

3D 图形预测仿真及虚拟夹具的大时延遥操作技术

蒋再男¹, 刘宏^{1,2}, 谢宗武¹, 赵京东¹,

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 150001, 哈尔滨; 2. 德国宇航中心
机器人及机电一体化研究所, 82230, 柏林)

摘要: 以空间机器人在轨服务为背景,建立了卫星在轨自维护系统的地面遥操作平台.远端由安装在卫星本体上的一个四自由度机器人和灵巧手的臂/手系统组成,当卫星出现故障时,遥操作者通过空间鼠标和力反馈数据手套分别控制远端的臂/手系统排除卫星故障,实现卫星的自我维护.对于地面-太空之间通讯的大时延,利用 3D 图形预测仿真技术克服时延的影响,并采用虚拟夹具法提高遥操作系统的安全性和操作性能.在大时延及变时延(约 7 s)的条件下,实现了武汉遥操作哈尔滨的自维护机器人臂/手系统,成功地完成了打开太阳能帆板的典型卫星在轨维护任务,验证了该方法的有效性,为今后实际空间机器人的地面遥操作提供了经验.

关键词: 空间机器人; 遥操作; 时延; 预测仿真; 虚拟夹具

中图分类号: TP872.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)01-0078-04

Teleoperation with Large Time Delay Based on 3D Graphic Predictive Simulation and Virtual Fixture

JIANG Zainan¹, LIU Hong^{1,2}, XIE Zongwu¹, ZHAO Jingdong¹

(1. School of Mechatronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Institute of Robotics and Mechatronics, German Aerospace Center, Berlin 82230, Germany)

Abstract: The ground teleoperation platform of satellite on-orbit self-serving system is constructed in the background of space robot on-orbit serving. When a malfunction of the satellite occurs, the teleoperator uses a space mouse and a data-glove with force feedback to control the arm/hand system fixed on the satellite body to remove the malfunction to implement the satellite self-serving. For the large time delay of the communication between ground and space, 3D graphic predictive simulation is employed to eliminate the impact of the time delay, and the virtual fixture is utilized to improve the performance and safety of the telemanipulation. Under the condition of large and variable time delay (about 7 s), the task of deploying a folded solar panel, a typical on-orbit serving of the satellite, is accomplished by operators in Wuhan through teleoperating the four-degree freedom robot arm/hand system in Harbin. The experimental results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: space robot; teleoperation; time delay; predictive simulation; virtual fixture

随着人类空间活动的不断发展,以及航天飞机、宇宙飞船和空间站的建立,大量的空间生产、空间加工、空间装配、空间维护和修理工作不可能仅仅依靠宇航员来完成,而必须发挥空间机器人^[1]的作用.由

于空间环境的特殊性,利用地面遥操作空间机器人可以大大减小宇航员从事危险工作的代价和成本^[2].目前,典型的空间机器人遥操作实验有欧洲航天局的空间机器人实验^[3],NASA的工程实验

卫星^[4],以及德国的国际空间站机器人组件的验证系统^[5].

当卫星发射后,其零部件可能会出现故障,将导致卫星失效,比如我国 2006 年 10 月 29 日发射的“鑫诺二号”卫星,太阳帆板二次展开未能完成,从而造成在国际通讯市场的潜在损失可能高达 1 000 亿元.针对这些情况,本文提出了卫星自维护的概念,即在卫星本体上安装一个轻型机械臂,臂的末端装有操作器(灵巧手),当卫星的机械展开部件出现故障时,由机器人来排除故障.这不仅可实现卫星的自我维护,还可大大提高卫星的可靠性和有效寿命.

本文建立了一套卫星自维护系统的地面遥操作演示平台,利用 3D 图形预测仿真技术来克服大时延的影响,采用虚拟夹具法来辅助进行机器人遥操作的任务规划,遥操作一个四自由度的机械臂和末端操作器(HIT/DLR 灵巧手)在大时延及变时延下,完成了打开故障太阳能帆板的典型维护任务.

1 系统结构

卫星自维护遥操作系统主要包括两部分:位于武汉的遥操作客户端和位于哈尔滨的遥机器人端,二者之间通过互联网进行通讯,实现前向通道的控制指令及反向通道的视频信息,以及遥机器人传感器信息的传输,如图 1 所示,其中武汉的遥操作客户端用于模拟空间机器人遥操作的地面系统,哈尔滨的遥机器人端用于模拟空间系统.

