

文章编号: 1002-0446(2001)06-0498-06

面向多机器人遥操作的分布式预测图形仿真系统*

朱广超 王田苗 丑武胜 伍军 战强 张启先

(北京航空航天大学机器人研究所 100083)

摘要: 在遥操作机器人系统中, 由于存在通信传输时延, 可能导致控制系统不稳定, 从而降低遥操作的效率和安全性. 目前多采用预测仿真的方法来克服. 在多机器人遥操作系统不但要克服时延的影响, 还要能控制机器人协调地完成遥操作任务. 我们开发了一个面向多操作者-多机器人遥操作的分布式预测图形仿真系统, 实现了对多机器人遥操作系统的预测仿真, 多个操作者可以通过人机交互接口遥控各自的机器人, 相互协调完成遥操作的任务. 初步的实验表明该系统能够克服时延的影响, 并能实现多操作者-多机器人的协调遥操作. 这对空间站机器人科学实验、多飞行器对接等方面的研究有理论参考价值.

关键词: 虚拟现实; 多机器人遥操作; 预测仿真

中图分类号: TP24 文献标识码: B

DISTRIBUTED PREDICTIVE GRAPHICAL SIMULATION SYSTEM FOR MULTI-TELEOPERATORS

ZHU Guang-chao WANG Tian-miao CHOU Wu-sheng

WU Jun ZHAN Qiang ZHANG Qixian

(Robotics Research Institute, Beijing University of Aero. & Astronautics, Beijing, 100083)

Abstract: There is constant or variant propagation time delay in telerobotic systems, and it can conduct the instability of the robotic system and degrades human teleoperator's intuition and effectiveness. Multi-telerobotic system not only should overcome the affection of time delay, but also should work coordinately to accomplish complex tasks. This paper describes our development effort on the distributed predictive graphical simulation system for multi-teleoperator-multi-telerobot. In this paper, a virtual reality based distributed graphic predictive display system, which implements the predictive simulation for multi-telerobot and accommodates multi-teleoperator to teleoperate the robot of himself by the human-machine interactive interface respectively, is developed, and a framework for multi-telerobot cooperation is proposed. Preliminary experimental results show that the system is effective to overcome the time delay and facilitate multi-operator to interact with multi-telerobot, and it can be applied to future researches on robotic experiment in space station and the jointing of multi-aircraft.

Keywords: virtual reality, multi-telerobot, predictive simulation

1 引言 (Introduction)

在机器人遥操作系统中, 操作者是在危险的环境或不可达的工作环境中, 通过远程控制操作于远端的机器人系统, 可以扩展操作者的活动能力, 完成在全自主情况下不可能完成的复杂操作任务. 然而目前在机器人遥操作系统仍有一些问题没有解决, 其中的一个主要问题是通讯传输时延问题. 研究表

明在产生命令与观察到相应的运动间存在不足一秒的时延情况下就可能严重地降低人的操作感觉, 进而降低遥操作的效率和安全性^[1]. 为了解决时延问题, 有许多学者开展这方面的研究, 这些研究工作大体上可以分为三类: 预测/预览显示^[2], 双边控制^[3]和遥编程^[4]. 在这些方法中, 预测/预览显示技术是建立一个远端机器人的图形仿真环境, 它可以对操作者的命令进行实时的反应, 并以图形显示和交互设备

提供给操作者一个远端环境的增强临场感. 通过这种预测/预览显示技术, 遥操作者就可以连续地控制远端的机器人, 并能通过传感器仿真技术获得不能从物理传感器得到的信息, 而远端的机器人系统在延迟一定的时间后执行遥操作者的命令. 这样时延问题就可以在在一定程度上被克服, 同时也降低了对传感器的要求. 该方法已广泛地应用在遥操作系统中^[5-9].

