

无时延感的遥操作实时共享控制仿真

李华忠¹, 梁永生¹, 唐强平¹, 刘云霞¹, 洪炳熔²

LI Hua-zhong¹, LIANG Yong-sheng¹, TANG Qiang-ping¹, LIU Yun-xia¹, HONG Bing-rong²

1.深圳信息职业技术学院 软件工程系, 广东 深圳 518029

2.哈尔滨工业大学 计算机科学与工程系, 哈尔滨 150006

1.Department of Software Engineering, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen, Guangzhou 518029, China

2.Department of Computer, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China

E-mail: chinawww@tom.com

LI Hua-zhong, LIANG Yong-sheng, TANG Qiang-ping, et al. Real-time shared control simulation without time delay for teleoperation. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(3): 11-15.

Abstract: For the existence of large time delay and telepresence lack in the teleoperation, the real-time shared control system without time-delay for space telerobot has been proposed, which has integrated a variety of technologies. The key technologies including two-way force feedback, local sensor intelligent control information, teleprogramming and predictive displays without time delay have been researched emphatically. The computer simulation has verified the effectiveness of the proposed system and its technology.

Key words: space telerobot; shared control; teleoperation; teleprogramming; simulation; time delay

摘要: 针对遥操作存在大延时和临场感缺失等问题, 提出了一种融合多种技术的无时延感的空间遥控机器人实时共享控制系统; 重点研究了融合双向力反馈、传感器局部自主控制、图形预显示和遥编程的无时延感遥操作技术; 计算仿真实验验证了该系统及其技术的有效性。

关键词: 空间遥控机器人; 共享控制; 遥操作; 遥编程; 仿真; 时延

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.03.003 文章编号: 1002-8331(2009)03-0011-05 文献标识码: A 中图分类号: TP39; TP242.3

1 引言

随着各空间大国月球探测工程的实施, 遥操作日益成为学者研究关注的热点议题之一。所谓遥操作(Teleoperation)是指在本地控制远程机器人进行的作业。目前, 它已广泛应用于航天、航空领域, 但遥控操作仍存在以下主要问题^[1-2]: 一方面, 操作员与空间遥控机器人(Space Tele-Robot, STR)之间的通讯时延和带宽限制一直是制约遥控操作系统性能的主要因素; 另一方面, 在使用传统的遥控操作系统时, 操作员丧失了对两个重要感知(视觉和力觉)的信任, 从而严重削弱了操作员完成遥控操作任务的能力^[3-5]。

研究的主要目的在于:(1)为操作员提供足够多的实时反馈信息实现“遥现”临场感及接近远场任务环境的真实、丰富的传感器反馈;(2)特别研究遥操作控制回路的结构, 包括克服时延影响的VR预显示图形仿真、遥感编程等技术;(3)演示具有强大人机接口的复杂多传感器融合系统的性能;(4)验证微

重力环境下自校准、关节力矩控制及运动规划技术;(5)基于多传感器集成与融合的遥控与自主结合的共享控制之关键技术。

为此首先设计了一种STR实时共享控制系统。其次, 重点研究了融合双向力反馈、传感器局部自主控制、无时延感的遥编程及VR预显示等技术。最后, 计算仿真实验验证了提出的系统及其相关技术的有效性。

2 系统构成

所设计的STR系统允许将基于任务驱动模型的控制和基于传感器的控制结合起来, 实现遥控操作和自主控制的合理分担与共享^[6], 使系统易于扩展的同时, 能有效地完成各种复杂空间任务并能处理发生的意外故障。该STR的系统构成如图1所示, 软硬件配置主要包括: STR本体, 6维自由度机械手, 6轴力/力矩腕力传感器、视觉子系统, 监控台和数据库管理处理子系统。

基金项目: 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.69985002); 国家高技术研究发展计划(863)(the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2001AA422270)。

作者简介: 李华忠(1963-)男, 工学博士, 工程师, 主要研究领域为空间机器人、嵌入式、人工智能; 梁永生(1971-)男, 工学博士, 教授, IEEE会员, 主要研究领域为计算机网络与数据通信、信号处理与模式识别; 洪炳熔(1939-)男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为人工智能、空间机器人、虚拟现实。

