

基于可重构创新散件的并联机器人实验平台设计

张启升, 宁峰平, 梁晶晶

(中北大学 机械工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为了弥补当前并联机器人实验平台柔性不强不可扩充的缺陷, 提出了一种基于模块化可重构机器人创新散件的“虚实”互补数字孪生模型, 设计出了6-SPS并联机构虚实结合、功能互补、能够相互验证的实验平台。建立了6-SPS并联机器人的位移、速度和加速度的理论模型, 得到机构的雅可比矩阵; 规划了一段轨迹, 经过实验验证了理论模型和真实运行轨迹的一致性。分析了机器人的最大可达工作空间, 据此分析了机器人在定姿态和任意姿态下机构的运动学性能。将实验平台应用于实验教学, 通过虚实结合方式解决了实验场地紧张, 实验设备不足等问题, 增加了设备的应用率和提高了实验的效果。实践表明, 这种实验方法直观、生动、虚实结合, 有助于提高学生的探索兴趣和工程实践能力。

关键词: 并联机器人; 模块化可重构; 虚实结合; 灵巧度

中图分类号: TP242; G642.423 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.05.0015

引用格式: 张启升, 宁峰平, 梁晶晶. 基于可重构创新散件的并联机器人实验平台设计[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(4): 431-439.

Zhang Qisheng, Ning Fengping, Liang Jingjing. Design of parallel robot experimental platform based on reconfigurable innovative components[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(4): 431-439.

Design of Parallel Robot Experimental Platform Based on Reconfigurable Innovative Components

Zhang Qisheng, Ning Fengping, Liang Jingjing

(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to make up for the shortcomings of the current parallel robot experimental platform, such as weak flexibility and inability to expand. A “virtual-real” complementary digital twin model based on modular reconfigurable robot innovative components was proposed, and an experimental platform for the 6-SPS parallel mechanism with virtual-real combination, complementary functions and mutual verification was designed. The theoretical models of displacement, velocity and acceleration of the 6-SPS parallel robot were established, and the Jacobian matrix of the mechanism was obtained. A trajectory was planned, and the consistency between the theoretical model and the real running trajectory was verified through experiments. The maximum reachable working space of the robot was analyzed, and based on this, the kinematic performance of the mechanism of the robot in a fixed attitude and any attitude was analyzed. The experimental platform was applied to experimental teaching. Through the combination of virtual and real methods, problems such as tight experimental venues and insufficient experimental equipment

收稿日期: 2025-05-30

基金项目: 山西省高等学校教学改革创新项目(J20240945)。

作者简介: 张启升(1979—), 男, 高级实验师, 博士, 主要从事机器人工程教育改革的研究。E-mail: zhangqisheng_qs@nuc.edu.cn。

were solved, increasing the application rate of equipment and improving the effect of experiments. Practice shows that this experimental method, which is intuitive, vivid and combines virtual and real elements, is conducive to enhancing students' exploration interest and engineering practice ability.

Key words: parallel robot; modular reconfigurable; virtual-real synthesis; dexterity

0 引言

并联机构由若干条支链组成,在动平台输出规律的曲线,可作为并联机床、雕刻机、康复机器人等^[1-3]高端装备的原型机构。并联机器人结构复杂,专业性强,大多是专机专用,极大地限制了其应用、开发和普及。模块化可重构理论和机构学的融合产生的可重构模块化机器人设计理论是当前机器人和机构学的研究热点。其核心是通过机器人进行基本模块划分,经过支链重组和支链链接方式重构,就能够实现从一种构型到另外一种构型的转换而无需重新加工制造^[4-6]。

