文章编号：1009－038X(2001)06－0630－05

遥操作空间机器人地面实验系统的集成与研究

刘国栋[1]， 孙增圻[2]
(1. 江南大学 通信与控制工程学院，江苏 无锡 214036；2. 清华大学 计算机系，北京 100084)

摘 要：主要对遥操作空间机器人地面实验系统的设计及基本结构进行了系统分析. 同时对柔顺控制、共享控制及力反馈控制等关键性技术进行了探讨.

关键词：遥操作机器人；柔顺控制；共享控制；力反馈控制
中图分类号：TP 242.6 文献标识码：A

Integration and Study of the Experiment System on Land of Teleoperation Space-Robot System

LIU Guo-dong[1]， SUN Zeng-qi[2]
(1. School of Communication & Control Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In this paper, the teleoperation space-Robot experimental system on land for design and fundamental constraction was analyzed. At the same time, some key techniques such as shared control, compliance control and forcereflection control in space-robot remote opration system were discussed and studied.

Key words: Teleoperation Robot; Shared control; Compliance control; Forcereflection control.

遥操作空间机器人主要用于外太空探索和开发领域. 它为人类不断扩大的宇宙探索行为提供了一种安全、可靠、方便、经济的解决方案. 早在 20 世纪 70 年代初，美国就提出了在空间飞行中应用机器人系统的观点，并在 20 世纪 80 年代，在航天飞机上投入使用. 主要用于对卫星的回收和释放及执行对航天飞机机身清理等复杂任务. 目前，一些发达国家正在积极进行遥操作空间机器人的研究[1,2]. 遥操作空间机器人地面实验系统的研制，为我国空间机器人技术的开发提供了必要的模拟条件及可靠有效的实验手段[3,4]. 本系统的目标是实现一个分布式、遥操作、三维实时仿真的体系结构. 在这个结构的基础上能够实现基于地面实验系统的遥操作空间机器人模拟仿真实验.

1 遥操作空间机器人地面实验系统的设计方案

在遥操作科学系统中，安全的人机交互协调操作是远程控制的一大难点. 同时，由于遥操作系统中普遍存在着通讯时差，因而如何克服时延对整个系统的不利影响，便成为遥操作系统体系结构设计中的关键问题. 在分析比较了国内外先进的遥操作控制系统的基础上，从实际应用出发，本系统吸收利用了共享控制的思想，解决多点分布式系统的协

收稿日期：2001－09－15； 修订日期：2001－10－08.
基金项目 国家 863 计划，空间机器人主题(863-2-4-1-19)资助课题.
作者简介：刘国栋(1950－)，男，辽宁沈阳人，清华大学计算机系访问学者，副教授.
万方数据

调交互控制.

本着结构化、模块化、智能化、柔性化的思想，建立了独立的遥操作机器人实验系统. 同时采用上层协调规划与底层分布式、智能自主相结合的集散化分层控制体系. 提出了基于任务的共享控制体系结构模型，统一机器人系统的自主智能和远端操作者的监控遥操作于一体. 系统在允许底层传感器的融合结果对高层控制规划和预测仿真模型进行修正的同时，通过分布式通讯介质，将操作者和远端机器人系统实时地统一在一个有机整体中，并将通讯大时延离散化，从而实现了具有一定局部自主行为控制能力的远端监控遥操作系统.

2　系统集成结构分析

2.1　系统逻辑简图及通讯网络结构

本系统可以直观地分成模拟星载部分和模拟地面部分. 如图 1 所示.

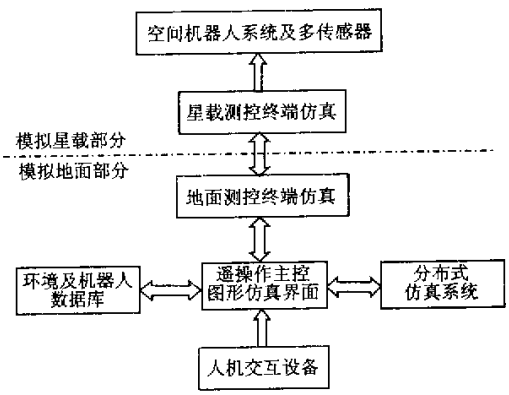


图 1　系统逻辑简图

Fig. 1　Logic diagram of the system

整个系统采用分布式的仿真体系结构，由多台计算机协同合作，并行地完成整个仿真系统的运行. 在系统底层的连接方式上，选用的是支持 IEEE802.3 标准的 10M 以太网. 由于在信息存贮方面采用了分布式体系结构，大大降低了网络传输量. 因此传输速度能够满足要求. 由于整个系统是一个多种计算机及设备并存的异构环境，因此，本系统选择了支持异构环境的 TCP/IP 协议，作为在物理层上运行的网络协议. 通讯网络结构如图 2 所示.

