

绳驱超冗余空间柔性机械臂遥操作系统设计与实验研究

朱晓俊¹, 王学谦², 马云萱², 梁斌³, 孙汉旭¹

(1. 北京邮电大学自动化学院, 北京 100876; 2. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055; 3. 清华大学自动化系, 北京 100084)

摘要: 针对绳驱超冗余空间柔性机械臂的运动特点和在大范围工作空间快速运动、避障及狭小空间作业和触碰情况下精细操作等在轨遥操作任务需求, 设计并研制了适应多种工况的基于手控器和虚拟现实(VR)手柄组合的遥操作人机交互系统。对狭小空间作业和避障等工况进行分析, 提出了基于自由度动态组合和末端一臂形同步规划的遥操作方法。最后, 完成了穿越卫星太阳帆板狭缝的典型实验, 实验验证了遥操作系统的工程实用性, 以及柔性机械臂遥操作运动规划方法的可行性。因此, 配合使用多种人机交互方式组合的遥操作系统和相应的运动规划方法, 可使操作者以更加直观自然的方式参与到遥操作系统中, 有效提高操作员完成复杂遥操作任务的安全性和操作性能。

关键词: 空间柔性机械臂; 绳索驱动; 遥操作; 人机交互; 运动规划

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2022)-01-0009-10

Design and Experimental Study on the Teleoperation System for Cable-driven and Hyper-redundant Space Flexible Manipulator

ZHU Xiaojun¹, WANG Xueqian², MA Yunxuan², LIANG Bin³, SUN Hanxu¹

(1. School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China;

3. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: For the motion characteristics of cable-driven and hyper-redundant flexible manipulator and the requirements of on orbit teleoperation tasks such as rapid movement in a large work space, obstacle avoidance, narrow space operation and fine operation under collision conditions, a human-machine interaction system for teleoperation based on the combination of manual controller and virtual reality (VR) handle is designed and developed, which can adapt to a variety of working conditions. Based on the analysis on working conditions such as narrow space operation and obstacle avoidance, a teleoperation method is proposed based on the DOF (degree of freedom) dynamic combination and the synchronous planning of the end and the arm configuration. Finally, a typical experiment of crossing through the slit between satellite solar panels is carried out. The experiment verifies the engineering practicability of the teleoperation system and the feasibility of the teleoperation motion planning method. It shows that the combination of a variety of human-machine interaction modes of teleoperation system and the corresponding motion planning method enable the operator to participate in the teleoperation system in a more intuitive and natural way, and improve the safety and operation performance of the operator to complete complex teleoperation tasks effectively.

Keywords: space flexible manipulator; cable-driven; teleoperation; human-machine interaction; motion planning

1 引言 (Introduction)

空间机器人及其遥操作是航天工程与机器人学科相结合的产物, 是空间作业中协助地面人员或替代宇航员执行危险或长期太空任务的重要手段, 增强了人类探索空间环境的能力, 在空间维护和修理、空间加工装配等在轨任务中发挥着重要作用。随着航空、航天等技术领域的飞速发展, 狭小工作

空间下的任务需求越来越多, 如卫星太阳能故障帆板展开、飞行器狭小空间故障探测、维修等。传统关节式刚性机械臂的体积大、灵巧度低, 不能很好地完成任务, 而体型纤细、结构紧凑、运动灵活的绳驱超冗余柔性机械臂更适合完成上述任务^[1]。受机构、控制、人工智能和传感技术水平的限制, 在非结构化环境下实现智能空间机械臂的全自主式工

作是当前乃至今后相当长时间内难以达到的。遥控操作技术将是空间机械臂在自主能力受限情况下不可或缺的操作手段之一。德国建立了第一个可在地面进行遥控操作的舱内空间机器人系统 ROTEX^[2], 其后日本、加拿大等国家在空间机器人遥控操作方面进行了大量研究, 也建立了相应的遥控操作系统^[3-5]。国内多家单位, 如哈尔滨工业大学、西北工业大学、中国科学院力学所和清华大学等也对空间机器人及其遥控操作系统进行了大量的研究和实验^[6-7]。

绳驱超冗余柔性机械臂在执行在轨任务时, 应具备的能力有: (1) 速度快: 大范围工作空间或无障碍情况下运动速度快; (2) 精度高: 在狭小空间内或执行接触操作时控制精度高; (3) 交互性好: 人机交互方式友好自然, 可同时控制末端和臂形^[8]。在传统的遥操作人机交互技术中, 手控器^[9]、骨骼式机械装置^[10]、仿机器人外形的控制器^[11]等接触式的机械设备经常被用作操作员和机器人之间交互的工具。这类控制器的最大缺点是需要操作员进行非常不直观的手臂动作对机器人进行控制, 这就需要操作员具备一定的操作经验才能有效地对机器人进行准确控制。本文针对超冗余柔性机械臂构形特点和任务需求, 提出了多种交互方式组合的遥操作人机交互系统, 研究了适用于遥控操作系统的自由度动态组合和末端一臂形同步规划的遥操作方法, 从而使其高效率、高质量地完成在轨任务。

2 超冗余空间柔性机械臂遥控操作系统设计 (The teleoperation system design for hyper-redundant space flexible manipulator)

柔性机械臂的主要任务包括辅助监视、狭小空间故障检测维修等。在执行复杂操作任务时, 星上控制器计算能力有限, 不能进行复杂算法计算。而且柔性机械臂自由度多、臂杆长, 面对复杂工作环境避障难、精细操作控制难。因此, 在空间柔性机械臂自主能力受限的情况下, 为保证成功完成任务, 将人的智能加入到控制闭环中, 构建柔性机械臂天地闭环协同遥控操作系统, 该系统主要包括操作员、遥控操作系统、天地通信链路、柔性机械臂。

2.1 超冗余柔性机械臂

超冗余柔性机械臂基于绳索驱动并采用主被动驱动分段联动的结构, 每个关节段为全约束的主被动驱动结构, 即其整体上由驱动绳进行主动驱动, 而段内的多个小节则由联动绳进行被动驱动, 实现等角度运动, 具有体型纤细、分段联动、机电分离

的特点。对于空间任务, 它具有灵活的曲线跟踪能力和狭小空间作业的能力。如图 1 所示, 超冗余柔性机械臂包含 5 个独立运动的主动联动关节段, 每段由 3 根主动驱动绳驱动, 共 15 根驱动绳。每个大段内有 8 个依次串联的采用联动绳索约束的被动方向节小节, 并以等角度方式运动。每个小节均具有 2 个方向的弯曲运动能力 (2DOF)。因此, 整个超冗余柔性机械臂共 80 个自由度。柔性臂单个小节长 100 mm, 其参数如表 1 所示。在机械臂末端装有用来监视测量的视觉相机等工具。

