

空间站转位机构末端效应器位姿设定试验方法研究*

张伟^{1,3},白鑫林^{1,2},徐志刚^{1,2}

(1.中国科学院沈阳自动化研究所,辽宁 沈阳 110016;
2.中国科学院机器人与智能制造创新研究院,辽宁 沈阳 110016;
3.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:针对空间站转位机构末端效应器地面试验要求,提出采用并联机构实现执行器与适配器之间的六维空间位姿设定。首先,设计了6自由度并联机构,并对其机构构成和工作原理进行了阐述;其次对所设计并联机构的工作空间运动学及作动器与适配器的运动干涉特性进行了数学建模,最后,编制了基于柱坐标的机构工作空间搜索算法和基于空间几何的干涉检测算法,并运用MATLAB进行了仿真分析。仿真结果表明,所设计的并联机构其工作空间满足末端效应器位姿设定的范围要求,并联机构各分支作动器与末端效应器之间不会发生运动干涉,验证了该方法的有效性。

关键词:空间站转位机构;末端效应器;并联机构;位姿设定

中图分类号:TH112 文献标识码:A 文章编号:1001-2354(2018)11-0089-06

DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2018.11.015

Research on test method of position-and-pose setting of redocking manipulator end-effector of space station

ZHANG Wei^{1,3}, BAI Xin-lin^{1,2}, XU Zhi-gang^{1,2}

(1.Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;
2.Institute of Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;
3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: According to the ground-test requirements for the position-and-pose setting of redocking manipulator end-effector of space station, a method on basis of parallel mechanism is proposed for the six-dimensional spatial position-and-pose setting between the actuator and the adapter. Firstly, the 6-DOF parallel mechanism is developed, with its structure and working principle. Secondly, both the workspace kinematics of the parallel mechanism and the motion interference characteristics of the actuator and adapter are mathematically modeled. Finally, both the workspace-search algorithm based on cylindrical coordinates and the interference-detection algorithm based on space geometry are developed; the simulation analysis is carried out by means of MATLAB. The simulation results show that for the parallel mechanism, its workspace reaches the standards of the end-effector's position-and-pose setting. There is no motion interference between the branch actuators and the end-effector, which verifies the effectiveness of the method.

Key words: redocking manipulator of space station; end-effector; parallel mechanism; position-and-pose setting

空间机械臂在研制过程中要进行各种试验,如微重力试验、结构载荷试验、碰撞检测与响应试验等^[1-2],以检验或修正其设计性能或设计参数,避免机械臂操控失效而造成较大损失。空间站转位机构是组建模块化空间站的核心机构,用于将待转舱段从对接舱段的轴向对接口转移至侧向对接口,空间站转位机构由多关节机械臂及末端效应器组成,末端效应器是空间站

机械臂操控转位舱段的关键连接部件,主要由连接于机械臂末端的执行器和固定于目标端的适配器组成^[3]。由于控制系统和机械加工等误差,末端效应器在连接过程中会出现偏差,即执行器和适配器之间是有差连接的,其偏差一般为空间六维位置和姿态误差,因而需要在地面试验时设定空间离散的多组特定位置姿态偏差,验证机械臂末端效应器的连接性能和容差特性。

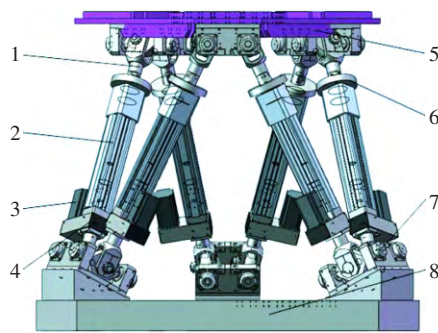
* 收稿日期 2016-12-26 修订日期 2018-05-26

机械臂末端效应器位姿设定的试验研究在国外已有报道与研究,如美国 HST 辅助维修机械臂^[4-6],可进行 HST 的精密零件替换和维修工作,该机械臂在正式使用前,对末端效应器进行了大量试验研究,文献^[7]中提到的大型机械臂也进行了大量的原理样机试验,其中包括末端效应器的容差连接试验,但其详细的试验方法和原理却未见报道。在国内,空间机械臂末端效应器处于研制阶段,南京航空航天大学 and 哈尔滨工业大学等单位在联合研制某型机械臂末端效应器^[8-9]时,分别将执行器和适配器固定于不同架体上,这样可实现平面位置和姿态的设定,但位姿精度和试验效率较低,不能精确地实现效应器六维位姿设定。

