

文章编号 1001-2486(2001)05-0108-04

应用虚拟现实的遥操作机器人技术*

李焱 吴涛 贺汉根

(国防科技大学机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

摘要 大时延遥操作是空间遥操作机器人研究中的一项关键技术。如何克服通讯延迟和有限带宽的影响是大时延遥操作研究的焦点。本文首先阐述了应用虚拟现实的大时延遥操作的基本思想。着重对基于虚拟现实的遥编程技术和虚拟环境中模型的误差校正技术进行了研究。基于监控思想和遥编程概念,实现了应用虚拟现实的遥操作机器人实验系统,在地面仿真环境中,该系统成功完成了插方孔等遥操作任务。

关键词 遥操作 遥机器人 遥编程 虚拟现实

中图分类号 :TP242 ;TP391.9 **文献标识码** :A

A Method of Applying Virtual Reality in Telerobotics

LI Yan, WU Tao, HE Han-gen

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Teleoperation through large time delay (T3D) is one of the key techniques for space telerobotics. How to overcome the impact of the time delay in the communication links and the limited bandwidth, is the focus in the research of T3D. In this paper, the main idea of applying Virtual Reality (VR) in T3D is discussed. The relative key problems in applying VR, including teleprogramming, and model calibration, are especially concerned. Based on the concept of supervisory control and teleprogramming, an experimental telerobotics system is implemented. The system has successfully fulfilled several tasks including the peg-in-hole task.

Key words teleoperation; telerobotics; teleprogramming; vVirtual Reality

对于空间遥操作机器人,如果能够在地面控制空间的遥机器人完成操作任务,将不仅可以避免由于空间的恶劣环境给宇航员带来的危险,也将减少完成空间任务的人力和物力消耗。然而,这种地—空遥操作系统面临的一个主要问题就是通信传输延迟问题,在月球和地球之间,信号传输延迟一般在3s以上。如果将这种信号延迟引入连续控制回路中,控制系统将很难稳定。为了保持操作的稳定性,操作员往往不得不采用“动一步,等一步”的策略,难以进行连续操作。另一方面的困难是通信带宽资源有限,这将使操作员难以获得足够的包括实时视频信息在内的反馈信息,从而限制了操作员对操作现场进行准确的感知和判断。

大时延遥操作的一种思路是采用主从直接控制的方式,通过预测显示技术、时延力反馈技术等对信号传输延迟进行补偿;另一种思路是采用监控方式,在这种方式下,操作员不是直接参与底层的控制回路,而主要是对遥机器人进行编程,并不断监视遥机器人的工作状态。监控策略通过将通讯延迟排除于底层的控制回路之外,从而避免了大时延对控制系统稳定性的影响¹⁾。

我们的研究主要是基于监控方式进行的。为了提高操作员的编程效率,我们应用虚拟现实技术构造临场感的人机交互界面。虚拟现实的作用主要体现在以下两个方面:

1) 实现预测显示(Predictive Display)

根据物体和机器人的几何模型和物理模型(运动学模型和动力学模型)构造虚拟环境和虚拟机器人。虚拟机器人能够即时响应操作员的动作,进行连续运动,通过仿真运行,虚拟机器人能够按照规划的程序预测显示机器人的运动轨迹,使操作员可以对指令序列进行验证和优化,这将提高操作的安全性和可靠性。

* 收稿日期 2000-12-11
基金项目 863-2 空间机器人与遥科学资助项目
作者简介 李焱(1973-)男,博士生。

2) 实现临场感监视(Virtual Presence)

对于机器人以及结构化的操作环境,物体的几何信息是已知的,根据机器人和物体的位姿信息,我们通过图形重构的办法,合成虚拟的操作环境,将操作环境的真实状态显示出来。在虚拟环境中,不仅实现了立体显示,而且操作员可以改变视点进行漫游,从而通过位姿信息而非视频图像实现了操作环境的临场感显示。这将大大降低对通信带宽的要求,从而有望在有限带宽条件下实现对操作环境的连续观察。

1 虚拟现实相关技术

1.1 遥编程技术

遥编程(Teleprogramming)^[2]的基本思想是构造虚拟环境和虚拟机器人,操作员面向虚拟环境,连续控制虚拟机器人进行运动,同时获得即时的视觉和运动觉反馈;系统监视操作员的动作,并自动将操作员的动作转化为符号命令程序。根据所生成的符号命令程序的抽象程度不同,遥编程主要分为三类:

- 1) 示教式编程 编程的结果是一段连续的运动轨迹。系统记录虚拟机器人运动中每一个时刻的位置、速度等信息,遥机器人根据这些信息,将完全复现虚拟机器人的运动。
- 2) 动作级编程 编程的结果是动作级语句。动作级语句描述机器人运动的基本动作,如“ x 关节转动 x 角度”、“末端沿直线运动到 x 位置”,等等。对于每一条动作语句,系统记录其起始位置和终止位置,识别出相应的动作类型,并确定动作语句的参数。遥机器人根据动作的类型和参数,自行规划连续运动轨迹。
- 3) 任务级编程 一个任务是由动作级语句,以及相关的参数设置语句,条件判断语句等构成的,包括特定的分支、循环结构的程序段。对于一个任务,需要指定其起始条件和终止条件。遥机器人首先对任务进行解释,然后以自主的方式执行任务。

根据任务的复杂性和遥机器人的自主能力的不同,不同的遥编程方式,各有其适用范围。一般地说,对于简单的任务采用示教方式和动作级编程比较方便快捷,而对于接触操作等比较复杂的任务,因其对位置控制和力控制精度要求较高,采用任务级编程更加合适。

为了使遥编程系统适应不同任务复杂性的要求,提高遥编程的效率,我们采用一种分段复合编程策略,即根据任务不同阶段操作复杂性和对控制精度要求的不同,采取不同的编程方式。我们只考虑动作级编程和任务级编程两种方式。对于动作级语句,又分为自由运动和受约束运动(guarded move)两类。我们根据操作过程中,遥机器人相对于操作对象的位置不同,将任务划分为三个阶段:

- 1) 自由运动阶段。遥机器人向操作对象接近,由于距离较远,不涉及避碰问题,对轨迹控制精度要求不高,采用动作级编程,生成自由运动语句。
- 2) 约束运动阶段。遥机器人接近并可能与操作对象发生接触,涉及避碰问题,需要较高的轨迹控制精度,并对遥机器人的运行速度和接触力附加限制,采用动作级编程,生成受约束运动语句。
- 3) 操作阶段。遥机器人与操作对象发生接触,需要通过力控制完成操作,调用预定义的任务。

1.2 虚拟环境的误差校正

应用虚拟现实的前提是虚拟环境具有一定的准确性。当操作员进行编程时,虚拟机器人的运动必须在一定程度上预测遥机器人的运行轨迹,尤其在接触操作中,虚拟机器人同操作对象之间的相对关系将直接影响操作人员的判断和编程的合理性。但是,即使对于高度结构化的环境,意外和偶然因素仍然是不可避免的,遥机器人的运行相对于理想轨迹或预定目标必然存在偏差,这就造成了虚拟机器人和真实机器人之间的误差;另一方面误差来源于实际运动的操作对象和虚拟操作对象之间的差异。根据这两方面误差的来源,虚拟环境的误差校正分为两个方面:虚拟机器人的误差校正和虚拟操作对象的误差校正。

(1) 虚拟机器人的误差校正

虚拟机器人的校正主要基于传感器信息。通过遥机器人的内置传感器,我们可以得到真实机器人的状态信息,对于机械手,其状态可由关节角或末端位置来表达。设遥机器人的状态矢量为 X ,虚拟机

机器人的状态为 \tilde{X} ,则虚拟机器人相对于遥机器人的误差为 $e = \|\tilde{X} - X\|$,当误差超过预定的阈值 $e \geq T$,将虚拟机器人的状态更新为遥机器人的状态。

(2) 虚拟操作对象的误差校正

同虚拟机器人不同的是 ,操作对象的位姿一般无法通过自身传感器获得 ,需要利用视频图像 ,通过视觉定位技术来获取。对于虚拟对象的误差校正我们通过单目计算机视觉定位的方法实现。假设在结构化环境下 ,物体的几何信息和特征结构都是已知的 ,摄像机是固定不动的 ,已经标定。设待求物体的位姿齐次矩阵为 M ,取物体上非共面的 4 个特征点 p_1, p_2, p_3, p_4 ,已知特征点在物体局部坐标系中的坐标为 $P_i = (x_i, y_i, z_i, 1)$,特征点在图像中对应的像素点的坐标为 $Q_i = (u_i, v_i, 1)$,则存在如下关系 :

$$Z_{c_i} \cdot Q_i = C \cdot M \cdot P_i$$

其中 C 是摄像机对应的投影矩阵 , Z_{c_i} 为 p_i 相对于摄像机的深度信息 , $i = 1, 2, 3, 4$ 。将四个线性方程联立求解 ,可以确定物体相对于世界坐标系的位姿矩阵 M 。

