

文章编号: 1002-0446(2002)05-0459-05

基于 Internet 多操作者多机器人的遥操作系统的研究*

赵 杰 闫继宏 蔡鹤皋

(哈尔滨工业大学机器人研究所 哈尔滨 150001)

摘 要: 近年来基于 Internet 多操作者多机器人 MOMR(Multi-Operator-Multi-Robot) 协作成为许多学者关注的对象. 相对于单操作者单机器人 SOSR(Single-Operator-Single-Robot) 遥操作任务的单一性和局限性, MOMR 在群体作业如: 设备维护、建筑建造、外科手术等许多场合具有明显的优势. 对于危险或难以到达的环境, MOMR 遥操作系统的控制成为一个主要问题. 本文综述了基于 Internet 的 MOMR 系统的结构、概念以及国内外的研究现状, 并讨论了 MOMR 系统存在的主要问题和各种协调(或协作)控制方法.

关键词: 多机器人协作; Internet; 遥操作

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

RESEARCH ON INTERNET-BASED MULTI-OPERATOR-MULTI-ROBOT TELEOPERATION SYSTEM

ZAO Jie YAN Jihong CAI He-gao

(Robot Research Institute, Harbin Institute of Technology 150001)

Abstract Recently some noticeable efforts have been devoted to the internet-based MOMR(multi operator-multi robot) collaboration. MOMR teleoperation would have a significant advantages over SOSR(single-operator-single-robot) in group work such as the plant maintenance, construction, and surgery. Control of MOMR teleoperation system plays an important role in remote operations in dangerous or difficult-to-access environment. This paper describes architecture and conception of internet-based MOMR teleoperation system and overviews the present situation, and its main problems and various coordinated schemes are also discussed.

Keywords: multirobot collaboration, Internet, teleoperation

1 引言(Introduction)

随着遥操作技术的发展,在许多太空、海底、军事、核废料和有毒物质的处理等危险的作业中机器人已经能够替代人来完成任务. 网络技术的发展使得通过 Internet 进行具有有力反馈的遥操作成为可能, 这项技术的应用主要包括远程医疗、分布式作业及通过 Internet 进行合作等. 各地的专家们通过 Internet 完成远端的高精度和相对复杂的任务, 这提高了人类在一些危险有害的作业环境的可达到性和安全性, 而 MOMR 遥操作主要是为了满足此目的.

基于 Internet 的机器人遥操作面临许多挑战和困难, 包括克服遥操作中随机时延的问题、人和计算机交互界面、人和机器人交互界面以及任务的同步

性等许多有待解决的问题, 而多操作者多机器人合作和协调来完成一个任务时, 问题就变得更为复杂.

2 基于 Internet 的 MOMR 遥操作系统的概念和分类(Conception and classification of internet-based MOMR teleoperation system)

多操作者的遥操作机器人系统结合了遥操作和多机器人协调两种技术, 处于不同地区的操作者共同协作遥控远处的多个机器人来共同完成一项任务. 在 MOMR 遥操作系统中操作者端和从机器人(或从操作手)端都与网络相连接, 采用 Internet 作为主、从操作手之间数据交换的通道, 操作者在预测显

示器的辅助下利用主手控制远端的从手. 多机器人遥操作的系统结构如图 1 所示.



图 1 基于 Internet 的 MOMR 遥操作系统

Fig. 1 Internet-based MOMR teleoperation system

Ohba^[1]等人根据多个机器人在完成任务时机器人彼此之间的相互关系把多机器人协作分为有约束协作系统和无约束协作系统两类. 这种分类方法仅以机器人之间的相互关系作为约束条件, 并不包括机器人的工作环境、工作目标等附加约束.

有约束协作系统指的是需要多个机器人共同合作完成一个任务, 操作者必须考虑其他辅助完成任务的机器人, 而不能独立地控制其中一个机器人; 无约束协作系统中每一个机器人则能够被独立地控制, 但是操作者必须小心地监视其他机器人的运动, 以免发生碰撞或运动冲突(或运动干涉). 最近几年中许多学者对于有约束协作提出了各种控制策略, 例如: 主-从控制、位置力混合控制或阻抗控制. 但是, 到目前为止, 对于 MOMR 遥操作系统的研究还主要集中在无约束协作这一方面.

