际系统的结构、功能及行为特性, 为各种实际问题提供了一种统一的框架。介绍了多智能体技术在几个有代表性领域的应用, 并对该技术今后的研究方向做了探讨。

关键词: 人工智能; 多智能体技术; 应用

中图分类号: TP 18 **文献标识码:** A

Overview of Application of Multiagent Technology

L IU J in-kun, ER L ian-jie

(Automatic Control Department, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: By adopting communication, cooperation, conflict, coordination, dispatch, management and control, multiagent technology expresses structure, function and characteristics of practical system, which provides uniform framework for various practical application. The applications of several representative application domains for multiagent technology are introduced. Further applications and research directions are discussed in detail.

Key words: artificial intelligence; multiagent technology; application

1 引言

多智能体系统是当今人工智能中的前沿学科, 是分布式人工智能研究的一个重要分支, 其目标是将大的复杂系统(软硬件系统)建造成小的、彼此相互通讯及协调的、易于管理的系统。多智能体的研究涉及智能体的知识、目标、技能、规划以及如何使智能体协调行动解决问题等。

多智能体系统的应用研究开始于 20 世纪 80 年代中期, 近几年呈明显增长的趋势。多智能体技术已成为当今人工智能研究的热点之一。本文在查阅国内外有关文献资料的基础上, 对多智能体技术近年

来的应用状况进行综述, 并对该技术今后的研究方向做了探讨。

2 多智能体技术

多智能体系统是由多个可计算的智能体组成的集合, 其中每个智能体是一个物理的或抽象的实体, 能作用于自身和环境, 并与其它智能体通讯。多智能体技术是人工智能技术的一次质的飞跃: 首先, 通过智能体之间的通讯, 可以开发新的规划或求解方法, 用以处理不完全、不确定的知识; 其次, 通过智能体之间的协作, 不仅改善了每个智能体的基本能力, 而

收稿日期: 2000-01-13; 修回日期: 2000-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(69874037)

作者简介: 刘金琨(1965—), 男, 辽宁瓦房店人, 副教授, 博士后, 从事智能控制理论及应用、复杂工业过程建模等研究; 尔联洁(1938—), 男, 天津人, 教授, 博士生导师, 从事控制理论及应用研究。

且可从智能体的交互中进一步理解社会行为;最后,可以用模块化风格来组织系统。如果说模拟人是单智能体的目标,那么模拟人类社会则是多智能体系统的最终目标。

多智能体技术具有自主性、分布性、协调性,并具有自组织能力、学习能力和推理能力^[1]。采用多智能体系统解决实际问题,具有很强的鲁棒性和可靠性,并具有较高的问题求解效率。多智能体技术打破了目前知识工程领域的一个限制,即仅使用一个专家,因而可完成大的复杂系统的作业任务。多智能体技术在表达实际系统时,通过各智能体间的通讯、合作、互解、协调、调度、管理及控制来表达系统的结构、功能及行为特性。由于在同一个多智能体系统中各智能体可以异构,因此多智能体技术对于复杂系统具有无可比拟的表达力,它为各种实际系统提供了一种统一的模型,从而为各种实际系统的研究提供了一种统一的框架,其应用领域十分广阔,具有潜在的巨大市场。

3 多智能体技术在各个领域的应用

3.1 智能机器人

目前,美国、英国、法国和澳大利亚等国家都在从事该方向的研究,我国也将这方面的研究列入国防科工委“八五”预研项目。在智能机器人中,信息集成和协调是一项关键性技术,它直接关系到机器人的性能和智能化程度。一个智能机器人应包括多种信息处理子系统,如二维或三维视觉处理、信息融合、规划决策以及自动驾驶等。各子系统是相互依赖、互为条件的,它们需要共享信息、相互协调,才能有效地完成总体任务,其目标是用来结合、协调、集成智能机器人系统的各种关键技术及功能子系统,使之成为一个整体以执行各种自主任务。

Lane等^[2]设计了单个机器人的多智能体系统,采用实时黑板智能体作为框架的核心,实现了分布式黑板结构,并采用分布式问题求解、实时知识库及实时推理技术,以提高机器人的实时响应速度,该机器人已成功地应用于自主式水下车辆的声纳信号解释。在多机器人系统中,当多个机器人同时从事同一项或多项工作时,很容易出现冲突^[3]。利用多智能体技术,将每个机器人作为一个智能体,建立多智能体机器人协调系统,可实现多个机器人的相互协调与合作,完成复杂的并行作业任务。

3.2 交通控制

由于交通控制拓扑结构的分布式特性,使其很适合于应用多智能体技术,尤其对于具有剧烈变化的交通情况(如交通事故),多智能体的分布式处理和协调技术更为适合。以城市交通控制系统为例,Bumeister等^[4]提出了未来汽车多智能体联运系统;Goldman等^[5]提出采用增量相互学习方法来协调交叉路口的两个控制器;Findler^[6]给出了交通网络的分级结构;Adorni等^[7]给出了汽车行驶路径规划的方法。多智能体技术应用于其它交通控制系统,主要有飞行交通控制(ATC)^[8]、铁路交通控制(RTC)^[9]和海洋交通控制(MTC)^[10]。