针对机械臂末端效应器的位姿设定要求,提出采用并联机构实现执行器与适配器间的六维空间位姿设定。并联机构具有较高的精度和刚度^[10-12],而空间实现体积却较小,在进行位姿设定时较串联机构及混联机构更具优势。文中阐述了 6 自由度并联机构的结构和空间站转位机构末端效应器的位姿设定原理,对并联机构的位姿设定空间和机构干涉性进行了数学建模和仿真验证。

1 并联机构结构设计

并联机构用于设定机械臂末端效应器的位姿,主要由动平台、静平台和单分支作动器组成,所设计的并联机构结构如图 1 所示。其中,单分支作动器主要由伺服电机、减速器、丝杠、虎克铰和锁紧机构构成。



1 丝杠;2 单分支作动器;3 伺服电机;4 减速器;
5 动平台;6 锁紧机构;7 虎克铰;8 静平台

图 1 并联机构设计结构

图 1 中,静平台与动平台之间有 6 个单分支作动器,各单分支作动器两端均有高精度虎克铰,上端虎克铰支座与动平台连接,下端虎克铰支座与静平台固定。根据螺旋理论及机构约束条件^[10]可得,所设计并联机构有 6 个自由度,可进行直线运动、旋转运动或二者的

组合运动,满足机械臂末端效应器位姿设定的自由度数和运动功能要求。

2 末端效应器位姿设定原理

在机械臂末端效应器进行连接前的位姿设定时,适配器通过连接法兰与并联平台固定,执行器位于多自由度机械臂的末端,执行器与适配器之间的六维空间位置和姿态由并联机构进行精确设定。当要进行末端效应器某一位姿的试验时,通过并联机构的运动学模型解算出该位姿各分支作动器的直线位移,上位机将该位移量转化为伺服电机的角位移,控制系统通过驱动伺服电机改变各单分支作动器的长度,单分支作动器均配置有直线位移传感器进行位置闭环反馈,进而使动平台上适配器控制点相对于并联平台上执行器的空间位姿发生变化,直至达到预设值;当达到指定位置和姿态后,各单分支上的锁紧机构对单分支进行锁紧,则动平台在受载状态下位姿仍然会保持不变,机械臂末端效应器位姿设定原理如图 2 所示。

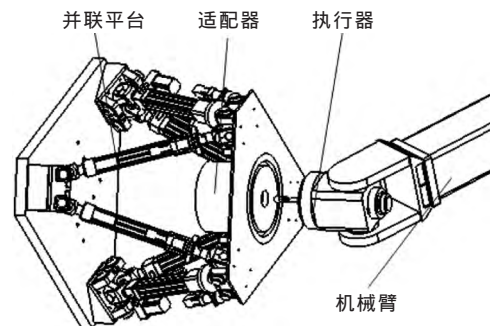


图 2 机械臂末端效应器位姿设定原理

3 机构位姿设定运动学建模

3.1 机构灵巧空间运动学建模

采用并联机构设定机械臂执行器和适配器之间的空间位姿,首先要建立并联机构的运动学模型。设 $O_{ss}-X_{ss}Y_{ss}Z_{ss}$ 为静平台坐标系,其原点 O_{ss} 位于静平台各铰点中心, $O_{ds}-X_{ds}Y_{ds}Z_{ds}$ 为动平台坐标系,其原点 O_{ds} 位于动平台铰点中心,动平台虎克铰转动中心分别为 $A_1 \sim A_6$,静平台虎克铰转动中心分别为 $B_1 \sim B_6$,动平台和静平台铰点半径分别为 R_{ss} 和 R_{ds} ,动平台和静平台铰间夹角分别为 α_{ss} 和 α_{ds} ,初始时刻静坐标系 $O_{ss}-X_{ss}Y_{ss}Z_{ss}$ 与动坐标系 $O_{ds}-X_{ds}Y_{ds}Z_{ds}$ 在 XOY 面内的投影重合,并联平台的坐标系定义如图 3 所示。

