0254-6124/2024/44(5)-0939-09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

QIU Xin'an, MA Dongtao, TIAN Licheng, HU Yuqian, WU Zhihong, ZENG Zhenglin, WEI Zhiming, DUAN Fuwei, XIAO Qiang, MA Hongjiong, SHI Wei. Design and Implementation of Space Manipulator Operating Subsystem (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(5): 939–947. DOI:10.11728/cjss2024.05.2023-0081

空间机械臂操作子系统设计与实现

邱新安[1] 马动涛[1] 田立成[1] 胡玉茜[2]
吴志红[2] 曾政森[1] 魏志明[1] 段福伟[1]
肖 强[1] 马洪炯[1] 施 维[1]

1(兰州空间技术物理研究所 兰州 730000)

2(北京空间飞行器总体设计部 北京 100094)

摘 要 空间机械臂作为中国空间站建设和在轨运营的重要平台, 具有自由度多、转动惯量大、操作精度高、模式多样等特点. 针对空间机械臂在轨任务特点, 建立了支持长期在轨、多模式工作的空间机械臂操作子系统. 该操作子系统由机械臂操作台、虚拟仿真平台、显示器等构成, 可满足多任务需求. 通过对操作子系统的架构、工作模式、技术特点的分析, 重点研究了操作子系统的多总线体系结构、多模态人机交互技术、力觉渲染算法, 并根据地面验证和在轨试验, 给出了空间机械臂操作子系统的验证情况. 结果表明, 空间机械臂操作子系统可有效模拟在轨任务, 准确完成对机械臂的控制与精细操作, 为支撑空间机械臂任务实施积累了经验和数据.

关键词 空间机械臂, 操作子系统, 机械臂操作台, 人机交互, 力觉渲染

中图分类号 TP24

Design and Implementation of Space Manipulator Operating Subsystem

QIU Xin'an[1] MA Dongtao[1] TIAN Licheng[1] HU Yuqian[2]
WU Zhihong[2] ZENG Zhenglin[1] WEI Zhiming[1]
DUAN Fuwei[1] XIAO Qiang[1] MA Hongjiong[1] SHI Wei[1]

1(*Lanzhou Institute of Physics*, *Lanzhou* 730000)

2(*Beijing Institute of Spacecraft System Engineering*, *Beijing* 100094)

Abstract As an important platform for the construction and on-orbit operation of space station, the space manipulator operating subsystem is the first independently developed large-scale space robotic system for aerospace engineering applications in China. The space robot arm has 14 degrees of freedom under the combination of the two arms, with large motion inertia, high operating precision, and support for multi-mode work. In this paper, according to the characteristics of space manipulator on-orbit mission, a

2023-08-07 收到原稿, 2024-01-26 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

space manipulator operation subsystem is established, which is supporting long-term on-orbit and multi-mode operation. The operation subsystem is composed of manipulator console, virtual simulation platform and display, which can meet the requirements of multitasking. This paper provides a summarize overview of the architecture, working mode, and technical characteristics of the operation subsystem, and focuses on analyzing the system bus structure, multimodal human-computer interaction technology, and force perception rendering algorithms of the operation subsystem. According to the ground test and on-orbit work, the verification of space manipulator operation subsystem is obtained, which provides valuable experience and data for space manipulator operation mission. The results show that the space manipulator operating subsystem can better carry out on-orbit management of the space robotic arm, monitor the whole process of it, as well as ground and on-orbit remote control and manipulation; the application of force perception rendering technology can better support the fine manipulation of the space robotic arm end and joints; the virtual simulation platform can effectively simulate the on-orbit tasks of the space robotic arm and simulate the pre-task rehearsal and training of the support task. The space manipulator operating subsystem has accumulated experience and data to support space robotic arm mission implementation.

Key words Space manipulator, Operating subsystem, Manipulator operator station, Man-machine interaction, Haptic rendering

0 引言

中国空间机械臂于 2021 年 4 月 29 日随天宫核心舱发射入轨, 先后完成了多项关键技术在轨验证. 空间机械臂作为空间站的重要组成部分, 主要用于空间站的建造与运营, 承担舱段转位、航天员出舱活动、舱外货物搬运、舱外巡检、舱外大型设备维护等八大类在轨任务[1–4]. 其作为空间站工程四大关键技术之一, 是中国首个自主研究的面向宇航工程应用的大型空间机械臂.

鉴于空间机械臂在空间站建设与发展中的重要作用[5,6], 空间机械臂的研究不断深入, 截至目前, 世界上已成功应用的机械臂包括: 德国空间研究所的空间机器人 ROTEX[7]、欧洲机械臂系统 ERA、美国航天飞机的加拿大臂 SRMS[8]、国际空间站遥操作加拿大 II 臂[9]、德国机械臂 ROKVISS[10]、日本实验舱机械臂 JEMRMS[11]、日本试验卫星机械臂 ETS-VII[12,13] 等, 完成了设备维护、转移和支持航天员舱外作业、国际空间站在轨建设、在轨操作等. 其中, ROTEX 采用 6 自由度手套式人机接口、三维虚拟环境图像系统, 实现了预编程、在轨遥操作、地面遥操作和遥传感编程等工作模式[14]; SRMS 采用航天员通过舱内机器人工作站的在轨操作方式完成机械臂控制; SSRMS 可接收实时视频图像, 通过机器人操作台 RWS 操作面板、手柄等设备完成操作控制; ROKVISS 的操作使用了临场感技术和双边控制方法, 实现了机械臂的共享控制[15]; JEMRMS 通过管理数据处理器 (MDP)、机械臂控制单元 (ACU) 等实现机械臂的状态采集、显示及人机交互; ERA 则通过舱内人机交互设备 IMMI、舱外人机交互设备 EMMI、中央控制计算机 CPC 等完成对其的操作[16]. 上述机械臂由于研制时期的传感器、处理平台等技术的发展限制, 在面对中国空间机械臂广泛、多样化、复杂化的应用需求时, 已难以满足任务需求, 迫切需要开展适应于中国空间站建设的空间机械臂操作子系统研究.