3 国内外研究现状(Literature review)

在过去的十几年中, 对基于 Internet 的遥操作的研究一直限制在 SOSR 遥操作系统的研究上, 解决时延问题一直是遥操作的核心问题, 许多学者^[2-8]致力于这方面的研究并且取得了初步的成果. 基于 Internet 的遥操作机器人系统按系统结构的不同, 可以分成两大类: 基于 Internet 的双向力反馈遥操作机器人系统与基于 Web 浏览器的遥操作机器人系统. 前者将 Internet 作为传统遥操作系统中的通讯手段, 从体系结构与技术上基本延续了传统遥操作系统所采用的方法与技术, 但由于 Internet 的引入, 在具体处理方法上与传统技术又有所区别. 后者完全以网络为主体, 遥操作系统中只存在从操作手, 而主操作手

被 Web 浏览器所取代. 1993 年 8 月, 由 Ken Goldberg 等连接到 Internet 上的 Mercury Project 是第一个基于 Web 浏览器的遥操作机器人系统. 操作者通过 Web 浏览器登录到加州大学的 Mercury Project 主页, 然后使用鼠标与键盘控制一台 SCARA 机器人在半圆形的沙堆中进行物品挖掘. 此后, Ken Goldberg 等又开发了 Telegarden 等多个基于 Web 浏览器的遥操作机器人系统. 1994 年 9 月, 西澳大利亚大学的 Ken Taylor 等把一台 ABB 工业机器人连接到 Internet 上, 该系统允许操作者通过 Web 浏览器控制机器人对工作台上的物体进行抓取和搬运, 是迄今为止最为完备且运行时间最长的网上机器人.

近年来国际上已经有部分学者致力于多机器人遥操作系统的研究. 最早是在 1996 年 Kheddar^[9]等人进行的远距离单个操作者并行操作多个机器人的实验, 但是并没有考虑到通讯时延的问题. 比较典型的有日本的机械工程实验室(MEL)同东芝机械系统实验室(TMSL)的 Nak Young Chong^[10-15]等人, 对通过网络操纵远端环境下的多机器人协作技术进行了研究, 目前的研究重点还主要在对多机器人运动干涉的协调与合作控制的问题上. 在 MOMR 远程操作中, 由于网络时延引起的操作者的视觉信息延迟严重影响了多机器人协调操作的效果, 因此需要辅助的手段来引导操作者. 通过在 MEL 和 TMSL 之间建立了一个远程操作实验性平台来研究具有时延的远程多机器人协作, 提出了多种避免多机器人运动冲突的协调控制方法并通过仿真试验验证各种方法的有效性. 美国密歇根州立大学的 Ning Xi^[16-18]等人对于网络上移动机器人和通用六自由度机器人之间的协调进行了理论和实验性的研究, 提出了一种新型的基于事件智能控制方法和 Internet 多机器人协调遥操作建模方法来解决 MOMR 遥操作系统中的 Internet 时延问题. 结合了 Petri 网模型和基于事件控制两种方法, 为解决 Internet 多机器人协调遥操作建模的同步性和复杂性提供了一个有效途径, 同时也为研究系统的稳定性、透明度和同步性提供了一个有效的分析工具. 通过在美国、日本、香港三个机器人实验室组成的实验平台对该理论进行了实验研究, 但是对于实际系统还有待于进一步验证.