以汽车行驶路径规划为例,Giovanni等提出一个分布式路径指导多智能体系统,该系统利用多智能体的协调技术,将交通图知识库中的信息与路径边界搜索算法相结合,建立一个局部世界描述机制,通过无线电获取信息,激活系统重新规划路径,并提出一个获得最短路径的规划算法,从而产生汽车行驶的最佳轨迹,系统向驾驶员提供行驶建议,避免了汽车在行驶中发生冲突。该系统分为8个智能体,每个智能体具有不同的能力。

3.3 柔性制造

多智能体技术可表示制造系统,并为解决动态问题的复杂性和不确定性提供新的思路。如在制造系统中,各加工单元可看作智能体,从而使加工过程构成一个半自治的多智能体制造系统,完成单元内加工任务的监督和控制。多智能体技术可用于制造系统的调度。Ramos^[11]建立了制造系统的动态调度协议,采用两类智能体分别完成任务安排和资源管理,通过智能体间的交互来解决生产任务的调度,采用合同网协议来处理调度过程中时间上的约束,根据资源情况动态安排任务,使系统能处理诸如设备故障等不确定性引起的实时调度问题。

多智能体技术可用于制造过程中的分布式控制,例如用于离散制造环境的分布式控制系统(YAMS)^[12]是为实现柔性制造而建立的工厂控制系统。系统为递阶结构,分为两层:上层为加工车间,下层为加工站。加工车间的智能体在上层做出调度计划,下层各个不同加工站的智能体执行调度计划。系统中包括多种调度策略,分为两类:一类是静态的,在系统运行前从全局上进行智能体的任务分配,称为全局调度器;另一类是动态的,在系统运行中对各智能体做出局部决策,称为局部调度器。这样的结构及控制策略能使系统进行柔性控制。

复杂制造系统的集成属于大型而复杂的分布式

系统。Jeff^[13]提出采用多智能体技术建立制造企业集成的计算机基础结构,将复杂的企业活动划分成多组元任务,每一个组元任务由一个智能体执行。将人的行为看作一类智能体,采用多媒体界面,通过大量智能体的交互,实现企业中地域分散的各生产部门知识的共享与协调,利用人-机、机-机的交互式协调进行复杂问题的求解,完成企业中各项功能的集成。Sprumont^[14]介绍了用于装配生产线设计的多智能体系统,该系统由两个交互的多智能体系统构成,一个多智能体系统用于生产线装配次序的设计,另一个多智能体系统用于生产线各部分的设计,生产线设计结果通过智能体间相互协商和智能体自组织来完成。

3.4 协调专家系统

对于复杂的问题,采用单一的专家系统往往不能满足要求,需要通过多个专家系统协作,共同解决问题。利用多智能体技术,可实现多专家系统的协调求解。Jennings^[15]提出将两个孤立的专家系统转变为一个多智能体系统的具体方法,建立了一个基于规则的多智能体系统环境(GRATE),通过采用多智能体的协调技术,将两个专家系统(BEDS)与CODEAS有机地结合起来,并建立了二者的协调协议,从而实现了多种诊断方法的集成,提高了故障诊断的效率。Polat^[16]探讨了采用多智能体技术解决协调专家系统的冲突问题,并以办公室设计为例,建立了4种智能体,即顾客要求智能体、功能智能体、电器智能体和成本智能体,每种智能体代表一个专家系统,4种智能体构成一个多智能体系统,它们相互协调,并且每种智能体分别采用不同的冲突解决策略,从而解决了设计过程的冲突问题。

3.5 分布式预测、监控及诊断

智能体具有意图的性质,利用多智能体的联合意图机制可实现联合行动,从而实现分布式预测与监控。Jennings和Draa等^[17,18]分别利用智能体的联合意图实现了联合监控机制。

Hartvigsen^[19]将多智能体技术应用于暴风雨气象观测,将各区域观测站分别作为一个智能体,各智能体对观测数据进行处理,作出局部预测,然后进行协调,构成一个多智能体系统。通过网络对整个地域进行分布式问题求解,最终形成一个可靠的一致解,即实现全局预测。Russell^[20]利用智能体技术建立了用于复杂问题实时诊断的分布式系统(MARVEC),系统将复杂的诊断问题划分成多个子区域,各子区域间不重叠,以避免冗余推理。单个智能体尽可能负

责某个子区域,以便分别承担诊断任务,减少通讯量,提高实时性。智能体通过元知识寻找超出其领域的合作,系统中的多个智能体协调解决涉及多个领域的诊断问题。

Wang等^[21]介绍了原子能发电厂故障分析和监控系统(A PACS),该系统采用多智能体技术,由分布在不同位置的计算机上的智能体构成多智能体系统,从而完成分布式协调监控与诊断任务。各个智能体采用不同的表达方式和推理机制,以完成各自的任務。