数字孪生(Digital Twin, DT)是基于仿真平台对机器、设备进行模拟,该技术广泛应用于仪器设计和开发^[7-10]。林润泽等^[11]构建了智能装配机械臂数字孪生实验系统,可应用于智能制造相关本科专业的实验教学。陶飞等^[12]借助DT技术构建了MRI原理与技术DT实验平台,满足了学习者时时能学、处处能学的现实需求。Schroeder等^[13]研究了物理空间与虚拟空间之间数据融合的方式,为数字孪生的数据连接提供了新方案。陆康等^[14]基于Unity3D的工业生产线中UR5e协作机器人数字孪生系统,替代人工完成工业生产线的高效通讯及管理。董靖川等^[15]设计了平面两自由度Diamond并联机器人数字孪生实验系统。孟庆森等^[16]基于虚拟被控对象仿真平台的并联机器人数字孪生虚拟调试系统,实现了包装工作站的工序流程仿真和优化,该系统能够有效验证并联机器人运动控制,完成生产线的协同调试。李公文^[17]以工业机器人为核心,实现了虚实同步机器人综合实验系统。李福等^[18]在三维虚拟空间中再现高危复杂环境下的机器人作业过程,借此锻炼学生的创新思维与解决复杂工程问题的能力。赵俊英等^[19]基于数字孪生虚实同步的工业机器人平台,准确可靠地实现了工业机器人坐标系标定。罗明坤等^[20]提出了一种基于数字孪生技术的工业机器人状态监测系统,解决了当前工业机器人状态监测模式单一、实时性差、可视化差的问题。

现有机器人实验平台的大量研究,其研究对象大多为工业机器人。并联机器人实验教学中理论计算抽象、实体实验复杂、功能单一、系统设备昂贵,而且不同厂家生产的产品操作系统、结构参数、控制器和运动控制卡等没有统一的标准。因此,研究更多更具专业性、经典性、直观性、功能多样性的并联式实验平台具有重要的实践意义。本文基于课题组自主研发的一套机器人散件,构建了并联机器人实验平台。通过这些散件的组装和功能重构,能够创新出构型不同的新型并联机器人,配合实验平台能够完成机器人运动学、轨迹规划、运动学性能等实验,该平台可以承担机器人工程专业部分实验任务,提升学生的创新能力。

本实验平台的创新性在于可以通过可重构散件的组装,重构成不同构型的并联机器人平台,可扩充性强;同时,虚实结合,可以将理论轨迹(虚拟环境)通过机器人(物理模型)实时再现。

1 虚实结合并联机器人实验系统框架

1.1 可重构机器人散件

可重构机器人“散件”(即机器人模块化可重构散装零部件的总称)包括运动副、连接件、静平台、动平台、驱动件和连杆等零部件。通过这些“散件”可以拼装出各种各样的机器人支链,通过改变支链的个数、支链的运动副组成及连接静、动平台的顺序可以将机器人从一种构型转变为另外一种构型,如可以重构成3-delta、3-PUU和3-UPU等并联机器人构型。图1为部分创新散件的运动副。



图1 部分机器人散件运动副

Fig. 1 Some of the robot's disassembled motion pairs

1.2 实验系统组成结构

模块化可重构并联机器人机械系统可通过散件组装而成,如图 2 所示。

为了后续平台的可扩充和可重构性,平台在设计之初采用开放式设计的思路,通过改变机器人各支链同静/动平台的连接方式、顺序和更换不同的连接关节,机器人还能够衍生成不同的并联机器人形式,如 6-PSS、3-PUU、3-UPU 等构型。基于数字孪生技术虚实互补的并联机器人实验系统是在 6-SPS 并联机器人基础上研制而成,整个系统包括 6-SPS 并联机器人本体、并联机器人虚拟模型、虚实人机交互系统、通讯与电气等模块,