至于其他的学者对多机器人协作的研究仅限于多个操作者之间的协调与控制问题或者是仅仅提出了基于 www 服务多机器人遥操作的交互界面的框架, 而没有通过实验进行验证. 南加州大学的 Ken Goldberg^[19]等人建立的多操作者协调系统

Planchette, 最多可以允许 30 个操作者控制一个机器人, 机器人根据网络上所有操作者提出的要求进行决策确定最后的移动位置. Suzuki^[20, 21]描述了一种基于 WWW 的多机器人遥操作人机交互界面系统, 为了实现单个操作者控制多机器人的遥操作, 讨论了操作和网络两方面的问题, 在交互界面和 WWW 服务之间提出了分三个层次来操作机器人. 建立了一个基于 Internet 的遥操作系统模型, 并建立了实验平台, 该平台由多个携带摄像机的全方位移动机器人组成, 但是并没有对 Internet 的时延问题进行讨论提出解决方法.

我国从 1995 年开始陆续有许多高校院所开展了基于 Internet 的 SOSR 方面的研究, 均是对单个操作者单个机器人系统的研究, 主要集中在解决空间大时延、虚拟环境建模、主操作手的设计、力觉临场感、遥操作控制算法、机器人局部自主等问题的研究上, 这些方面的研究以北航、哈工大、清华、沈阳自动化所、南开、东南大学、上海交大等为代表, 而对于基于 Internet 的多操作者多机器人遥操作系统的研究在国内还未见报导.

4 基于 Internet 的 MOMR 遥操作系统存在的主要问题(Main problems of internet-based MOMR teleoperation system)

基于 Internet 的 MOMR 遥操作系统具有基于 Internet 的遥操作和多机器人协调与合作两种技术的局限性和困难. 网络通讯存在变化的传输时延, 将 Internet 作为遥操作系统的通讯手段会降低系统的控制效果甚至失去稳定性, 因此解决变化时延的影响是基于 Internet 的遥操作技术的核心内容. 多机器人协调与合作指的是两个或多个机器人共同完成一项工作的情况, 这个任务一般由单个机器人难以完成需要群体作业, 确保在无运动冲突的条件下并行操作多个机器人就成为其操作中的主要障碍.

4.1 基于 Internet 的 MOMR 遥操作系统中的时延问题

网络传输时延的不确定性是基于 Internet 的遥操作机器人系统不可避免的问题, 它不仅影响到系统的稳定性, 而且影响到系统的可操作性. 遥操作中操作者必须能够监视从端机器人, 以保证他发出的命令被正确地执行或者能够在出现错误时及时地改变控制命令, 但是由于时延的存在从机器人和主操作手之间的信息传输具有双向时延. 在过去的几年里, 预测显示经常被用来解决 SOSR 遥操作系统中

时延对视觉反馈造成的影响, Noyes、Sheridan、Cheng 及 Hirzinger^[22, 23]等人通过不同的实验对预测显示技术进行了研究, 证明了该方法的有效性. 近年来, 结合虚拟现实技术, 这一方向发展成为虚拟现实建模技术, 通过对逼真的虚拟环境的操作来得到对从机器人一端的控制命令, 基本可以解决操作者的视觉和力觉反馈问题. 但是, 在 MOMR 遥操作系统中, 由于多个操作者身处异地彼此之间对于其他操作者的控制意图不能及时的了解, 致使预测由其他操作者控制的从机器人的运动非常困难.

网络带宽与动态路由造成的不确定传输时延如果不能很好解决还会造成系统的不稳定、不同步. 在 MOMR 遥操作系统中, 异地的操作者在遥控机器人的过程中的同步性和稳定性的降低也会影响遥操作机器人之间协调运动的安全性和灵活性.

4.2 基于 Internet 的 MOMR 遥操作系统中的运动冲突问题

当多个从机器人在同一个工作空间内运动极有可能发生碰撞, 因为传输给每个操作者的另一个机器人的图像是具有时延的, 他并不清楚从机器人的实际构形, 容易被有时延的图像造成误解而发出错误的命令. 实际上操作者仅仅依靠现场的摄像机提供的具有时延的视觉信息不足以确定出其他地点的操作者控制的从机器人的运动, 因此会因为担心相互协作的从机器人之间发生运动冲突而感到神经紧张. 而且我们很难建立出一个对异地的操作者的控制状况的预测模型, 因此操作者控制机器人时不能给出大步距的命令, 必须保证相互协作的机器人之间有一定的距离, 致使系统的效率很低.