收稿日期: 2008-09-22 **修回日期:** 2008-11-03

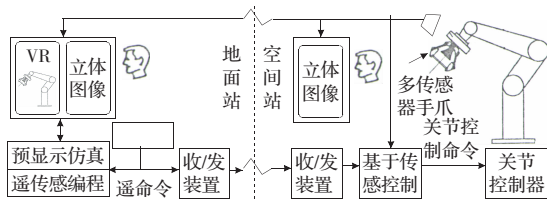


图1 空间遥控机器人的系统构成

(1)机械手:为具有六维自由度的 PUMA 型机器人,其肩的旋转、偏转和俯仰驱动装置结构类似,均能产生 240 N.m 力矩;其肘关节驱动器能产生具有 40:1 同步驱动变换;其手爪装有多种传感器,包括两个 6 轴力/力矩腕力传感器、触觉矩阵、捕捉力控制器、激光测距仪、一个微型手持立体相机和固定全局头部立体摄像机;其每个关节驱动控制器设计均相似,均由一个带 2 MB RAM 的 Intel Conroe-L 420 处理器、I/O 板、电源板、DC 电机驱动板及模拟识别板组成。

(2)6 轴力/力矩腕力传感器:安装在机械手末端,产生两组六维差分模拟信号,测量末端驱动力/力矩矢量的 6 个独立部分;由两个独立控制器进行 A/D 转换产生代表力/力矩矢量的数字信号。

(3)视觉子系统:包括两个 CCD 摄像机,其一手眼相机安装在腕部,另一个全局相机安装在顶部;手眼相机负责拍摄手爪的立体图像、协助完成复杂作业任务和详细检查任务的完成情况。固定全局相机能缩放、聚焦及手动控制,负责提供机器人全局工作空间的立体图像;规划子系统利用视觉子系统提供的信息,完成 STR 的路径与轨迹规划^[7]。

(4)监控台子系统:涉及在遥控操作、自主与共享控制等操作模式下完成测试 STR 能力的多种任务,主要包括:

①为演示舱内/舱外服务能力,执行如下基本任务:(a)轨迹跟踪、插拔圆柱零部件和拧松/拧紧螺丝等 ORU 轨道作业;(b)捕捉浮游物体,如浮游卫星。

②验证操作模式的有效性:(a)采用立体摄像机监视器星载遥控操作;(b)利用计算机图形 VR 预显示仿真技术,完成 STR 的地面遥控操作;(c)基于传感器的遥编程(Tele-Programming)以克服时延影响。

(5)数据库管理处理子系统:通过 CAN 总线,由支持 STR 软硬件结构的计算机、控制器及数据视频录相机、遥机器人控制计算机(TRCC)、遥机器人冗余计算机(TRC),显示装配控制器及电源模板控制器(PMC)、3 个关节控制器、载荷控制器及手控制器等构成分布式系统,如图 2 所示。其中,在前向回路中,它从手控制器获得命令,计算逆运动学参数,产生机械手所需运动。在逆向回路中,TRCC 从腕力传感器接收传感信息输入与计算机手命令,执行边界管理、接触控制和内部安全检查。TRCC 负责执行控制、显示面板和供给 STR 载荷等任务。PMC 提供卫星上行/下行通讯链路,控制头部相机。