本文结合空间机械臂的结构复杂、作业任务繁多、大小臂协调及在轨任务的可靠安全实施, 从优化空间机械臂的操控时延、提升航天员的操作自然性出发, 构建了由机械臂操作台、虚拟仿真平台、显示器等构成的操作子系统, 采用了多总线体系结构, 引入多模态人机交互技术、力觉渲染技术, 以实现空间机械臂的灵活、便捷操作. 根据地面验证和在轨运行数据, 给出了操控子系统的实现情况.

1 操作子系统

1.1 子系统主要功能与性能指标

空间机械臂操作子系统作为空间机械臂的人机交互入口, 分布在空间站核心舱内, 能够实现在轨管理操作天和机械臂 (大臂) 与问天机械臂 (小臂)、双

臂组合转接件舱外悬挂装置、对接相机等, 同时支持地面监测、遥控、遥操作空间机械臂.

1.2 子系统组成

根据空间站机械臂的功能和性能指标要求, 空间机械臂操作子系统由机械臂操作台、虚拟仿真平台、显示器三部分构成, 如图 1 所示. 空间机械臂操控任务属于典型的“人在回路中”操控系统, 舱内航天员通过舱内的机械臂操作台发送机械臂操作指令, 通过虚拟仿真平台、显示器等观察机械臂运行的图像、状态及运动、态势信息, 支持对大臂、小臂的独立操控, 也支持对大臂、小臂组合态下的分时、协同操控.

机械臂操作台包括控制器、操作面板、平动手柄、转动手柄. 控制器主要用于机械臂分系统遥测参数、指令的解析及数据管理, 以及相关分系统数据的处理、转发. 操作面板是协助航天员对机械臂进行操作的终端仪表, 主要用来完成机械臂操控的辅助控制及机械臂各种工作模式下的指令输入和状态显示、提示. 手柄作为航天员与机械臂之间重要的人机接口, 主要用来实现对机械臂单关节、肘部相机云台及末端执行器的操作. 其末端控制由平动手柄和转动手柄共同完成, 主要用来控制末端的位置与姿态.

虚拟仿真平台由仿真控制器和虚拟三维机械臂软件构成, 实现对三维仿真机械臂运动显示与运动控制. 其中三维模型主要包含组合舱体、大臂、小臂、实验舱 I、实验舱 II、航天员、脚限位器等对象. 在轨操作时, 可通过仿真控制器上的虚拟三维机械臂软件提前规划, 显示空间机械臂的运动路径; 模拟操作时, 可通过机械臂操作台驱动虚拟三维机械臂运动, 为航天员在轨操作空间机械臂执行任务提供前期推演、训练.

显示器共有三块, 均为液晶触控屏显示器, 可以进行点击操作. 位于舱内航天员左前方二块, 分别显示四分屏 4 路的舱外摄像机图像和全屏幕 1 路的舱外摄像机图像; 位于舱内航天员右前方 1 块, 用于显示机械臂的仪表参数信息. 图像显示采用 1+4 模式, 1 为大屏显示, 放置在左下方屏幕, 为主要目标监视相机图像; 4 为四分屏, 放置在左上方, 为辅助目标监视相机图像.

1.3 主要工作模式

由空间机械臂的功能可将操作子系统的工作模式分为地面操作、在轨操作、模拟操作. 三个模式可由地面遥控切换, 也可由航天员在轨直接切换.

(1) 地面操作模式. 机械臂操作子系统默认工作模式就是地面操作, 在地面操作方式下, 机械臂操作台需要完成机械臂数据转发功能, 实现地面遥控操作与监视机械臂功能; 机械臂操作台还需以 1 s 的周期定时向数管总线转发操作台自身的遥测信息, 通过以太网接口向测控网转发机械臂、操作台的常规遥测数据. 该模式下, 机械臂操作台除了部分按键 (在轨操作、模拟操作和紧急处理按键) 外, 所有的按键、操作手柄均无效; 机械臂操作台可通过地面或航天员操作在轨操作或模拟操作按键来切换工作模式.