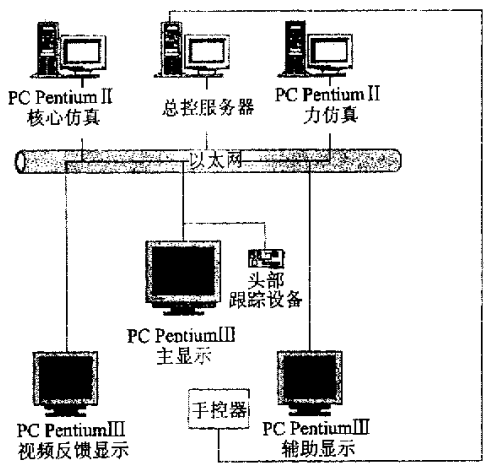


图 2　通讯网络结构

Fig. 2　Construction diagram of communication network

2.2　系统集成体系结构

空间遥操作机器人地面实验系统的整体功能由机器人本地系统和遥操作控制站两部分组成. 如图 3 所示.

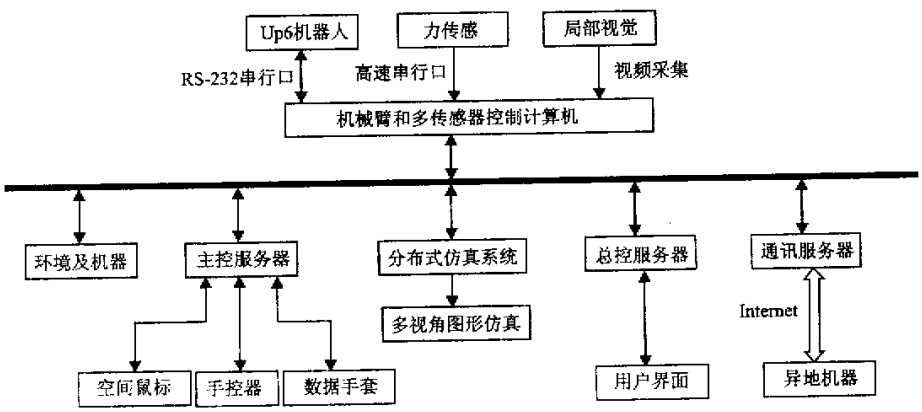


图 3　系统集成体系结构

Fig. 3　Integrated constraction of the system

万方数据

总控服务器提供总的调度,接受各个服务器的数据和请求,进行服务的调度和分配.

主控服务器采集所有操作人员的指令,其中包括:

1)采集手控器各个关节信号和 K3 及 UMP 键的状态.

2)进行手控器正运动学计算,得到手控器末端的位置变化量.

通讯服务器处理通讯仿真,主要包括空间通讯时延仿真、对机器人摇控及图象数据传输等.

3 局部柔顺控制

柔顺控制是摇操作机器人完成任务的基础,它可以大大地提高机器人的可靠性和适应性,本系统对空间机器人柔顺控制的基本研究方案是,根据 Motoman-Up6 机器人的控制特点,在机械臂腕部直接加上力传感器,实现力-位置控制. 其控制结构如图 4 所示.

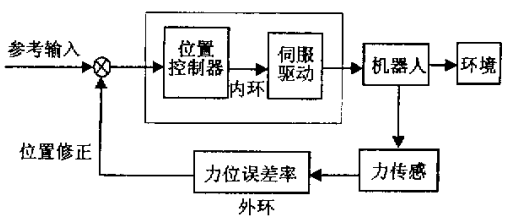


图 4 柔顺控制结构简图

Fig. 4 Compliance control diagram

控制原理为:利用腕力传感器得到的接触力信号,把力控制信号转化为位置控制器的修正值,参与内环的位置控制. 通常多关节机器人的末端设备和外界工作环境接触时,其动力学方程为:

$$H\ddot{q} + C\dot{q} + G(q) = \tau + J^T \cdot F \qquad (1)$$

采用计算力矩法控制机械手的动力学方程为:

$$D(q)[\ddot{q}_d + K_p(q_d - q) + k_v(\dot{q}_d - \dot{q})] + H(q,\dot{q}) + G(q) = \tau + J^T \cdot F \qquad (2)$$

其中:$q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d \in R^n$,分别是机械臂期望的关节角矢量、角速度矢量和角加速度矢量;K_q, k_v 分别为关节角度和角速度增益矩阵. D、H、G 是用来计算的模型参数;$\tau \in R^{n\times n}$,为关节空间的控制力矩输入矢量;$\tau^T \in R^{n\times n}$,为 Jacobian 矩阵;$F \in R^n$,是传感器测得的 n 维力向量,即 $F = [f_1 \cdots\cdots f_n]^T$.

本系统采用在计算力矩控制机器人机械臂位置的基础上附加力外环控制的方案,实现了对机器人的力-位置控制.