3.6 分布式智能决策

利用多智能体技术所具有的特性可解决复杂系统的决策问题。Avouris^[22]采用智能体技术将多个专家系统的决策方法有机地协调起来,建立了基于多智能体协调的环境决策支持系统。智能体采用基于规则的描述方法,实现了环境管理的分布式智能决策。Kuroda等^[23]利用多智能体技术建立了智能体消息交互的合同网模型,实现了决策过程中的协调,从而实现化工批量生产操作的分散式协调动态决策。Yager^[24]采用多智能体技术建立了WWW网上广告决策模型,该模型采用面向智能体程序设计的思想,通过统计网络用户浏览广告概率的特性及用户有关的潜在个人专门信息,帮助广告客户及时做出决策。

3.7 软件开发

利用计算机来开发多智能体系统,称为软件agent^[25]。软件工程的研究从模型角度考察agent,认为面向agent的软件开发方法是为更确切地描述复杂并发系统的行为而采用的一种抽象的描述形式,是观察客观世界和解决问题的一种方法。Shoham^[25]以agent为基元,以语言活动建立agent的交互,以Belief, Desire和Intention等概念描述智能体的思维状态,并建立了语言agent0。Van等^[26]应用多智能体技术建造主动型数据库,通过引入推理能力来提高主动型数据库系统的适应性和灵活性。Mehra^[27]利用智能体技术实现了软件的设计。Etzion等^[28]认为软件agent是进行AI研究的基础。在传统的AI研究中存在一些基本问题,如规划、机器学习、知识表示等。软件agent为探索这些AI问题提供了一个非常合适的测试平台,是AI研究的新型通用工具。

Huhns教授^[29]认为,针对复杂系统的软件开发,应引入一种全新的软件设计风范,以这种方法设计的软件系统,应是由多个能相互交互并带有验证

内核的模块组成的开放式结构; 并认为采用智能体技术可实现这一要求, 通过智能体构成软件开发模块, 可使模块起到活动的作用, 以监视环境条件, 自动对环境做出反应。Jennings 等^[30]认为智能体技术是软件工程的下一步, 它代表着解决复杂分布式问题的一种新方法。

3.8 虚拟现实

虚拟现实定义为使用户不同程度地投入一个人工环境, 并能与该环境中的对象进行相互作用的仿真技术。这项研究是以人为中心的人机和谐系统。

Tsvetovaty^[31]采用虚拟智能体技术建立了电子市场的模拟系统(MAGMA), 实现了电子市场中的货物储藏和买卖机制以及银行信贷和金融管理机制, 设计了买和卖智能体, 提出了两类智能体间的直接交互和代理交互算法, 并采用异质智能体技术将模拟系统设计为开放式结构。

Saiwaki 等^[32]建立了基于虚拟智能体的音乐演奏表演系统, 采用两个智能体分别模拟鼓声和低声, 每台计算机作为一个智能体, 人作为两个智能体的合成器, 探讨了三种协作方法。对具体协作音响效果进行对比分析, 通过两个智能体的协作得出了两种乐器协同表演的最佳协作方式。

3.9 操作系统

Hyacinth 等^[33]利用拟人化的具有自学习能力的人机智能体(IPAI)技术设计了VAX/VMS操作系统, 利用智能体所具有的特性实现了操作系统的自适应功能。智能体IPAI可通过接受用户的反馈使操作系统适应用户的兴趣和习惯, 通过识别正确与错误的命令及与其它智能体进行网络通讯实现系统的学习, 从而使操作系统在复杂环境下实现与用户的交互。

3.10 网络自动化与智能化

(1) 网络管理

利用多智能体一致性的组织、表示、通信等特点, 通过定义不同类别的智能体, 可构成网络的不同智能成员(包括网络单元智能体、管理对象智能体和操作系统智能体), 实现网络管理。基于智能体的网络管理方法具有以下特点: 1) 网络能主动地分析和推理, 给网络管理注入了智能化的功能; 2) 智能体的通信语法简洁、有效, 使网络具有简单、有效、标准的通信协议; 3) 具有较好的开放性和扩充能力, 能扩展网络管理的结构和功能; 4) 网络具有一定的智能决策能力, 智能体可根据自身的知识和状态做出合理的选择。

为了解决网络各智能体之间由于频繁的信息交换而造成的通讯负担过重、效率低、网络不稳定等问题, 发展了移动智能体技术。该智能体具有较强的独立性和异步动作能力^[34], 非常适合于网络管理。基于移动智能体技术的网络管理的典型例子有: Internet 中自动为用户查找储存于不同地点的资料, 帮助用户完成网络上的搜索^[35], 为异地用户建立多媒体会议进程^[36]等。BM, UNISYS 等公司已将智能体技术置于网络管理的核心地位, 比尔·盖茨在《未来之路》一书中多次强调智能体软件在信息高速公路中的重大作用, 称它为软件中的软件。

(2) 网络协同化

智能体技术具有在 Internet 上的协调功能, 通过采用 Unix 命令实现用户在 Internet 上广泛的协调^[37]。将智能体技术与 Internet 技术相结合, 建立基于客户/服务器的智能体结构, 可实现用 WWW 开发计算机支持的协同工作(CSCW), 建立一个以 WWW 为基础, 以一组协同工作的智能体为核心的应用环境(CAW), 达到在网络环境下更好地支持用户之间的协同工作。在 Internet 和 Intranet 中, 通过采用 CAW 可实现 Web 要素之间的协同作用、异构资源的一体化信息检索。Web 服务器之间通过智能体主动地通信, 可以解决 Web 站点负载过重的问题^[38]。