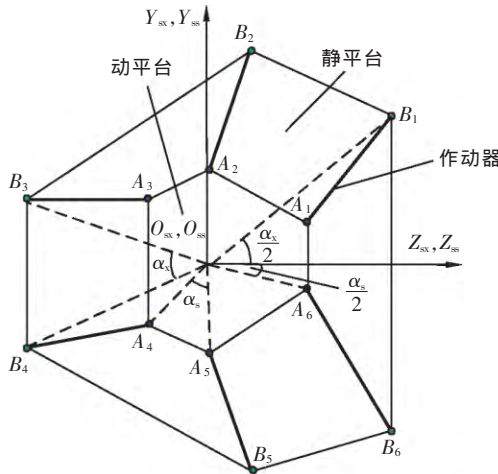


图3 并联机构坐标系定义

由图3可分别得到静系中下铰点 $B_1 \sim B_6$ 的坐标和动系中上铰点 $A_1 \sim A_6$ 的坐标,其矩阵形式为:

$$A_s = [A_1 \ A_2 \ A_3 \ A_4 \ A_5 \ A_6]$$

$$B_s = [B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4 \ B_5 \ B_6]$$

设动平台的姿态角分别为 $\alpha_s, \beta_s, \gamma_s$,初始时刻动平台和静平台之间距离为 H_s ,控制点 P 在坐标系 $O_{ss}-X_{ss}Y_{ss}Z_{ss}$ 中的坐标为 (x_p, y_p, z_p) ,文中将控制点设置在适配器与动平台连接法兰的中心,则控制点 P 在静系中的位置矢量 P_s 为:

$$P_s = T_s \cdot [x_p \ y_p \ z_p]^T + [0 \ 0 \ H_s]^T = [P_{sx} \ P_{sy} \ P_{sz}]^T$$

式中: T_s ——姿态矩阵, $T_s = A_1 A_2 A_3$;

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_s & -\sin \alpha_s \\ 0 & \sin \alpha_s & \cos \alpha_s \end{bmatrix};$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \beta_s & 0 & \sin \beta_s \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_s & 0 & \cos \beta_s \end{bmatrix};$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos \gamma_s & -\sin \gamma_s & 0 \\ \sin \gamma_s & \cos \gamma_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

同理,可得到上铰点 $A_1 \sim A_6$ 在静系中的位置矢量 A_{xs} ,其表达式为:

$$A_{xs} = T_s \cdot A_s + [0 \ 0 \ H_s]^T$$

当动平台存在位置和姿态的运动时,作动器的长度 $l_{s_i} (i=1, 2, \dots, 6)$ 会发生变化, l_{s_i} 两端的铰点分别为 A_i 和 B_i ,则任意时刻作动器 l_{s_i} 的长度为 $|A_{xs}(i)B_x(i)|$,其矩阵形式为:

$$l_s = [|A_{xs}(1)B_x(1)| \ |A_{xs}(2)B_x(2)| \ |A_{xs}(3)B_x(3)| \\ |A_{xs}(4)B_x(4)| \ |A_{xs}(5)B_x(5)| \ |A_{xs}(6)B_x(6)|]$$

设单分支作动器长度的最值分别为 $l_{s_{min}}$ 和 $l_{s_{max}}$,则:

$$l_{s_{min}} \leq |l_s(i)| \leq l_{s_{max}} \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