一方面目前以上的研究中, 大部分都集中于单个机器人的遥操作. 事实上正如人类完成许多的复杂任务一样都需要靠双手来完成, 多机器人系统比单个机器人系统的功能更强大, 它们可以完成一些由单个机器人无法完成的任务, 如搬运重物、装配和空间操作等任务. 例如在空间环境, 全部 195 种 EVA 空间操作中至少有 166 种 EVA 操作需要双臂机器人协调才能完成任务^[10]. 因此, 研究太空、核环境、深海等环境下的多机器人协调遥操作有更现实和深远的意义. 多个空间机器人的遥操作是以单个机器人遥操作为基础的, 但并不是多个机器人的简单组合, 要提高多机器人系统的整体性能, 还需要解决一些基础性理论问题和关键技术, 诸如多机器人的协调控制, 面向多操作者-多机器人系统的分布式预测图形仿真技术, 基于虚拟现实的人机交互技术等等.

另一方面由于是同时对多个机器人进行遥控, 因此多机器人遥操作任务大多需要多个遥操作者共同参与才能完成, 例如遥控多个空间机器人相互协调完成空间对接任务时, 这些任务的实现仅靠一个操作者来遥控是非常困难的, 往往需要多个操作者分别遥控各自的控制对象针对同一个空间环境相互协调相互配合地完成遥操作. 这就要求作为人机交互接口的预测图形仿真系统采用分布式结构, 以使每个操作者在不同计算机上以实现针对不同控制对象的遥控, 并将多台参与图形仿真的计算机通过网络相连, 以保证每台计算机能为操作者提供相同的仿真环境. 而由此引出的对仿真模型的同步协调问题进行研究就显得十分有意义, 因为不仅要保证各个仿真单元中操作者能看到同样的仿真环境, 又要保证整个系统以很快的速度刷新各个单元中的仿真模型. 同时传统的多机器人系统中, 研究人员已提出了许多协调方法^[11], 然而这些方法主要集中在自主方式下机器人之间的规划和协调, 不能直接地用于多机器人遥操作系统中. 因此, 需要对面向多操作者、多机器人遥操作的机器人预测图形仿真的体系结构、同步协调控制等方面进行进一步的研究.

针对以上问题, 本文对分布式预测图形仿真系统的体系结构、仿真模型同步协调及多机器人的协调遥操作等技术进行了研究, 并介绍了我们已经建立的实验平台.

2 多操作者-多机器人的遥操作系统体系结构 (The structure of multi-teleoperator-multi-telerobot system)

我们实现的多操作者-多机器人遥操作系统的物理结构如图 1 所示. 在远端执行端, 多机器人系统由两个机器人手臂集成系统构成, 一个是由 7 自由度的 PA-10 机器人和 3 指 9 自由度 BH-III 型的多指灵巧手构成的臂手系统, 另一个是由德国 7 自由度模块化机器人和 BH-III 型多指灵巧手构成的臂手系统. 此外, 两个机器人分别固定在两个互相平行的直线导轨上, 臂手系统可以沿导轨做直线运动. 在每个机器人的腕部装配有 6 维力/力矩传感器, 在多指灵巧手每个手指的指端装还配有 6 维指端力/力矩传感器, 用于完成抓持和操作的力控制. 环境中还有一个 CCD 摄像头, 它将环境的视频图像通过网络通讯实时反馈给操作端.

在操作端, 我们采用分布式的结构实现了面向多操作者-多机器人遥操作的分布式预测图形仿真系统 (Distributed Predictive Graphical Simulation System, DPGSS). DPGSS 可以使遥操作者沉浸在计算机产生的虚拟场景中, 对每个操作者都产生了一个远端机器人系统的预测显示系统, 操作者可以通过触觉交互设备和虚拟环境进行交互. DPGSS 通过网络相连的两个 SGI 工作站和两个 PC 机构成, 可以分为四个单元: Envision 单元、WTK 单元、OpenGL 单元和同步控制中心. 各单元和控制中心之间采用 Socket 方式完成通讯, 实现信息的交换和共享. 其逻辑结构如图 2 所示. 整个采用了模块化的结构, 以增强系统的可靠性、可扩展性和可维护性.