(2) 在轨操作模式. 在轨操作模式是实现人机交

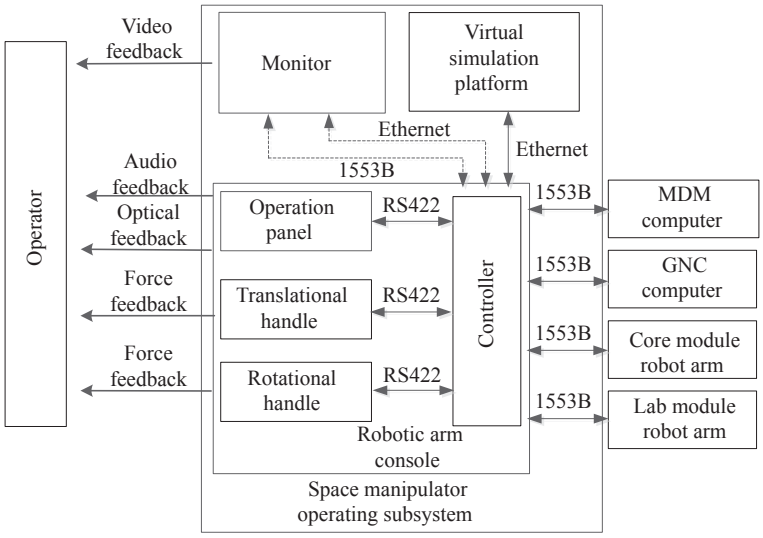


图 1 空间机械臂操作子系统组成结构

Fig. 1 Block diagram of the subsystem

互的主要模式, 在在轨操作模式下, 机械臂操作台需要监视航天员按键、触摸屏、手柄操作动作, 完成按键动作、手柄动作解释, 生成机械臂操作指令, 并发送给机械臂分系统执行, 实现航天员在轨对机械臂的操作与监视功能. 在该模式下, 机械臂操作台以固定周期接收常规遥测数据和组织自身的遥测信息, 并向数管计算机转发, 实现地面对机械臂的安全监控; 机械臂操作台还通过以太网接口向测控网转发机械臂常规遥测数据. 机械臂操作台可以根据菜单流程, 为航天员提供操作控制接口, 完成指令接收、生成与发送, 实现在轨操作功能.

(3) 模拟操作模式. 模拟操作模式是为了方便航天员在轨期间执行任务时, 熟悉任务的操作流程和操作要点, 提高在轨操作效率和安全性设置的. 在该模式下, 机械臂操作台需要监视航天员按键、触摸屏、手柄操作动作, 完成按键动作、手柄动作解释, 生成机械臂操作指令, 并通过以太网接口发送给测控网, 转发至虚拟仿真平台, 仿真计算机将根据指令, 驱动三维仿真模型运动, 生成虚拟场景实现航天员虚拟操作. 在该模式下, 机械臂操作台不向机械臂发送指令, 需定周期接收常规遥测数据和组织自身的遥测信息, 向数管总线转发, 实现地面对机械臂的安全监控. 模拟操作模式具备在轨操作模式所有的菜单操作和指令生成功能, 与虚拟仿真平台、显示器组成视觉闭环的虚拟训练系统, 完成模拟操作任务.

2 技术特点

2.1 多总线体系结构

机械臂操作台作为机械臂的信息中心, 需准确收集机械臂状态, 并上传给不同分系统, 同时需准确解析上级总线指令并分发执行. 空间机械臂操作子系统采用以太网+1553B+RS422 多级多总线的结构形式, 利用模块化设计思想实现空间机械臂的可靠、轻巧、便捷设计. 操作子系统的多总线体系结构如图 2 所示. 操作台控制器通过 1553B 总线与空间站数据计算机、GNC 控制器、机械臂末端执行器、中央控制器进行通信, 实现遥控指令的发送及状态的监控、管理, 接收大臂固定端六维力数据给 GNC 控制器; 通过以太网将仿真参数、自身遥测数据、显示参数发送给测控网, 同时驱动虚拟仿真平台的机械臂模型, 实现航天员的机械臂在轨训练和仿真. 另外, 机械臂操作台接收航天员操作信息, 生成操作指令, 发往机械臂专用总线或者请求数管总线发送 P 指令, 间接完成对机械臂的操作. 机械臂操作台可根据 RT 在线状态自动识别大臂末端、小臂末端并作为固定端, 同时支持大小臂独立工作、大小臂组合工作. 为了实现大臂作业

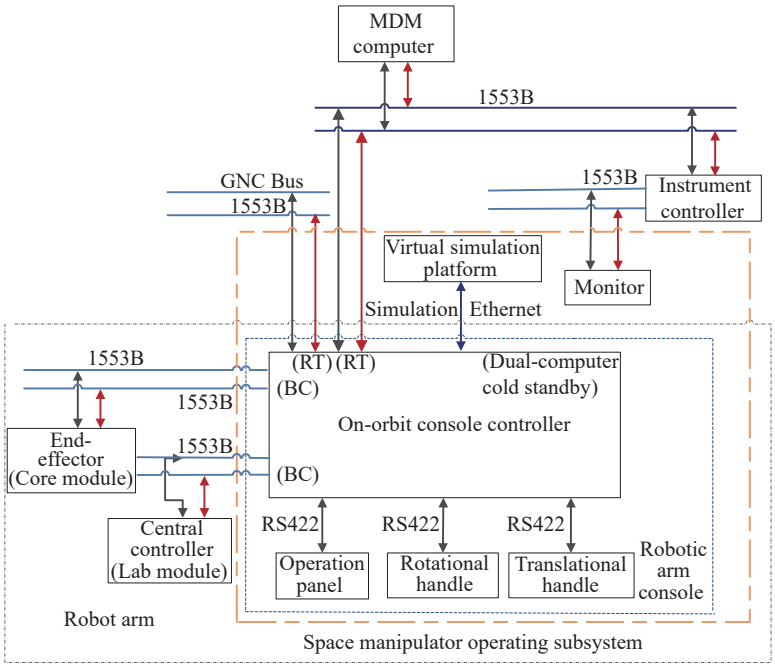


图 2 操作子系统的多总线体系结构

Fig. 2 Multi-bus architecture of the subsystem

半径、减少大小臂的数据传输路径, 系统采用双总线 BC 灵活切换机制, 进一步优化闭环控制周期.