其原理框架如图 3 所示。



图 2 6-SPS 并联机器人实验系统

Fig. 2 Experimental of 6-SPS parallel robot

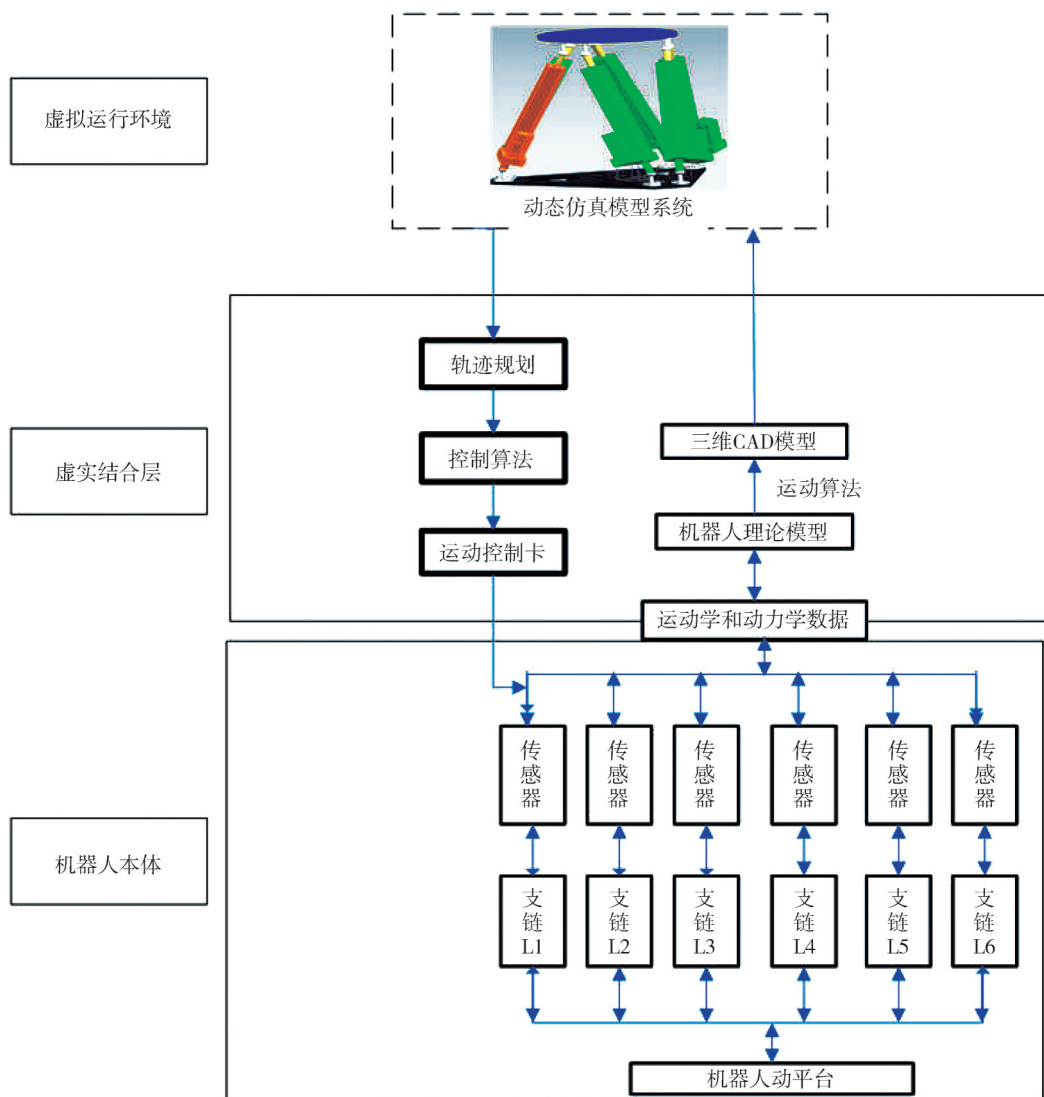


图 3 虚拟仿真实验平台实现原理

Fig. 3 Implementation principle of the virtual simulation experiment platform

1.3 虚实数据的交互

机器人系统可以实时反馈真实环境下的轨迹和传动力矩情况。系统通过各类传感器实时将各驱动杆的位移、速度、加速度和传动力矩的数据以图形和数据的方式输出,做到物理模型和虚拟模型之间的完全统一。机器人本体与虚拟模型三维几何信息尺寸完全一致,其拓扑结构信息作为虚拟样机模型的载体;利用虚拟样机模型来设计和仿真并联机器人的运动学、轨迹规划和动力学,与实物模型相互映射,可以准确表征并联机器人在工作状态下的位姿情况。而虚拟样机的运动学、动力学信息等可以作为机器人实验平台的运动学或者动力输入,用于控制实物机器人。要做到并联机器人本体和虚拟环境各单元之间协同、步调一致,系统要实时准确地获得和传递各单元的数据信息,力求数字虚拟体对物理实体状态的实时读取与监控。机器人实物的一些状态信息如位姿、电机驱动角度、速度和力矩等物理信息将实时地反映在虚拟环境下,显示机器人运行的状态。同时,虚拟环境下得到的仿真数据也能驱动实物进行反向验证。虚实之间的数据传输如图4所示。