(3) 网络信息处理

软件智能体是指活动于软件环境中的智能体, 它通过下达命令和分析环境反馈同环境进行交互。利用软件 agent 技术, 可对 Internet 这一规模庞大、极度异质、高度动态的软件环境实现信息的收集、检索、分析、综合, 从而实现高度智能行为的信息处理手段。目前, 用于 Internet 信息处理的软件 agent 有以下几方面:

1) 信息交互、日程安排: Katia^[39]建立了来访安排系统, 该系统利用两类软件 agent 实现了信息交互和任务安排: 一类是信息 agent, 如 Finger agent 用来处理通过 Finger 命令获得信息, Faculty interest agent 获取研究人员感兴趣的信息等; 另一类是任务 agent, 如 Visitor-Hoster agent 负责接受来访者的信息, Scheduling agent 提供日程安排和解决日程冲突等。

2) Internet 上的游览助理: Balabanovic^[40]构造了适应性 Web 游览 agent, 用以帮助用户在 Internet 上获得感兴趣的最新信息。该 agent 根据用户的要求, 采用启发式搜索技术, 选择最佳的 Web 页面

提供给用户;得到用户的反馈后,agent 利用其学习方式做出调整,以便以后提供更好的页面。

3) 信息检索:基于智能化和自主化以及分布式问题求解的智能体技术为网络上的信息检索提供了新的途径。Krukwich^[41]利用 Inforfinder agent 实现了信息检索,该 agent 采用搜索技术,可为用户检索出感兴趣的信息。Brown^[42]建立了 WWW 上的信息提供智能体和信息需求智能体,信息需求智能体在网络上通过 WWW 搜索所需要的信息,信息提供智能体向信息需求智能体提供信息。Takahashi 等^[43]针对 Internet 上信息的异质性、分布性、多样性和动态性,利用人机智能体技术为顾客采集 Internet 上的商业和市场信息。其中人机智能体位于客户机上,作为客户智能体,网络信息资源位于服务器上,作为服务智能体,通过智能体间的通讯和协调完成网络信息的在线采集和整理。

4) 信息自适应:Decker 等^[44]利用多智能体技术建立了分布式系统框架(RETNA),用来解决开放式 Internet 网络环境下的信息自适应问题。该框架采用三种智能体技术,即人机智能体、任务智能体和信息智能体。其中,人机智能体用来实现人与网络计算机的信息交互;任务智能体通过与其它智能体交互帮助用户完成任务;信息智能体实现对动态环境下异质信息资源的智能获取。文献[44]建立了信息智能体的自适应框架,在 RETNA 框架中,采用通讯、规划、调度、监控等几种不同的方法,实现了整个框架及单个智能体对外界环境的自适应。

网络通信领域中基于多智能体技术的其它应用还有网络控制、传输和交换、通信网业务管理等。

3.11 分布式计算

进入 20 世纪 90 年代后,用户迫切希望在网络上建立更为丰富的分布式应用,不仅能实现数据共享,而且能实现各计算实体的协同工作。分布式计算成为影响计算机技术发展的关键技术,其目标是实现分散对等的协同计算^[45]。多智能体技术为实现这种方法提供了新的途径,基于智能体的计算是下一代软件开发的突破口^[46]。

用多智能体技术建立分布式计算环境的基本目标是建立各种客户/服务器应用,其核心是基于智能体的服务请求代理机制^[47],它分为两部分:1) 客户环境:由客户应用和服务请求智能体组成;2) 服务环境:由一组服务智能体组成。客户应用通过本地的服务请求智能体访问服务智能体,服务请求智能体使得客户应用所需的异地服务如同发生在本地一

样。

吴泉源教授等^[47]建立了银河分布式客户/服务器计算机系统(YHCS),该系统是我国 863 计划重点项目支持下取得的重要成果。其核心是基于多智能体的分布式计算环境,采用了以下关键技术:1) 基于智能体的服务请求代理机制;2) 智能服务技术;3) 含多媒体信息的协同计算技术。

3.12 产品设计

目前,利用智能体技术来构造设计系统已成为一个研究热点。设计问题涉及到多目标的约束求解和设计过程的协调。以超大规模集成电路(VLSI)的设计为例^[48,49],它需要有关电路、逻辑门、寄存器、指令集、结构以及装配技术等方面的知识。为了降低 VLSI 设计的耗费,提高设计的速度,利用多智能体系统的并行处理技术将不同的任务分解,分别分布在不同的智能体上。智能体由代理助手服务器、智能体服务器、布线智能体服务器和数据库服务器构成,每类智能体服务器分别对 VLSI 的某一部分进行设计,完成不同的设计功能,通过代理助手服务器实现服务器与客户的协调通讯。利用客户/服务器技术可实现 VLSI 设计过程的网络协同化,即实现基于 CSCW 的 VLSI 设计,通过建立公用黑板结构实现各智能体间的协调机制,得到全局一致的解。