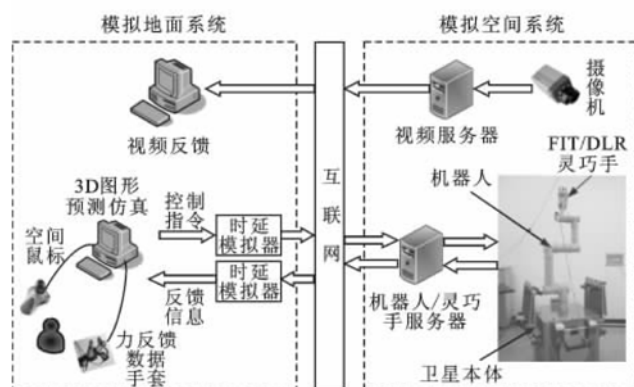


图1 卫星自维护遥操作系统结构

在遥操作客户端,操作者通过空间鼠标和力反馈数据手套实时控制仿真计算机中的虚拟机器人和灵巧手,当操作无误后,控制指令经过时延模拟器进行延迟,并通过互联网发送给远程实际遥机器人和灵巧手.遥机器人系统的位置/力传感器信息经过互联网与时延模拟器进行延迟后,用于在虚拟环境下构建遥机器人的场景,并将现场的实时视频信息反

馈到操作者端,用以辅助操作者进行遥操作.因此,视频反馈可以使操作者获得视觉临场感,力反馈数据手套能够感觉到遥机器人灵巧手的操作力,使操作者获得力觉临场感.

在遥机器人端,一个四自由度机器人和末端操作器(HIT/DLR 灵巧手)安装在卫星本体上,以实现卫星的自我维护. HIT/DLR 灵巧手是一个具有 13 个自由度和关节力矩传感器的四指灵巧手,安装在机器人末端用于抓取操作.另外,视频服务器用于将摄像机采集的遥机器人视频信息压缩后传输给客户端. 机器人/灵巧手服务器用于接收遥操作控制指令并执行该命令,同时将机器人的位置/力矩传感器信息发送给客户端.

2 3D 图形预测仿真

2.1 3D 虚拟仿真场景

直接利用 Open Inventor 软件的建模函数能够建立虚拟仿真场景,缺点是难以建立复杂场景,尤其是对于曲面建模十分困难.本文充分利用 ProE 软件和 Open Inventor 软件的优势,方便地建立了逼真的仿真场景.如图 2 所示,首先采用 ProE 软件对卫星自维护系统的各部分实体按实际尺寸建模,设定模型的颜色、单位和光照等特征后,转化成 Open Inventor 可读取的文件格式(.iv 文件),然后利用 Open Inventor 软件导入转化后的文件,按运动的逻辑关系(父子关系)进行组装.根据机器人的运动关系,将机器人的基座作为根节点,依次装配机器人的各关节、手掌和手指各关节.这样,在驱动虚拟模型时,父节点的运动就可以传递到子节点上,而不需要经过机器人正运动学计算,因此提高了实时性.

2.2 3D 图形预测仿真

为了克服时延对视觉反馈的影响,一般采用预测显示技术,目前预测显示主要有两种类型:①根据系统当前状态和时间导数,通过泰勒级数进行外推,

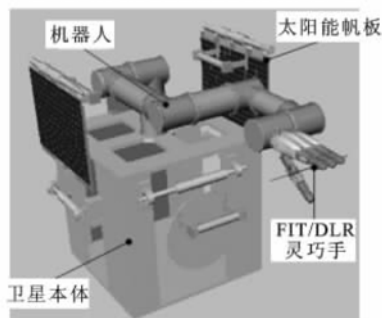


图2 虚拟仿真场景

该方法只能应用于小时延(几十毫秒)的情况;②基于系统当前状态与控制输入,仿真系统以比实际系统快得多(几十倍)的速度运行,预测系统在当前输入后的状态,该方法适用于大时延(几秒)的遥操作。