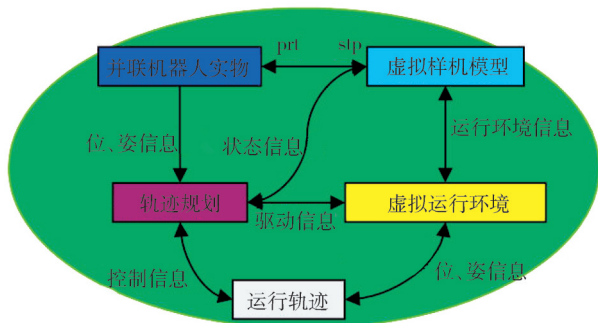


图4 实验台内部模块信息交互关系

Fig. 4 Information relationship among the internal modules

2 虚拟模型的构建

2.1 并联机器人数字模型的建立

基于数字孪生理念,在虚拟系统中构建实际物理系统的数字映像,实现虚实间的数据交互、状态同步等,从而为物理实体的状态监控和运动控制提供了条件。构建数字孪生模型时,首先在三维Nx软件中创建CAD模型(如图5所示);然后导入Adams仿真环境中,两个软件间能够完全兼容,能够做到CAD/CAE同步;最后在虚拟环境中设置虚拟模型的运动参数、运动控制映射关系等。通过固高运动

控制卡实现虚拟环境与物理实体间数据收发、运动控制和运行结果可视化等功能。



图5 虚拟样机模型

Fig. 5 Virtual prototype model

2.2 并联机器人运动学求解

并联机器人6-SPS运动学的本质就是已知机器人位姿 X 的变化,求解每条支链伸缩杆 l_i 的变化。如图6所示,在静平台上建立坐标系 $o_1-x_1y_1z_1$,各支链与静平台链接的球铰中心对称分布在半径为 R 的圆周上。同理,动平台球铰中心对称分布在半径为 r 的圆周上。建立6-SPS并联机器人的第 i 条支链矢量图,支链各矢量的关系如图7所示。

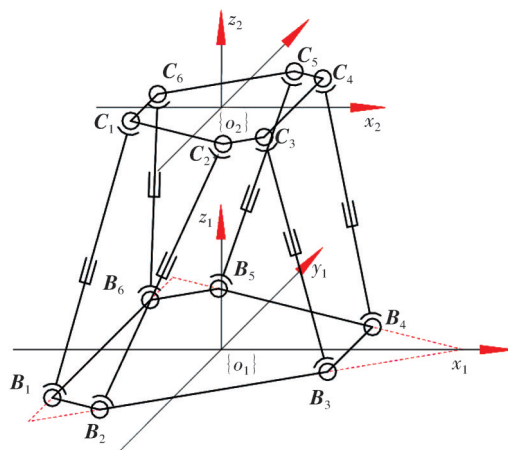


图6 6-SPS并联机构结构简图

Fig. 6 Structural diagram of the 6-SPS PM

建立第 i 条支链的封闭矢量方程

$$L_i = O_1O_2 + O_2C_i - O_1B_i, (i=1, 2, \dots, 6), (1)$$

得到支链的长度

$$L_i = \|B_i - C_i\|, (i=1, 2, \dots, 6), (2)$$

式中: $B_i = [B_{ix}, B_{iy}, B_{iz}]^T$ 为 B_i 在静坐标系下的坐标矢量; $C_i = [C_{ix}, C_{iy}, C_{iz}]^T$ 为 C_i 在静坐标系下的坐标

矢量。

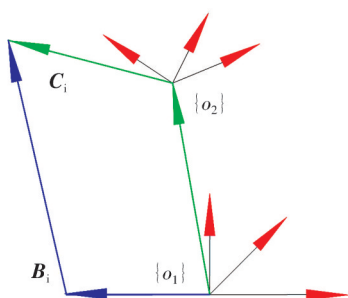


图 7 第*i*条支链动定平台位姿关系

Fig. 7 The pose relationship of the *i*-th limb

$$C_i = [C_{ix}', C_{iy}', C_{iz}']^T \cdot R, (i = 1, 2, \dots, 6), (3)$$

式中: $C_i' = [C_{ix}', C_{iy}', C_{iz}']^T$ 为 C_i 在静坐标系下的坐标矢量; R 为位姿变换矩阵, 以 $Z(\alpha)$ - $Y(\beta)$ - $X(\gamma)$ 欧拉变化表示。