2.2 多模态人机交互

空间机械臂的多模态交互是为了提升航天员操作机械臂的交互自然性. 多模态交互是指充分利用人体的多种感官和生理效应, 有选择地综合多种传感方式, 使各种传感信息并行采集并协调互补地捕获操作者的操作意图[17]. 操作子系统充分利用人的感知能力, 同时结合操作者的视觉、听觉、触觉, 对系统信息进行综合筛选、融合、提取, 对机械臂作出快速准确可靠的操控. 多模态人机交互技术融合了运动检测、机器视觉、触觉再现、传感器技术等交互技术, 操作子系统中数据交互融合的流程如图 3 所示. 在传统的视觉、听觉反馈信息的基础上, 结合新型的触觉交互方式, 增加了操作者的信息量, 使操作环境更加逼真. 图 4 为系统的力觉交互手柄, 利用手柄上的传感器检测手部动作及手柄 (把手) 位置信息, 获取人的操控信息, 控制虚拟臂或空间机械臂的关节、末端跟随把手运动. 同时, 通过接收末端六维力数据来控制手柄的力/力矩输出, 实时反馈机械臂末端的作业力情况, 实现操作人员通过力觉对环境的感知. 该力觉交互手柄采用改进型 DELTA 机构, 由主动杆、从动杆、动平台、静平台等组成, 其采用平行四边形机构与主动杆、动平台分别通过转动副连接, 具有结构稳定紧凑、定位精度高、操作空间大、可靠性高等特点, 与改进型 3RRR 球面并联机构手柄[18] 适用于转动自由度控制不同, 其较适应于平动自由度的操控.

2.3 力觉渲染算法

根据设计的力反馈手柄开发了一套力觉渲染模型, 通过阻抗控制方式, 按照力觉模型计算并输出末端反馈力矩, 作用于操作者手部, 实现操作者对被控对象的状态感知.

图 5 所示为手柄的机构, 其中 A_i 为 A_1, A_2, A_3, 表示固定于底座上的静平台; B_i 为 B_1, B_2, B_3; 表示与把手一体的动平台; 主动杆 $A_iP_i{=}l_1$, 从动杆 $B_iP_i{=}l_2$, 静平台半径 $OA_i{=}R_1$, 动平台半径 $O'B_i{=}R_2$. 设动平台中心 O'在 $Oxyz$ 坐标系中的坐标值为 $[x, y, z]$, α_i为 OA_i 与 x 轴的夹角, θ_{1i}为 OA_i 与 A_iP_i 的夹角, θ_{2i}为 A_iP_i 与 P_iB_i 的夹角, θ_{3i}为 P_iB_i 与静平台面平行且垂直于 OA_i 的法向量的夹角.

由机构的几何关系计算可得

$$\theta_{3i}{=}\arccos\left(\frac{-\sin\alpha_i x+\cos\alpha_i y}{l_2}\right), \tag{1}$$

$$\theta_{2i}=\arccos\left(\frac{J}{2l_1l_2\sin\theta_{3i}}\right),$$

$$J=x^2+y^2+z^2+2(R_2-R_1)(x\cos\alpha_i+ y\sin\alpha_i)+(R_2-R_1)^2. \tag{2}$$

$$\theta_{1i}=2\arctan\cdot \left[\frac{2l_1z-4z^2{l_1}^2}{m-2(R_2-R_1-l_1)(x\cos\alpha_i+y\sin\alpha_i)}+ m-2(R_2-R_1+l_1)(x\cos\alpha_i+y\sin\alpha_i)\right]. \tag{3}$$