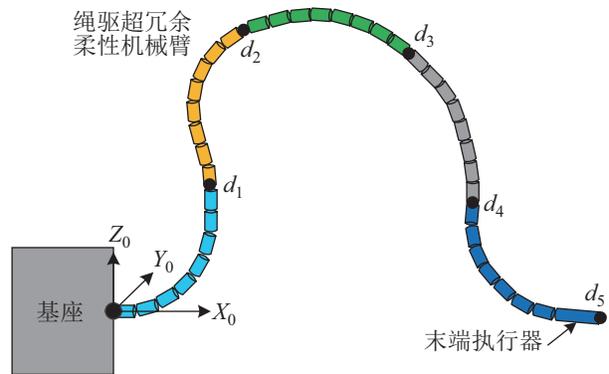


图 1 绳驱超冗余柔性机械臂示意图

Fig.1 The schematic of cable-driven and hyper-redundant flexible manipulator

表 1 单个柔性模块关节参数

Tab.1 Joint parameters of a single flexible module

类别	数值
自由度	2 个
质量	0.3 kg
尺寸	直径 60 mm, 长 100 mm
角度限制	$\pm 20^\circ$

2.2 超冗余空间柔性机械臂遥操作人机交互系统

柔性机械臂遥操作人机交互系统主要功能是将人的操作意图转化为柔性机械臂控制指令, 实时生成、发送主从操作命令序列, 控制柔性机械臂完成指定的遥操作任务。

柔性机械臂遥操作人机交互系统由人机交互单元、信息管理单元组成, 如图 2 所示。人机交互单元通过交互输入模块采集操作者的操作意图信息并将其转化为计算机指令; 通过平滑滤波等算法对指令数据进行处理, 提高指令数据的安全稳定性; 利用柔性机械臂运动学算法及柔性机械臂控制输入信息, 得到柔性机械臂控制指令; 场景显示模块利用图形预测仿真技术给操作者实时提供可视化的操作场景, 使操作者能快速准确地完成操作任务。信息管理单元将经过处理和安全检测的柔性机械臂控制

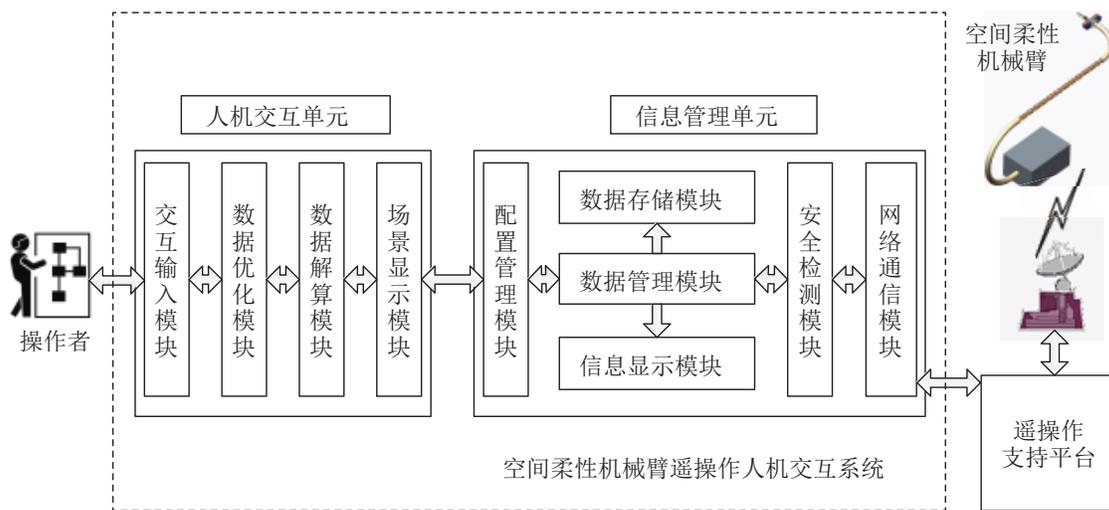


图 2 遥操作系统组成图

Fig.2 The composition diagram of the teleoperation system

指令发送给遥操作支持平台。遥操作支持平台作为地面遥操作系统和空间机械臂通信的桥梁,负责遥控和遥测信息的加工、转发。

(1) 人机交互单元在遥操作系统中主要承担将操作者的意图转化为柔性机械臂控制指令的功能,由交互输入模块、数据优化模块、数据解算模块、场景显示模块组成。一方面操作者通过人机交互设备产生自然高效的控制指令,另一方面,人机交互单元给操作者提供充分的远端环境临场感信息。

(2) 信息管理单元在遥操作系统中主要承担数据的接收、转发、存储,指令的安全检测,系统配置管理等功能,由配置管理模块、数据存储模块、数据管理模块、信息显示模块、安全检测模块、网络通信模块组成。信息管理单元是遥操作系统与外界的连接中枢。

2.3 人机交互方式

人机交互设备是遥操作系统中不可或缺的模块,该模块是连接人与计算机的桥梁。人机交互设备将操作者的操作意识转化为数字信号发送给计算机,同时可将操作对象与环境的作用力反馈传递给操作者。为提高遥操作效率,遥操作系统人机交互方式应符合操作对象的运动学特性,针对柔性机械臂,不但要能控制末端位置、姿态,还应具备控制机械臂整体臂形的能力。

常用的遥操作设备——力反馈手控器,具有精度高、力反馈准确的优点。然而,由于手控器的操作空间有限,在涉及大范围工作空间交互操作任务时,需要进行多次重复复位,会导致操作效率降低。另外操作对象为多自由度超冗余柔性机械臂时,只能控制末端,不能控制臂形,无法控制机械

臂完成避障等复杂任务^[12]。为此,本文提出了针对多自由度超冗余柔性机械臂的多种交互方式组合的人机交互系统。当柔性机械臂臂杆周围有障碍、需要大范围工作空间运动时,采用虚拟现实(virtual reality, VR)手柄进行控制,可快速给出机械臂运动趋势指令并控制臂形;当柔性机械臂在狭小空间碰到危险需要精确操作或需接触操作时,采用力反馈手控器控制。采用多种交互方式组合能解决只采用手控器单一交互方式使得控制对象受限的问题,如表 2 所示。

表 2 人机交互设备

Tab.2 Human-machine interaction equipments

序号	人机交互设备	控制类型	适应工作场景
1	力反馈手控器	末端控制、力反馈控制	狭小空间、接触操作
2	VR 手柄	末端 + 臂形同步控制	大空间快速操作、避障操作