DPGSS 的 Envision 单元、WTK 单元和 OpenGL 单元为操作者提供预测显示, 分别在 SGI Octane 和两个 PC 机上实现, 在每个计算机内都有一个关于整个多机器人系统的虚拟场景. 在 Envision 单元, 一个操作者利用 CyberGlove 数据手套和 Fasttrak 定位仪遥控虚拟的 PA-10 臂手系统, 其中利用定位仪控制 PA-10 机器人臂, 用数据手套控制多指灵巧手, 利用鼠标控制导轨的运动. 同时可以将虚拟环境中手指与环境的接触情况通过数据手套上的触觉反馈装置反馈给操作者. 在 WTK 单元, 另一

个操作者利用我们自制的带力反馈的机械臂和带触觉反馈的数据手套控制模块化机器人臂手系统,其中机械臂控制模块化机器人,数据手套控制多指灵巧手,利用鼠标控制导轨的运动。OpenGL 单元用做整个系统的辅助显示,为操作者提供多视点和多视角的虚拟场景显示,并以图形的方式显示各个机器

人运动状态和传感器信息,此外,在该单元内专门开辟窗口,用于显示远端的实时视频图像。同步控制中心是整个系统管理和协调控制的中心,负责各个单元之间仿真模型的同步、整个仿真系统的数据和消息管理等工作。