ACE 是一个用于电厂的设计系统,它是基于演说型的多智能体系统^[50]。用于设计的智能体间可通过协商解决冲突,该系统支持多学科设计人员共同进行设计。PACT 系统利用多智能体技术进行大型设计系统的构造,该系统解决了由多学科设计人员及多种设计工具协同工作的大型设计系统构造问题^[51]。Park 等^[25]利用智能体技术实现了电缆装置的并行设计,设计过程由多个专家完成,每个专家相当于一个智能体,独立地对电缆装置的某一部分进行设计,然后各智能体通过电子信件相互通讯,实现彼此间的协调,完成总体设计任务。

3.13 商业管理

目前,物资流通管理中存在以下几方面问题:缺少公共的通讯结构;缺少集中管理机制;协调成本过高。Merz 等^[53]将移动智能体应用于物流管理,建立了如图 1 所示的框架结构。由图可见,利用移动智能体(MA)可实现网络化的物资购买与出售之间的管理。

3.14 网络化的办公自动化

人可作为一类智能体存在于多智能体系统中^[54]。采用多智能体技术可实现办公自动化系统的

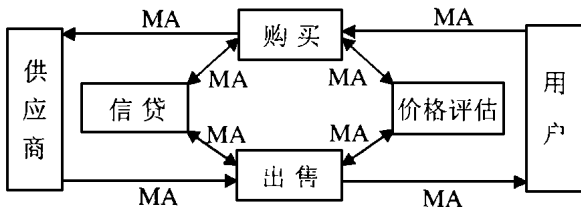


图1 基于移动智能体的网络化物流管理

人机一体化,系统中各个智能体分别实现信息的采集、存储、交换、加工和决策。

办公自动化系统的结构分为三个层次:事物层、管理层、决策层,每一层都由若干个模块组成,同一层次的模块间有横向信息的集成,层与层之间有纵向信息的集成。可见,办公自动化具有异构性、并发性的特点。将每个层次作为一类智能体,并将各层次下的每个模块作为一个智能体,建立多智能体系统的分层结构,利用最新提出的异质智能体技术^[55],可实现层与层之间、模块与模块之间的协调,实现横向集成;通过多个智能体间的合作,可实现模块与层之间的协调,实现纵向集成。

Sen^[56]采用智能体技术,将每个会议视为一个智能体,建立了基于网络的会议调度多智能体系统,该系统主要实现以下功能:1)建立用户界面,在该界面下用户可通过Email或主页提出会议请求,选定会议参加人数,并可向用户提醒会议时间;2)智能体之间采用合同网与启发式协商策略相结合,实现各种会议之间在时间安排上的协调;3)根据会议的重要程度设定智能体优先权,在会议之间时间发生冲突时优先考虑比较重要的会议;4)建立工作内存机制,通过工作内存可实现增加新的会议、撤消原定的会议等功能;5)实现自适应调度机制,当某个会议取消或时间发生变化时,整个多智能体系统重新进行协调。

3.15 网络化计算机辅助教学及医疗

Farias等^[57]采用人机智能体技术建立了一个放射治疗培训系统(RATAPLAN),开发了用于人机交互的窗口,实现了人机对话。每个用户都有各自的人机智能体,各智能体通过网络实现通讯。该培训系统实现以下功能:1)人机智能体通过最初请求判断用户的业务水平,以决定进一步培训的方式;2)人机智能体之间通过网络实现通讯,使初学者向高水平专家请教或彼此之间相互交流;3)人机智能体是动态的,它采用机器学习技术,可随用户需要而不断调整,使用户水平不断提高。

Moussalle把智能体技术应用于智能教学系统

开发。Singh利用多智能体技术建造了远程教学和健康信息系统。可以预见,在网上智能学校和网上智能医院的设计和开发中,多智能体技术将发挥潜在的不可估量的作用。

3.16 控制

Sahasrabudhe^[58]建立了一个多智能体控制系统框架,该框架包括三层:最底层为控制层,具有实时控制能力;中间层为管理层;最上层为多智能体协调与通讯层。该框架可解决飞行器机翼的伺服控制问题,框架内每个智能体负责各自的控制任务。Kohn等^[59]采用多智能体技术建立了混杂控制系统。Mehra等^[60]采用智能体建立了板材自适应控制模型。

4 发展与展望

作为分布式人工智能的重要组成部分,多智能体技术的理论与应用研究刚刚起步,还有不少问题有待于解决。多智能体今后的研究方向主要集中在以下几方面:

(1) 多智能体系统的实时性

1) 实时条件下多智能体系统通讯层、协作层和控制层的设计;

2) 实时条件下多智能体系统的性能(不确定性、可靠性、鲁棒性、推理机制、学习机制及各种规划算法等);

3) 复杂实时动态条件下智能体结构、表达方法、协调机制;

4) 开放式综合多级的多智能体系统结构,该结构应反映复杂环境下多层次、实时、动态的特点,并随问题性质的变化而改变;