根据机器人位姿变化矩阵将式(1)所表示的矢量转化为静平台下坐标矢量就可以得到各支链的长度, 即为机器人运动学逆解。

式(1)对时间求一阶导就可以得到支链的运动学映射关系矩阵式(4)。

$$\dot{L} = J\dot{X}, (4)$$

式中: $\dot{L} = [\dot{L}_1 \ \dot{L}_2 \ \dot{L}_3 \ \dot{L}_4 \ \dot{L}_5 \ \dot{L}_6]^T$ 为机器人伸缩杆的变化速度; $\dot{X} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ \dot{\gamma}]^T$ 为动平台的变化速度; J 为雅可比矩阵。

$$J = \left[\frac{\partial L_i}{\partial X} \right]. (5)$$

式(4)两边对时间求导, 得到机器人输入和输出的加速度关系式

$$\ddot{L} = J\ddot{X} + \dot{J}\dot{X}. (6)$$

为了验证可重构散件机器人理论和结构设计的合理性对其进行运动学仿真。

2.3 运动学仿真

机器人静平台 $R=300$ mm, 动平台 $r=130$ mm, 伸缩杆的伸缩范围为 $[0, 400]$, 在 6-SPS 并联机器人动平台参考点规划一段运动轨迹如下:

$$\begin{cases} x = 50 \sin \omega t, \\ y = -50 \cos \omega t + 50, \\ z = 80 \sin \omega t, \\ \alpha = 5^\circ \sin \omega t, \\ \beta = 10^\circ \sin \omega t, \\ \gamma = 15^\circ \sin \omega t, \end{cases} \quad \omega = 2\pi/5, t \in [0, 5], (7)$$