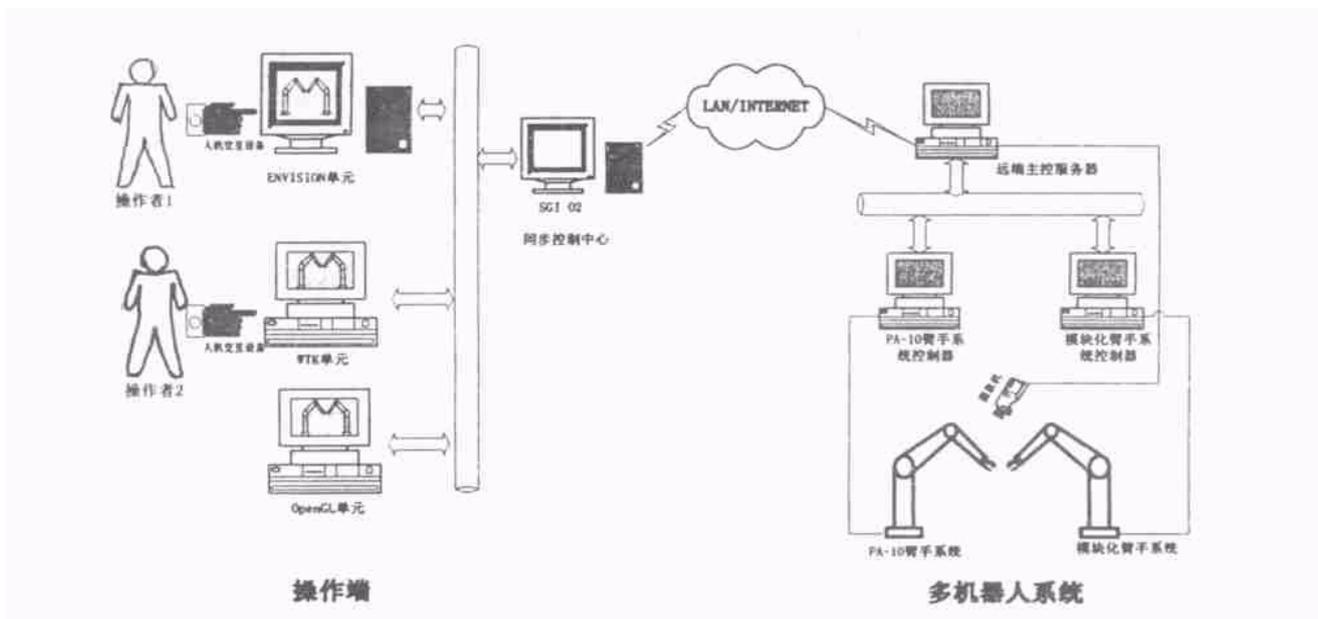


图 1 多机器人遥操作实验系统的物理结构

Fig. 1 The physical structure of multi telerobot experimental system

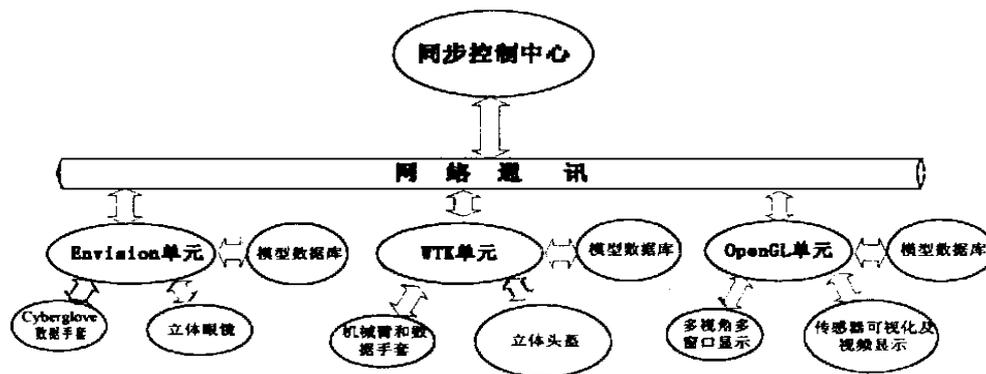


图 2 DPGSS 的逻辑结构

Fig. 2 The logic structure of DPGSS

3 DPGSS 的实现 (The implementation of DPGSS)

3.1 虚拟图形环境的实现

DPGSS 中的各个单元是在不同的平台上完成。三个预测显示单元分别是在两个不同的平台上实现的,Envision 单元是在 UNIX 操作系统下,借助于美

国 Deneb 公司的商业软件 Envision 实现了机器人及其环境的建模和仿真,WTK 单元是在 Windows NT 下,采用了 Sense8 公司的 WTK 作为建模和仿真工具,OpenGL 单元是在 Visual C++ 环境利用 OpenGL 库开发实现的。

每一个单元都具有相同的机器人和周边设备的

几何模型. 为了便于实现跨平台的传输和数据转换, 我们采用了 VRML1.0 格式作为其几何模型的数据格式. 该文件格式通用性好, 许多图形软件都支持该格式, 而且由于它是面向 Internet 上应用开发的, 它特别适合在网络上应用. 我们首先在 Envision 环境下建立了机器人系统及周边设备的几何模型, 并将模型存为 VRML 格式, 这些文件就可以直接传输到 WTK 环境下, 由 WTK 直接调入其环境中, 再利用杆件之间的关系完成运动学的建模. 在 OpenGL 单元中我们利用自己开发的几何转换接口将 VRML 模型文件读入到 OpenGL 环境下, 图 3 和图 4 分别

为在 WTK 和 Envision 环境下的预测图形显示.

Envision 单元和 WTK 单元的结构很类似, 如图 5 所示. 由 5 个子模块构成. 其中用户接口模块接受操作者的控制命令, 并通过交互装置反馈触觉信息. 由于交互装置如机械臂和机器人的结构是异构的, 因此必须在预处理模块中完成运动学的解算, 实现操作者运动空间和机器人运动空间之间的映射. 网络接口完成通过网络和其它单元的通讯. 仿真模块按照仿真命令计算对象的变化, 同时将这些变化送到模型更新和显示模块, 以提供给操作者以实时的预测显示.