5 MOMR 协调控制方法(Coordinated control methods of MOMR)

网络时延是影响 MOMR 遥操作系统主要因素, 到目前为止一些学者已经提出了几种不同的协调控制方法并取得了一定的满意效果.

5.1 虚拟厚度修改

Ohba^[1]等人提出通过改变从机器人在主操作手端显示时的厚度弥补通讯时延造成的从操作手运动的不确定性. 它最大的优点是方法简单, 可以通过从操作手厚度的改变补偿通讯中的时延问题, 并且能够明确地表达出可能发生运动干涉的区域, 但是这种方法中的干涉区域牺牲了一些从操作手可以进入的有效区域, 使得从操作手的运动空间受到了一定的限制, 操作精度降低.

5.2 估计预测重叠

Kawabata^[24]等人采用估计预测重叠的方法进行协调控制,在主操作手端重叠预测的从操作手的运动轨迹和从操作手具有时延的模型.首先平均从操作手末端5个采样周期的速度,使从操作手以平均速度移动克服时延,然后利用传输回来的从操作手运动状态信息建立实体模型,并在其上重叠预测的从操作手的轨迹轮廓,最后操作者对照预测轨迹轮廓操纵从操作手.但是,由于不知道其他操作者的控制命令,所以预测精度很难保证.

5.3 比例速度协调控制

前两种方法虽然能够补偿从操作手在时延条件下运动的不确定性,显著地降低了产生运动冲突的可能性,但是不能避免瞬间突发的运动冲突.实际上操作者即使意识到从操作手之间的运动可能会有冲突,立即停止远端的从操作手的运动也是非常困难的.但是如果在允许的界限内控制从操作手的速度,有利于安全、迅速地中止从操作手的运动. Kosuge^[25]等人在宏微遥操作中提出一种比例调节控制方法,用两个比例因子(运动比例系数和力比例系数)简化主手和从手之间运动和力的关系,据此 N. Y. Chong^[10]等人提出了比例速度协调控制方法.当预测到从操作手要发生运动冲突时自动调整从操作手的速度,而且在两个从操作手之间的距离不够安全可能发生运动干涉时,从操作手末端的速度会降下来.主操作手的控制指令根据从操作手之间的距离成比例地缩放调整后发命令给从操作手,这样不仅能使操作者免于担心从操作手的运动状态,而且可以给出大步距的操作命令以提高协作任务完成的效率,但是破坏了主操作手的可操作性.

5.4 虚拟阻抗协调控制

N. Y. Chong^[11]等人在比例速度控制方法的基础上又提出采用基于虚拟阻抗的协调控制方法来解决 MOMR 系统中由于通讯时延而引起的从操作手之间的运动冲突.在主从遥操作中设置了一个可调阻抗,初始时在主操作手端加上一个低阻抗,根据两个从操作手之间的距离调整阻抗,距离越小阻抗越高.需要明确指出的是,在从操作手上加上虚拟阻抗并反馈给主操作手,从操作手之间可以等同一个弹簧、质量和阻尼系统.当从操作手没有发生运动干涉时,从操作手末端操作器上的阻抗不会被激活,对主操作手不会有任何影响,只有在从操作手可能发生碰撞前这种附加的阻抗才发出信号给操作者停止主操作手当前的控制.直接测量从操作手末端的力并

反馈给主操作手是具有力反馈的主从遥操作中的一个简单明了的方法,但是把从操作手端的力不断地反馈给主操作手的控制是难以接受的,因为具有时延的力反馈对主操作手有一些意想不到的干扰会导致系统稳定性下降.因此采用预测显示模型解决图像传输中的时延问题,虚拟阻抗克服力反馈中的时延问题.这一方法提高了操作性能,保证了整个操作过程中主操作手控制的一致性,但是提高了对操作者的要求.