式中: 位移的单位 mm; 转角单位为 $(^\circ)$ 。

建立虚拟样机模型, 在 adams 软件环境进行运动学分析, 得到 6 条 SPS 支链中伸缩杆的位移和速度的变化规律, 如图 8~图 10 所示。

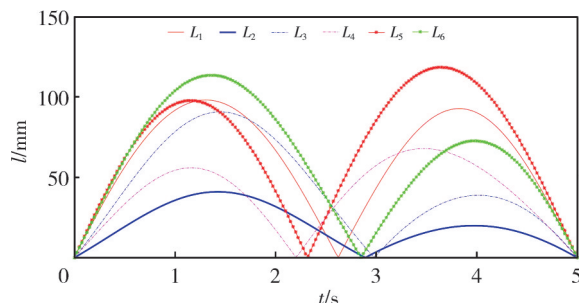


图 8 伸缩杆位移变化曲线图

Fig. 8 Variation curve of telescopic rod displacement

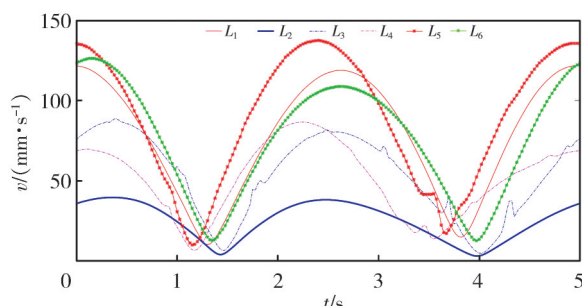


图 9 伸缩杆速度变化曲线图

Fig. 9 Variation curve of telescopic rod velocity

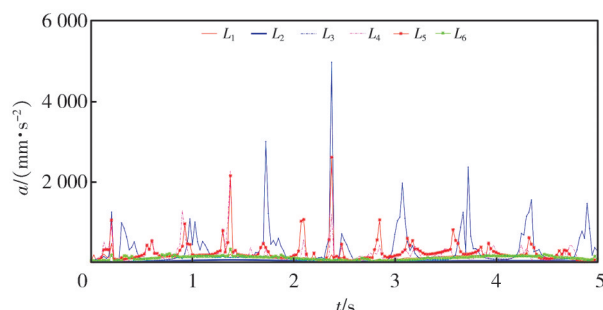


图 10 伸缩杆加速度变化曲线图

Fig. 10 Variation curve of telescopic rod acceleration

根据规划的轨迹和运动学逆解得到的伸缩杆变化规律, 只要驱动各支链的伺服电机按照伸缩杆变化规律运动, 就能在动平台实现所期望的轨迹。在交互软件中嵌入 Matlab 软件, 调用虚拟仿真得到的数据, 按照一定规划方法生成“真实”轨迹驱动程序, 同时显示规划的轨迹。将规划的轨迹翻译成控制系统能够识别的语言。通过控制系统的软件驱动相应的控制硬件, 得到机器人的真实轨迹。