2.3.1 力反馈手控器

力反馈手控器的结构设计简洁合理、力反馈大、感知明显、控制精度高,适合狭小空间或目标接触操作。在力反馈手控器控制方式下,将手控器手柄处的位置姿态映射到柔性机械臂的末端位置姿态,通过柔性机械臂逆解算法计算出关节角和绳长控制数据,完成对柔性机械臂的实时控制,坐标映射关系如图 3 所示。当末端需接触目标操作时,基于柔性机械臂的动力学模型,根据电机角度与绳索电流值计算出末端接触力大小,通过手控器反馈给操作者,完成力反馈控制。力反馈设备采用瑞士 Force Dimension 公司的 Omega.6,它是基于 Delta 机构的并行运动学设计的高端力反馈设备。

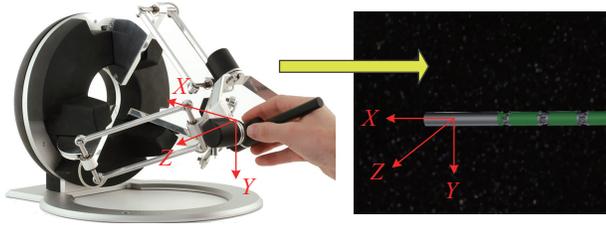


图3 手控器控制示意图

Fig.3 The schematic of the hand controller

2.3.2 VR手柄

VR手柄的优点是人机交互直观自然、操作空间大、速度快,属于非接触式的人机交互设备,整个操作方式是非侵入式的,对操作员的干扰大大减小,应用于需要避障操作或大范围工作空间运动的工作场景^[13-14]。操作员使用2个手柄,一个手柄控制柔性机械臂末端位姿,另一个手柄控制柔性机械臂中间臂形控制点,如图4所示。对于长度达4m的柔性机械臂只需一个操作者即可同时控制柔性臂的臂形与末端。VR设备采用Oculus VR公司推出的Oculus Rift头戴式虚拟现实设备,包括Oculus CV1眼镜、VR Touch手柄和定位器。

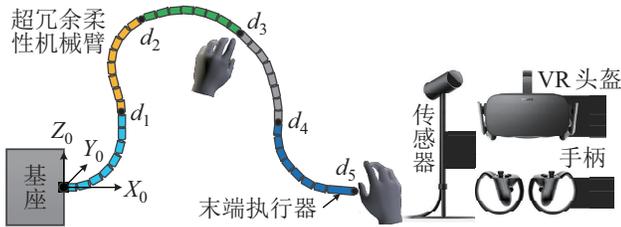


图4 VR手柄控制柔性机械臂示意图

Fig.4 The schematic of flexible manipulator controlled by VR handle

3 超冗余柔性机械臂的运动规划算法 (The motion planning algorithm of hyper-redundant flexible manipulator)

3.1 运动学建模

绳索驱动超冗余柔性机械臂采用分段联动结

构,包括5个大的关节段,段内的多个小节利用联动绳索进行被动驱动,实现等曲率控制。每个关节段由8个模块化子关节组成,共包括40个子关节,每个关节可实现俯仰和偏航2个自由度的运动,实际上共包括80个自由度。按照一般建模方法,此时柔性机械臂雅可比矩阵为 $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{6 \times 80}$ 。这样,在进行机械臂运动学逆解的迭代计算时,计算时间将大幅增加,影响计算效率。因此,首先推导和简化单个关节段的雅可比矩阵,进一步地完成整个柔性机械臂雅可比矩阵的简化,简化后雅可比矩阵变成 $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{6 \times 10}$,大大降低了计算量。

采用经典的D-H(Denavit-Hartenberg)法建立单个关节段的D-H坐标系^[15],如图5所示。根据建立的坐标系,可以得到其对应的D-H参数表,如表3所示。柔性机械臂关节段的模块化子关节之间采用联动的运动方式,在任何构形下各个旋转轴之间具有等角度的约束关系。因此对于任意关节段 m 其正运动学只需利用2个变量 θ_{2m-1} 和 θ_{2m} 进行表示即可,同一关节段上的2个关节转轴运动状态相同,即 θ 相同,表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_m &= {}^1\mathbf{T}_{m,2} {}^2\mathbf{T}_{m,3} {}^3\mathbf{T}_{m,4} {}^4\mathbf{T}_{m,5} \cdots {}^{14}\mathbf{T}_{m,15} {}^{15}\mathbf{T}_{m,16} \\ &= \mathbf{f}(\theta_{2m-1}, \theta_{2m}) \end{aligned} \quad (1)$$

表3 单个关节段D-H参数表

Tab.3 D-H parameters of single joint segment

连杆 m, i	a_i / mm	$\alpha_i / (^\circ)$	d_i / mm	θ_i
$m, 1$	0	-90	0	θ_{2m-1}
$m, 2$	l	0	0	θ_{2m}
$m, 3$	0	90	0	θ_{2m}
$m, 4$	l	0	0	θ_{2m-1}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$m, 15$	0	90	0	θ_{2m}
$m, 16$	l	0	0	θ_{2m-1}

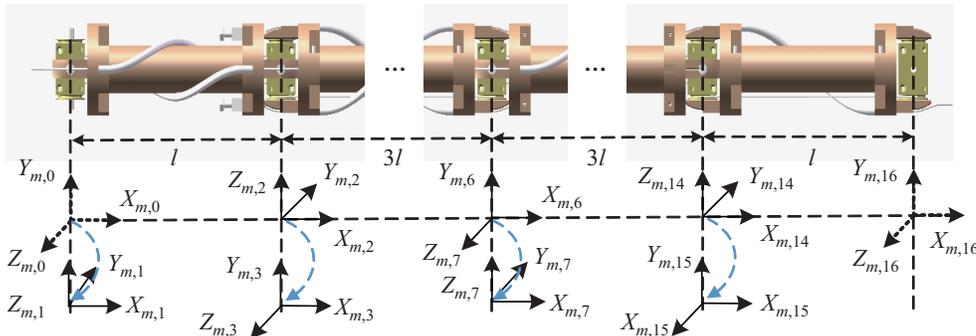


图5 单个关节段自由度配置

Fig.5 Freedom configuration of a single joint segment

超冗余柔性机械臂共由 5 个联动关节段依次串联而成, 从机械臂基座依次连乘相应的关节段可以得到其正运动学, 其简化的参数化运动学方程为

$${}^0T_{\text{end}} = \prod_{m=1}^5 T_m = f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{10}) \quad (2)$$

在单个关节段中, 其子关节的个数为 8 个, 自由度为 16 个, 因此其末端的速度和角速度按传统的方法可以求解为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_m \\ \mathbf{w}_m \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{m,1} \times \mathbf{r}_{m,1} & \cdots & \mathbf{e}_{m,16} \times \mathbf{r}_{m,16} \\ \mathbf{e}_{m,1} & \cdots & \mathbf{e}_{m,16} \end{bmatrix} \\ &\quad \underbrace{[\dot{\theta}_{2m-1} \ \dot{\theta}_{2m} \ \dot{\theta}_{2m} \ \cdots \ \dot{\theta}_{2m} \ \dot{\theta}_{2m} \ \dot{\theta}_{2m-1}]^T}_{16\dot{\theta}} \\ &= \mathbf{J}_m \dot{\theta}_m \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{r}_{m,i}$ ($i = 1, 2, \dots, 16$) 是坐标系 $\{i\}$ 原点指向关节段末端的矢量, $\mathbf{e}_{m,i}$ 为单位矢量, 指向坐标系 $\{i\}$ 的 Z 轴方向。