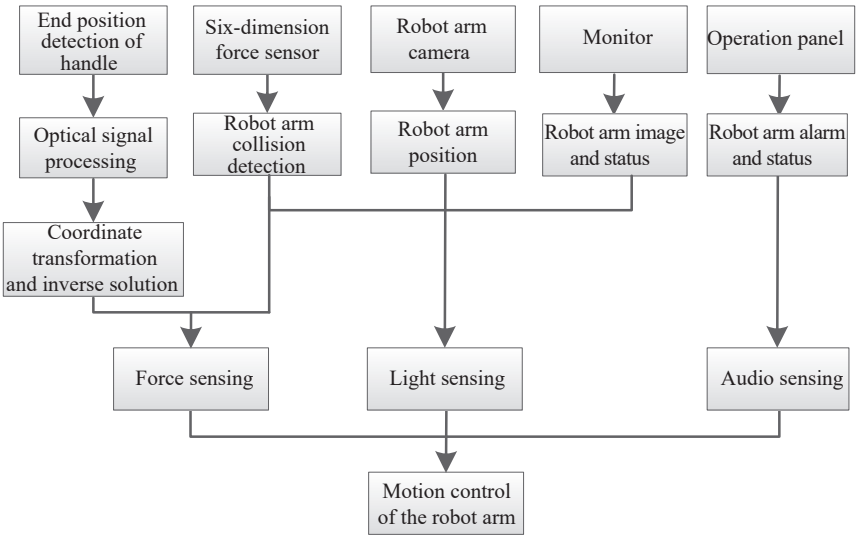


图 3 操作子系统的数据交互流程

Fig. 3 Data interaction flowchart of the subsystem

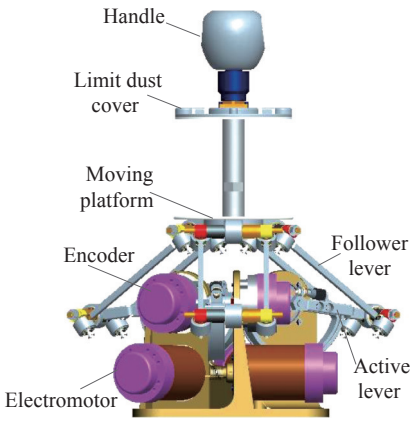


图 4 力觉交互手柄三维模型

Fig. 4 3D model of the handle

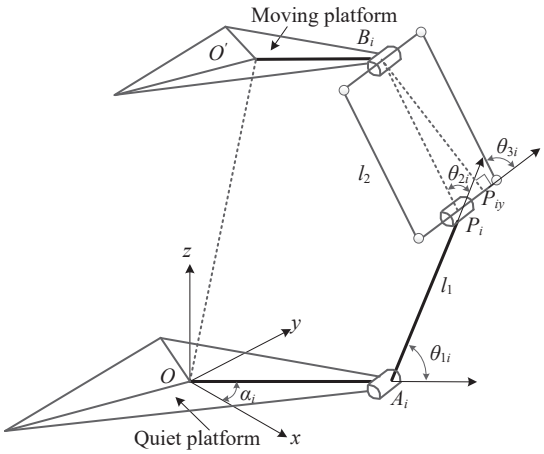


图 5 手柄简化机构模型与参数

Fig. 5 Simplified institutional model and parameters of the handle

其中, $m = x^2 + y^2 + z^2 + (R_2 - R_1 - l_1)^2 - {l_2}^2$.

利用机构的雅克比矩阵来描述动平台 (把手) 与关节速度 (静平台驱动关节) 之间的映射关系. 假设把手的线速度为 $\boldsymbol{v} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$, 驱动关节角速度为 $\boldsymbol{w}=(\dot{\theta}_{1\,i}, \dot{\theta}_{2\,i}, \dot{\theta}_{3\,i})$, 则机构的速度关系可描述为

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{v} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{w}. \tag{4}$$

其中, $\boldsymbol{A}$ 为正向雅克比矩阵, $\boldsymbol{B}$ 为反向雅克比矩阵.

令 $\boldsymbol{J}$ 为机构输入输出的速度映射关系 ($\boldsymbol{w} = \boldsymbol{J}\boldsymbol{v}$), 即雅克比矩阵, 则

$$\boldsymbol{J} = \boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{A}. \tag{5}$$

由图 5 可知,

$$\boldsymbol{OB_i} = \boldsymbol{OO'} + \boldsymbol{O'B_i} = \boldsymbol{OA_i} + \boldsymbol{A_iP_i} + \boldsymbol{P_iB_i}. \tag{6}$$

对式 (6) 两边时间求导后, 再乘以 $\boldsymbol{P_iB_i}$, 得

$$\boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{P_iB_i} = |\boldsymbol{w}| \cdot |\boldsymbol{OA}_i \times \boldsymbol{P}_{iy}\boldsymbol{B}_i|. \tag{7}$$

进一步推导可得

$$\boldsymbol{A} = l_2 \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}. \tag{8}$$

其中,

$$A_{11} = \cos\alpha_1 \sin\theta_{31} \cos(\theta_{11} + \theta_{21}) - \cos\theta_{31} \sin\alpha_1,$$

$$A_{12} = \sin\alpha_1 \sin\theta_{31} \cos(\theta_{11} + \theta_{21}) + \cos\theta_{31} \cos\alpha_1,$$

$$A_{13} = \sin\theta_{31} \sin(\theta_{11} + \theta_{21}),$$

$$A_{21} = \cos\alpha_2 \sin\theta_{32} \cos(\theta_{12} + \theta_{22}) - \cos\theta_{32} \sin\alpha_2,$$

$$A_{22} = \sin\alpha_2 \sin\theta_{32} \cos(\theta_{12} + \theta_{22}) + \cos\theta_{32} \cos\alpha_2,$$

$$A_{23} = \sin\theta_{32} \sin(\theta_{12} + \theta_{22}),$$

$$A_{31} = \cos\alpha_3 \sin\theta_{33} \cos(\theta_{13} + \theta_{23}) - \cos\theta_{33} \sin\alpha_3,$$

$$A_{32} = \sin\alpha_3 \sin\theta_{33} \cos(\theta_{13} + \theta_{23}) + \cos\theta_{33} \cos\alpha_3,$$

$$A_{33} = \sin\theta_{33} \sin(\theta_{13} + \theta_{23}).$$

$$\boldsymbol{B} = l_1 l_2 \begin{bmatrix} \sin\theta_{21}\sin\theta_{31} & 0 & 0 \\ 0 & \sin\theta_{22}\sin\theta_{32} & 0 \\ 0 & 0 & \sin\theta_{23}\sin\theta_{33} \end{bmatrix}. \tag{9}$$

将式 (8) 和式 (9) 代入式 (4) 可得

$$\boldsymbol{J} = \frac{1}{l_1} \begin{bmatrix} \dfrac{A_{11}}{\sin\theta_{21}\sin\theta_{31}} & \dfrac{A_{12}}{\sin\theta_{21}\sin\theta_{31}} & \dfrac{A_{13}}{\sin\theta_{21}} \\ \dfrac{A_{21}}{\sin\theta_{22}\sin\theta_{32}} & \dfrac{A_{22}}{\sin\theta_{22}\sin\theta_{32}} & \dfrac{A_{23}}{\sin\theta_{22}} \\ \dfrac{A_{31}}{\sin\theta_{23}\sin\theta_{32}} & \dfrac{A_{32}}{\sin\theta_{23}\sin\theta_{32}} & \dfrac{A_{33}}{\sin\theta_{23}} \end{bmatrix}. \tag{10}$$

