

多智能体模型在多机器人网络遥操作中的应用*

高永生 赵 杰

(哈尔滨工业大学机器人研究所 哈尔滨 150080)

摘要：通过 Internet 网络操作远端的机器人可以扩展人类的控制能力，但系统的复杂性和不确定性使如何更好地表现其良好性能成为目前的热点问题。通过对多机器人网络遥操作系统控制模式分析，阐明了以智能体技术为支撑，实现操作者智能与机器人局部自主能力的结合，完成多操作者多机器人 Internet 网络遥操作任务。在对多智能体技术概述基础上，重点分析智能体之间的联结特点，建立具有公共属性的智能体模块化层次结构，给出各模块的功能描述。在此基础上，实现基于多层分布式黑板模型和智能体节点的多机器人网络遥操作系统体系结构。最后设计一组辅助医学操作试验，通过测试实时避碰智能体的工作状态和效率验证了多智能体结构框架下多机器人网络遥操作的可行性和有效性。

关键词：多智能体 黑板结构 多机器人 遥操作

中图分类号：U270

0 前言

20 世纪末，机器人技术、计算机技术和网络技术的快速发展使得通过 Internet 网络遥操作机器人成为可能，机器人应用领域从传统的危险环境下操作、太空作业和简单重复性操作，扩展到远程医疗、分布式任务和网络操作等许多新兴领域。由此，人类的控制能力得到极大扩展，并且在未知环境中的安全性得到提高。

目前，为了克服单机器人操作的局限性，提高完成复杂作业任务的能力和效率，由多个不同种类的机器人按照一定的结构关系和模式相结合的多机器人系统成为研究热点^[1-3]。但系统中存在网络传输时延、运动冲突和死锁等不确定问题，造成通信负担重、系统不稳定，仅仅通过传统的分层控制存在很多困难。而 AI(人工智能)领域中具有计算能力、合作能力与竞争能力等特点的智能体技术恰好可以与多机器人系统的技术研究相结合，更好地完成控制任务^[4-5]。抽象的智能体理论可以利用概念、体系结构和协作策略进行表述^[6-9]。ZHANG 等^[10]应用智能体理论实现了双臂协作装配，设计出相应的开发工具和传感、执行系统结构。HU 等^[11]设计了 PLMAS 模块，通过使用分布式智能体技术实现各影响因素和决策推理目标的协调。DANIEL 等^[12]研究了智能体与黑板模型的交互形式，据此提出通用控制模型。

首先阐明多机器人遥操作系统中操作者智能参与和机器人局部自主相结合的控制模式对于系统实现的重要意义，提出适用于 Internet 网络多机器人遥操作的共享控制模式。然后按照智能体理论，分析了抽象智能体实现结构，设计了节点形式的通用智能体结构。建立了由各智能节点和分布式黑板模型集成的多机器人网络遥操作系统，实现其局部自主能力。设计了一组医学辅助操作试验，通过测试实时避碰智能体效果验证了基于多智能体结构的多机器人系统的有效性。

1 系统控制模式分析

对于典型的网络遥操作系统，理想的控制模式是机器人自主完成任务，操作者监督机器人的工作过程。这种情况下，需要机器人有高级协作和决策能力。当前科技水平还不能实现这样的控制思想，因此，主要工作集中在如何集成机器人局部自主性和操作者的智能参与性，达到有效扩展人类远程控制能力的目的。

图 1 描述了遥操作过程中的信息产生和传递过程：操作者发送控制命令，同时监督远端的机器人状态变化；远端的机器人子系统采集和处理实时状态信息，同时将局部融合信息传送到本地端的操作者虚拟环境中，更新其中显示的机器人状态。由这一过程可知，系统的信息处理过程非常复杂，仅仅依靠机器人局部处理能力远远不够，需要操作者的智能参与才能很好地解决复杂问题。按照操作者智能参与程度的不同，系统控制模式可以分成三类：直接控制、共享控制和监督控制。随着操作者

* 国家 863 计划资助项目(2001AA422250)。20051027 收到初稿，20051215 收到修改稿

参与程度的降低，机器人的智能程度逐渐增加。在直接控制模式中，操作者完成所有的决策工作，而机器人没有任何智能。共享控制中，机器人按照环境信息和操作者任务命令完成局部控制；同时人的智能行为优先于机器人智能，操作者控制处于主导地位，必要时对机器人行为进行干预。而监督控制模式中，机器人具有完全自主性，独立完成操作者命令，操作者在系统中只作为监控者和命令发布者出现。