5.5 虚拟斥力场引导协调

N. Y. Chong^[15]等人提出在预测图形仿真器中采用虚拟斥力场的协调控制方法.通过把预测仿真器内计算出来的虚拟反应力反馈给操作者来控制远端多个机器人的协调运动.当从端机器人相互接近时预测仿真器中对应的机器人末端操作器周围会产生一个虚拟斥力场,斥力会给从机器人一个推力,使得机器人之间保持一定的距离,同时操作者操作会感到有阻碍.当两个机器人之间的距离远到可以安全地进行协作时斥力场就不再起任何作用.这一方法能够帮助操作者克服视觉信息延迟,保证通过网络控制远端的机器人安全地无碰撞地协作,提高操作性能和作业效率,但是目前此方法仍处于研究阶段.

5.6 基于事件的智能控制

传统的控制系统以时间作为控制器输入、输出信号的参考,基于 Internet 的遥操作系统存在的变化网络时延打乱了主从操作手之间的同步,因此以时间作为参考就很难保证系统的稳定.而基于事件的控制使用系统中发生的事件来规划控制,参考是系统发生的事件,这种表示与时间无依赖关系,可以有效地回避时延问题. Ning Xi^[17]等采用这种全新的基于事件的智能控制方法来解决存在时延的网络遥操作,并建立了基于 Internet 移动操作手的协作控制系统.尽管网络时延是不确定的,采用此方法仍然能够保证系统的稳定性和同步性,并且在两个协作过程中具有很好的动态响应性能,但是该方法目前主要应用在对移动和其他机器人的协调控制上,而且有待进一步验证.

6 结论(Conclusion)

本文综述了基于 Internet 的 MOMR 系统的结构、概念以及国内外的研究现状,讨论了 MOMR 系统存在的主要问题和各种协调(或协作)控制方法.

随着计算机技术和控制理论等相关技术的发

展,作为网络遥操作中新兴的一个方向 MOMR 遥操作将在服务场合(例如:远端协助,帮助老年人或残疾人);医疗场合(例如:远程外科手术)危险场合(例如:对废气、废物的处理);太空、深海等难以到达的(例如:太空装配)许多场合得到应用。

参考文献 (References)