忽略机构杆件的重力, 设把手受到外力矩 $\boldsymbol{M} = [F_x, F_y, F_z]^{\mathrm{T}}$, 驱动关节的力矩为 $\boldsymbol{T} = [T_1, T_2, T_3]^{\mathrm{T}}$, 根据把手力矩与关节驱动力的关系, 可得

$$\boldsymbol{T} = (\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}})^{-1}\boldsymbol{M}. \tag{11}$$

如图 6 所示, 通过对电机电流 I 与把手位置 P 的监测, 实现对手柄力的闭环控制. 设把手无力作用 (手柄自动回到零位) 时动平台到静平台的距离为 l, 图 6 中, $\theta = (\theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3})$ 为光编采集的关节位置, $P = (x, y, z - l)$, F_{req} 为把手偏离零位的坐标, F_{s} 为机械臂末端的态势力, F_{drag} 为机械臂运动过程中的警示力, F_{reg} 为消除手柄抖动的有益阻力, 为把手回到零位

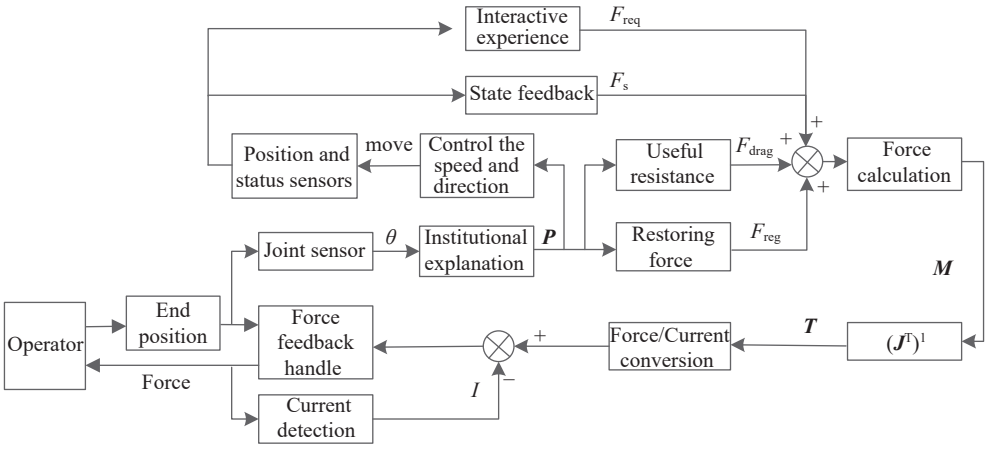


图 6 手柄力的控制

Fig. 6 Force control block diagram of the handle

的回复力, 有

$$F_{\text{req}}=\begin{cases} k\left[\dfrac{1}{\rho(\boldsymbol{q})}-\dfrac{1}{\rho_0}\right], & \rho(\boldsymbol{q})\leqslant\rho_0;\\ 0, & \rho(\boldsymbol{q})>\rho_0. \end{cases} \tag{12}$$

其中, $\rho(\boldsymbol{q})$为机械臂末端与障碍物的距离; ρ_0为常数, 表示障碍物产生态势力的范围半径; k为调节系数.

$$F_{\text{s}}=k_1\sin(2\pi f). \tag{13}$$

其中, k_1为调节系数, f为从端状态的振动警示频率.

$$F_{\text{drag}}=-k_2v. \tag{14}$$

其中, k_2为可调节的阻尼系数, v为把手线速度.

$$F_{\text{reg}}=\begin{cases} k_3\left(P-P_0\right), & P>P_0;\\ 0, & P\leqslant P_0. \end{cases} \tag{15}$$

其中, k_3为可调节的刚度系数, P_0为把手的死区.

3 试验验证

3.1 地面验证

如图 7 所示, 空间机械臂操作子系统先后参与了空间机械臂系统的半物理仿真测试、桌面软连接测试、二维气浮平台功能性能测试和三维悬挂平台机械臂测试[19,20], 验证了机械臂操作子系统对大臂、小臂的在轨管理、监测、遥控、操控功能.

根据地面联试数据记录, 分别取手柄操控机械臂末端向三个方向运动过程中部分时间 (10 s) 的测试数据. 如图 8 所示, 显示了操作手柄控制机械臂运动过程中的实际力输出曲线. 结果表明, 机械臂末端力、移动位置与方向可以较好地跟随手柄末端力、位置与方向.

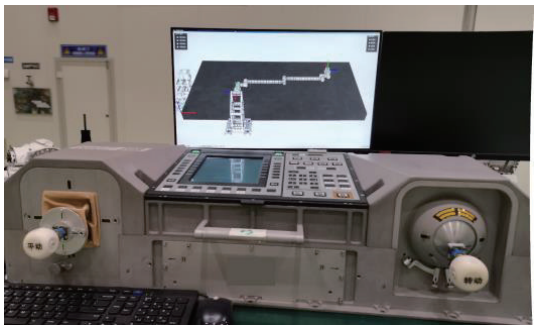


图 7 空间机械臂操控子系统地面验证试验

Fig. 7 Ground-based verification tests of space manipulator operating subsystem

图 9 显示了通过手柄操控机械臂单关节运动过程中的期望角度、角速度与实际角度、角速度的曲线, 操控手柄. 结果表明, 机械臂关节角度、角速度可以较好地跟随期望的关节角度、角速度.