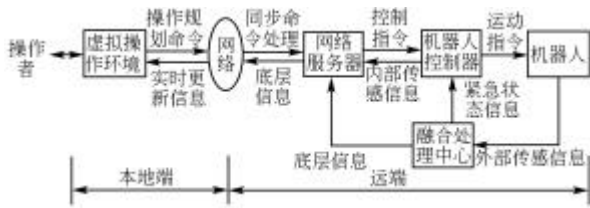


图1 基于Internet多机器人遥操作中的信息流

从以上对于智能分配和管理的分析可知，开发具有计算、管理和通信等多种主要特征的多智能体模型，可以更好地提高系统的局部自主能力，保证操作者的参与能力，从而有效地完成复杂任务。

2 智能体模型的分析与设计

2.1 智能体结构分析

智能体技术不但是人工智能和计算机科学领域的研究热点之一，而且在机器人领域正逐渐发挥重要作用。目前对于智能体还没有统一的标准定义，一般认为智能体是一个具有自主性、主动性、社交性及反应性的物理或抽象的实体。多智能体系统是多个这样的可计算智能体的集合，研究目标是将复杂系统构造成规模较小、相互协调、具有分布特性的子系统。子系统由多个抽象智能体按照其功能进行表述和信息交互，而功能独立的抽象智能体可以由一些功能细化的子智能体组成，智能体之间可以利用黑板结构实现信息交互，协作完成复杂的分布式任务。

图2描述了抽象智能体的基本结构。作为父类的抽象智能体是构成子系统的基本单位，具有公共属性，实现全局信息管理、交互和子智能体之间的执行控制。同一级子智能体之间可以直接通信，而任一个子智能体的次级子智能体可以与上一级其他子智能体之间通信和相互作用。以这样的层次化结构建立智能体复合结构，任务层次清晰，控制智能体间信息流动容易，降低了通信负担；减小了上层节点的任务量和上层失误对全局的影响，并且多层分布式节点结构增强了系统的强壮性。

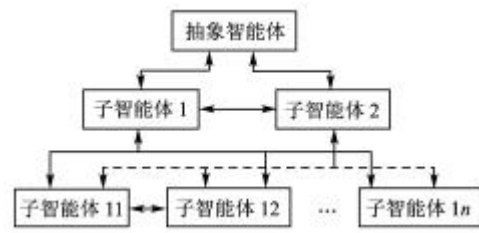


图2 智能体层次细化结构

2.2 智能体节点设计

人工智能领域中，慎思智能体是基于知识的符号人工智能系统，强调规划、搜索已知环境下任务明确、目标给定的情况；反应智能体是基于行为的人工智能特点的体现，每个行为都试图控制机器人，底层行为比高层行为具有更高的优先权。这种结构的智能体结构简单，难以完成复杂的任务，并且以局部信息为决策依据，不能考虑整体和其他部分的信息，也无法预测其决策对系统整体行为的影响，其没有远见性的行为可能导致系统行为的不可预见性和不稳定性。因此，结合以上两种基本智能体结构形式和多机器人遥操作系统控制特点，建立复合智能体模型，既体现规划推理，又强调交互反馈，每一个智能体作为一个共享节点而开发相应的行为，实现传感、规划和反应作用等基本功能。

相应地，节点控制结构设计如图3所示，各子智能体功能解释如下。

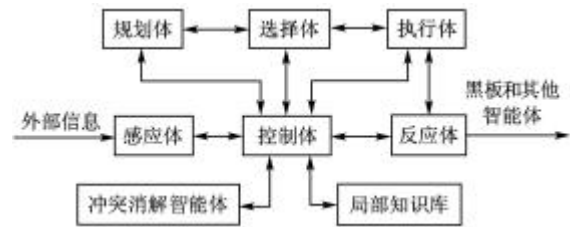


图3 智能体功能节点图

(1) 控制体。负责节点的抽象行为，包括总体规划和管理。按照储存在感应体中的外部工作状态激活全局或局部知识源。如果成功，则激活的知识源会被推入规划体中。它也可以从子智能体中获得负载和源信息用于维护正确的信息表。按照这张表，利用分配算法，将知识源分配到子智能体中。当不能根据相应的外部信息激活源时，信息由黑板机制传输到其他的节点中。

(2) 感应体。主要功能是从黑板或其他智能体中接收和翻译信息。为提高互操作性和信息流动管理，定义两个层面上的信息流协议和通信方法。首先是负载信息描述标准，其次是通信协议标准语言，指明传输地址、发送方法和接收方法。