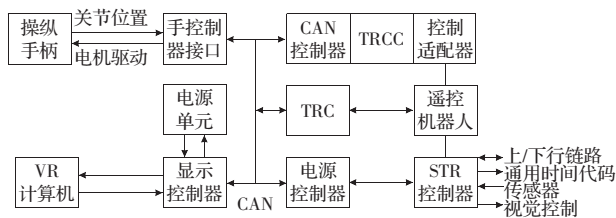


图2 数据管理和处理子系统

(6)控制子系统:采用基于 NASREM 的 STR 实时共享控制系统结构^[8],负责提供多种操作模式选项,按纵向分层横向分级的组织布局,它由 3 个层次组成:任务分解模块、世界模块和传感器处理模块。高层的控制命令通过分层递阶控制在空间和时间上被分解成子命令字符串和模式,数据共享是在同一级的水平模块之间进行,该子系统能完成 3 种较低级:基本运动级、原始级和伺服级的任务。既提供基于位置的力反馈阻抗控制法的主控制模式;也提供无力反馈或速度控制模式下的手控操作。操作员能改变各种系统选项的增益,如选择命令自由度的任意组合,修改阻抗刚度、阻抗阻尼和手控制力/力矩反馈增益等。若需要执行跟踪预编程轨迹的轨道任务,STR 也能在自主模式下完成智能化作业。在遥控模式时,手控制器先生成笛卡尔坐标控制命令,然后通过逆运动学将其转化成伺服级关节角驱动命令;最后由嵌套在模拟力矩回路中的关节控制器,完成数字比例积分 PD 控制器运算。NASREM 定义了遥控机器人的逻辑计算结构,能满足系统演变更新换代要求,既能从前期开发的各类系统软、硬件设计与实现及其体系架构中继承其结构特征,也易于萃取、融合并集成最新的研究成果。它是一个具有最典型代表性的通用模型,其软件和计算机结构的实现靠功能结构分层递阶驱动。

3 实时共享控制系统

实时共享控制系统由 4 个重要的模块组成:任务驱动模块、遥任务模块、协调模块和组合模块。任务驱动模块负责基于遥任务模块、嵌入式控制设备、视觉和力觉传感信息及 STR 的位姿/状态信息等的输入产生不同的运动。遥任务模块在高速高性能处理器上运行,执行繁重的空间运动学、动力学正计算与逆运算,并处理用户接口任务。然后将结果通过 CAN 总线送给在嵌入式实时系统上运动的任务模块。协调模块包括状态机、与状态机有关的全部动作、任务模式转换和给任务模块发送信息等。组合模块能智能地将任务模块的控制输出合成连贯的控制命令,并保证机械手能执行正确、合适的运动。

(1)任务驱动模块:主要功能在于生成机器人的期望运动轨迹、向任务协调模块发送事件发生的信息。机器人的期望运动轨迹由任务分解模块基于系统的全局变量(如位置、姿态、状态变量等)、嵌入式设备和遥控任务模块等实时生成。在嵌入式实时系统中,每个子任务模块作为独立线程运行,每个周期执行如规则定义的任务:周期开始。读输入命令队列,设置适合变量;读传感器设备或从遥任务模块接受输入;基于局部输入和机器人位置信息产生控制运动;如果发生某一事件则给状态机发送相应的消息;周期结束。采用相似的数据处理结构,容易生成彼此相互独立工作的子任务模块,从而增加实时并行处理能力。任务模块提供顺应控制来辅助完成抓取操作,协同配合 STR 自主或遥控完成各种复杂任务。因为每一个模块仅能产生唯一的期望运动,与其它任务模块期望运动的组合运动不能保证合成 STR 可执行的运动,任务模块必须具有强鲁棒性。作者在设计轨迹跟踪算法时,充分考虑到控制稳定性问题,已经设计的算法在受到其它同时运行模块的轻干扰时鲁棒性较好。

(2)遥控任务模块:在复杂 STR 控制系统中,需要特殊高性能嵌入式实时系统及其用户接口。遥控任务在遥工作站上运

行的过程正像运行在实时系统上的任务模块一样,具有几个GUI,可与状态机进行交互作用,并实时地显示当前状态信息。根据GUI,操作员能动态地改变遥操作输入设备的参数并实时动态显示机器人实时图形。

(3)组合模块:将各任务模块的运动合成一个运动并确保该运动是机器人可执行的运动。有多种方法合并来自任务模块的输出矢量。作者在仿真中实验了如下几种方法:对角度和速度的简单和、简单平均值、加权和与加权平均及表决法。加权平均法计算量不太大,其性能也可预测,因而该法使用效果较好。组合模块是连接共享控制系统与机械手之间的关键之一。

(4)协调模块:共享控制系统中的主要概念之一是每个任务模块都不了解发生作用的其它任务模块。其仅仅按照指令完成要求的任务,一旦出现重要事件,马上发出相应的消息,触发事件响应处理程序。协调模块的职责负责使任务模块智能化地完成任任务。状态机负责协调各任务模块与任务序列,决定需要改变的状态与事件的结束,它主要基于从任务模块返回的消息,在状态机中的每个状态知道各任务模块在该状态期间执行什么任务。当进入一个新的状态时,相应设定的任务开始启动,而其它任务将停止执行。系统启动时,将向各任务模块发送一组初始化命令,配置状态参数,决定各模块运行机制。状态机采用C++语言编程实现,用户可描述各任务模块命令和输出,包括任务执行状态、初始化命令序列指定转换和初始状态等,因为所有这些信息都以文件形式保持,可实时进行语意分析,并检验正确与否。

