

空间机器人遥操作系统设计及研制

王学谦¹, 徐文福², 梁 斌^{1,2}, 李 成²

(1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 深圳 518055, xqwang@robotsat.com;

2. 哈尔滨工业大学 空间智能系统研究所, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对空间机器人的特点设计了多种遥操作控制模式, 提出了空间机器人遥操作分层控制结构 LATSR (Layered Architecture for Teleoperation of Space Robot), 并研制了一套遥操作系统, 包括任务规划子系统、主从控制子系统、预测仿真子系统、信息处理子系统和地面验证子系统. 最后利用该系统开展了多项遥操作实验, 对整个系统及各子系统的功能和性能进行了检验. 该系统具有灵活的操作接口, 既为一般用户提供了简便的用户界面, 也为机器人专家提供了底层控制能力.

关键词: 空间机器人; 遥操作; 预测仿真; 地面验证; 遥编程

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)03-0337-06

Design and development of teleoperation system for space robot

WANG Xue-qian¹, XU Wen-fu², LIANG Bin^{1,2}, LI Cheng²

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China, xqwang@robotsat.com;

2. The Institute of Space Intelligent System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Several remote control modes and a layered architecture for teleoperation of space robot (LATSR) are designed aiming at the characteristic of space robot. A teleoperation system for space robot is developed, which is comprised of five subsystems: the task planning subsystem, the master-slave control subsystem, the predictive simulation subsystem, the information processing subsystem and the ground-based validation subsystem. Experimental results verify the functionality and performance of the system and its subsystems. The flexible operation interface of the system provides simple user interface for general users, and the low-level control capability for roboticists.

Key words: space robot; teleoperation; predictive simulation; ground-based validation; tele-programming

空间机器人系统在未来的空间活动中具有越来越重要的作用, 其中在卫星维修、在轨服务以及建造大的空间结构方面具有广泛的应用前景. 由于受机构、控制、传感及人工智能等支撑技术的制约, 从 80 年代开始普遍认为, 实现完全自主的空间机器人是短期内难以达到的目标, 因此目前的研究重点是有人参与的局部自主遥操作系统. 德国、日本、加拿大等国家在空间机器人遥操作方面

进行了大量研究, 建立了相应的遥操作系统^[1-4]. 国内的多家公司, 如哈尔滨工业大学^[5-8]、中科院力学所^[9]和清华大学^[10]等也对空间机器人及其遥操作系统进行了大量的研究和实验. 本文提出了空间机器人遥操作分层控制结构 LATSR (Layered Architecture for Teleoperation of Space Robot), 并研制了一套工程实用的遥操作系统, 包括任务规划子系统、主从控制子系统、预测仿真子系统、信息处理子系统和地面验证子系统. 该系统具有主从、双边和遥编程多种遥操作控制模式, 既能利用手控器进行直接的遥操作, 也能进行基于传感器、面向任务的遥编程操作, 从而保证空间遥操

收稿日期: 2008-12-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60805033, 60775049).

作者简介: 王学谦(1980—), 男, 博士研究生;

梁 斌(1968—), 男, 教授, 博士生导师.

作任务高效、顺利地完

1 空间机器人遥操作系统设计

1.1 遥操作系统的功能与组成

天地间大的通讯时延和有限通信带宽是空间机器人遥操作中存在的主要问题,给空间机器人的稳定遥操作控制带来了很大的困难.地面操作者在控制空间机器人时一般采用“运动-等待”的策略来保证遥操作的可靠性和安全性,这就造成系统操作效率的降低.学者们从不同的角度出发,对如何克服时延影响提出了许多方法,这些方法大体上可以分为三类:图形预测仿真、遥编程控制和双边控制.这三种方法都是基于模型的,所以需要增加模型修正功能,以保证预测模型的准确.