雅可比矩阵可以表示为

$$\mathbf{J}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{m,1} \times \mathbf{r}_{m,1} & \cdots & \mathbf{e}_{m,16} \times \mathbf{r}_{m,16} \\ \mathbf{e}_{m,1} & \cdots & \mathbf{e}_{m,16} \end{bmatrix}^{6 \times 16} \quad (4)$$

由此可知, 关节段 m 的雅可比矩阵 $\mathbf{J}_m \in \mathbf{R}^{6 \times 16}$, 而整个机械臂的雅可比矩阵将达到 $\mathbf{J} \in \mathbf{R}^{6 \times 80}$, 这将大大地降低求逆解的计算效率, 影响控制实时性。考虑到单个关节段中仅有 2 个关节变量, 因此, 有必要对雅可比矩阵进行进一步的简化。

由式 (3) 可得, 柔性机械臂关节段 m 的末端线速度可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_m &= \mathbf{e}_{m,1} \times \mathbf{r}_{m,1} \cdot \dot{\theta}_{2m-1} + \mathbf{e}_{m,2} \times \mathbf{r}_{m,2} \cdot \dot{\theta}_{2m} + \cdots + \\ &\quad \mathbf{e}_{m,15} \times \mathbf{r}_{m,15} \cdot \dot{\theta}_{2m} + \mathbf{e}_{m,16} \times \mathbf{r}_{m,16} \cdot \dot{\theta}_{2m-1} \\ &= [\mathbf{v}_{m,1} \ \mathbf{v}_{m,2}] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{2m-1} \\ \dot{\theta}_{2m} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{v}_{m,k}$ ($k = 1, 2$) 代表关节段 m 中相同方向轴 k 的单位线速度对末端线速度的影响, 可以具体表示为

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{m,1} = \mathbf{e}_{m,1} \times \mathbf{r}_{m,1} + \mathbf{e}_{m,4} \times \mathbf{r}_{m,4} + \mathbf{e}_{m,5} \times \mathbf{r}_{m,5} + \\ \quad \mathbf{e}_{m,8} \times \mathbf{r}_{m,8} + \mathbf{e}_{m,9} \times \mathbf{r}_{m,9} + \mathbf{e}_{m,12} \times \mathbf{r}_{m,12} + \\ \quad \mathbf{e}_{m,13} \times \mathbf{r}_{m,13} + \mathbf{e}_{m,16} \times \mathbf{r}_{m,16} \\ \mathbf{v}_{m,2} = \mathbf{e}_{m,2} \times \mathbf{r}_{m,2} + \mathbf{e}_{m,3} \times \mathbf{r}_{m,3} + \mathbf{e}_{m,6} \times \mathbf{r}_{m,6} + \\ \quad \mathbf{e}_{m,7} \times \mathbf{r}_{m,7} + \mathbf{e}_{m,10} \times \mathbf{r}_{m,10} + \mathbf{e}_{m,11} \times \mathbf{r}_{m,11} + \\ \quad \mathbf{e}_{m,14} \times \mathbf{r}_{m,14} + \mathbf{e}_{m,15} \times \mathbf{r}_{m,15} \end{cases} \quad (6)$$

同样地, 其关节段末端的角速度也可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_m &= \mathbf{e}_{m,1} \cdot \dot{\theta}_{2m-1} + \mathbf{e}_{m,2} \cdot \dot{\theta}_{2m} + \cdots + \mathbf{e}_{m,15} \cdot \dot{\theta}_{2m} + \\ &\quad \mathbf{e}_{m,16} \cdot \dot{\theta}_{2m-1} \\ &= [\mathbf{w}_{m,1} \ \mathbf{w}_{m,2}] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{2m-1} \\ \dot{\theta}_{2m} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

$\mathbf{w}_{m,k}$ ($k = 1, 2$) 代表关节段 m 中相同方向轴 k 的单位角速度对末端角速度的影响, 可以具体表示为

$$\begin{cases} \mathbf{w}_{m,1} = \mathbf{e}_{m,1} + \mathbf{e}_{m,4} + \mathbf{e}_{m,5} + \mathbf{e}_{m,8} + \\ \quad \mathbf{e}_{m,9} + \mathbf{e}_{m,12} + \mathbf{e}_{m,13} + \mathbf{e}_{m,16} \\ \mathbf{w}_{m,2} = \mathbf{e}_{m,2} + \mathbf{e}_{m,3} + \mathbf{e}_{m,6} + \mathbf{e}_{m,7} + \\ \quad \mathbf{e}_{m,10} + \mathbf{e}_{m,11} + \mathbf{e}_{m,14} + \mathbf{e}_{m,15} \end{cases} \quad (8)$$

进一步地可以得到:

$$\mathbf{J}_m \dot{\theta}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_m \\ \mathbf{w}_m \end{bmatrix} \dot{\theta}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{m,1} & \mathbf{v}_{m,2} \\ \mathbf{w}_{m,1} & \mathbf{w}_{m,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{2m-1} \\ \dot{\theta}_{2m} \end{bmatrix} \quad (9)$$

再结合式 (3) 可以得到简化后的雅可比矩阵:

$$\mathbf{J}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{m,1} & \mathbf{v}_{m,2} \\ \mathbf{w}_{m,1} & \mathbf{w}_{m,2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

整个柔性机械臂的雅可比矩阵的推导与单个关节段的类似, 最后得到末端线速度和角速度与各个轴的关系:

$$\mathbf{J} \dot{\theta} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{1,1} & \mathbf{v}_{1,2} & \cdots & \mathbf{v}_{5,2} \\ \mathbf{w}_{1,1} & \mathbf{w}_{1,2} & \cdots & \mathbf{w}_{5,2} \end{bmatrix} [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \cdots \ \dot{\theta}_{10}]^T \quad (11)$$

即超冗余柔性机械臂的雅可比矩阵为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{1,1} & \mathbf{v}_{1,2} & \cdots & \mathbf{v}_{5,2} \\ \mathbf{w}_{1,1} & \mathbf{w}_{1,2} & \cdots & \mathbf{w}_{5,2} \end{bmatrix}^{6 \times 10} \quad (12)$$