3.2 作动器与适配器运动干涉特性建模

当并联机构进行位姿运动时,固定于其上的适配器的空间位置也发生相应变化,因此要分析机构的干涉特性,避免适配器底部与各分支作动器发生运动干涉,影响末端效应器的正常锁合连接。由于适配器嵌入并联平台部分的外形包络为圆柱,设适配器地面的最大包络外圆半径为 R_{sj} ,适配器底面中心点 O_{sj} 位置矢量为 O_{sj} ,适配器底面所在的平面为 Π_{sj} ,作动器最大包络外圆半径为 R_{sz} 。作动器与适配器发生干涉时的示意图如图4所示。

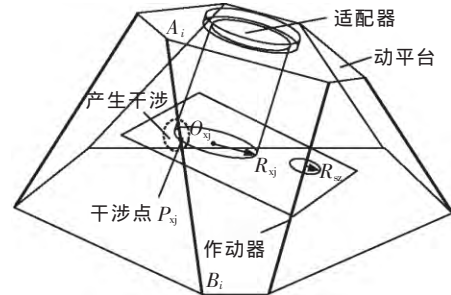


图4 作动器与适配器干涉示意图

当作动器 $A_i B_i$ 发生干涉时,空间直线 $A_i B_i$ 与 Π_{sj} 的交点 P_{sj} 位于适配器底面内,考虑到作动器的外形尺寸,则不发生干涉的条件为:

$$|O_{sj} P_{sj}| - R_{sj} - R_{sz} \geq 0 \quad (2)$$

设 P_{sj} 点的坐标为 $P_{sj} = (x_{sj}, y_{sj}, z_{sj})$,可通过联立直线 $A_i B_i$ 与 Π_{sj} 平面的方程得到:

$$\Pi_{sj}: [A_{sj} \ B_{sj} \ C_{sj}] \cdot (P_{sj} - O_{sj})^T = 0 \quad (3)$$

$$A_i B_i: \frac{x_{sj} - B_{ix}}{A_{ix} - B_{ix}} = \frac{y_{sj} - B_{iy}}{A_{iy} - B_{iy}} = \frac{z_{sj} - B_{iz}}{A_{iz} - B_{iz}} = t \quad (4)$$

式中: A_{ix}, A_{iy}, A_{iz} —— A_{xs} 的坐标分量;

B_{ix}, B_{iy}, B_{iz} ——铰点 B_i 的坐标分量, $i=1, 2, \dots, 6$ 。

4 仿真验证

为验证并联机构设定执行器与适配器之间六维空间位姿的性能,在给定位姿范围的前提下对并联机构进行仿真分析,末端效应器的位姿参数设定如表1所示。

表1 末端效应器位姿参数设定范围

参数	$\Delta P_{sx}/\text{mm}$	$\Delta P_{sy}/\text{mm}$	$\Delta P_{sz}/\text{mm}$	$\alpha_s/(\circ)$	$\beta_s/(\circ)$	$\gamma_s/(\circ)$
数值	150	± 200	± 200	± 3	± 3	± 3

4.1 机构灵巧空间仿真

采用基于柱坐标的搜索算法对并联机构的工作空间进行离散搜索,设动平台和静平台两铰间的距离分别为 d_{sa} 和 d_{sb} ,则其工作空间搜索算法的流程图如图5所示。

