Stewart 平台远程操作试验系统的研制

吴 强 王占林 李 佳 王志峰

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了研究 Stewart 平台大时延情况下的远程操作稳定性,建立了相关试验系统. 用以太网模拟远程通信信道,连接 2 套 Stewart 平台控制系统;利用 DirectX 技术,对用户屏蔽了具体硬件设备,建立了用户输入接口和视频反馈;利用 OpenGL(Open Graphic Library)技术,建立了虚拟操作环境,以便于未来利用虚拟操作环境补偿时延;用神经网络的位置正解方法代替传统方法驱动虚拟模型,获得更高的精度;对通讯的带宽进行在线监控,优先保证指令传输;通过改变发送速率,保证视频连续发送. 试验结果表明,用户通过输入指令可以方便地控制平台,平台位姿可以通过虚拟操作环境和视频进行反馈,系统满足了设计要求.

关 键 词: Stewart 平台; 远程操作; 虚拟操作环境; 正解

中图分类号: TP 871

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)07-0819-04

Development of teleoperation testing system for Stewart platform

Wu Qiang Wang Zhanlin Li Jia Wang Zhifeng

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Teleoperation testing system for Stewart platform was developed to study Stewart platform teleoperation stability under condition of large time delay. Ethernet was used to simulate the telecommunication channel, which linked two Stewart platforms control systems. DirectX technology was used to build user input interface and video feedback without consideration of hardware. Open graphic library (OpenGL) technology was used to establish virtual operation environment, through which time delay could be compensated. To obtain higher accuracy, neural network forward kinematics solution, instead of traditional methods, was used to drive virtual models. Communication bandwidth was monitored online to assure operation command´s priority. The continuity of video transmission was guaranteed by changing transmission rate. The result shows that platform is easily controlled by operator´s command input, position and attitude information is feedback through virtual operation environment and video, testing system meets design requirements.

Key words: Stewart platform; teleoperation; virtual operation environment; forward kinematics

远程操作技术是一种有着重要应用的先进技术. 在许多人类不能或不易临场操作的工作环境,诸如深水、太空,核辐射区域、有着高度危险的震后地区和火山爆发地区等等,大大延伸人类的工作范围;在当今世界上,设备设施等硬件资源,以及专家学者等智力资源都存在着严重的分布不均衡,远程操作技术可以让这些资源的共享变为现实,通过轻松地操作远程的仪器,利用远程的设施,专家也可以不用出门,就亲手解决现场的问题.

并联机构是一类全新的机构,自 1965 年 Stewart 把它用于飞行模拟器的设计以来,得到广泛应用,因而并联机构也称为“Stewart 平台”. 与串联机构相比,并联机构具有刚度大、承载能力强、结构稳定、自重负荷比小、误差小而精度高等优点,但也存在着工作空间小的缺点. 由于并联机

收稿日期: 2005-09-21

基金项目: 国防重点学科建设资助项目

作者简介: 吴 强(1980-),山东泰安人,博士生,qiangwu@buaa.edu.cn.

构的上述特点,形成了自己的特殊应用领域,与目前广泛应用的串联式机构在应用上形成互补,从而扩大了整个机器人的应用领域. 目前主要应用在:飞船对接器的对接机构模拟;模拟运动;金属切削加工;微机构等领域.

在很多研究领域,需要将2种技术结合在一起. 例如太空对接中,对接机构是并联机构,操作人员在地面控制站进行远程操作;远程车辆和工程机械的控制试验中,车辆和机械的运动通常用Stewart平台来模拟,操作人员远离工作环境进行远程监控,等等.

基于以上应用背景,建立了一套较完善的Stewart平台远程操作试验系统,用来研究多种并联机构远程操作技术的性能. 本文论述了系统结构,建立系统用到的关键技术,以及系统建立后的试验结果.

1 系统结构

根据项目的应用背景,设置了2个端点:远程被控端和本地控制端.

在远端,用一台服务器负责通讯和任务的调配,并有下位机模拟现场控制器,对平台进行控制. 许多远程工程机械工作于比较恶劣的环境,对于它与服务器之间的通讯,广泛应用的工业现场总线技术是一个理想的选择,在此系统中,选择了CAN总线. CAN总线具有高实时性,数据传输距离长,传输稳定可靠等优点.