3.2 在轨验证

空间机械臂随核心舱入轨后, 操作子系统先后多次辅助空间机械臂完成了航天员舱外作业、爬行辨识、舱外巡检等任务, 并通过转位货运飞船在轨验证了机械臂操作台控制空间机械臂进行自主转位的可行性. 航天员通过操作子系统操作机械臂的试验过程如图 10 所示, 通过空间站在轨开展的系列技术验证试验表明, 通过机械臂操作台操作面板、手柄可以准确地完成对空间机械臂末端、关节的位置、速度控制, 完成机械臂的精细操作; 虚拟仿真平台可以有效地对空间

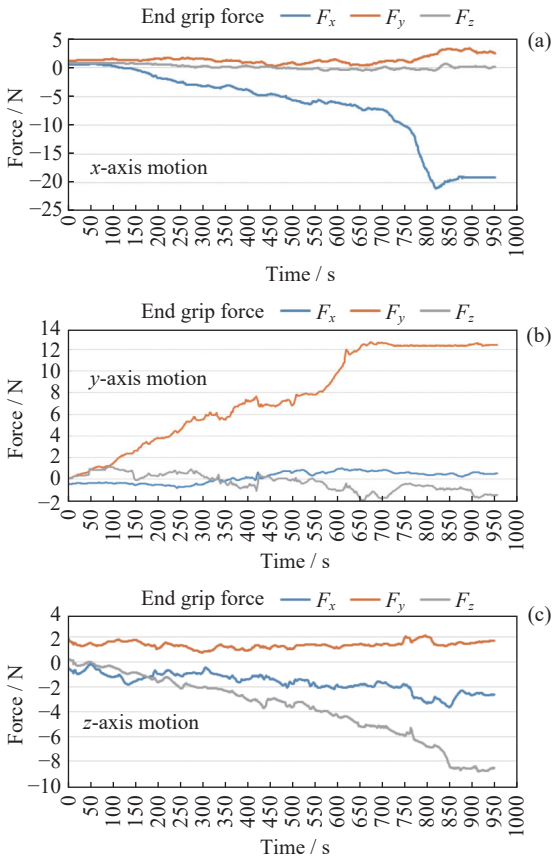


图 8 手柄末端力监测结果

Fig. 8 Monitoring of the end of the handle force

机械臂在轨任务进行模拟, 模拟状态与在轨状态一致.

4 结论

以空间机械臂的应用操作为需求, 采用以太网+1553B+RS422 多级多总线的结构形式实现了空间机械臂的优化; 同时针对空间机械臂交互自然性的需求, 提出的多模态人机交互方案表现优异, 为航天员在轨操作、地面支持中心遥操作提供了良好支持; 采用力觉渲染算法为航天员提供了便捷、精细的操控能力. 通过对子系统的地面试验验证和在轨数据分析, 得出如下结论.

(1) 对于支持长期、不定时、任务多样的空间机械臂操作平台, 建立由操作平台、虚拟仿真平台、多屏显示的操作子系统, 为航天员提供多维的交互数据和操作接口可较好地辅助机械臂完成在轨任务.

(2) 多总线体系结构的建立可有效减少空间机械臂的数据交互路径, 减少系统的延时, 为机械臂的作业半径的扩大提供了必要基础.

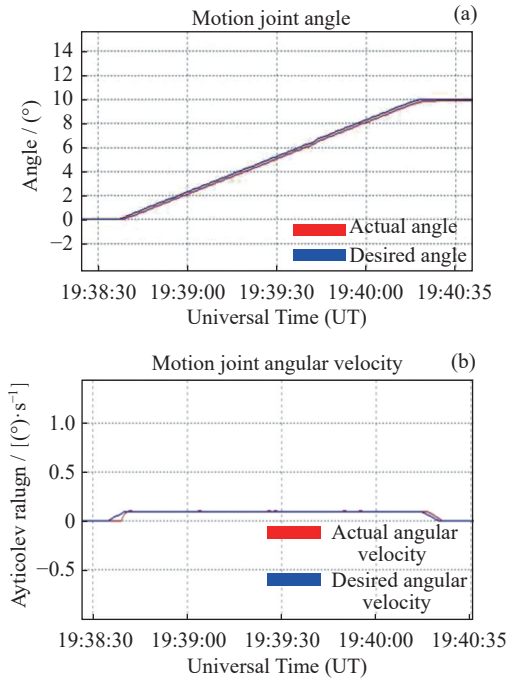
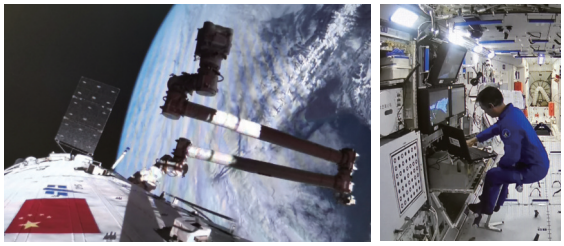


图 9 关节运动过程数据

Fig. 9 Data on the course of joint movement



(a) Tianhe manipulator in motion (b) Astronauts operating robotic arms in orbit

图 10 航天员通过机械臂操作台操控机械臂

Fig. 10 Astronaut controls the space manipulator through the manipulator operator station

(3) 力觉渲染算法的应用进一步提升了航天员操作机械臂作业的灵活性和便捷性, 较好地满足了机械臂的关节、末端的交互运动, 让执行任务的过程变得更加直观、简单.

后续将针对空间机械臂的长期在轨工作任务需求, 进一步研究操作子系统在机械臂多复杂任务、精细化作业等场景中的协作应用, 使机械臂不仅能够完成自主转位、航天员出舱作业、载荷搬运等典型任务, 还可面对特定、随机任务的协调操作, 更好地服务空间站的在轨运行.