3.2 基于自由度动态组合的柔性机械臂规划方法

针对狭小空间作业的需求, 提出基于自由度动态组合的规划方法。柔性机械臂在维修太阳帆板压紧杆的任务中, 其最为困难的地方在于实现臂本体在帆板狭缝中穿越。基于此, 柔性臂处于帆板狭缝之间的部分需要进行平面规划, 并保持构形不变, 而处于帆板外面的部分则需要进行空间规划。因此, 可以将柔性机械臂划分为帆板外 S_1 和帆板内 S_2 两大部分, 如图 6 所示。对于柔性臂帆板内大段 S_2 , 可以通过给定的末端点的位置, 利用几何求解的方法求解其根部的可能范围。剩余的自由度 N 由逆运动学算法计算确定。由于在迭代计算过程中柔性机械臂参与求逆解的自由度数目是动态变化的, 由此提出了基于自由度动态组合法的空

间逆解规划方法,完成柔性机械臂穿越帆板狭小空间时的轨迹规划。根据帆板外 S_1 和帆板内 S_2 两大部分的规划需求,两大部分的自由度动态组合的方式有:10DOF+0DOF、9DOF+1DOF、8DOF+2DOF、……。。

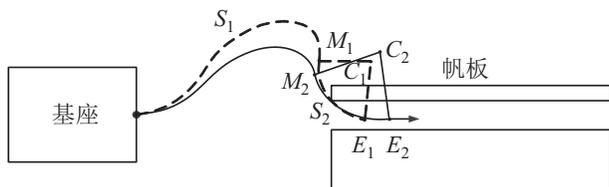


图6 自由度动态组合规划方法示意图

Fig.6 The planning method based on DOF dynamic combination

$${}^0T_M = {}^0T_{\text{end}} f_{S_2}^{-1}(\theta_{S_2}) \quad (13)$$

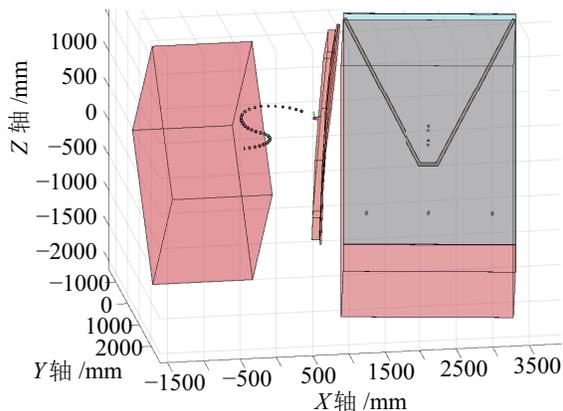
式(13)中解出了柔性臂段 S_2 中的俯仰自由度,剩下的自由度则结合柔性机械臂逆运动学算法,在每次逆解计算过程中,其实际迭代用到的关节角个数为10、9、8个。

根据自由度的变化情况,柔性机械臂穿越帆板狭缝的规划过程可以分为3个子过程,帆板外采用10DOF+0DOF方式进行规划,第5段进入狭缝时采用9DOF+1DOF方式进行规划,第4、5段进入狭缝时采用8DOF+2DOF方式进行规划,仿真过程如图7所示。由图7可知,采用此方法可以有效地完成帆板狭缝穿越任务。在帆板狭缝穿越任务中,由于帆板形成的空间是一个平面,将末1段或末2段的俯仰角度设置为固定值 0° ,其他工作场景 S_2 段俯仰角度根据不同任务需求进行配置计算。

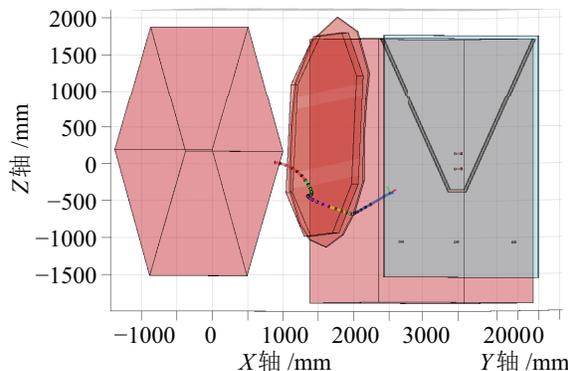
3.3 末端一臂形同步规划方法

当超冗余柔性机械臂需要完成避障规划时,需要对末端位姿和臂形进行整体规划^[16]。针对这一问题,提出将超冗余柔性机械臂段与段之间的控制点作为控制对象来调整机械臂臂形的方法,该方法在满足末端位姿到达的前提下,通过优化超冗余柔性机械臂所有自由度的方式,使中间臂形逼近控制点要求的整体臂形,因此,该方法满足了“整臂臂形—末端轨迹”同步规划的需求。

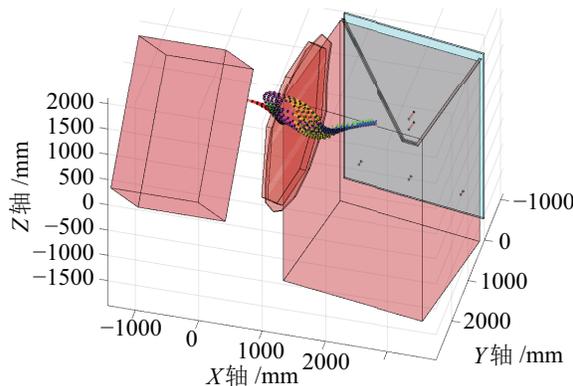
在末端轨迹与期望轨迹一致的基础上,在空间设置 j 个控制目标点,在超冗余柔性机械臂设定 j 个被控制点。根据机械臂的特点将被控制点设定为机械臂上关节段与段之间的节点 N_j ($j=1,2,3,4$),被控制点与相应控制目标点 C_j ($j=1,2,3,4$)之间的距离 $d_j = |\overrightarrow{N_j C_j}|$ ($j=1,2,3,4$)则为待优化目标,如图8所示。当任意欧氏距离大于对应安全性阈值