4 空间机器人共享控制

4.1 共享控制(Shared Control)的基本概念

即把机器人机械装置的精确控制能力与操纵者的宏观决策能力集成,实现对机器人的高智能高精度控制. 这种控制方法,应用遥现技术把远端机器人传来的力、位置、速度和视觉信息综合起来,使操作者获得真实的临场感觉. 以进一步实现把人的智能融入控制系统的目的. 目前,视觉临场感、位姿临场感和力觉临场感是遥现技术的主要形式. 在空间遥操作机器人控制系统中存在大时延的情况,通常时延是在秒数量级上. 研究表明,当时延大于 1 s 时,主-从结构的因果关系将会丧失,操作时无法通过再现现场数据的方法获得临场感. 为了解决这个问题,本系统采用了基于预测的视觉和力觉仿真方法,取得了良好的效果.

4.2 共享控制的体系结构

空间遥操作机器人共享控制体系结构主要包括 3 个部分:地面控制站、远端机器人系统及两者之间的通讯链路. 其结构如图 5 所示.

在控制站中,以手控器和数据手套作为共享控制系统的输入设备. 视觉临场感通过立体视觉的方法获得. 本系统利用实时关节数据以仿真方式重建机器人三维视景,获得虚拟现实环境下的机器人立体视觉. 另外,还在远端机器人的正交方向安装了两台摄像机,以满足三维监控的要求.

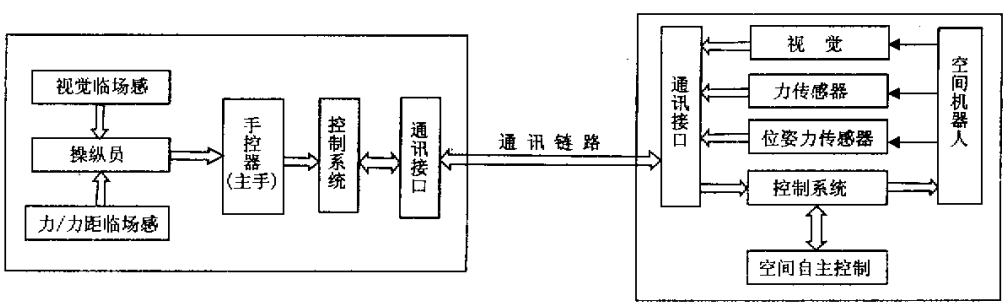


图 5 共享控制结构简图

Fig. 5 Shared control diagram

万方数据

5　空间遥操作机器人系统力反馈控制

5.1　空间遥操作机器人力反馈系统的结构

由手控器作为主手实现人机接口,同时由计算机图形仿真生成的机械手作为虚拟从手. 它们组成一个主从式、异构的遥操作机器人力反馈地面实验系统. 其结构如图 6 所示.

力反馈原理是,通过手控器驱动虚拟从手的运动,当从手进入一个力仿真域后,仿真环境自动产生一个虚拟的静态力,并经过 Jacobian 转置计算,得到主手关节空间的广义力/力矩. 经过驱动后,则可使操作者获得从手末端的力感觉.

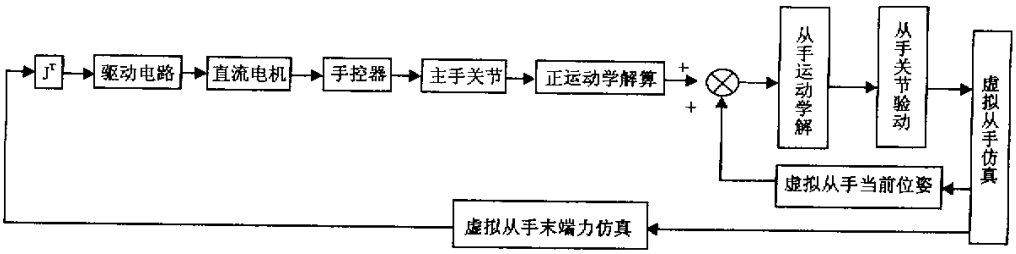


图 6　力反馈控制原理

Fig. 6　Forcereflection control diagram

5.2　手控器结构特性分析

本系统采用的双臂协调 6D-OF 型手控器为 STANFORD 结构 RRPRRR 型的万能手动操作器. 其计算简图如图 7 所示.