(3) 反应体。负责发送智能体规划处理的控制指令。当任务完成能力不足时,则分配任务到其他智能体或写入黑板中,以便进一步处理问题。

(4) 规划体。根据反应体中的信息,结合局部知识库中提供的处理方法,进行问题求解规划。

(5) 选择体。选取规划体中的规划步骤,将问题的优化处理集调入执行体中。

(6) 执行体。根据规划体的信息处理方法,完成局部规划或实时反应。在信息处理过程中,可以通过与其他智能体的协作,动态调整加工过程。执行完成后,将控制指令列送入反应体中。

(7) 冲突消解智能体。解决子智能体之间在局部计算中的潜在冲突。当控制智能体发现信息不完备、不正确的信息和知识、自治体应用判据不同、推理机制不同、工作目标不同等问题求解的不确定性时会启动它,按照优先级重新进行决策。

3 系统结构

按照共享操作模式,多机器人网络遥操作系统可以分成三个子系统:人机交互控制、协调规划和实时监控子系统。每个子系统按照功能要求由多个逻辑智能体构成,子系统内部及其之间集成分布式黑板结构,作为共享数据库存放问题求解状态信息和实现信息交互(图4和表1描述了基于多智能体结构的多机器人遥操作系统结构)。

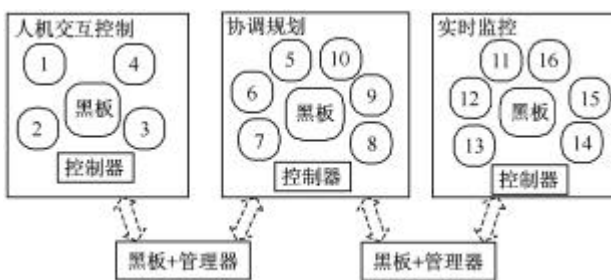


图4 基于多智能体结构的多机器人遥操作系统结构

表1 系统智能体名称

个体	智能体名称	个体	智能体名称
1	人机界面	9	RX60 实时控制
2	操作者协调	10	RX90 实时控制
3	远程监控	11	智能手爪
4	预测	12	视频传感
5	指令同步	13	实时避碰
6	协调	14	信息融合
7	RX60 运动规划	15	信息采集
8	RX90 运动规划	16	任务分配

人机交互控制子系统主要是为分布式操作者提供工作界面和远程监控。其中,人机界面智能体提

供功能良好的工作界面,以便准确、清晰地执行操作任务。远程监控智能体监控实际工作的多个机器人状态,通过侦测实时工作空间信息和利用信息反馈修正的机器人状态信息。操作者可以使用预测智能体在VR(虚拟环境)中判断机器人是否可以成功完成规划的任务。如果在VR中机器人位置异常,则给出警告指令,避免传输控制指令到远端机器人系统。协作智能体会帮助操作者之间领会操作意图,避免无效操作。

协调规划子系统作为人机交互控制和实时控制子系统的桥梁,也执行多操作者的命令。其中,同步指令智能体根据时间序列判断操作命令的有效性。协作智能体融合实时机器人状态信息和操作者指令,判断机器人工作状态。运动规划智能体实现机器人每一步操作的控制指令。

实时监控子系统的作用是保证系统工作过程中准确执行指令和进行安全控制。信息采集智能体感知或接受环境信息,存入相应的黑板结构中。信息融合智能体融合黑板结构的实时信息,并且给出机器人的实时状态信息到其他智能体中。实时避碰智能体接收信息融合智能体传递的实时状态信息,同时也会根据当前指令搜寻机器人相关状态,然后作出机器人间的运动状态判断。当实时避碰智能体检测到危险区域时,会驱动相应的保护机制工作以避免危险,同时将状态信息传递给操作者。

黑板模型设计对于实现存储、控制和有效分配系统信息非常重要。在黑板中登记每个智能体的地址、工作能力和状态,在工作条件变化时,动态改变相应记录,解决动态连续性问题。黑板模型分配信息给每一智能体节点,使用同步控制机制控制全局知识库中知识源的共享存取。模型特性如下:黑板结构的层次化设计。源和层次化子黑板结构的定义良好的协作关系。信息积累的易加工处理。

简化刺激过程和响应源的能力,响应环境变化中的紧急事件、无需复杂推理。控制简单,高效的分配算法。实现智能体的交互、推理、决策等功能。

智能体和黑板之间的交互方式如图5所示。智能体根据触发信息搜寻环境信息,将信息在黑板管理器中注册后,保存在相应的级别中。智能体搜索或接受触发信息后,使用局部知识库中的源知识或者通过检查黑板级别中的注册信息与其他智能体合作处理信息。加工结果作为共享数据在黑板中注册,同时将信息保存在黑板的共享级别中。通过这样一系列的子任务可以最终完成给定的任务。