4 关键遥操作技术

提出的STR共享控制系统集成了操作员遥控与STR自主性两者的优点,涉及双向力反馈、局部自主控制、预显示及遥编程等关键技术。

4.1 双向力反馈技术

遥操作系统与主从概念密切相关,从臂试图尽可能精确地跟踪操作员通过输入设备给定的位置、速度等命令,通过安装在从臂末关节和末端效应器之间的外部腕力/力矩传感器,采用主从双向力反馈控制方法,如图3所示。通过右边的控制回路,采用具有增益矩阵 S_s 和阻尼矩阵 D 的PD伺服反馈,从臂关节角矢量 θ_s 被迫尽可能地跟踪主臂关节角矢量 θ_m 。增益矩阵 S_s 可从期望的笛卡尔刚度矩阵 $S_{s,s}$ 导出刚度控制公式: $\tau_s = S_s \Delta\theta = J_{s,s}^T J_s \Delta\theta_s$ 。它将主臂关节角误差 $\Delta\theta_s$ 和关节力矩 τ_s 与从臂广义雅可比矩阵 J_s 联系起来。左控制回路提供与安全相关的力反馈给主臂。当主臂运动时,若从臂与墙等障碍物发生碰撞,则左控制回路系统的位置误差会急剧增大,强迫主臂的操作力/力矩剧增,并最终达到从臂关节力/力矩的极限,使从臂损坏或破坏作业环境。采用安装在从臂末关节和末端效应器之间的外部腕力/力矩传感器,能克服上述负荷超载等缺陷。因此,左控制回路,利用一定的增益 $S_m = J_m^T S_{s,m} J_m$ 产生相应的笛卡尔刚度 $S_{s,m}$,将位置误差反馈给主臂关节电机。关节控制器利用从臂的逆运动学模型,通过补偿项 $h_m(\theta_m, \dot{\theta}_m)$ 和 $h_s(\theta_s, \dot{\theta}_s)$

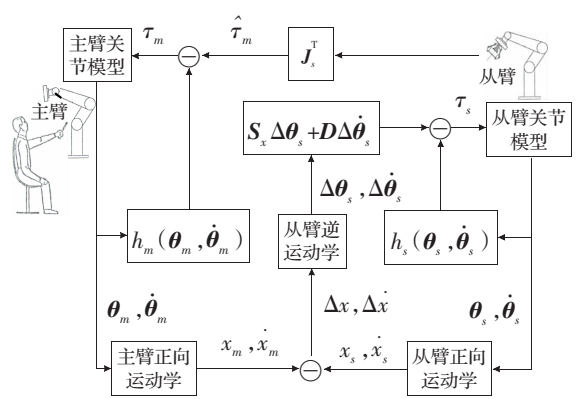


图3 主从双向力反馈遥操作方框图

可补偿重力、摩擦、惯性和耦合力等。由于在任何运动期间伺服系统不可避免地存在位置误差,采用双向力反馈技术既能使操作员真实地感觉到产生的位置偏差,也能向操作员提供可靠的反作用力信息。

4.2 基于传感器的局部自主控制

在空间遥操作时,由于存在大时延、视觉被局部或完全遮挡等问题,STR容易出现失控现象。为了有效解决这些技术难题,使STR具有某种程度的自主决策能力是必不可少的,而实现STR智能化的重要一步是实现基于传感器的局部自主控制能力。图4是本文研究的基于传感器的局部自主控制技术的概念图,由遥控与自主共享伺服任务分解模块负责实施。图5给出了共享伺服任务分解模块的基本结构及其与操作员的控制接口。它既可将任务分解成自主控制模式,也可由操作员通过操纵与主臂采用遥控模式。根据两种输入源,工作分配模块产生协调的输出结果,控制STR的规划器模块,周期地将数据