5) 实时动态环境下定性和定量相结合的局部-全局不精确多智能体推理模型,并将时序推理、非单调推理、时限推理和异步事件处理技术溶入多智能体系统推理中;

6) 采用模糊集理论,研究多智能体系统中各智能体的不一致性和不确定性,探讨多智能体可信度协调模型;

7) 在时间和资源约束下多智能体系统的资源分配,各智能体间的学习及协作。

(2) 网络环境下的多智能体系统

研究基于多智能体技术的网络智能化方法,探讨建立和完善基于多智能体的分布式仿真系统和测试平台所面临的软件和硬件问题。

(3) 多智能体系统的协调

- 1) 参与协调智能体对系统所做的贡献;
- 2) 参与协调智能体信息的可靠性;
- 3) 参与协调智能体之间的影响;
- 4) 系统对参与协调智能体的重视程度;
- 5) 将多目标协调问题化为单目标协调问题。

(4) 实际应用的多智能体系统考核指标

- 1) 实时性、鲁棒性、自适应性、稳定性;
- 2) 开放性、可扩充性、可移植性;
- 3) 准确性、可靠性;
- 4) 可维护性、界面友好性、可操作性、通用性、

实用性。

(5) 逻辑符号与数学计算相结合的多智能体系统

研究多智能体的符号和数学方式的表达方法,探讨符号运算与数学计算的相互结合与转换,并将其应用于以机器和操作人员构成的人机共存的多智能体系统。

(6) 基于多智能体系统的分布智能控制

探讨将多智能体技术应用于实际的智能控制中所面临的问题,进一步研究具有分布和协调功能的智能控制系统的性能。

5 结 语

多智能体技术是目前人工智能领域中最新、最重要的研究方向之一。随着网络技术的发展,多智能体技术的应用领域不断扩大,现已面向社会领域的各个方面。该项研究刚刚起步,还有许多理论与实际问题有待于深入研究。如何将多智能体技术应用于生产实际,已成为当前最为迫切的任务之一。相信基于多智能体技术的分布式智能控制将成为智能控制的一个重要的研究方向,多智能体技术将为复杂系统的综合集成提供一条新的途径。

参考文献:

- [1] B C Draa, B M Moulin. Trends in distributed artificial intelligence[J]. Artificial Intelligence, 1992, 56(6): 35-66
- [2] D M Lane, A G M cfadzean. Distributed problem solving and real-time mechanisms in robot architectures[J]. Engineering Application Intelligence, 1994, 7(2): 105-117.
- [3] G Cohen. Concurrent system to resolve real-time conflicts in multi-robot systems[J]. Engineering Application Artificial Intelligence, 1995, 8(2): 169-175
- [4] B Bumeister, A Haddadi, G M atylis. Applications of multi-agent systems in traffic and transportation[J]. IEEE Trans on Software Engineering, 1997, 144(1): 51-60
- [5] C V Goldman, J S Rosenschein. Mutual supervised learning in multiagent systems[A]. Proc of IJCAI 95 Workshop[C]. Berlin, 1996. 85-96
- [6] N V Findler. Distributed control of collaborating and learning expert systems for street traffic signals[A]. IFAC Distributed Intelligence Systems[C]. Pergamon Press, 1991. 125-130
- [7] G Adorni, A Poggi. Route guidance as a just-in-time multiagent task[J]. Applied Artificial Intelligence, 1996, 10(2): 95-120
- [8] K H Funk, J H Lind. Agent-based pilot-vehicle interfaces: Concept and prototype[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1992, 22(6): 1309-1322
- [9] G Vernazza, R Zunino. A distributed intelligence methodology for railway traffic control[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 1990, 39(3): 263-270
- [10] Y Jin, T Koyama, Z J Zhang. The marine traffic control systems as a distributed problem solving network[A]. Proc IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics[C]. USA, 1990. 876-881.
- [11] C Ramos. Architecture and a negotiation protocol for the dynamic scheduling of manufacturing systems[A]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation [C]. USA, 1994. 3161-3166
- [12] H V D Parunak. Distributed AI and manufacturing control: Some issues and insights[A]. Proc 1st European Workshop on Modelling an Autonomous Agent in a Multiagent World[C]. UK, 1989. 30-37.
- [13] Y C P Jeff, J M Tenenbaum. An intelligent agent framework for enterprise integration[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1991, 21(6): 1391-1408
- [14] F Sprumont, J P Muller. AMACO IA: A multiagent system for designing flexible assembly lines[J]. Applied Artificial Intelligence, 1997, 11(6): 573-589
- [15] N R Jennings, L Z Varga, R P Arnts *et al*. Transforming standalone expert systems into a community of cooperating agents[J]. Engineering Application Artificial Intelligence, 1993, 6(4): 317-331
- [16] F Polat, S Shekhar, H A Guvenir. Distributed conflict resolution among cooperating expert systems[J]. Expert Systems, 1993, 10(4): 227-236