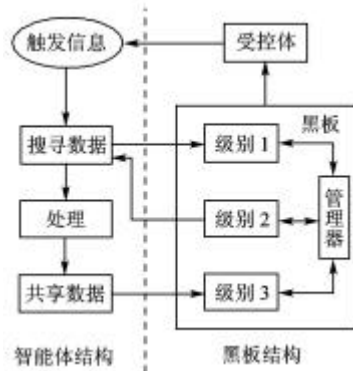


图5 智能体与黑板结构信息交互

4 试验方法与分析

远程医学领域应用是多机器人遥操作的一个重要方向。作为初级研究阶段，试验目标是利用协作多机器人代替医学人员在病毒实验室和危险环境中的操作，这样，医学科研人员可以远程操作复杂试验，同时避免接触易感染环境。

4.1 物理结构

多操作者多机器人遥操作是指多个操作者在不同地区通过 Internet 在分布式虚拟环境中操作处于同一工作空间的远端机器人(图6)。本试验系统中使用 Staubli 公司的 RX60 和 RX90 机器人，末端手爪是自行研制的包含多个异构传感器的智能手爪(包括7组测距传感器，2个阵列触觉传感器，1个6自由度刚性力/力矩传感器，1个6自由度柔性力/力矩传感器，1个 CCD 微摄像头)，此手爪在机器人运动或抓取物体时可以感知周围环境。另外，在机器人工作空间中，设置了3个 CCD 摄像机，可以获得机器人运动信息。操作者可以利用鼠标、力反馈手柄或主手在分布式虚拟环境中规划机器人运

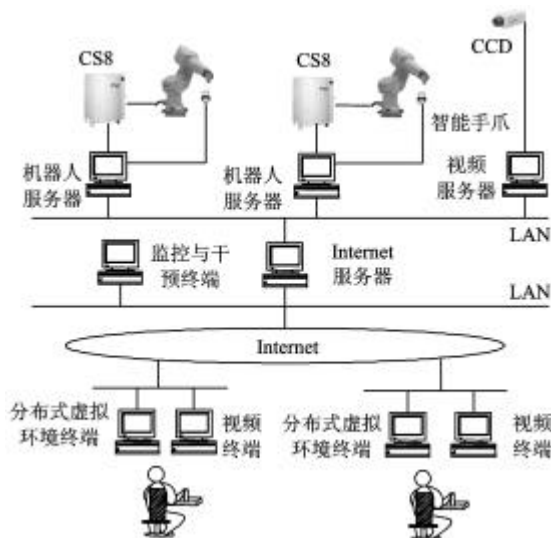


图6 多机器人网络遥操作系统结构图

动。操作指令被同步化后，与实时状态信息协调规划，得到规划后的控制指令。由控制器按照控制指令控制机器人和手爪完成运动。

4.2 试验过程与分析

从医学标准试验过程来看，整个操作是复杂而且耗时的。因此，将试验分成四个阶段进行讨论：抓取试验仪器、滴试剂、抽取样品和观察。图7给出了试验阶段性快照。其中，图7b显示了用 Java3D 语言建立的虚拟环境。为更好地评价基于多智能体模型的系统操作效果，将实时控制子系统中实时避碰智能体的激活次数作为指标，在表2中记录了不同试验阶段中实时避碰智能体的激活次数。由于网络时延是影响机器人遥操作的重要因素，因此利用时延仿真器仿真随机网络时延^[13]。从表2的试验结果可见，实时避碰智能体在试验的各个阶段都发挥了作用。随着操作任务的复杂性和多机器人在同一工作空间中冲突的可能性的增加，实时避碰智能体的激活次数明显增加，及时地进行局部规划和控制，避免碰撞。从表2中也注意到在时延情况下或复杂条件实时避碰智能体的作用尤其重要。