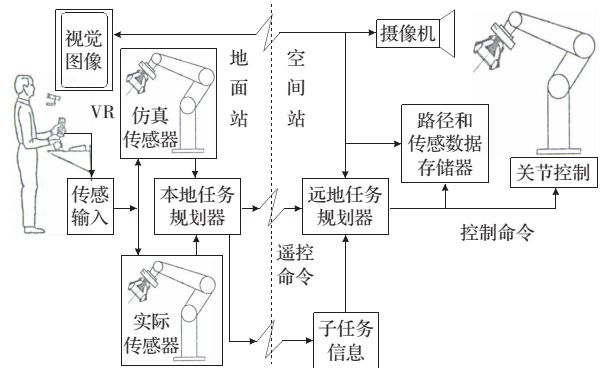


图4 基于传感器的局部自主控制技术

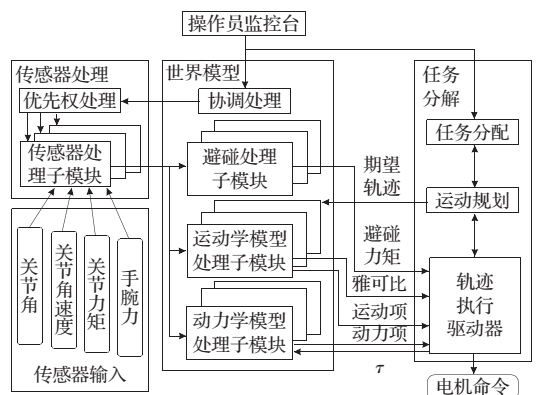


图5 共享伺服任务分解模块的基本结构

点送给执行器模块。执行器使用的数据可用来做 STR 的状态标记。基于当前状态和每个规划器的期望输入状态值之差,执行器模块可周期地计算 STR 驱动器的控制信号。利用该项技术,可控制 STR 沿期望的轨迹运动。供给伺服的原始输入参数包括:伺服坐标参数、关节坐标参数、末端效应器参数、STR 的期望位置、速度和加速度参数及控制系统增益。针对不同的伺服系统,选择不同的矩阵参数和控制模式,采用相应的伺服控制算法。由操作员命令输入相应的参数决定 STR 的控制模式,如遥控、自主或共享控制模式。作业算法选择操作员期望的算法;作业状态返回操作员的控制状态。

4.3 图形预显示技术

当从地面或其它远离中继卫星的飞船上遥控机器人时,时延是遥控操作中关键问题之一,而预显示计算机图形是克服该问题的一种有效方法。目前,预显示有 3 种类型:第一种是当前状态和时间延续的简单泰勒序列外推法;第二种由 Ziebolz 和 Paynter 首先提出,该法将当前状态和时间序列及近期的期望控制信号输入到模型,针对模块化过程的短预测结果非常满意,并能解释产生非线性动力学的现象,使得模型运行速度比实际过程快许多倍;第三种是图形预显示技术。提出基于 VR 模型并融合 STR 运动学与动力学模型的图形预显示技术^[11-12],其结构如图 6 所示。

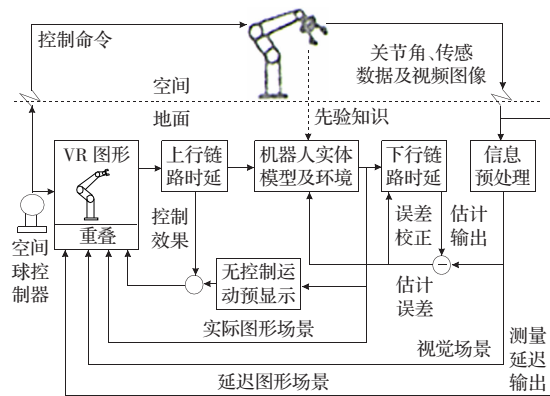


图 6 基于 VR 模型的融合预显示技术

该技术融合运动学与动力学建模预测的观点,叠加在延时视频上的 3D 立体图形既可由运动学模型驱动,也可由动力学模型驱动,由作用在相应延时命令的 A 和 B 的与、或构成。预显示 3D 立体图形仿真是 STR 成功的一项关键技术。一般典型往复时延为 5~7 s。在星载上得实现与地面站相同的控制结构和路径规划器,同时要在地面虚拟环境中实现 STR 的自由运动及传感器感知和反馈的仿真。操作员先通过 VR 预显示机械手图形模型处理六维自由度手控制器,然后立即将控制命令送到机器人仿真器,并经存在时延传输线发送给 STR。仿真预览地面站计算机和仿真系统,包括有时延的卫星上行/下行线路模型、真实机器人状态及其环境的模型。实际卫星下行电路传感器信息和关节数据与从仿真器传来的下行数据误差用观察器或估计器修正模型假设。图形重迭前,要将生成场景和实时视觉图像进行标定,以确保计算视点与真实视点一致,使虚拟世界能重现真实世界。在已知微重力环境下浮游物体的动力学时^[9-10],在地面可利用手部相机提供的 STR 的位姿信息,采用动