根据大时延问题的解决方法确定了遥操作系统的功能和组成,应具备图形预测、遥编程和双边控制功能.由于三维图形显示、动力学计算和图像处理部分需占用较多的计算机资源,单台计算机难以保证系统性能,因此按功能将遥操作系统划分为多个子系统进行分布设计.同时空间遥操作要求高度的可靠性和安全性,增加了地面验证功能,对遥操作命令进行充分的验证.根据这些系统需求,设计了相应的空间机器人遥操作系统,由任务规划子系统、主从控制子系统、预测仿真子系统、信息处理子系统和地面验证子系统五部分组成,如图 1 所示.遥操作支持平台用于支持遥操作系统进行相应的操作,分别对遥控信息和遥测信息进行加工处理.

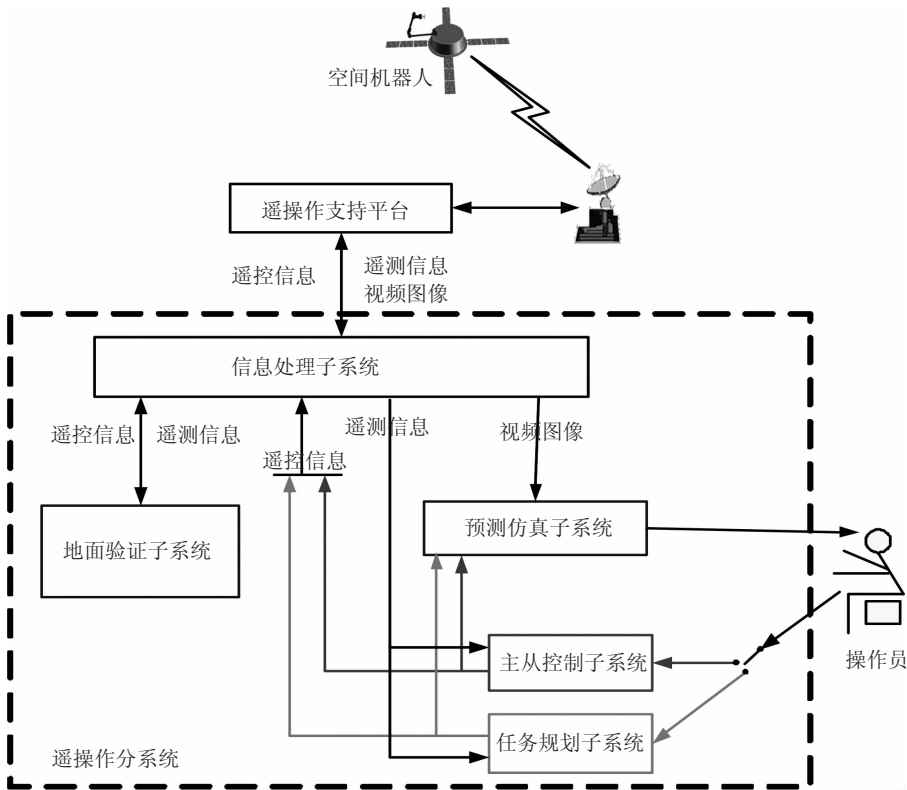


图 1 遥操作系统组成图

1.2 遥操作控制模式设计

按自主能力从低到高,该系统具有以下几种遥操作模式:主从模式、双边模式和遥编程模式,根据不同的任务选择系统不同的遥操作模式^[11].主从控制模式中,操作员直接操纵手控器,将手控器的位置或速度形成空间机械手运动指令,空间机械手跟随该指令运动.双边模式和主从模式的不同点在于双边模式中存在力反馈,增加了双边控制方法.双边模式中本地端和远端都在一个控制回路中,两者之间直接相互作用,通过设计控制算法克服通信时延的影响.遥编程控制可以看成是涵盖最为广泛的一种控制模式,包括各种监督

控制结构,其基本思想在于:要求远端机器人拥有一定的自主控制能力,操作员所发出的指令是一种“高级”的机器人运动命令,远端机械手接收此命令后,依靠自己的局部闭环控制器来自行执行它.