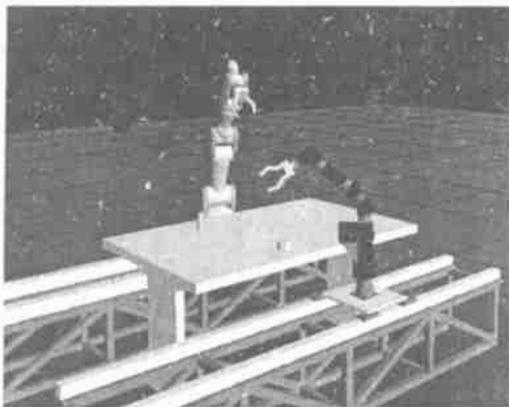


图 3 Envision 环境下的多机器人预测显示环境
Fig. 3 The predictive display in Envision

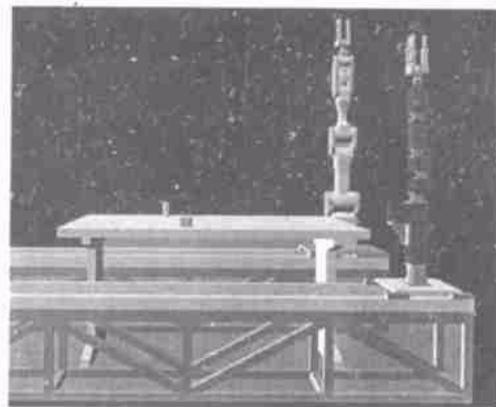


图 4 WTK 环境下的多机器人预测显示环境
Fig. 4 The predictive display in WTK

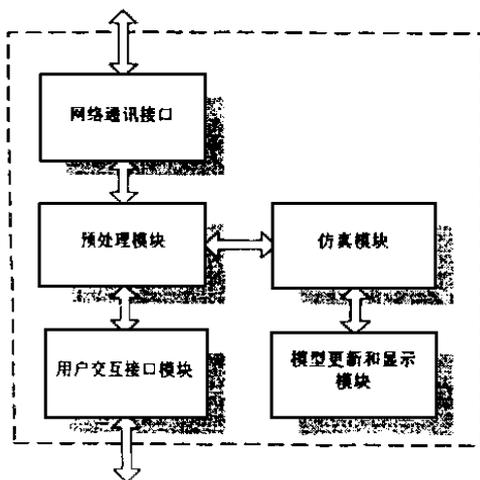


图 5 预测图形仿真单元的结构
Fig. 5 Components in predictive simulation module

每个操作者都面对同样的虚拟场景, 任一操作者遥控引起的虚拟场景的变化另一个操作者都可以在自己的显示单元中看到. 操作者的命令经过一定

的时延后同时送到远端机器人系统. 这样操作者通过和 DPGSS 的交互可以实现连续地控制远端机器人完成操作, 由此可以有效地克服时延的影响. 当其中任一操作者和虚拟机器人完成交互时, DPGSS 都可以模拟遥操作者命令并实时地显示虚拟机器人的变化, 并同时给操作者提供触觉反馈信息.

如图 2 所示, 我们在每个单元中都建立了机器人及其环境模型数据库, 这样在生成仿真图形时, 在本地就可以完成如各个杆几何尺寸等大量模型参数的查询, 通过网络传输的仅是如关节位置、关节速度、抓持状态、控制命令等数据量很小的运动和状态参数, 这样可以提高分布式仿真的运行速度和降低对网络通讯带宽的要求. 在 DPGSS 中, 网络通讯协议采用 TCP/IP 协议, 各个子单元与同步控制中心的通讯采用了基于 TCP/IP 的 Socket 通讯方式. 因此, 该仿真系统不仅适用局域网, 也可用于 Internet 等广域网, 这样更便于不同地理位置的操作者通过分布式仿真系统相互协调地完成遥操作任务.

3.2 仿真模型的同步协调技术

分布式图形仿真系统中,为了保证各个操作者能同时看到相同的仿真环境,就要求各个子单元中的所有仿真对象的模型和状态始终保持一致.在每个显示单元中所有的对象都可以分为三类.一是可控运动对象,是指在该单元内操作者通过输入设备可以遥控的对象,如对 Envision 单元,操作者通过交互设备可以遥控 PA-10 机器人臂手系统及其导轨,因此,它们对 Envision 单元是可控运动对象;第二类是在该单元内操作者不可以控制的运动对象我们称为不可控运动对象,不可控运动对象是由别的操作者在他自己的单元中控制,由本单元通过通讯从服务器定期取得当前的运动状态,以刷新本单元中该对象的运动状态,如对 Envision 单元,模块化机器人臂手系统及其导轨不可以由 Envision 端操作者直接控制,而由 WTK 端的操作者控制,该单元可以从服务器得到当前的运动状态,因此,它们对于 Envision 来说是不可控运动对象.第三类为在仿真过程始终保持静止的对象我们称为静态对象.如导轨基座、桌子等.