对于卫星自维护系统的遥操作,从哈尔滨至武汉的互联网传输时延 T_i 约为几百毫秒。为了模拟空间遥操作大时延(7 s)的情形,采用数据缓冲技术,将遥操作客户端生成的控制命令及反馈的传感器信息经过一个链表进行约 3.5 s 的延迟,从而实现了在仿真计算机上人为地给前向通道和反向通道各增加 3.5 s 的模拟时延 T_m 。整个遥操作系统的时延为

$$T = 2(T_m + T_i) \quad (1)$$

由于网络状况的变化将会导致互联网传输时延的变化,因此 T_i 模拟了空间遥操作变时延的情形, T_m 模拟了空间遥操作大时延(7 s)的情形。针对卫星自维护系统的大时延及变时延的情况,采用第②种预测显示技术,操作者面向所建立的 3D 图形预测仿真模型进行操作,虚拟仿真场景实时地响应操作者给出的控制指令,由仿真验证控制指令正确后,将该指令发送给远端服务器,遥机器人则执行该条指令。

3 虚拟夹具法

虚拟夹具法^[6]是在软件里通过限制机器人一定的运动,使机器人沿着需要的轨迹运动,或者避免机器人运动到禁止区域。因此,虚拟夹具分为禁止区域虚拟夹具和引导虚拟夹具。为了提高系统的安全性及操作性能,在系统的任务规划中采用了这两种虚拟夹具。

3.1 禁止区域虚拟夹具

由于图形碰撞检测的算法复杂,会占用大量的计算机资源,降低仿真速度及性能,影响系统的实时性,因此本文采用禁止区域虚拟夹具来实现机器人与卫星本体的碰撞检测。首先将卫星本体的模型定义为一个立方体禁止区域,然后通过机器人和灵巧手的正运动学计算得到灵巧手各手指的末端位置,如果这些位置在禁止区域内,即表明机器人末端与卫星本体发生碰撞,控制指令无效,且不能发送到遥机器人的服务器上。

3.2 引导虚拟夹具

在遥操作过程中,操作者是通过手动控制空间鼠标来控制机器人的位置和姿态。通过手动操作,要实现精确的控制十分困难,甚至不可能实现(比如通过空间鼠标控制机器人沿直线或者圆弧轨迹运动)。

然而,在打开太阳能帆板的任务中,由于太阳能帆板只能绕其轴线沿圆弧轨迹运动,因此要求机器人必须严格沿着该圆弧轨迹运动。

在通常情况下,通过空间鼠标控制的是太阳能帆板轨迹上 c 点的位姿 (x_c, y_c, rx_c) ,由于手动控制不精确,导致机器人运动轨迹与帆板运动轨迹发生偏离,从而会产生较大的接触力,甚至会损坏机器人和灵巧手。借助于引导虚拟夹具,在打开帆板阶段,空间鼠标将不直接控制 c 点的位姿,而是控制 c 点对应的太阳能帆板圆心角 J_1 ,从而保证机器人运动轨迹与帆板运动轨迹能够严格重合,避免因为刚体接触而导致的较大接触力,如图 3 所示。通过计算间接得到 c 点的位姿

$$x_c = x_o + r \sin(J_1) \quad (2)$$

$$y_c = y_o + r \cos(J_1) \quad (3)$$

$$rx_c = J_1 \quad (4)$$

式中: (x_o, y_o) 为太阳能帆板的圆心坐标; r 为太阳能帆板运动轨迹的半径。

4 遥操作任务规划与实验

为了能够合理地利用虚拟夹具法辅助遥操作,本文采用分段控制方法进行任务规划,即将打开太阳能帆板任务分解为多个子任务,每个子任务采用不同的控制方式。该任务规划主要分为以下 3 个子任务。

(1) 抓握帆板手柄子任务:该任务控制机器人到达帆板的手柄位置,并控制灵巧手抓握帆板手柄。

(2) 打开帆板子任务:该任务是在灵巧手抓握帆板手柄后,控制机器人打开太阳能帆板。

(3) 退出帆板手柄子任务:在打开太阳能帆板后,控制机器人和灵巧手从帆板手柄中安全退出,并使机器人和灵巧手复位。

任务(2)是利用引导虚拟夹具指导机器人沿着太阳能帆板的运动轨迹运动,任务(1)和任务(3)则是利用禁止区域虚拟夹具来防止机器人与卫星本体发生碰撞。

如图 4 所示,空间鼠标生成的控制命令通过引导虚拟夹具进行判断,从而决定是直接控制机器人的位姿,还是通过引导虚拟夹具来控制机器人的位姿。通过机器人和灵巧手的正运动学计算得到手指末端的位置,利用禁止区域虚拟夹具判断灵巧手末端是否与卫星本体发生碰撞。如果发生碰撞,该控制命令无效,需重新获取空间鼠标的控制命令;如果未发生碰撞,则利用机器人逆运动学来计算得到各关