2 遥操作系统实现

系统从功能结构上主要分两个部分 :人机接口系统和遥机器人系统(参见图 1)。其中 ,人机接口系统实现操作员交互界面和程序自动生成功能 ,遥机器人系统是一个基于动作级语言的半自主机器人系统。遥机器人系统是基于 PUMA560 机械手构造的 ,其主要功能包括 :命令解释、路径规划、关节空间或操作空间的力/位置控制 ,以及误差检测。目前 ,我们的遥机器人系统实现了基于事件反馈的局部自主^[3]。人机接口系统实现的主要功能如下 :

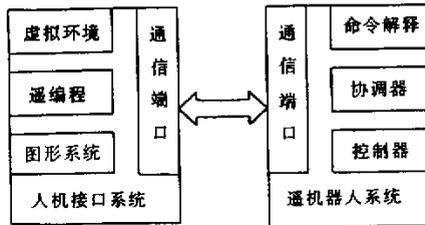


图 1 遥操作系统结构图

Fig.1 Architecture of Telerobotics system

· 虚拟环境交互界面。在虚拟环境中 ,我们基于 PUMA560 机械手的模型构造了虚拟机器人。由手控器给出机器人的关节或末端位置 ,通过运动学计算驱动虚拟机器人。在此基础上 ,人机交互实现了以下内容 :

(1) 多种运动控制方式。在虚拟环境中 ,操作员可以选择虚拟机器人的关节或者末端进行控制 ,从而实现关节、末端两种控制方式。

(2) 碰撞检测。我们基于分层包围盒结构实现了虚拟机器人和操作环境(包括操作工件)之间的快速碰撞检测。

(3) 虚拟坐标。我们构造了虚拟坐标等合成对象 ,可以根据需要随时给出包括世界坐标系、工作坐标系、机器人基坐标系和控制单元的局部坐标系在内的多种坐标系的坐标轴。

· 遥编程。系统根据特定时间段内虚拟机器人的起始和结束状态 ,结合当前的运动控制状态 ,自动生成动作语句。语句的构成基于我们针对 PUMA560 机械手自行开发的 OSRL 动作级语言 ,主要分为三类 :

(1) 动作语句 ,包括关节运动和末端运动两类。每一条动作语句的主体内容包括 :动作标识号、动作参数 ,不同的动作拥有不同的参数结构、力、速度约束条件。

(2) 参数语句 ,通过参数语句可以设置机器人的运行速度、调整机器人的控制模式(位置控制模式

和力控制模式),以及向机器人发送监控事件。

(3) 任务调用语句 通过调用预先开发好的任务。

· 动作的预显示。根据遥机器人控制系统模型构造了机器人运动学仿真器,仿真器的主要功能包括 命令解释、轨迹规划、运动学计算。通过仿真器,可以对已经生成的动作语句进行预显示。

· 多模式显示。操作员界面采用切换方式实现不同的显示模式。有三种显示模式 编程模式、任务预显示模式和操作现场遥现模式。在编程模式下,操作员控制虚拟机器人进行连续运动;在预显示模式下,虚拟机器人演示机械手的理想运动轨迹;在遥现模式,操作员可以对操作现场进行监控,并在出现意外情况下进行误差诊断。

· 通信接口。我们基于 TCP/IP 协议,以客户/服务器模式建立操作员控制站和遥机器人之间的通讯。通讯接口实现逻辑上独立的两个信道,一个用于传输控制命令和反馈状态报告,我们称之为命令信道,一个用于传输操作现场的传感器信息,我们称之为数据信道。通过缓存技术,实现了命令的连续发送和接收。

3 试验及结论

在地面仿真环境中,进行了大时延遥操作试验。为了模拟大时延,我们在通信线路中人为设置了 3s 的时间延迟,上行通路和下行通路各有 3s 延迟。试验的主要内容是插方孔(无导角),其中孔和插件的间隙配合精度为 0.02 ~ 0.04mm。

在试验中,成功地完成了插方孔操作任务。试验结果表明,我们研制的应用虚拟现实的遥操作系统有效克服了大时延的影响,能够完成较高精度的遥操作任务。

参考文献:

- [1] Sheridan T B. Space Teleoperation through Time Delay :Review and Prognosis[J]. IEEE Trans. On. Robotics and Automation ,October ,1993 ,9(5):592-606.
- [2] Paul R ,Lindsay T ,Sayes C. Time Delay Insensitive Teleoperation[A]. Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference of Intelligent Robots and Systems ,July 7-10 ,1992 :247-254.
- [3] 韦庆,李杰. 基于事件反馈的机器人监控技术及在大时延遥操作中的应用[A]. 空间机器人及遥科学技术研讨会,1999.