1.3 遥操作控制结构设计

在可预见的将来,大多的空间机器人任务都需要地面遥操作的支持,但是自主的级别不尽相同.对于简单的操作任务可由星上自主功能完成,但对于卫星维修等复杂任务需要操作员较多的参与.为了实现多自主级别的遥操作,必须采用合适的地面遥操作控制结构.本文在 NASREM^[12] 和

MARCO^[13]的基础上设计了模块化、标准化的空间机器人遥操作分层结构 LATSR, 横向包括四层, 分别为任务层、基本动作层、基元层和伺服层; 纵向包括三个模块, 分别为信息处理模块、环境建模

模块和任务分解模块. 操作员接口为地面操作提供了介入的接口, 所有的模块共享一个全局数据库和操作员接口模块, 如图 2 所示.

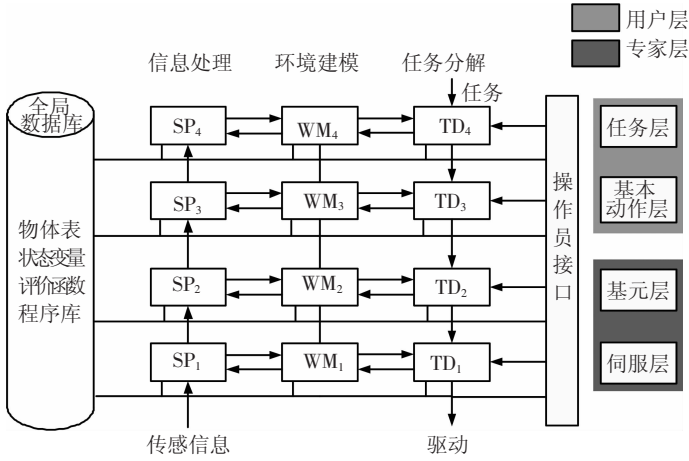


图 2 空间机器人遥操作控制结构 LATSR

LATSR 采用层次型控制结构设计, 操作任务逐层分解为机器人能直接完成的底层任务. 其中任务层和基本动作层同属于用户层, 命令集简化为需要做什么, 而不需要考虑明确的机器人动作. 基元层和伺服层属于专家层, 涉及机器人底层控制, 描述了机器人系统如何执行任务. 任务分解模块将高层目标分解成底层动作, 包括时序分解和空域分解. 环境建模模块是对环境状态进行建模 (即记忆、估计、预测), 保存在全局数据库中. 信息处理模块在时间和空间上进行模式识别、事件检测、滤波和集成. 任务层将任务命令分解为操作器的基本运动序列, 如移动轨道替换单元 ORU (Orbital Replaceable Unit) 的任务, 可分解为机械臂运动到捕获准备位置、末端接近目标星手爪、打开手爪、闭合手爪、机械臂运动到目标位置等基本运动序列. 基本运动层将基本运动分解为一串中间位姿数据, 将面向任务的描述转变为面向操作器的描述, 以前述的“机械臂运动到捕获准备位置”为例, 该基本运动分解为末端在笛卡尔空间的位姿序列. 基元层主要进行动力学计算, 生成平滑运动轨迹, 执行动力学意义上较大的运动, 对上面已分解的笛卡尔空间运动, 经过该层的处理后转化为关节空间的运动. 伺服层执行动力学意义上较小的运动, 包括伺服关节位置、速度、力的控制. LATSR 为每层都提供了操作员接口, 为地面操作者提供了强大的交互方式. 各层接收的任务命令可以来自上层或者来自操作员, 或者是二者的结合, 可以实现各自主级别的遥操作. 遥操作系统需要地面系统和星上系统协同设计, 包含相同的 LATSR 内核. 地面部分包括图形用户界面、

LATSR 内核、三维图形界面、手控器以及提供给多用户的 VRML 场景显示. 星上部分包括 LATSR 内核、机器人和传感器.