节角度,驱动虚拟环境中的仿真机器人,并把该控制命令发送给遥操作机器人执行。

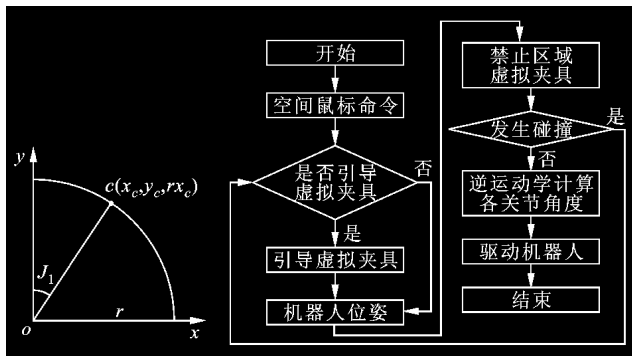
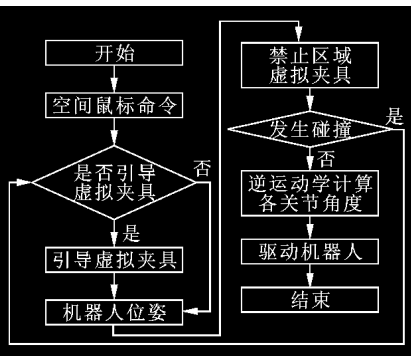


图3 太阳能帆板
打开轨迹

图4 系统控制流程图



如图5和图6所示,采用3D图形预测仿真及虚拟夹具的技术,在大时延及变时延(约7 s)的条件下,利用卫星自维护遥操作系统实现了打开卫星出故障的太阳能帆板,完成了典型的在轨维护任务。



(a)初始位置 (b)抓握手柄 (c)推开帆板

图5 打开太阳能帆板3D预测仿真



(a)初始位置 (b)抓握手柄 (c)推开帆板

图6 打开太阳能帆板的实验

5 结 论

本文建立了卫星自维护系统的地面遥操作平台,在大时延及变时延(约7 s)条件下,利用3D图

形预测显示技术对遥操作机器人进行预测仿真,利用虚拟夹具法辅助进行遥操作的任务规划,完成了打开卫星出故障太阳能帆板的任务。实验结果验证了3D图形预测显示技术能够较好地克服大时延对空间机器人遥操作的影响,使遥操作得以顺利连续地执行。同时,仿真实验也验证了虚拟夹具法在提高系统安全性和操作性能方面发挥着重要的作用。

参考文献:

- [1] 李成, 梁斌. 空间机器人的遥操作 [J]. 宇航学报, 2001, 22(1): 95-98.
LI Cheng, LIANG Bin. Teleoperation of space robotics [J]. Journal of Astronautics, 2001, 22(1): 95-98
- [2] DIFTLER M A, CULBERT C J, Ambrose R O, et al. Evolution of the NASA DARPA robonaut control system [C] // Proceedings of the 2003 IEEE Conference on Robotics and Automation, Piscataway, USA: IEEE, 2003: 2543-2548.
- [3] BRUNNER B, HIRZINGER G, LANDZETTEL K, et al. Multisensory shared autonomy and tele-sensor-programming key issues in the space robot technology experiment ROTEX [C] // Proceedings of the 1993 IEEE Conference on Robotics and System, Piscataway, USA: IEEE, 1993: 2123-2139.
- [4] IMAIDA T, YOKOKOHJI Y. Ground space bilateral teleoperation of ETS-VII robot arm by direct bilateral coupling under 7 s time delay condition [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(3): 499-511.
- [5] HIRZINGER G, LANDZETTEL K. Rokviss-robotics component verification on ISS [C] // Proceedings of the 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Noordwijk: Netherlands, 2005: 57-67.
- [6] ABBOTT J J, MARAYONG P, OKAMURA A M. Haptic virtual fixtures for robot assisted manipulation [C] // Proceedings of the 12th International Symposium of Robotics Research. San Francisco, USA: Springer, 2005: 49-64.

(编辑 管咏梅)