我们通过同步控制中心来实现各个子单元中模型的同步.同步控制中心是在 SGI O2 工作站上实现的一个应用程序,采用了基于多进程的客户-服务器结构:控制中心程序是服务器,仿真系统中的子单元是客户.客户向服务器发出请求,得到服务器的认可后,客户就可以向同步控制中心发送当前状态信息或从控制中心取得当前状态信息以刷新自己的仿真环境.在每个仿真周期中,若某个单元中的可控对象状态发生变化,该单元就会向同步控制中心发送最新的状态信息,这样在同步控制中心中始终保存着所有仿真对象的最新的状态和信息,各个单元则定期从同步控制中心取得本单元内不可控运动对象的最新的状态信息,以刷新这些对象.同步控制中心向客户传送的信息格式如下:

```
($ ) <command type> <unit ID> <object ID
  A r r a y >
```

```
...
```

```
<length of A r r a y> <data> <stamped time> <* >
```

其中字符“\$”表示命令的开始,“*”表示命令的结束.当客户接收到包含对象状态的命令时,它首先对命令进行翻译,并按照当前时间 t_c 和命令中的标记的时间 t_s ,计算该命令中指定对象的状态,并利用得到的状态信息刷新自己的本地模型.在每个预测显示单元中所有不可控运动对象都按照该方式在同步控制下进行刷新.

3.3 多机器人协调控制

遥操作的一个重要的特性是操作者处于机器人控制回路中.这样就可以将人的智能和机器的智能有机地结合起来用于机器人的控制. DPGSS 支持三种方式的遥操作:主从式、监控式和共享控制方式.在主从控制方式下,操作者负责机器人的任务和路径规划,机器人的运动完成由操作者控制.在监控方式下,机器人自主地工作,操作者监控机器人的运动并可以在任何时候干预机器人的运动.在共享控制方式下,操作者和机器人的自主控制都能控制机器人的行为.

按照在多机器人协调遥操作中操作阶段的不同,我们采用了不同的遥操作方式.一般说来,多机器人运动可以分为精细运动和粗运动.例如当机器人的末端离操作点很远时或没有与环境发生接触时,它的运动是粗运动;当机器人的末端离目标点很近、与环境有约束时或多机器人开始协调工作时,它们的运动是精细运动.当机器人做粗运动时,可以采用主从控制方式,此时,操作者之间可以通过语音通信进行机器人遥操作之间的协调, DPGSS 此时主要用于碰撞检测.在机器人接近目标点时,可以采用共享控制的方法,此时不仅操作者的命令参与机器人控制,而且机器人的自主控制在任务执行时也参与了控制.在 DPGSS 中我们利用虚拟距离传感器和虚拟力觉传感器来辅助仿真系统完成共享控制,虚拟测距传感器可以做一个以角度的扇形来扫描,虚拟力觉传感器完成精细的碰撞检测.这些虚拟传感器可以将系统状态中不可见的信息以信息可视化的方式提供给操作者,便于操作者完成遥操作任务.当机器人共同操作物体完成协调操作时,考虑到安全性的原因我们采用了监控控制.为了提高协调速度,我们在机器人之间直接建立 socket 来实现直接协调通信.在此阶段采用了常规的多机器人协调控制方法,操作者起监控作用,可以在任意时刻干预机器人的运动.

4 初步实验结果(Preliminary experimental results)

我们在局域网环境下通过模拟传输时延利用 DPGSS 完成了一些初步的实验.在工作站 Envision 单元中,操作者利用 CyberGlove 数据手套和 Fasttrak 定位仪遥控 PA-10 机器人臂手系统,另一个操作者在 PC 平台上利用我们自制的带触觉反馈的数据手套和带力觉反馈的机械臂控制模块化机器

人臂手系统. 我们完成一个插孔装配的实验, 在实验平台上有一个销子和销孔, 操作者分别面对各自单元的预测仿真环境通过交互设备实现对各个机器人臂手系统的遥控, 控制机器人分别抓持销子和销孔, 完成插孔操作后, 两个机器人共同做协调运动. 图 6 所示为各个机器人臂手系统在抓持物体的过程, 图 7 表示完成插孔的过程, 图 8 是在完成插孔后两个机器人系统在保持约束情况下做协调运动. 初步的结果显示, DPGSS 可以为不同的操作者提供相同的预测仿真环境, 可以克服时延的影响, 并且可以实现多操作者-多机器人的协调遥操作.