态视觉方法进行捕捉目标操作。

4.4 无时延感的遥编程技术

遥编程的概念是指将符号型、误差限制和控制程序段而不是笛卡尔或关节层次的信息传递给 STR,来克服遥控操作中有限的带宽限制和通讯延迟等问题。操作员可与现场的几何图形模型进行相互作用,并能立即获得视觉和肌肉感知反馈信息。利用监视操作员动作的主系统产生命令程序,从系统相对主系统一步步延迟执行接收到的程序,直到发现错误信息。一旦发现错误立即通知主系统,然后等待发送新的命令。操作员与任务相互作用的速率由平均错误时间决定,而不是由通讯速度和时延决定,它具有处理达数秒时延的能力。

遥感编程子系统主要由基于传感器的在线遥控操作和相应的离线编程部分组成。遥编程操作模式本质上是一种面向任务的隐式离线编程形式,将传感器仿真数据提供给实际 STR,可校准 STR 模型,克服传统方法存在的缺陷,以补偿 STR 和实际世界绝对位置的不精确性,实现在线遥控操作和基于传感器离线编程在任何时间的快速转换及其分担与共享控制。在线遥控操作时,全局路径既可由操作员给定,也可由星载路径规划器自动生成,提供 C-Space 构型先验知识和共享控制类型,允许实现传感器融合的神经网络训练,识别真实的目标状态,将传感误差映射成位置/旋转误差,然后将位置/旋转误差映射成运动命令,完成复杂空间作业任务。该方法能在虚拟环境中进行离线遥控操作仿真,然后在找到满意运动路径的任意时刻发送遥控命令。

符号命令的生成是遥编程中的关键技术之一。生成的指令将被发送到远场,驱动从臂 STR 执行遥操作任务。符号命令语言是一种与内容无关的语言,由不带循环的或分支结构简单描述语言组成,产生相应的语法,形成语言分析器。遥控指令可分成两类:低级命令和专用命令。低级命令与被警戒和顺应运动有关,基于过程时间和 STR 几何模型中的状态变化而产生。专用命令既与比执行环境传输速率要高的动作有关,也与工具应用有关。STR 从臂控制的基本形式是“混合力/运动控制”。操作员与从臂的通讯,采用如下约定描述执行环境原语:(1)任务模型;(2)位移控制和力控制;(3)预载力方向控制;(4)警戒力和速度;(5)确保任务完成的顺应状态。一个典型的执行环境消息传递的命令在远场执行过程如下:(1)通过语义分析,将连续执行环境的内容转化成局部控制语言;(2)用数值替换符号动力学参数;(3)将结果代码传递给机器人局部控制器执行操作任务;(4)监督执行过程。

如果遵循“发送、等待”策略,当传输时延为 $\tau(s)$,基本任务命令时间为 $t(s)$,任务时间 $T(s)$,则总任务执行时间为: $(1 + 2\frac{\tau}{t})T(s)$ 。而采用遥编程方法,总任务执行时间 $(1 + \frac{2\tau}{nt})T$ 。显然,如果 nt 远大于 τ ,则时延影响得到有效限制。如果采用监视仿真系统实时产生遥控机器人的符号命令,遥控系统工作起来仿佛不存在时延一样。

5 系统实施

提出的共享控制系统在空间机器人地面综合仿真平台上

得以实现。本文实施方案将设计过程分成两部分:编辑、调试、测试代码的开发环境和执行空间机器人实时控制系统代码的目标环境。该方案如图7所示。

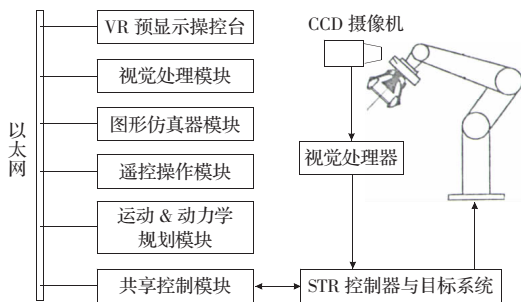


图7 共享控制系统实施

运行 Windows 的通用计算机网络用于基于 Visual Studio 2005 VC++的高级语言和嵌入式系统开发环境。一旦代码测试通过,则可被交叉编译并下载到目标系统上。目标系统由几块 ARM9 处理器组成。从软件角度来看,目标环境的多处理器操作系统应尽可能简单以减轻负载,它的主要职责是启动处理器、下载执行代码及各处理器间的通讯,目标软件驱动六维自由度 PUMA 型机器人。图8是遥控机器人在遥控与自主共享操作模式下无时延感完成拧螺丝作业仿真场景。