本地控制端也有一台服务器负责接收操作人员的控制指令,与远端通讯,监控远程平台,并控制本地平台跟踪远程平台的运动. 本地平台是可以承载大负载的液压Stewart平台. 这样在需要的时候,就可以把整个操作台放在Stewart平台上,使操作人员有临场感[1].

服务器之间的连接,采取了以太网,它通用性好,通过设置传输特性数据库,能够较好地模拟地面与太空、Internet两端点间等不同情况的传输特性.

整个系统的结构见图1.

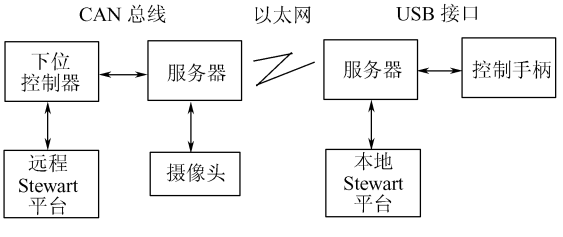


图1 系统结构图

2 关键技术

2.1 DirectX技术的应用

DirectX是Microsoft推出的一套功能强大的API,用户可以直接调用硬件,独占系统资源,而不用考虑具体设备. DirectShow和DirectInput是其提供的2个组件,分别提供鼠标、键盘和手柄的应用接口,以及高质量多媒体流捕获和回放功能.

视频信息是最直接也是最真实的信息反馈,虽然在大时延的通讯条件下,视频反馈会延迟、断续,但是它仍然是遥编程等远程控制策略不可或缺的参考信息.

系统使用了Logitech Notebook Pro摄像头,运用DirectShow技术,实现视频信息的反馈[2]. 系统的视频反馈可以自行选择解码器,实时改变压缩率,这就为根据通讯情况的变化确定传输策略提供了方便.

手柄是一种比较常用的控制指令输入设备. 利用杆和按键的组合,可以轻松地实现6自由度的位姿输入. 系统使用了力抖振手柄,运用DirectInput技术,实现指令的输入. DirectInput技术的使用也为今后应用力反馈手柄铺平了道路.

2.2 虚拟操作环境的建立

如前所述,因为数据流量大,视频信号经常会有大的延迟和断续,所以在远程控制中,单纯依靠视频反馈是不行的. 应用比较广泛的遥编程技术,为了保证控制信息的及时传递,建立了远端被控对象的虚拟操作环境. 这样就只需要传递被控对象的特征信息,数据量很小,传输的可靠性和实时性相比都有很大地提高. 视频信息为操作提供参考和校正标准,在通信带宽允许的情况下,直接作为主要反馈.

2.2.1 虚拟模型的建立

为了增加所建模型的可移植性,经常采用了OpenGL进行建模. OpenGL,即Open Graphic Library的缩写,是近几年发展起来的一个性能卓越的三维图形标准,它是在SGI等多家世界闻名的计算机公司的倡导下,以SGI的GL三维图形库为基础制定的一个通用共享的开放式三维图形标准. OpenGL是一个独立的工作平台,独立于硬件设备、窗口系统和操作系统,用它编写的应用程序可以很容易地移植到支持OpenGL的操作系统上,例如UNIX、Windows NT/9x/2000,这是它的一个很大的优点.

建模的思路是先部分再整体,即先分别为并联平台的各个部件建模,然后再组合为一个整体.

先分别建立上平台、下平台、缸体、连接球铰等各部分的模型,在此过程中根据不影响运动精度的原则作了一定的简化,并充分考虑了模型的优化,以保证软件整体的实时性. 然后,把各个部分的模型连接起来.

2.2.2　虚拟模型的驱动

要驱动虚拟模型运动,就要得到并联平台的实际位置和姿态. 要实测得到远端平台的准确位姿,现有水平,只能利用激光等精确测距设备测量平移,陀螺仪等设备测量转动. 显然,这样会大大增加系统的复杂性和成本. 由于 Stewart 平台 6 个缸的长度非常容易得到,可以用并联平台的正解算法代替.