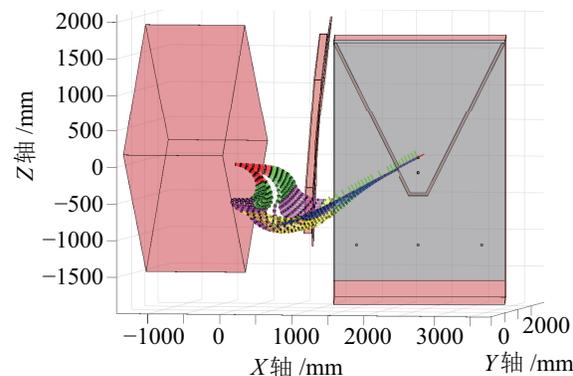
(a) 起始时刻10DOF+0DOF



(b) 第5段开始穿缝9DOF+1DOF



(c) 第4段开始穿缝8DOF+2DOF



(d) 到达目标点

图7 自由度动态组合规划仿真

Fig.7 Simulation of the planning method based on DOF dynamic combination

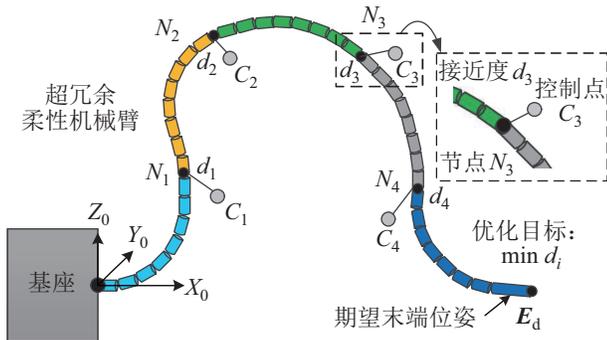


图 8 末端一臂形同步规划示意图

Fig.8 Synchronous planning of the end and the arm configuration

时, 通过基于梯度投影的全局优化法使得欧氏距离 d_i 逼近 0, 从而得到超冗余柔性机械臂在空间的期望构形。如果任意欧氏距离 d_i 为 0, 则超冗余机械臂的构形与控制点设定的期望构形完全一致。如果任意欧氏距离 d_j 不为 0, 则通过优化超冗余柔性机械臂的整臂自由度, 使得距离 d_i 的加权和 $\sum_{i=1}^4 \lambda_j d_j$ 最小 (λ_j 为权重系数), 即柔性机械臂的整臂构形与控制点所设定构形的一致性达到最优化状态, 实现末端一臂形同步规划目标。针对文中柔性机械臂任务特点, 主要优先调整 d_3 点位置来控制臂形。

4 超冗余空间柔性机械臂遥操作系统研制与实验 (Development and experiment of the teleoperation system for a hyper-redundant space flexible manipulator)

4.1 遥操作人机交互系统的实现

针对第 2 节系统设计内容建立超冗余空间柔性机械臂的遥操作人机交互系统, 布局如图 9 所示。

遥操作系统由 3 个操作界面组成, 其中场景显示界面实时显示柔性机械臂工作状态的预测仿真结果, 完成空间机械臂任务场景的本地再现, 刷新频率不低于 25 Hz; 人机交互界面负责将手控器或 VR 手柄采集的操作员操作数据转换为柔性机械臂控制数据, 数据采集频率不低于 50 Hz; 信息管理界面负责发送、接收、存储和显示遥控指令和遥测数据, 存储时间不低于 24 h。吊丝配重实验系统采用重力补偿方法模拟空间柔性机械臂的真实工作状态, 并用作空间机械臂地面遥操作实验中的操作对象。

4.2 柔性机械臂遥操作实验

卫星太阳帆板无法展开是一类典型的卫星故障。为了使卫星帆板能够顺利展开, 需要拆除帆板压紧机构。帆板折叠时与卫星本体之间的缝隙很小, 一般在 10 cm 以内, 且压紧杆在帆板中间位置。刚性机械臂的臂杆和关节尺寸太大, 无法通过狭小空间到达压紧杆位置。绳索驱动的柔性机械臂的电机处于臂的根部, 柔性机械臂臂杆可以通过狭小空间且臂杆运动灵活, 可以越过狭窄空间。但是执行在轨任务时, 目标处于未知状态, 柔性机械臂无法自主完成任务。现通过遥操作方式控制柔性机械臂穿越狭小空间完成预定任务, 并针对此任务开展实验研究。

4.2.1 实验条件

基于 Unity 3D 软件开发了空间柔性机械臂操作场景, 场景中包括机械臂驱动控制箱、柔性机械臂臂杆、模拟太阳帆板、模拟障碍物等。基于自由度动态组合和末端一臂形同步规划遥操作方法配合手控器和 VR 手柄进行操作, 完成柔性机械臂穿越太阳帆板狭缝到达压紧杆位置的实验。

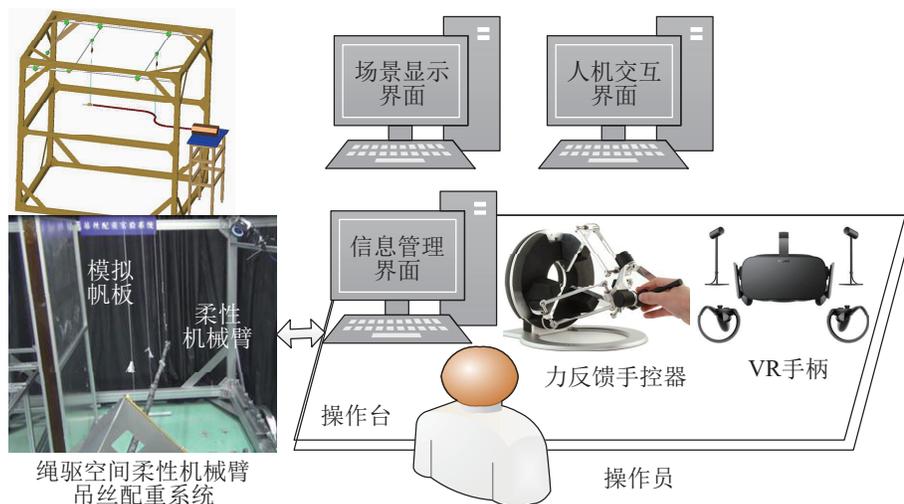


图 9 遥操作人机交互系统布局图

Fig.9 The schematic of teleoperation human-machine interaction system

实验步骤如图 10 所示, 主要包括 6 个步骤。首先在离帆板较远且有障碍时, 通过 VR 手柄调整臂形同时控制末端快速到达帆板边缘; 然后通过自由度动态组合方法将末 1 段、末 2 段分别规划至平面运动; 在保持末 1 段或末 2 段在一个平面的情况下, 利用手控器精细控制柔性机械臂末端到达压紧杆。实验过程中可通过柔性机械臂末端视觉相机实时观察狭缝中目标的情况, 调整操作策略。