2 空间机器人遥操作系统实现

针对上面的分析建立了如下的空间机器人遥操作系统, 布局如图 3 所示, 整个遥操作系统由一个操作员进行操作. 操作和显示界面由四个显示器实现, 其中预测仿真显示界面显示空间机器人运动的三维图形预测, 刷新率不低于 20 帧/s; 信息处理显示界面显示和备份遥操作命令数据、遥测数据和遥操作系统的状态信息, 备份时间不低于 30 min; 任务规划界面规划生成自主命令和遥编程命令、选择合适的遥操作模式; 主从控制界面设置手控器和双边控制的控制参数, 主手的操作空间不小于 200 mm × 200 mm × 200 mm, 力反馈精度为 0.3 N; 地面验证子系统由对末端运动进行等效机械臂、进行星载验证的中央控制器和关节、手爪电模拟器以及天地通信模拟设备组成, 可模拟 0 ~ 10 s 的定常时延和随机时延, 以及 4 Kbps 的上行码速率和 16 Kbps 的下行码速率.

2.1 任务规划子系统

任务规划子系统具体包括完成多种遥操作模式下的任务规划; 支持在线和离线的空间机器人基座与机械臂协调运动的运动规划; 支持在线和离线的空间机械臂运动轨迹规划与优化; 生成和在线显示遥操作命令. 任务规划子系统对遥操作任务进行分析、分解与决策, 实现多种遥操作模式下的任务规划, 生成空间机器人系统运动数据或任务序列.



图 3 空间机器人遥操作系统布局图

2.2 主从控制子系统

主从/双边控制子系统由手控器机构部分、驱动检测部分、控制器部分、运动数据解算部分、主从/双边控制算法等主要部件,以及辅助显示和操作面板等两个辅助单元组成。主从控制子系统用于实现对空间机械手的主从控制和双边控制,利用手控器实时生成控制命令。双边控制器采用双边 PD 控制方法实现双边控制。双边 PD 控制中主端向从端传递速度信息,从手的控制采用位置控制,使从手跟踪主手运动;从端向主端反馈速度信息,主手的控制采用位置控制,使主手跟踪从手运动,操作者感受到对应的控制力,从而完成虚拟力反馈。双边 PD 控制方法中主手和从手都采用位置误差的 PD 控制,前向传递和反向反馈的信息分别为主手和从手的速度。

2.3 预测仿真子系统

预测仿真子系统用来进行对空间机器人状态信息的预测,并进行逼真的实时计算机图形显示辅助遥操作。预测仿真子系统由 6 个模块组成:1) 用户界面模块;2) 三维模型模块;3) 运动学、动力学模型校正模块;4) 碰撞检测模块;5) 网络模块;6) 处理引擎模块。详见文献[14]。

2.4 信息处理子系统

信息处理子系统是遥操作系统对外通信的桥梁和接口,由遥操作命令处理模块、遥测信息处理模块、图像处理模块、数据存储模块和网络管理模块组成。遥操作命令处理模块接收、保存,经安全性检查后发送给空间机器人。遥测数据处理模块接收遥测数据,分析处理进行显示并转发至其它子系统。图像处理模块对接收到的图像数据按照规定的格式进行组帧,然后发送到预测仿真子系统。数据保存模块对遥操作命令、遥测信息和图像

数据进行备份。网络管理模块实现遥操作系统内部的网络通信以及与遥操作支持平台间的网络通信,并提供遥操作系统内部时间统一功能。

2.5 地面验证子系统

目前,我国还没有在轨运行的空间机器人,缺乏空间遥操作方面的经验。为保证遥操作的安全,空间机器人发射前必须进行地面验证。地面验证子系统包括物理验证、星载验证和天地通信模拟模块,详见文献[15]。