如图 2 建立坐标系,进一步构造并联平台的数学模型,尝试采用位置正解的数值解法[3]. 当给定 6 个驱动器的杆长度 $l_i(i=1,2,\cdots,6)$ 后,为求上平台的 6 个独立的输出参数,可以建立如下方程组:

$$l_i^2 = (\boldsymbol{b}_i - \boldsymbol{B}_i)^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{b}_i - \boldsymbol{B}_i) \quad i = 1,2,\cdots,6 \qquad (1)$$

式中,$\boldsymbol{b}_i = [\,b_{ix} \quad b_{iy} \quad b_{iz}\,]$,$i=1,2,\cdots,6$ 为上平台各铰链点在固定坐标系中的坐标值;$\boldsymbol{B}_i = [\,B_{ix} \quad B_{iy} \quad 0\,]$,$i=1,2,\cdots,6$ 为下平台各铰链点在固定坐标系中的坐标值.

式(1)是 6 个独立的隐式方程,当已知机构的基本尺寸和 6 个驱动器的杆长度,就可以利用式(1)求出上平台的位置和姿态. 计算过程中,采用三维搜索法,把式(1)中未知数的个数降为 3 个. 最后用离散 Newton 法[4]求解出所需的位姿.

通过轨迹实验发现,此数值方法对迭代初值的依赖性很大,可选初值区域也比较小,很容易造成发散.

为避免上述问题,采用 BP 网络. 利用位置逆解结果作为训练样本,通过对大量样本的训练学习,实现机器人从关节空间到工作空间的非线性映射,从而求得并联机器人运动学正解,避免求解位置正解时公式推导和编程计算等繁杂的过程.

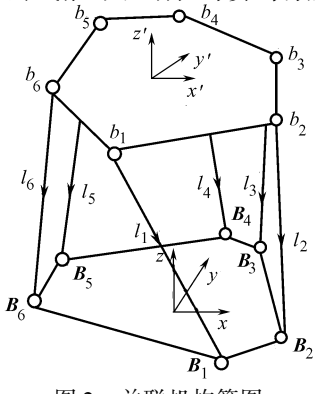


图 2　并联机构简图

BP 神经网络采用标准的 3 层神经网络,输入输出层分别由 6 个神经元组成,输入神经元的输出等于输入,分别是 6 个杆长的输入值,输出层神经元的输出是上平台的位姿坐标,即是上平台坐标原点在空间的位置坐标 x,y,z,以及上平台绕着 3 个坐标轴的转角 $\theta_x,\theta_y,\theta_z$. 隐层由神经元的个数经验公式(2)得到:

$$n_1 = \sqrt{n+m} + a \qquad (2)$$

式中,n_1 为隐层神经元的个数;m 为输出神经元的个数;n 为输入神经元的个数;a 为 1 ~ 10 之间的常数. 按照经验公式(2)以及多次试验,选择隐层神经元的个数为 20 个.

在工作空间选取了 1 849 个学习样本点,经过 30 000 次的迭代学习后误差为 10^{-2}. 网络训练完毕后对上平台在 y 轴方向的正弦轨迹进行正解测试,并与实际运动曲线比较,结果比较令人满意,测试曲线见图 3.

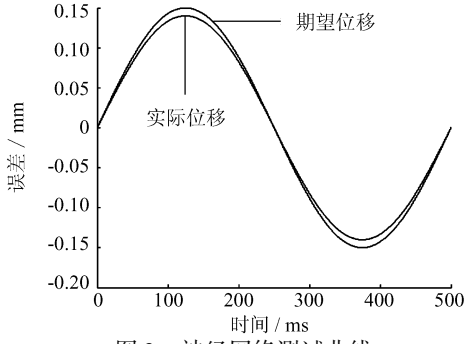


图 3　神经网络测试曲线

2.3　网络通讯与监控

试验系统需要传输的信息包括:控制端的控制信息、被控端的状态反馈信息和视频反馈信息. 控制信息和状态反馈信息对于远端控制和虚拟模型的运动至关重要,要优先保证,选用 TCP 作为传输方式;视频反馈数据量大,优先级低,采用 UDP.