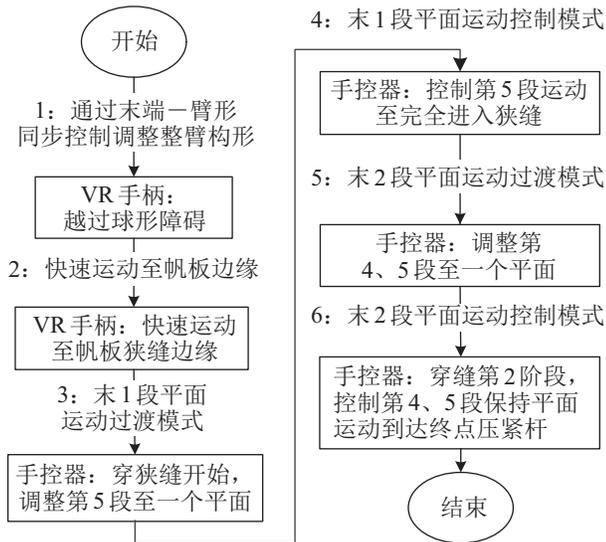


图 10 实验步骤流程图

Fig.10 Flow chart of experimental steps

4.2.2 实验结果与分析

在实验的初始位置, 柔性臂的关节角度为 $(-8.50^\circ, 0.00^\circ, -12.00^\circ, 0.00^\circ, 8.00^\circ, -2.00^\circ, 13.00^\circ, 0.00^\circ, 12.00^\circ, -2.00^\circ)$, 如图 11 所示。此时, 柔性臂的运动前方有球形障碍物, 只控制末端运动可能会发生碰撞, 因此需要在控制末端运动的同时控制臂形。基于末端一臂形同步规划方法, 利用 VR 手柄操控柔性臂避过障碍运动至帆板狭缝附近, 此时关节角度为 $(-6.14^\circ, -15.00^\circ, -3.29^\circ, -8.72^\circ, 7.20^\circ, 15.0^\circ, 5.55^\circ, 15^\circ, 1.00^\circ, -2.80^\circ)$, 如图 12 所示。将 VR 手柄与末端一臂形同步规划方法结合, 在大范围工作空间快速控制柔性机械臂的避障运动并到达指定位置。

到达帆板边缘后, 为了防止臂杆和帆板发生碰撞及臂杆与帆板接触力过大, 采用手控器对机械臂进行精细控制。首先, 柔性机械臂第 5 段完成平面运动过渡, 使最后一段俯仰方向角度 X_5 变为 0° , 然后手控器控制末端, 使第 5 段进入帆板狭缝, 如图 13 所示, 关节角度值为 $(-2.79^\circ, -6.63^\circ, -1.75^\circ, -6.31^\circ, 5.03^\circ, 11.60^\circ, 1.87^\circ, 9.68^\circ, 0.00^\circ, -4.64^\circ)$ 。第 5 段进入狭缝后, 基于自由度动态组合方法使柔性

机械臂的末 2 段完成平面运动过渡, 第 4、5 段的俯仰方向角度 X_4 和 X_5 变为 0° 。保持第 4、5 段的俯仰角度为 0° , 利用手控器控制柔性机械臂末端运动至帆板压紧杆处, 如图 14 所示, 关节角度值为 $(-2.641^\circ, -2.064^\circ, -1.81^\circ, -4.64^\circ, 4.777^\circ, 5.87^\circ, 0.00^\circ, 4.764^\circ, 0.00^\circ, -0.543^\circ)$ 。实验证明采用手控器操作可以精细控制柔性机械臂在狭小空间运动。柔性机械臂进入狭缝到达压紧杆位置的实物图如图 15 所示, 其中图的左上角为末端相机拍摄的模拟帆板压紧杆。

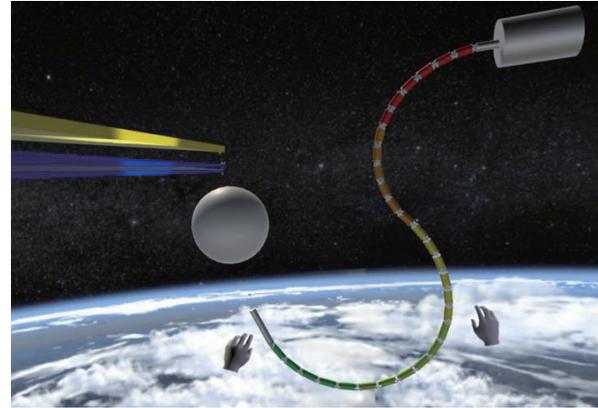


图 11 柔性机械臂穿越帆板的准备臂形

Fig.11 The prepared arm configuration of flexible manipulator crossing through the solar panels

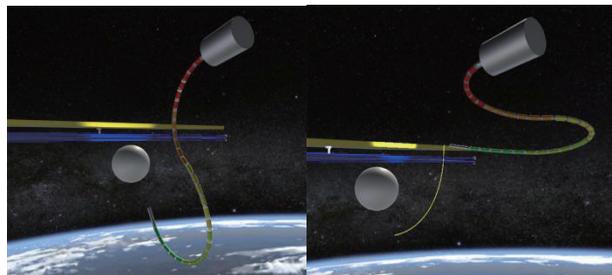


图 12 机械臂通过末端一臂形同步控制运动至帆板边缘
Fig.12 The manipulator moving to the edge of the solar panel by synchronous control of the end and the arm configuration

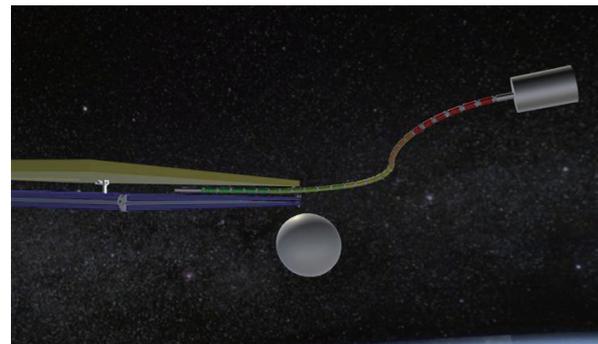


图 13 第 5 段保持平面运动进入狭缝

Fig.13 The 5th segment keeps the plane moving into the slit

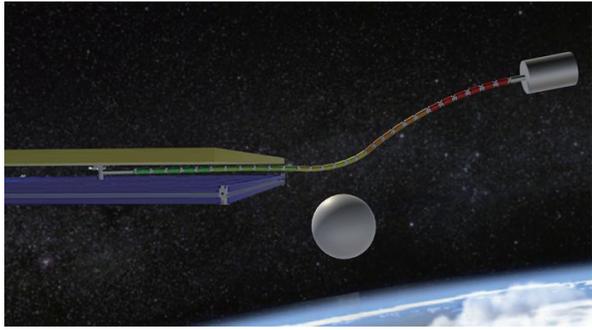


图 14 第 4、5 段保持平面进入狭缝

Fig.14 The 4th and 5th segment keep the plane moving into the slit

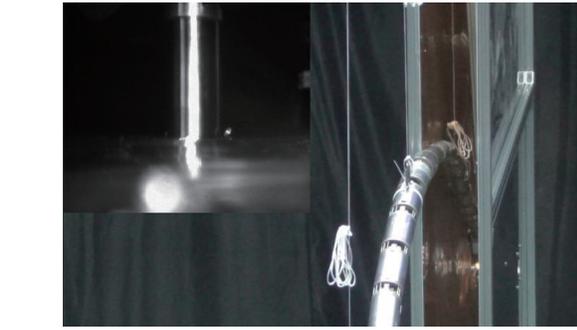
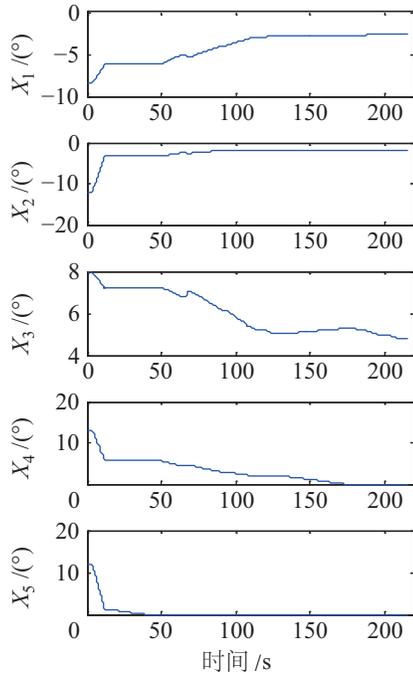