- [1] Kohtaro Ohab, S Kawabata, Nak Young Chong, Kiyoshi Komoriya, T Matsumaru, N Matsuhira, K Takase, Kazuo Tanie. Remote Collaboration through Time Delay in Multiple Teleoperation. Proc IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems, 1999. 1866- 1871
- [2] Ken Goldberg, Michael Mascha, Steve Gentner, Nick Rothenberg, Carl Sutter, and Jeff Wiegley. Desktop Teleoperation via the World Wide Web. Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995. 654- 659
- [3] Taylor K, Dalton B. T revelyan J. Web-based Telerobotics. Robotica, 1999, 17: 49- 57
- [4] Kevin Brady, Tzyh-Jong Tarn. Internet-Based Remote Teleoperation. Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998. 65- 70
- [5] Gunter Niemeyer, Jean-Jacques E Slotine. Towards Force-Reflecting Teleoperation Over the Internet. Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998. 1909- 1915
- [6] Raju G J. Operator Adjustable Impedance in Bilateral Remote Manipulation. MIT Master Degree Thesis. 1988
- [7] Saghir Munir, Wayne J Book. Internet Based Teleoperation using Wave Variables with Prediction. Proc IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2001. 43- 50
- [8] Kuk-Hyun Han, Shim Kim, Yong-Jae Kim, Seung-Eun Lee, Jong-Hwan Kim. Implementation of Internet-Based Personal Robot with Internet Control Architecture. Proc IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2001. 217- 222
- [9] A Kheddar, C Tzafestas, P Coiffet, T Kotoku, S Kawabata, K Iwamoto, K Tanie, I Mazon, C Laugier, R Chellali. Parallel Multi-Robots Long Distance Teleoperation. Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1997. 1007- 1012
- [10] Nak Young Chong, Tetsuo Kotot u, Kohtaro Ohab, Kiyoshi Komoriya, Nobuto Matsuhira, Kazuo Tanie. Coordinated Rate Control of Multiple Telerobot Systems with Time Delay. Proc IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1999. 1123- 1128
- [11] Nak Young Chong, Tetsuo Kotot u, Kohtaro Ohab, Kiyoshi Komoriya, Nobuto Matsuhira, Kazuo Tanie. Virtual Impedance Based Remote Tele-Collaboration with Time Delay. Proc IEEE Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 1999. 267- 271
- [12] Nak Young Chong, Tetsuo Kotot u, Kohtaro Ohab, Kiyoshi Komoriya, Fumio Ozaki, Hideaki Hashimoto, Funji Oaki, Katsuhiko Maeda, Nobuto Matsuhira, Kazuo Tanie. Development of a Multi-telerobot System for Remote Collaboration. Proc IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems, 2000. 1002- 1007
- [13] Nak Young Chong, Tetsuo Kotot u, Kohtaro Ohab, Kiyoshi Komoriya, Nobuto Matsuhira, and Kazuo Tanie. Remote Coordinated Control in Multiple Telerobot Cooperation. Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000. 3138 - 3143
- [14] Nak Young Chong, Tetsuo Kotot u, Kohtaro Ohab, Hisayuki Sasaki, Kiyoshi Komoriya, Kazuo Tanie. Use of Coordinated On-line Graphics Simulator in Collaborative Multi-robot Teleoperation with Time Delay. Proc IEEE Workshop on Robot and Human Interactive Communication. 2000, 167- 172
- [15] Nak Young Chong, Tetsuo Kotot u, Kohtaro Ohab, Kazuo Tanie. Virtual Repulsive Force Field Guided Coordination for Multi-telerobot Collaboration. Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001
- [16] I Elhajj, J Tan, N Xi, W K Fung, Y H Liu, T Kaga, Y Hasegawa, T Fukuda. Multi-Site Internet-Based Cooperative Control of Robotic. Proc of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2000. 826- 831
- [17] I Elhajj, J Tan, N Xi, W K Fung, Y H Liu, T Kaga, Y Hasegawa, T Fukuda. Internet Based Cooperative Teleoperation. Proc. International Workshop on Bio-Robotics & Teleoperation, 2001. 84- 91
- [18] I Elhajj, J Tan, N Xi, W K Fung, Y H Liu, T Kaga, Y Hasegawa, T Fukuda. Modeling and Control of Internet Based Cooperative Teleoperation. Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001. 662- 667
- [19] Goldberg K, Chen B, Solomon R, et al. Collaborative Teleoperation via the Internet. IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2000, San Francisco: 2019- 2024
- [20] Tsuyoshi Suzuki, Teruo Fujii, Kazutaka Yokota, Hajime Asama, Hayato Kaetsu, Isao Endo. Teleoperation of Multiple Robots through Internet. Proc IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, 1996. 84- 89
- [21] Tsuyoshi Suzuki, Teruo Fujii, Kazutaka Yokota, Hajime Asama, Hayato Kaetsu, Isao Endo. A multi-robot teleoperation system utilizing the Internet. Advanced Robotics, 1998, 11(8): 781- 797
- [22] Hirzinger G, Brunner B, Dietrich J, Heindl J. Sensor-Based Space Robotics-ROTEX and Its Telerobotics Features. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1993, 9(5): 649- 663
- [23] Sheridan T B. Space Teleoperation through Time Delay: Review and Prognosis. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(5): 592- 606
- [24] JS Kawabata. A Study on Collaboration Tasks by Remote Teleoperation of Robots Using a Network. M S Thesis, The University of Electro-Communication, Tokyo, Japan, 1999
- [25] K Kosuge, T Itoh, T Fukuda. Scaled Telem anipulation with Communication Time Delay. Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1996. 2019- 2024

作者简介:

赵 杰 (1968-), 男, 博士后, 教授. 研究领域: 机器人控制技术, 多传感器集成技术.

闫继宏 (1974-), 女, 博士生, 研究领域: 多机器人遥操作技术.

蔡鹤皋 (1934-), 男, 中国工程院院士, 研究领域: 机器人控制技术.