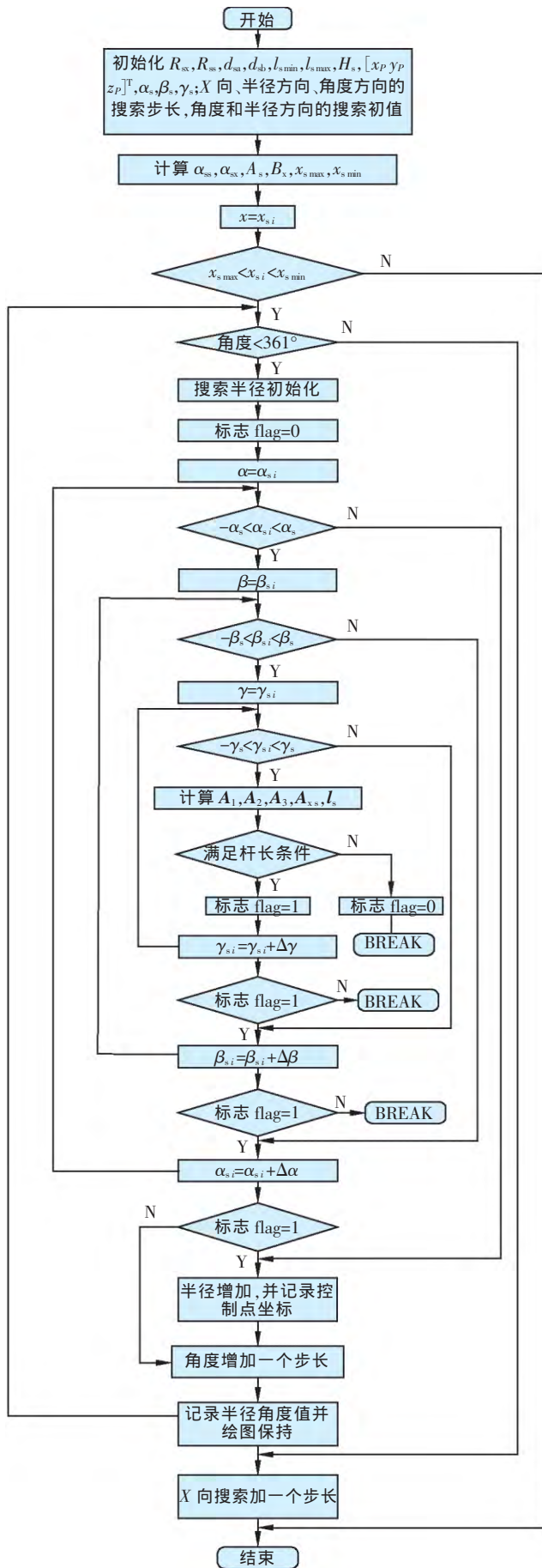


图 5 工作空间搜索算法流程图

其中, $\Delta\alpha_s, \Delta\beta_s$ 和 $\Delta\gamma_s$ 分别为姿态角 α_s, β_s 和 γ_s 的迭代步长, 迭代步长越小则搜索准确度越高, 但搜索时间也会成倍增加, 因此要合理选择角度和半径的搜索步长。

柱坐标进行工作空间搜索的原理为: 首先将控制点的 X 坐标赋为某值, 然后以控制零姿态时的坐标点为圆心, 进行半径方向和圆周方向的搜索和遍历, 每遍历一个步长的搜索半径和角度后, 均需要进行杆长条件(式(1))判断, 直至找到控制点在该 X 坐标下搜索半径和搜索角度的最大值, 若控制点初始位置和姿态不满足杆长条件时则直接退出, 然后进行 X 坐标下一步长的搜索, 直到完成这个工作空间的搜索, 最终绘制出控制点工作空间的示意图。

按照工作空间搜索算法伪代码进行 MATLAB 编程, 并代入并联机构的各结构参数值即可得到适配器上控制点的工作空间, 其仿真结果分别如图 6~图 9 所示。

通过仿真结果可知, 控制点 P 的坐标范围为: $814.519 \text{ mm} \leq P_{s_x} \leq 972.519 \text{ mm}$, $-252 \text{ mm} \leq P_{s_y} \leq 238 \text{ mm}$, $-225.5625 \text{ mm} \leq P_{s_z} \leq 225.5625 \text{ mm}$, 即并联机构行程 $\Delta P_{s_x}, \Delta P_{s_y}$ 和 ΔP_{s_z} 分别为 $158 \text{ mm}, \pm 245 \text{ mm}$ 和 $\pm 225.56 \text{ mm}$, 满足末端效应器位置和姿态的设定要求。