图 15 吊丝配重系统下机械臂实物图

Fig.15 Physical diagram of the manipulator under the suspension system

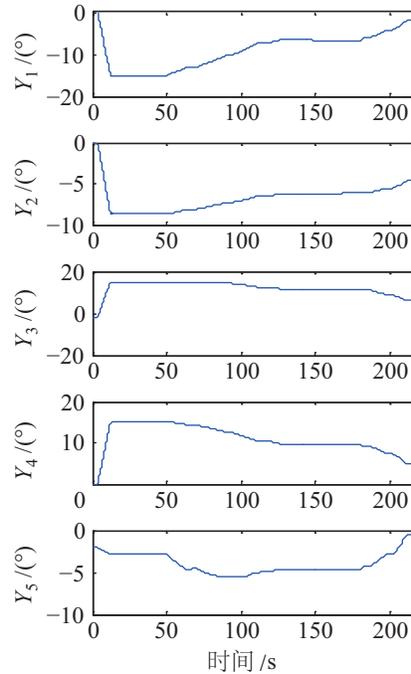


图 16 关节角度曲线

Fig.16 The curve of joint angles

柔性机械臂 5 大段 10 个关节角的运动曲线如图 16 所示, 通过曲线可知在进入狭缝时, 先是第 5 段俯仰角度 X 调整到 0° 并保持, 然后第 4 段的俯仰角度 X 调整到 0° 并保持, 最终, 到达帆板压紧杆位置。此时遥操作系统发送维修指令, 利用柔性机械臂末端的工具对帆板压紧杆进行维修拆除, 整个实验持续了 216.4 s。

5 结论 (Conclusion)

针对绳驱冗余空间柔性机械臂的运动特点和在轨任务需求, 提出并建立了基于力反馈手控器和 VR 手柄组合的遥操作人机交互系统, 该系统可实现空间柔性机械臂在大范围工作空间内的快速运动, 还可在狭小空间内存在障碍和发生触碰等复杂工况下完成精细的在轨操作任务。提出了自由度

动态组合和末端一臂形同步规划遥操作方法, 并完成了太阳帆板狭缝穿越典型实验。实验验证了算法的可行性和遥操作人机交互系统的工程实用性。未来将继续研究优化适用于遥操作控制的超冗余柔性机械臂规划方法, 并在绳驱柔性机械臂力反馈控制方面开展进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] 刘天亮. 面向狭小空间作业的绳索驱动超冗余机械臂的研究[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学, 2016.
Liu T L. A study on the cable-driven and hyper redundant manipulator for the narrow space operations[D]. Shenzhen: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [2] 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.

- [3] Oda M, Doi T. Teleoperation system of ETS-VII robot experiment satellite[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 1997: 1644-1650.
- [4] Ma O, Wang J, Misra S, et al. On the validation of SPDM task verification facility[J]. *Journal of Robotic Systems*, 2004, 21(5): 219-235.
- [5] Artigas J, Balachandran R, de Stefano M, et al. Teleoperation for on-orbit servicing missions through the ASTRA geostationary satellite[C]//IEEE Aerospace Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/AERO.2016.7500785.
- [6] 王学谦, 徐文福, 梁斌, 等. 空间机器人遥操作系统设计及研制[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(3): 337-342. Wang X Q, Xu W F, Liang B, et al. Design and development of teleoperation system for space robot[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(3): 337-342.
- [7] 张涛, 陈章, 王学谦, 等. 空间机器人遥操作关键技术综述与展望[J]. *空间控制技术与应用*, 2014, 40(6): 1-9,30. Zhang T, Chen Z, Wang X Q, et al. Overview and prospect of key technologies of teleoperation of space robot[J]. *Aerospace Control and Application*, 2014, 40(6): 1-9,30.
- [8] Martín-Barrio A, Roldán J J, Terrile S, et al. Application of immersive technologies and natural language to hyper-redundant robot teleoperation[J]. *Virtual Reality*, 2020, 24(3): 541-555.
- [9] Zhu C C, Song A G. Design of a 3-DOF parallel hand-controller[J]. *Journal of Sensors*, 2017. DOI: 10.1155/2017/8162512.
- [10] 李家霖, 杨洋, 杨铁, 等. 外骨骼式遥操作主手设计及主从异构映射算法研究[J]. *机器人*, 2020, 42(6): 651-660. Li J L, Yang Y, Yang T, et al. Design of exoskeletal teleoperation master device and research on master-slave isomerism mapping algorithm[J]. *Robot*, 2020, 42(6): 651-660.
- [11] Singh J, Srinivasan A R, Neumann G, et al. Haptic-guided teleoperation of a 7-DoF collaborative robot arm with an identical twin master[J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2020, 13(1): 246-252.
- [12] Qin L, Huang F, Chen Z, et al. Teleoperation control design with virtual force feedback for the cable-driven hyper-redundant continuum manipulator[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(22). DOI: 10.3390/app10228031.
- [13] Wang Q Y, Jiao W H, Yu R, et al. Modeling of human welders' operations in virtual reality human-robot interaction[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(3): 2958-2964.
- [14] Wang H Y, Mecham R, Zhang B. A method targeting repair in space: Tele-operating a collaborative robot with virtual reality [C]//IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2017: 1068-1071.
- [15] Liu T L, Xu W F, Yang T W, et al. A hybrid active and passive cable-driven segmented redundant manipulator: Design, kinematics, and planning[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2021, 26(2): 930-942.
- [16] Mu Z G, Yuan H, Xu W F, et al. A segmented geometry method for kinematics and configuration planning of spatial hyper-redundant manipulators[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(5): 1746-1756.

作者简介:

朱晓俊 (1986-), 男, 博士生。研究领域: 空间机器人, 遥操作。

王学谦 (1980-), 男, 博士, 教授。研究领域: 空间机器人, 遥操作, 动力学与控制。