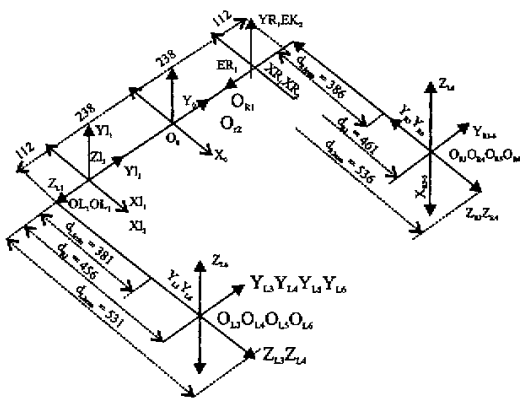


图 7　双臂协调遥操作手控器计算简图

Fig. 7　Calculation of double coordinated teleoperated master arms

5.3　基于虚功原理的手控器关节空间的广义力-力矩关系

由于作者寻求在手控器腕关节获得力反馈,因此只需对该手控器的前三个关节,即RRP结构进行分析和研究.

在力反馈实验系统中,人手握持手控器末端所产生的力-力矩与从手作业空间在外力-力矩作用下产生的反馈力-力矩处于平衡状态,说明这些力-力矩,对手控器腕部关节所作的总虚功等于零. 即满足虚功原理.

在力反馈实验系统中,假设由仿真环境产生的从手末端的广义力-力矩向量是直接作用在手控器腕关节坐标系上的,并可通过关节变换转换成相对于基坐标的六维列向量. 即:

$$\boldsymbol{F} \triangleq [F_{LX} \quad F_{LY} \quad F_{LZ} \quad M_{LX} \quad M_{LY} \quad M_{LZ}]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

其中 前三维为力向量,后三维为力矩向量. 针对手控器 RRP 结构,作者再定义一个广义关节力-力矩向量:

$$\boldsymbol{T} = [\tau_{L1} \quad \tau_{L2} \quad f_{L3}]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

它是由 $\boldsymbol{F}$ 向量传给各关节(即各连杆)的力-力矩分量组成的.

根据虚功原理,我们可将手控器末端腕关节的微分运动向量与关节空间的微分运动向量通过 Jacobian 矩阵联系起来.

即 :$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{J}^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{F}$. 最后推出如下重要关系:

$$\begin{bmatrix} \tau_{L_1} \\ \tau_{L_2} \\ f_{L_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S\theta_{L1}\cdot[S\theta_{L2}\cdot(456+d_{L3})-112C\theta_{L2}-238] & -C\theta_{L2}(456+d_{L3}) & -1 \\ -C\theta_{L1}S\theta_{L2}\cdot[S\theta_{L2}\cdot(456+d_{L3})-112C\theta_{L2}-238] & 0 & 0 \\ -C\theta_{L1}C\theta_{L2}[S\theta_{L2}\cdot(456+d_{L3})-112C\theta_{L2}-238] & 0 & 0 \\ -S\theta_{L1} & 0 & 0 \\ -S\theta_{L1}S\theta_{L2} & -C\theta_{L2} & 0 \\ S\theta_{L2}C\theta_{L2} & -S\theta_{L2} & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \cdot \begin{bmatrix} f_{LX} \\ f_{LY} \\ f_{LZ} \\ m_{LX} \\ m_{LY} \\ m_{LZ} \end{bmatrix} \tag{5}$$

万方数据

根据(5)式能够确定,由 F 传给手控器 RRP 结构各关节的力-力矩,再经过输出驱动电路,便可使从手末端感受的静态力在主手末端(腕关节)得到复现,即实现力反馈.

6 结 论

在实现基本设计目标的基础上,对局部柔顺控制、共享控制、力反馈控制、视觉引导及基于多传感器的机器人自主规划等多项任务进行了深入的实验研究,充分利用预测仿真技术克服大时延的影响.同时增强了自主功能,从而进一步弥补了基于预测仿真及遥操作控制中存在的不足,安全有效地实现了空间遥操作机器人在地面实验中所要完成的各种复杂的双臂协调遥操作任务.

参考文献:

[1] 孙增圻.机器人智能控制[M].太原:山西教育出版社,1995.

[2] DUBOLISKY S. The control of space, manipnlators Subject to spacecraft Attitude Control Saturation limits[J]. **Proc NASA Cont on Space Telerobotics**,1989(14):409~418.

[3] 金永南,王敏,黄心汉.一种新的机械手运动方程求解方法[J].机器人,1994,16(5):269~274.

[4] 熊有伦.机器人学[M].北京:机械工业出版社,1993.

(责任编辑:秦和平)

(上接第 623 页)

[3] JOHN WILEY, SONS. The Gamma ray-lnduced crosslinking of polyacrylamide in the solid slate[J]. **Journal of Polymer Science**, 1983,(21):615~620.

[4] BAYSAL B M, ERTEN H N, RAMELOW U S. Solid-state polymerization of acrylamide and some acrylates initiated by ultraviolet radiation[J]. **Journal of Polymer Science**, 1971,(9):581~587.

[5] HANS G B, GERHARD W. New experiments concerning the mechanism of solid-state photopolymerization of 2,5-Distyrylpyrazine[J]. **Makromol Chem**,1983,184:1103~1119.

(责任编辑:李春丽)

万方数据