由于网络负载的瞬时变化,连接特性在整个过程中可能在不断的变化,系统设置了带宽估计器. 对 ping 命令的源程序进行修改,发送一个相对小的数据包,然后测量 RTT 的方法来估计带宽. 获得实时带宽后,系统优先保证控制信息和状态反馈信息的发送,剩余带宽分配给视频信息,通过不断调整视频发送速率来保证视频信息的连续发送[5].

2.4　模块化的结构方式

如图 4 所示,系统功能被划分为清晰的模块,模块通过结构与其他模块相连,共同完成系统功能. 这样,模块彼此独立,方便建立和维护,模块的

改动、替换也很容易.

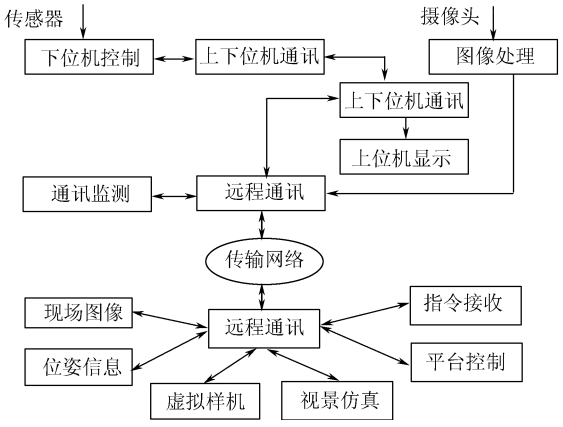


图 4 系统模块结构

3 实验结果

Stewart 平台的控制采用双通道 PID[3] 的控制方式,操作人员通过控制手柄控制远端平台的运动,同时本地平台跟踪远端平台的实验,以虚拟模型的运动作为主要反馈信息,视频信息辅助. 实验中,在网络延时不大的情况下,系统控制端的控制信息和被控端的状态反馈信息可以及时地传递,观察本地平台和远端平台之间的运动,是一致的. 视频图像也可以流畅地传送.

图 5 是虚拟平台和实际平台位姿的比较,可以看出神经网络正解算法可以准确地驱动虚拟模型反映远端平台的实际位姿.

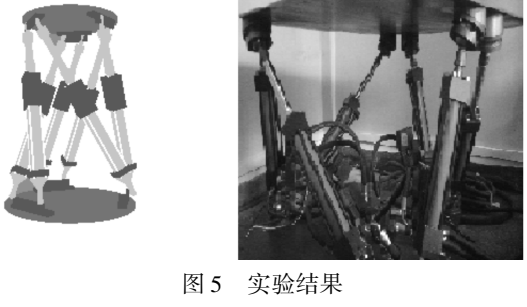


图 5 实验结果

4 结 论

1) 经过检验,系统可以完成试验平台所必需的信息传递和平台的控制,为下一步解决时延和丢包的远程控制策略的试验和功能的扩展做好了准备.

2) 模块化的结构方式是必需的,方便控制策略、通讯策略和补偿策略的增减及改变.

参考文献 (References)

[1] 赵丁选,黄海东,宫文斌,等. 遥操作工程机器人系统临场感技术研究[J]. 工程设计学报,2002,9(3):127-130
Zhao Dingxuan, Huang Haidong, Gong Wenbin, et al. Study on the technology of telepresence in operating a construction telerobot system[J]. Journal of Engineering Design, 2002,9(3):127-130(in Chinese)

[2] 郭坚,陈一民,黄薇. 基于 DirectShow 和 RTP 的远程机器人监视系统[J]. 计算机工程,2005,31(5):197-199
Guo Jian, Chen Yimin, Huang Wei. A remote robot monitoring system based on directShow and RTP[J]. Computer Engineering, 2005, 31(5): 197-199(in Chinese)

[3] 黄真. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 第 2 版. 北京:机械工业出版社,1997:36
Huang Zhen. Mechanism theory and control for parallel robot [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 1997:36(in Chinese)

[4] 颜庆津. 数值分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000:140
Yan Qingjin. Numerical analysis[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2000:140(in Chinese)

[5] Roberto Oboe. Force-reflecting teleoperation over the Internet: the JBIT project[J]. Proceeding of the IEEE, 2003, 91(3): 449-462

(责任编辑:张 嵘)