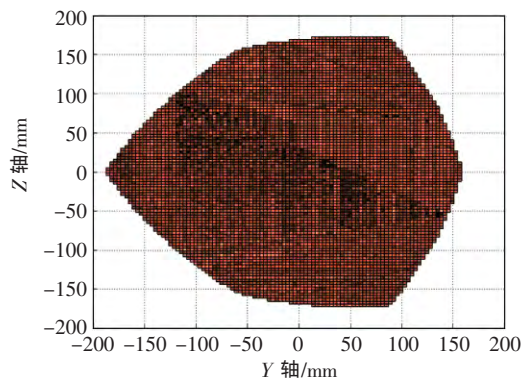


图 6 $x_{P1}=900 \text{ mm}$ 时的灵巧空间

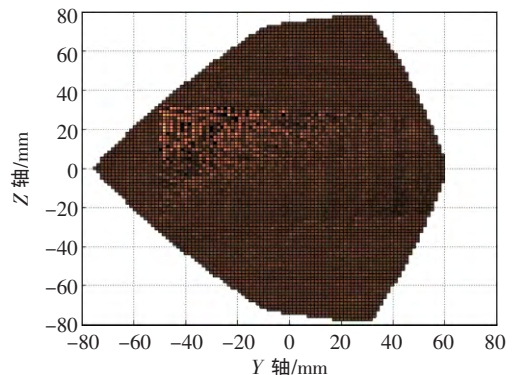


图 7 $x_{P1}=950 \text{ mm}$ 时的灵巧空间

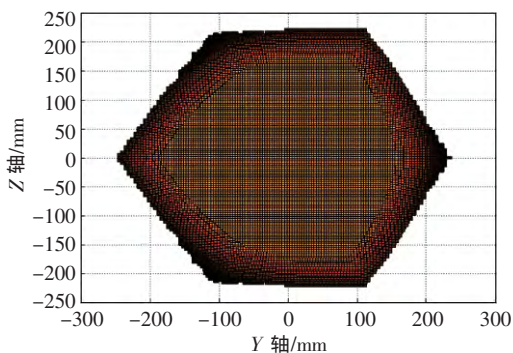


图8 灵巧空间俯视图

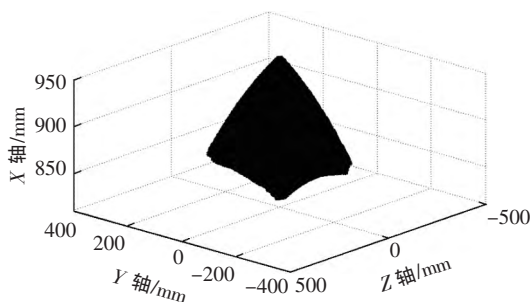


图9 灵巧空间轴测图

4.2 机构干涉性仿真

在上述仿真基础上,增加式(2)、式(3)和式(4)对应的计算代码,就可得到机构干涉检测算法的伪代码,运行该程序可计算出灵巧空间范围下作动器和旋转适配器之间的安全距离 d_s , 点 O_{s_j} 的运动轨迹如图 10 所示,作动器 A_1B_1 的运动轨迹如图 11 所示。