图8 遥控机器人共享拧螺丝作业仿真场景

6 结论

开发了一种无时延感的空间遥控机器人实时共享控制系统,重点研究了给操作人员提供视觉和力觉反馈信息,以克服时延的双向力反馈、局部自主控制、基于 VR 预显示和遥编程等

关键技术。仿真实验结果表明遥控与自主结合的共享控制技术是辅助操作员完成复杂空间任务的有效手段。

参考文献:

- [1] Won S K, Hannaford B, Bejczy A K. Force-reflection and shared compliant control in operating telemanipulations with time delay[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1992, 8(2): 176-184.
- [2] Yokokohji Y, Ogawa A, Hhasunuma. Operation mode for cooperating with autonomous functions in intelligent teleoperation systems[C]// IEEE Proc of 1993 Conf on Robotics and Automation, 1993: 510-515.
- [3] Papanikolopoulos N P, Khosla P K. Shared and traded telerobotic visual control[C]// Proc of the 1992 IEEE Int Conf on Robotics and Automation, Nice, France, 1992: 878-885.
- [4] Schneiderman H, Khosla P K. Implementation of traded and shared control strategies for exploration using a tactile sensor[C]// Proc of the Foruth ANS Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, 1991, 99: 217-226.
- [5] Conway L. Teleautonomous systems: projecting and coordinating intelligent action at a distance[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1990, 6(2): 146-158.
- [6] 李华忠, 杨维萍, 柳长安. 基于虚拟现实的空间机器人共享控制系统及其仿真[J]. 宇航学报, 2000, 21(3): 100-105.
- [7] 李华忠, 洪炳熔. 基于 VR 的自由飞行空间机器人自主运动规划仿真系统[J]. 计算机工程与应用, 1999, 35(5): 1-4.
- [8] 洪炳熔, 李华忠. 基于 VR 的空间站地面实验综合平台仿真系统研究[J]. 计算机应用研究, 1999, 16(6): 51-54.
- [9] 李华忠, 洪炳熔. 基于关节驱动力矩的自由飞行空间机器人捕捉目标控制算法[J]. 机器人, 2000, 22(3): 161-168.
- [10] 洪炳熔, 李华忠. 自由飞行空间机器人的关节驱动力矩求解算法[J]. 机器人, 1999, 21(5): 328-334.
- [11] 李华忠. 基于虚拟现实的无时延感空间机器人遥控操作研究[J]. 计算机应用研究, 2008.
- [12] 李华忠. 空间机器人连续运动轨迹控制建模和仿真研究[J]. 机器人, 2008.
- [13] Netherlands, 2005. New York, USA: ACM Press, 2005: 821-827.
- [14] Dimopoulos Y, Moraitis P. Multi-agent coordination and cooperation through classical planning[C]// Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology, Hong Kong, China, 2006. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2006: 398-402.
- [15] Croft W B. User-specified domain knowledge for document retrieval[C]// Proceedings of the 9th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval, Pisa, Italy, 1986. New York, USA: ACM Press, 1986: 201-206.
- [16] 彭军, 刘亚, 吴敏, 等. 基于状态预测的多智能体动态协作算法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(20).

(上接 10 页)

参考文献:

- [1] 李海刚, 吴启迪. 多 Agent 系统研究综述[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2003, 31(6): 728-732.
- [2] 李实, 徐旭明, 叶榛, 等. 机器人足球仿真比赛的 Server 模型[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(2): 37-39.
- [3] Chen W, Decker K. Managing multi-agent coordination, planning, and scheduling[C]// 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems, New York, USA, 2004, 1(3): 1360-1361.
- [4] Cox J, Durfee E, Bartold T. A distributed framework for solving the agent plan coordination problem[C]// The 4th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems, Utrecht,