3 实验研究

3.1 实验条件

空机械臂的 $D-H$ 坐标定义如图 4 所示,此时初始关节角度均为零。空间机器人机械臂各部分的质量特性如表 1 所示。向量 $^i a_i$ 、 $^i b_i$ 和 $^i I_i$ 均为第 i 坐标系中表示,各连杆的长度(单位:m)为

$$L_1 = 0.3, L_2 = 0.3, L_3 = 0.83, L_4 = 0.3, \\ L_5 = 0.7, L_6 = 0.1, L_7 = 0.2345.$$

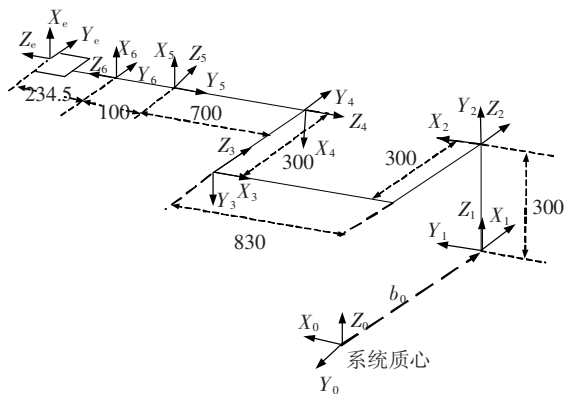


图 4 空间机械臂 $D-H$ 坐标系

基座的质心初始位置和初始姿态分别为

$$r_{00} = [-0.0475, -0.0042, -0.0583]^T \text{m},$$

$\Psi_{h0} = [0^\circ, 0^\circ, 0^\circ].$

机械臂的初始关节角为

$\Theta_{s0} = [0^\circ, 56.555\ 1^\circ, -89.781\ 6^\circ, 0^\circ,$
 $-56.773\ 5^\circ, 15.000\ 0^\circ].$

手柄坐标系相对于惯性坐标系的位置姿态为

$r_{h0} = [1.352\ 0, -0.029\ 0, 0.133\ 5]^T\text{m},$
 $\Psi_{h0} = [0^\circ, 0^\circ, 180^\circ].$

手柄坐标系相对于工具坐标系的初始位姿为
[-6.5 mm, 4.5 mm, 500 mm, -15°, -0.5°, 0°].
遥操作命令的发送周期为 250 ms,中央控制器规划出力矩传送给关节控制机器进行运动. 空间机器人系统共安装四个相机:两个手眼相机安装在机械臂末端、一个全局相机和一个交会相机均安装在飞行基座上.

表 1 机械臂质量特性参数

连杆	质量/kg	$i a_i$			$i b_i$			转动惯量 $i I_i / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$					
								I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	I_{xy}	I_{xz}	I_{yz}
连杆 0	400				0.357 0	-0.009 5	0.419 0	30	28	32	0.260 0	0.370 0	-0.290 0
连杆 1	6	0	0	0.150 0	0	0	0.150 0	0.150 0	0.150 0	0.075 0	0	0	0
连杆 2	5	0.270 2	0	-0.251 3	0.559 8	0	-0.048 7	0.092 6	0.905 3	0.845 1	0	0.131 5	0
连杆 3	5	0	0	0.150 0	0	0	0.150 0	0.105 0	0.105 0	0.0294 0	0	0	0
连杆 4	4	0	0	-0.350 0	0	0	-0.350 0	0.249 8	0.249 8	0.019 6	0	0	0
连杆 5	3	0	-0.033 8	0	0	-0.066 2	0	0.033 0	0.017 2	0.026 0	0	0	0
连 捕获目 杆 标前	2	0	0	0.075 0	0	0	0.159 5	5.152E-002	5.152E-002	2.192E-002	0	0	0
	6 捕获目 标后	-4.7E-003	0	0.4292	0	0	0	0.799 2	0.892 5	0.468 2	-2.3E-002	4.458E-003	1.7E-002

3.2 遥操作实验结果

利用地面验证子系统为遥操作对象,进行了多次遥操作实验,以验证遥操作系统的有效性. 操作者在图形预测仿真的支持下进行操作实验,来克服时延(本实验中通过数据缓冲区来模拟 5 s 回路时延),其中线框模型为预测机器人,实体模型为反馈机器人,操作过程中反馈机器人跟随预测机器人运动,当操作结束后两个机器人重合. 操作员利用手控器连续操作预测机器人进行目标的抓捕,控制命令经过网络传送给地面验证子系统,命令经过缓冲后连续执行.