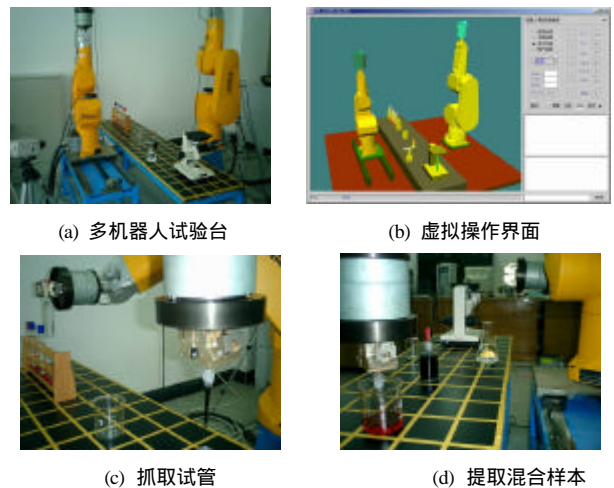


图7 试验装置及试验过程

表2 实时避碰智能体的激活次数

激活次数	阶段			
	抓试管	滴试液	抽取样品	显微观察
时延条件				
0 s	2.5	12.3	7.4	15.6
随机时间 t/s	4.5	18.7	14.6	19.4

5 结论

提出层次化智能体模型，并在共享控制模式下构建基于多智能体的多机器人网络遥操作系统，可以有效地融合操作者智能与机器人局部自主能力，完成复杂的网络操作任务。设计模块化智能体节点结构和智能体与黑板结构的交互作用模型，并对基

于多智能体模型的多机器人网络遥操作进行试验,验证了基于智能体技术的网络信息流控制和网络遥操作的可行性。

参 考 文 献

- [1] LUO R C, SU K L, SHEN S H, et al. Networked intelligent robots through the Internet : issues and opportunities [J]. IEEE, 2003, 91(3) : 371-382.
- [2] JOZEF Z, JAMES H G. A neural-fuzzy approach for robot system safety[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews, 2001, 31(2) : 49-64.
- [3] NAK Y C, TETSUO K, KOHTARO O, et al. Remote coordinated control in multiple telerobot cooperation[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, California, 2000 : 3 138-31 43.
- [4] ECKHARD F, JURGEN R. The basic ideas of a proven dynamic collision avoidance approach for multi-robot manipulator systems[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ, IROS, Las Vegas, Nevada, October, 2003 : 1 173-1 177.
- [5] SARIDIS G N. Architecture for intelligent controls[C]// IEEE symposium on implicit and nonlinear systems, Ft, worth, TX, 1992 : 14-15.
- [6] SUH I H, YEO H J, KIM J H. Design of a supervisory control system for multiple robotic systems[C]. IROS, Osaka, Japan, January 1996 : 332-339.
- [7] WEISS G. Multiagent systems[M]. Cambridge :MIT Press, 1999.
- [8] WANG Liqun, CHENG Shifu. Multiagent and multi-problem harmony model[J]. Journal of Software, 2002, 13(8) : 1 637-1 643.
- [9] ASAMA H, FUKUDA T, ARAI T, et al. Distributed autonomous robotic systems[M]. Tokyo : Springer-Verlag, 1994.
- [10] ZHANG J, COLLANI Y V. An Interactive assembly by a two-arm agent[J]. Robotic and autonomous systems, 1999, 29 : 91-100.
- [11] HU Wenbing, WANG Shaomei. Study on logistics decision supported system based on multi-agent[C]// The 8th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, Xiamen, China, 2004 : 313-318.
- [12] DANIEL D C. Collaborating software blackboard and multi-agent systems & the future[C]// Proceedings of the International Lisp Conference, New York, October 2003.
- [13] 赵明国. 基于 Internet 的遥操作系统的研究[D]. 哈尔滨 : 哈尔滨工业大学, 2001.

APPLICATION OF MULTIA-GENT MODEL IN MULTI-ROBOT TELE-OPERATION SYSTEM

GAO Yongsheng ZHAO Jie

(Robotics Institute, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150080)

Abstract : Control capability of human being can be expanded by operating remote robots through the Internet. But it is becoming the hotspot of how to achieve the excellent performance under the complexity and uncertainty of the system. By analyzing control modes of the multirobot teleoperation system, it is clarified that agent technology is supported to realize the incorporation of the intelligence of the operators and local autonomous ability of the robots to finish the teleoperating tasks. On the basis of the summary of agent technology, connection characters among the agents is analyzed and layered structure of abstract agent with public attributes is presented. Functional descriptions of each agent in a node are also depicted. System architecture is realized based on distributed layered blackboard and agent node structure. A set of auxiliary medical operational experiments are designed to test the feasibility and effectiveness of tele-robots system by measuring the work state and efficiency of real-time collision avoidance agent.

Key words: Multi-agent Blackboard structure

Multi-robot Tele-operation

作者简介:高永生,男,1971年出生,博士研究生。研究方向为多机器人网络控制技术。

E-mail : gao_ys@hit.edu.cn