- [17] N R Jennings. Controlling cooperative problem solving in industrial multiagent systems using joint intentions [J]. *Artificial Intelligence*, 1995, 75(2): 195-240
- [18] B C Draa, P M illot. A framework for cooperative work: An approach based on the intentionality. *Artificial Intelligence in Engineering*, 1990, 5(4): 199-205
- [19] G Hartvigsen, D Johansen. Cooperation in a distributed artificial intelligence environment——The stomach application[J]. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 1990, 3(3): 229-237.
- [20] S J Russell. Provably bounded optimal agents[A]. *Proc of the 13th Int Joint Conf on Artificial Intelligence[C]*. USA, 1993. 40-48
- [21] H Wang, C Wang. APACS: A multi-agent system with repository support[J]. *Knowledge-based Systems*, 1996, 9(3): 329-337.
- [22] N M A vouris. Cooperating knowledge-based systems for environmental decision support [J]. *Knowledge-based Systems*, 1995, 8(1): 39-54
- [23] C Kuroda, M Ishida. A proposal for decentralized cooperative decision making in chemical batch operation [J]. *Engineering Application Artificial Intelligence*, 1993, 6(5): 399-407.
- [24] R R Yager. Intelligent agents for world wide web advertising decisions[J]. *Int J of Intelligent Systems*, 1997, 12(2): 379-390
- [25] Y Shoham. A gent oriented programming[J]. *Artificial Intelligence*, 1993, 60(1): 51-92
- [26] V an D A J, Siebes A. Enriching active databases with agent technology[A]. *Cooperative Information Agents[C]*. Berlin: Springer-Verlag, 1997. 116-125
- [27] Mehra A, Nissen M. Redesigning software procurement through intelligent agents[A]. *15th National Conf on Artificial Intelligence[C]*. Wisconsin, 1998. 26-30
- [28] O Etzioni, D Weld. A softbot-based interface to the Internet[J]. *CACM*, 1994, 37(7): 35-44
- [29] 张东摩, 李红兵. 人工智能研究动态与发展趋势[J]. *计算机科学*, 1998, 25(2): 5-8
- [30] N Jennings, B Crabtree. Introduction to the special issue[J]. *Applied Artificial Intelligence*, 1997, 11(5): 3-5
- [31] M Tsvetovatyy, M Gini, B Mobasher *et al*. MAG-MA: An agent-based virtual market for electronic commerce[J]. *Applied Artificial Intelligence*, 1997, 11(5): 501-523
- [32] N Sawaki, J Kawabata, H Tsujimoto. Cooperative performance system based on virtual agents [A]. *IEEE Conf[C]*. USA, 1996. 3230-3234
- [33] SN Hyacinth. Software agents: An overview [J]. *The Knowledge Engineering Review*, 1996, 11(3): 205-244
- [34] D Rus, R Gray, D Kotz. Transportable information agents[J]. *J of Intelligent Information Systems*, 1997, 9(2): 215-238
- [35] O Etzioni, D S Weld. Intelligenet agents on the internet: Fact, fiction and forecast [J]. *IEEE Expert*, 1995, 4(1): 44-49
- [36] K C Lee, W H Mansfield, A P Sheth. Framework for controlling cooperative agents[J]. *Computer*, 1993, 26(7): 8-16
- [37] A Poggi. Cooperative software agents for the unix domain[J]. *Knowledge-based Systems*, 1996, 9(3): 245-252
- [38] P Maes. Agents that reduce work and information overload[J]. *Communication of the ACM*, 1994, 37(7): 31-40
- [39] P S Katia. VISITOR-HOSTOR: Towards an intelligent electronic secretary[A]. *CIKM '94[C]*. Maryland, 1994. 80-92
- [40] M Balabanovic. An adaptive agent for automatic web browsing[R]. *Stanford University*, 1995. 35-44
- [41] B Kruhwich. The inforfinder agent: Learning user interests through heuristic phrase extraction [J]. *IEEE Expert*, 1997, 5(1): 22-27.
- [42] C Brown, L Gasser, E O Leary. AI on the WWW - supply and demand agents[J]. *IEEE Expert*, 1995, 4(1): 50-55
- [43] K Takahashi, Y Nishibe, I Morihara. Intelligent pages: Collecting shop service information with software agents [J]. *Applied Artificial Intelligence*, 1997, 11(5): 489-499
- [44] K S Decker, K Sycara. Intelligent adaptive information agents[J]. *J of Intelligent Information Systems*, 1997, 9: 239-260
- [45] T G Lewie. Where is client/server software headed? [J]. *Computer*, 1995, 28(4): 49-55
- [46] W Michael, R J Nicholas. Intelligent agents: Theory and practice [J]. *Knowledge Engineering Review*, 1995, 10(2): 115-152
- [47] 吴泉源, 王怀民. 银河分布计算环境[J]. *软件学报*, 1997, 8(10): 745-751.
- [48] D D A Moreira. Using software agents to generate VLSI layouts[J]. *IEEE Expert*, 1997, 6(1): 26-32

(下转第 180 页)