图 5 为捕获过程中手柄坐标系相对于工具坐标系的位姿变化,位姿误差的减小表示机械手末端逐渐接近目标. 当 $t = 42.5\text{ s}$ 时位姿误差分别小于 10 mm 和 1° ,闭合手爪成功捕获目标,如图 6 所示. 基座的位置姿态变化如图 7 所示,质心位置由 $[-0.047\ 5, -0.004\ 2, -0.058\ 3]\text{m}$ 变为 $[-0.046\ 0 -0.003\ 8 -0.044\ 3]\text{m}$,同时基座的姿态由 $[0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]$ 变为 $[0.029\ 9^\circ, -15.376\ 0^\circ, 0.495\ 3^\circ]$. 基座的平均线速度小于 0.4 mm/s,平均角速度小于 0.5 ($^\circ/\text{s}$),也就是说机械臂对基座的干扰非常小. 图 8 为目标捕获成功后的三维显示,左面为四个相机的图像.

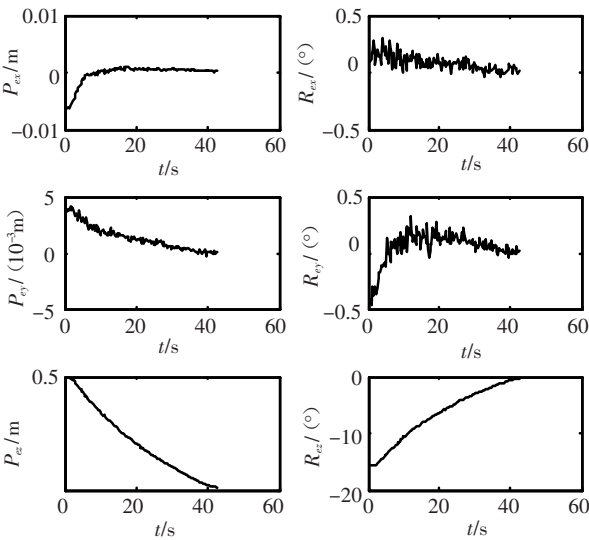


图 5 手柄与工具坐标系的相对位姿曲线

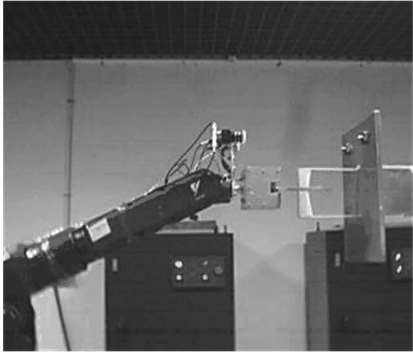


图 6 地面验证捕获成功

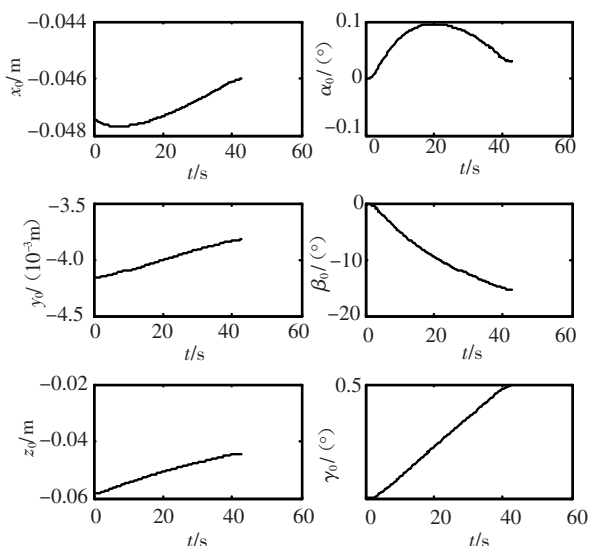


图7 基座的位姿曲线

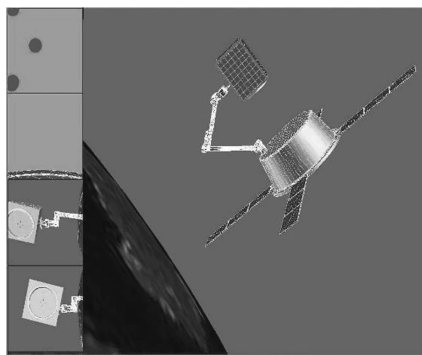


图8 捕获成功时三维显示结果

4 结 论

根据我国空间机器人在轨试验系统的需要,本文研究和建立一套遥操作系统,并开展了空间机器人遥操作验证实验,保证了该系统的实用性和工程性.本系统有如下特点:

1) 预测仿真技术是目前解决空间遥操作中大时延问题的一个主要办法,但由于系统存在的建模误差和累积误差会导致虚拟对象和真实对象的不一致,降低了预测精度并可能导致误操作.本系统利用遥测信息来辨识运动学和动力学参数并校正模型误差,从而提高了系统的鲁棒性和抗干扰能力.

2) 空间机器人遥操作要求很高的安全性和可靠性,因此设计了地面验证子系对遥操作命令的执行过程进行验证,包括对中央控制器的运算能力和执行过程进行星载验证,和针对空间机器人末端的物理验证.该子系统在遥操作系统研制阶段可作为其它部分的联调对象,保证系统研制的顺利开展.

3) 提出并实现了空间机器人遥操作分层控制结构 LATSR,可进行多自主级别的遥操作,既

适合于机器人专家的底层操作,又适合于非专家用户的操作,实现灵巧的操作任务.本控制结构可扩展应用到月球、火星探测机器人.

参考文献:

- [1] HIRZINGER G, BRUNNER B, DIETRICH J, *et al.* Sensor-based space robotics-ROTEX and its telerobotic features [J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1993, 9(5): 649-663.
- [2] ODA M, DOI T. Teleoperation system of ETS-VII robot experiment satellite [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Grenoble: [s. n.], 1997: 1644-1650.
- [3] LANDZETTEL K, BRUNNER B, DEUTRICH K, *et al.* DLR's experiments on the ETS-VII space robot mission [C]//9th International Conference on Advanced Robotics. Tokyo: [s. n.], 1999.
- [4] MA O. On the validation of SPDM task verification facility [J]. Journal of Robotic Systems, 2004, 21(5): 219-235.
- [5] WANG X Q, XU W F, LIANG B, *et al.* General scheme of teleoperation for space robot [C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Xi'an: IEEE, 2008: 341-346.
- [6] 史士财, 谢宗武, 朱映远, 等. 空间机械臂地面实验系统[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(3): 381-385.
- [7] 倪风雷, 刘宏, 石晶新, 等. 空间机器人柔性关节控制器的设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(3): 376-380.
- [8] 阎继宏, 赵楠, 赵杰, 等. 基于适应性虚拟向导的遥操作机器人系统[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(1): 59-63.
- [9] 赵猛, 张珩, 陈靖波. 灵境遥操作技术及其发展[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(14): 3248-3252.
- [10] 崔锦实, 连广宇, 孙增沂. 大时延遥操作系统中的图形技术与模型修正[C]//中国智能自动化会议论文集:上册. 昆明: [s. n.], 2001: 577-581.
- [11] 李成, 梁斌. 空间机器人遥操作[J]. 宇航学报, 2001, 22(1): 95-98.
- [12] 黄玉明. 空间机器人的主从和自主控制[J]. 控制工程, 1993(2): 11-17.
- [13] BRUNNER B, LANDZETTEL K, SCHREIBER G, *et al.* A universal task-level ground control and programming system for space robot applications[C]. International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space. Noordwijk: [s. n.], 1999: 507-514.
- [14] 王学谦, 梁斌, 李成, 等. 自由飞行空间机器人遥操作三维仿真系统研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(1): 402-408.
- [15] 王学谦, 梁斌, 徐文福, 等. 空间机器人遥操作地面验证技术研究[J]. 机器人, 2009, 31(1): 8-14.

(编辑 张 宏)