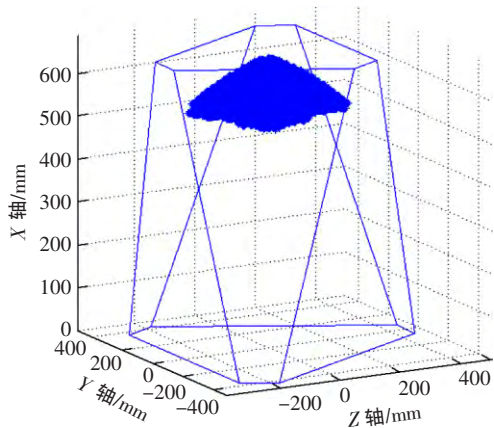


图10 点 O_{s_j} 的运动轨迹

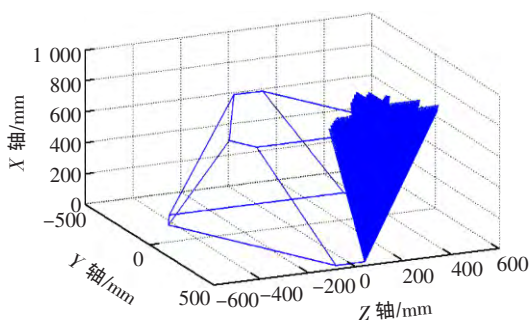


图11 作动器 A_1B_1 的运动轨迹

通过仿真可得, $|O_{s_j}P_{s_j}|$ 的最小值为 269.680 2 mm, 将 R_{s_j} 和 R_{s_z} 代入式(2)中得到 $d_s=64.680 2$ mm, 即各分支作动器不会与适配器发生干涉, 由此可验证所设计并联机构的机构参数设计的合理性, 并联机构参数如表 2 所示。

表2 并联机构参数表

参数	R_{s_s}	R_{s_z}	$l_{s_{min}}$	$l_{s_{max}}$	d_{s_i}	H_s
数值	350	460	754	964	210	94

5 结论

(1)针对机械臂执行器与适配器间六维空间位姿设定的应用需求, 提出采用并联 6 自由度机构实现机械臂末端效应器的位姿设定试验, 并对所设计的并联机构及其试验原理进行了阐述。

(2)建立了并联机构的工作空间运动学模型及作动器与适配器运动干涉特性模型, 编制了基于柱坐标的机构工作空间搜索算法和基于空间几何的干涉性检测算法伪代码;MATLAB 仿真结果表明, 所设计并联机构的工作空间满足末端效应器位姿设定范围要求, 并联机构各分支作动器与末端效应器之间不会发生运动干涉, 验证了该方法的有效性。

参考文献

[1] 徐文福,杜晓东,王成疆,等. 空间机械臂系统总体技术指标确定方法[J]. 中国空间科学技术,2013,33(1):53-60.

[2] 钟琼玮,项基,韦巍,等. 基于扰动观测器的机械手碰撞检测与安全响应[J]. 浙江大学学报:工学版,2012,46(6):1115-1121.

[3] 徐志刚,白鑫林,王军义,等. 基于等效惯量模拟的空间站转位机械臂承载性能测试[J]. 机器人,2015,37(2):231-236.

[4] McGuire J,Roberts B. Hubble robotic servicing and deorbit mission:risk reduction,mitigation,and lessons learned [C]// AIAA Space 2007 Conference,2007.

[5] Cepollina F J,Burns R D,Holz J M,et al. Method and associated apparatus for capturing, servicing, and de-orbiting earth satellites using robotics;U.S.,7,513,459[P]. 2009-04-07.

[6] Oda M,Nishida S,Inaba N,et al. A feasibility study of robotic servicing for the Hubble Space Telescope [C]//I-Sairas—The International Symposium on Artificial Intelli-

- gence, Robotics and Automation in Space, 2005.
- [7] Lozino-Lozinsky, Bratukhin A G. Aerospace systems: book of technical papers [M]. Moscow, Russia: Publishing House of Moscow Aviation Institute, 1997.
- [8] 陈金宝, 聂宏, 李有光, 等. 空间站大机械臂锁合末端效应器设计及关键技术研究[J]. 宇航学报, 2013, 34(12): 1529-1539.
- [9] 沈力, 王小涛. 高可靠性末端效应器控制系统设计[J]. 电子设计工程, 2012, 20(15): 78-81.
- [10] Chi W, Cao D, Wang D, et al. Design and experimental study of a VCM-based stewart parallel mechanism used for active vibration isolation[J]. Energies, 2015(8): 8001-8019.
- [11] 李保庆, 王培俊, 于鹏, 等. 一种含防扭臂并联机器人结构及静力学分析[J]. 机械设计, 2016, 33(8): 21-25.
- [12] 许允斗, 姚建涛, 赵永生. 基于几何约束条件过约束并联机构自由度瞬时性的简便判别方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(5): 10-16.

作者简介 张伟(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 机器人机构学、航天器空天环境测试理论与试验技术。

E-mail zhangwei1055@126.com