何一级的Agent都需要具有数据处理和特征状态识别的能力,只是不同级别的Agent可以采用不同的“算法”。

4.5 算法接口

Agent内核与算法模块之间的通信是通过接口完成的。只要为Agent内核与算法模块之间的通信提供一套标准的接口,便可使算法模块方便地与内核及其它Agent通信,从而使算法独立于Agent,实现算法的重用和移植,也便于在同级Agent间实现算法共享。

除上述5部分外,由于组织级Agent位于分散递阶控制系统的顶层,直接接受来自用户的输入指令,并将系统的状态反馈给用户,因此还需要一个面向用户的接口。

5 结 语

本文提出一种基于Agent的集散递阶智能控制的思想,并勾画了ABICS中各个层次的Agent的结构、功能及实现方案。如何实现具有并行、分布式结构的ABICS系统并应用于实际,是我们下一步工作的目标。将具有更高智能的MAS与传统的DCS相结合,充分发挥MAS的能力和DCS的结构优势,实现地理上分布、控制功能上分散、管理操作集

中的智能化功能,将是解决复杂系统控制问题的发展方向。

参考文献:

- [1] Jennings N R, Sycara K P, Wooldriage M J. Agent technology: Foundations, applications and market [M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1997.
- [2] 胡舜耕, 张莉, 钟义信. 多Agent系统的理论、技术及其应用[J]. 计算机科学, 1999, 26(9): 20-24
- [3] Jennings N R, Sycara K P, Wooldriage M J. A roadmap of agent research and development[M]. Autonomous Agents and Multi-agent Systems Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998 (1): 275-306
- [4] Wittig T. ARCHON: An architecture for multi-agent systems [M]. Chichester England: Ellis Horwood, 1992
- [5] 杨爱东, 郭壮, 秦宏启, 等. 基于对象/Agent的计算机集成过程运行系统建模研究[J]. 控制与决策, 1999, 14(3): 240-244
- [6] Saridis G N. Intelligent robotic control[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1983, 28(5): 547-557.
- [7] Yannis Labrou, Tim Finin. A proposal for a new KQML specification[R]. Pittsburg PA: TR CS-97-03, 1997.
- [8] 244
- [9] N Mani. Towards a cooperative multi-agent approach for computer aided VLSI design [J]. IEEE Proc, 1996, 78(3): 2119-2123
- [10] P C Michal. Discourse model for collaborative design [J]. Computer-aided Design, 1996, 28(5): 565-574
- [11] M R Cuskosky. PACT: An experiment in integrating concurrent engineering systems[J]. IEEE Computer, 1993, 26(1): 30-42
- [12] H Park, M R Cutkosky, A B Conru *et al*: An agent-based approach to concurrent cable harness design. Artificial Intelligence for Engineering Design. Analysis and Manufacturing, 1994, 8(1): 45-61.
- [13] M Merz, B Liberman, W Lamersdorf. Using mobile agents to support interorganizational workflow management[J]. Applied Artificial Intelligence, 1997, 11(6): 551-572
- [14] M Gams, B Hribovsek. Intelligent-personal-agent interface for operating systems [J]. Applied Artificial Intelligence, 1996, 10(4): 353-383
- [15] S N Hyacinth. Software agents: An overview [J]. The Knowledge Engineering Review, 1996, 11(3): 205-244
- [16] S Sen. Developing an automated distributed meeting scheduler[J]. IEEE Expert, 4(1): 41-45
- [17] A Farias, T N Arvanitis. Building software agents training systems: A case study on radiotherapy treatment planning[J]. Knowledge-based Systems, 1997, 10(2): 161-168
- [18] V Sahasrabudhe. A multiagent control system framework for smart structures [A]. AIAA [C], USA, 1998. 4202-4215
- [19] W Kohn, A Nerode. Multiple agent autonomous hybrid control systems [A]. Proc of the IEEE Conf on Decision and Control [C]. Tucson, 1992. 16-18
- [20] A Mehra, C Virginio. Adaptive process control for a plating line using intelligent agents [A]. Int Conf on Multiagent Systems, ICMA S '98 [C]. Paris, 1998. 76-82

(上接第140页)

- [49] N Mani. Towards a cooperative multi-agent approach for computer aided VLSI design [J]. IEEE Proc, 1996, 78(3): 2119-2123
- [50] P C Michal. Discourse model for collaborative design [J]. Computer-aided Design, 1996, 28(5): 565-574
- [51] M R Cuskosky. PACT: An experiment in integrating concurrent engineering systems [J]. IEEE Computer, 1993, 26(1): 30-42
- [52] H Park, M R Cutkosky, A B Conru *et al*: An agent-based approach to concurrent cable harness design. Artificial Intelligence for Engineering Design. Analysis and Manufacturing, 1994, 8(1): 45-61.
- [53] M Merz, B Liberman, W Lamersdorf. Using mobile agents to support interorganizational workflow management [J]. Applied Artificial Intelligence, 1997, 11(6): 551-572
- [54] M Gams, B Hribovsek. Intelligent-personal-agent interface for operating systems [J]. Applied Artificial Intelligence, 1996, 10(4): 353-383
- [55] S N Hyacinth. Software agents: An overview [J]. The Knowledge Engineering Review, 1996, 11(3): 205-