5 结论(Conclusion)

分布式预测图形仿真系统是多操作者-多机器

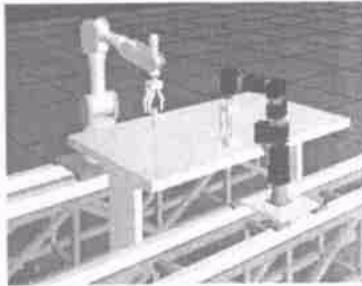


图 6 机器人分别抓持工件
Fig. 6 Robots grasp the part respectively

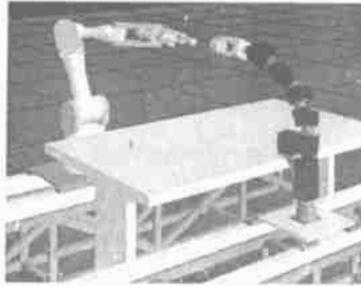


图 7 机器人共同完成插孔
Fig. 7 Robots peg in hole

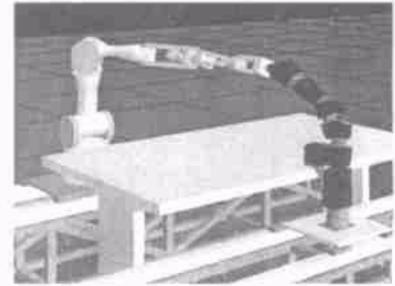


图 8 机器人共同完成协调作业
Fig. 8 Robots work coordinately

参考文献 (References)

- 1 R Oboe, P Fiorini. Issues on Internet Based Teleoperation. Proceedings of the fifth IFAC Symposium on Robot Control, Sep., 1997, Nantes, France
- 2 Naoto Abe. Practically Stability and Disturbance Rejection of Internal Model Control for Time-Delay Systems. Proceedings of CDC
- 3 Sukhan Lee, HahkSung Lee. Modelling, Designing and Evaluation of Advanced Teleoperated Control Systems with Short Time Delay. IEEE Tran. On R & A, 1993, 8(2): 176- 184
- 4 Janez Funds, Thomas Lindsay, Richard Paul. Teleprogramming: Toward Delay-Invariant Remote Manipulation. Presence, 1992, 1(1): 29- 44
- 5 Antal K Bejczy, Won S Kim, Steven C Venema. The phantom robot: Predictive displays for teleoperation with time delay. In IEEE International Conference on R & A, Cincinnati, OH, May, 1990: 546- 551
- 6 Thomas B Sheridan. Space teleoperation through time delay: Review and prognosis. IEEE Transactions on R & A, 1993, 9(5): 592- 606
- 7 Li Larry. Development of a Telepresence Controlled Ambidextrous Robot for Space Application. Proceedings of IEEE International Conference on R&A: 58- 63, 1996
- 8 Praveen Bhatia, Massm Uchiyama. Shared Intelligence for Telerobots with Time Delay: Theory and Human Interface with Local Intelligence. IEEE Trans. On R&A, 1993
- 9 D Schulz, W Burgard, A Cremers. Predictive Simulation of Autonomous Robots for Tele-operation Systems Using the World Wide Web. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems/Workshop Robots on the Web, Canada, 1998
- 10 Bruno M Jau. Dexterous Telem anipulation with Four Fingere d Hand System. IEEE International Conference on R & A, 1995. 338- 343
- 11 Ning Xi, Tzyh-Jong Tarn, Antal K. Bejczy. Intelligent Planning and Control for Multi-Robot Coordination-An Event-Based Approach. IEEE Trans. On R & A, 1999, 1: 219- 224

作者简介:

朱广超 男. 研究领域: 多机器人遥操作, 虚拟现实.
王田苗 男. 研究领域: 多机器人遥操作, 虚拟现实.