参考文献

[1] ZHOU Jianping. Chinese space station project overall vision[J]. *Manned Spaceflight*, 2013, **19**(2): 1-10 (周建平. 我国空间站工程总体构想 [J]. 载人航天, 2013, **19**(2): 1-10)

[2] LI Daming, RAO Wei, HU Chengwei, *et al.* Key technology review of the research on the space station manipulator[J]. *Manned Spaceflight*, 2014, **20**(3): 238-242 (李大明, 饶炜, 胡成威, 等. 空间站机械臂关键技术研究 [J]. 载人航天, 2014, **20**(3): 238-242)

[3] ZHU Chao, KONG Xu, HU Chengwei, *et al.* Maintainability system design and evaluation system construction for space manipulators[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, **42**(1): 524002 (朱超, 孔旭, 胡成威, 等. 空间机械臂维修性系统设计与评价体系的构建 [J]. 航空学报, 2021, **42**(1): 524002)

[4] LIU Hong, LIU Dongyu, JIANG Zainan. Space manipulator technology: Review and prospect[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, **42**(1): 524164 (刘宏, 刘冬雨, 蒋再男. 空间机械臂技术综述及展望 [J]. 航空学报, 2021, **42**(1): 524164)

[5] LIN Yiming, LI Daming, WANG Yaobing, *et al.* Current status and analysis of space robot[J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, **24**(5): 1-7 (林益明, 李大明, 王耀兵, 等. 空间机器人发展现状与思考 [J]. 航天器工程, 2015, **24**(5): 1-7)

[6] LIU Hong, JIANG Zainan, LIU Yechao. Review of space manipulator technology[J]. *Manned Spaceflight*, 2015, **21**(5): 435-443 (刘宏, 蒋再男, 刘业超. 空间机械臂技术发展综述 [J]. 载人航天, 2015, **21**(5): 435-443)

[7] JIA H L, ZHANG W M, HUANG Q, *et al.* Stiffness optimization design of a light space manipulator[C]//2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics. Jinan: IEEE, 2007: 803-808

[8] REHNMARK F, SPAIN I, BLUETHMANN W, *et al.* An experimental investigation of robotic spacewalking[C]//4th IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots. Santa Monica: IEEE, 2004: 366-384

[9] MCGREGOR R, OSHINOWO L. Flight 6A: deployment and checkout of the space station remote manipulator system (SSRMS)[C]//Proceeding of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space. St-Hubert, Canada: Canadian Space Agency, 2001

[10] ALBU-SCHAFFER A, BERTLEFF W, REBELE B, *et al.* ROKVISS – robotics component verification on ISS current experimental results on parameter identification[C]//Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Orlando: IEEE, 2006

[11] VAN WOERKOM P T L M, MISRA A K. Robotic manipulators in space: a dynamics and control perspective[J]. *Acta Astronautica*, 1996, **38**(4/5/6/7/8): 411-421

[12] YOSHIDA K. Engineering test satellite VII flight experiments for space robot dynamics and control: theories on laboratory test beds Ten Years Ago, Now in Orbit[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2003, **22**(5): 321-335

[13] FUKUSHIMA Y, INABA N, ODA M. Capture and berthing experiment of a massive object using ETS-VII's space robot-World's first on-orbit satellite capture experiment by space robot system[C]//Astrodynamics Specialist Conference. Denver: AIAA, 2000

[14] HIRZINGER G, BRUNNER B, DIETRICH J, *et al.* Sensor-based space robotics-ROTEX and its telerobotic features[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, **9**(5): 649-663

[15] REINTSEMA D, LANDZETTEL K, HIRZINGER G. DLR's advanced telerobotic concepts and experiments for on-orbit servicing[M]. Berlin: Springer, 2007: 323-345

[16] BOUMANS R, HEEMSKERK C. The European robotic arm for the international space station[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1998, **23**(1/2): 17-27

[17] YI Runze. Multi-modal man-machine interaction technology for robotic teleoperation[D]. Nanjing: Southeast University, 2018 (易润泽. 面向机器人遥操作的多模态人机交互技术 [D]. 南京: 东南大学, 2018)

[18] QIU Xin'an, MA Dongtao, ZHU Bo, *et al.* Design of force feedback handle for space manipulator operation[J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, **29**(4): 66-73 (邱新安, 马动涛, 朱博, 等. 面向空间机械臂操作的力反馈手柄设计 [J]. 航天器工程, 2020, **29**(4): 66-73)

[19] HU Yuqian, LIU Bin, WU Zhihong, *et al.* Design and implementation of ground testing and verification scheme for large space manipulator[J]. *Spacecraft Engineering*, 2021, **30**(4): 151-158 (胡玉茜, 刘宾, 吴志红, 等. 空间大型机械臂地面测试验证方案设计与实现 [J]. 航天器工程, 2021, **30**(4): 151-158)

[20] ZENG Lei, CHEN Ming, ZHU Chao, *et al.* Study on full-physical ground experiment test method for space manipulator 3D movement[J]. *Manned Spaceflight*, 2021, **27**(3): 359-366 (曾磊, 陈明, 朱超, 等. 空间机械臂三维全物理地面试验方法研究 [J]. 载人航天, 2021, **27**(3): 359-366)

作者简介

邱新安 男, 1988 年 12 月出生于河南省信阳市, 现为中国空间技术研究院兰州空间技术物理研究所高级工程师, 主要研究方向为空间机械臂遥操作设计、空间人机交互技术等.

E-mail: qiuxinan510@163.com

马动涛(通信作者) 男, 1976 年 10 月出生于甘肃省兰州市, 现为中国空间技术研究院兰州空间技术物理研究所研究员, 主要研究方向为空间机械臂系统遥操作设计、空间结构与控制技术等.

E-mail: madongtao@sina.com