2.4 实验轨迹再现过程

打开机器人控制系统, 给数据采集机器人上电

和复位。进入运动学与动力学数据采集系统(如图 11 所示), 机器人的测量系统完成数据采集, 对采集的

数据进行处理, 去除远离理论曲线的变异点, 将这些数据在软件中与真实轨迹进行“虚实”对比。

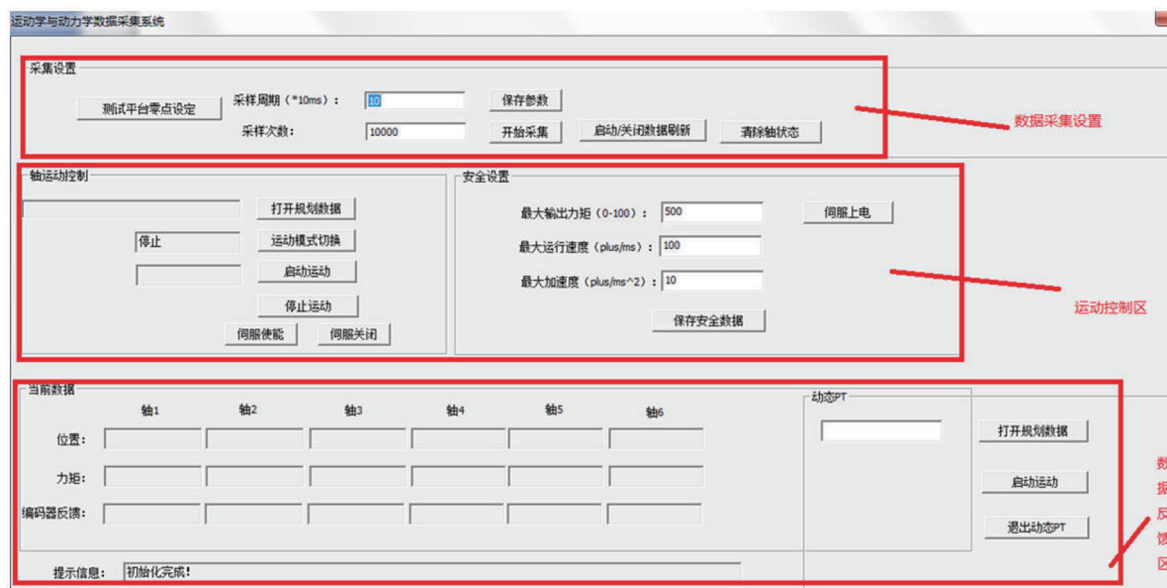


图 11 数据采集界面

Fig. 11 Data acquisition interface

图 12 和图 13 分别为动平台理论规划的轨迹和真实的物理模型运行测量的轨迹, 可以看出理论轨迹与真实运行轨迹一致。

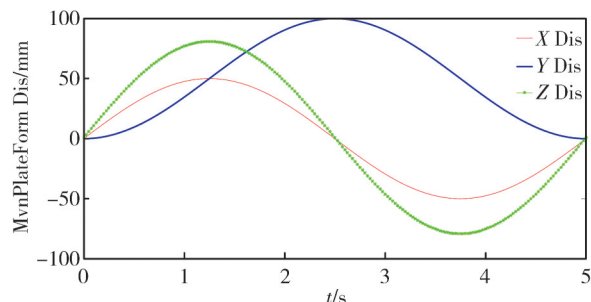


图 12 动平台理论位移输出

Fig. 12 Theoretical displacement output of the moving platform

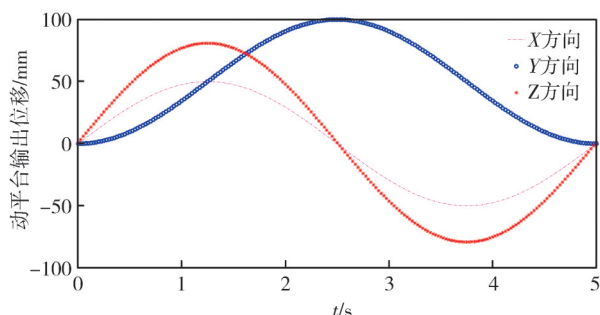


图 13 动平台真实测量位置输出

Fig. 13 Real measured position output of the moving platform

图 14 和图 15 分别为机器人动平台理论姿态变化规律和实验平台运行真实运行的轨迹, 可以看出两者轨迹基本重合。

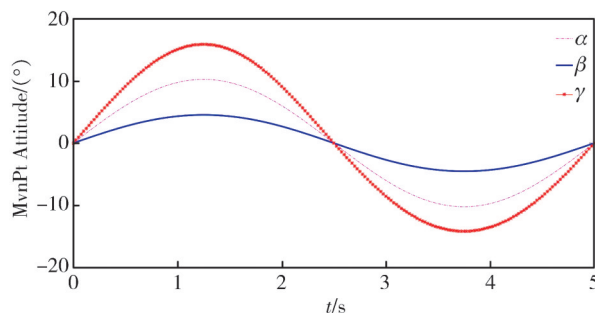


图 14 动平台理论姿态输出

Fig. 14 Theoretical attitude output of the moving platform

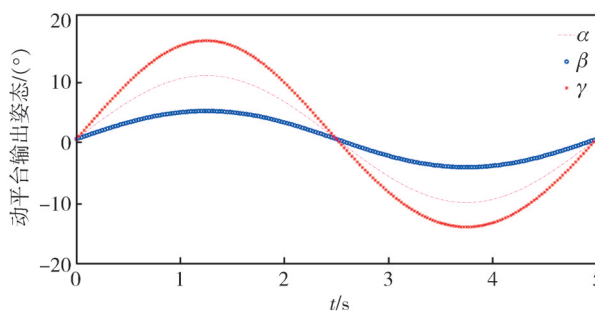


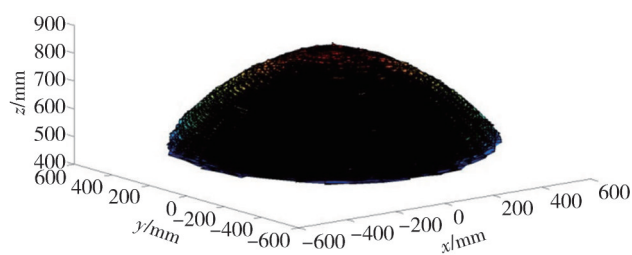
图 15 动平台真实测量姿态输出

Fig. 15 Moving platform real measurement output

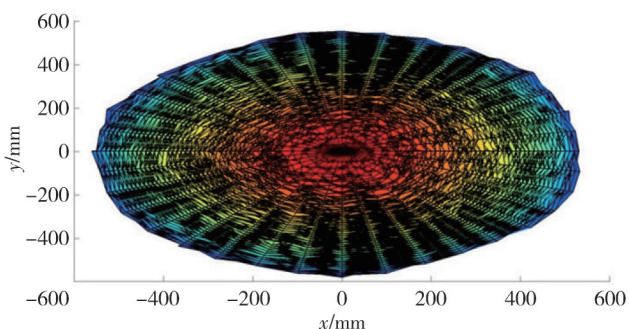
3 可重构并联机器人工作空间分析

机器人的工作空间不仅与杆长和杆件之间的干涉、运动副的活动范围有关, 还与机器人动平台的姿态角有关。考虑所有的约束条件, 得到机器人动平台以任意姿态角所能到达的最大工作空

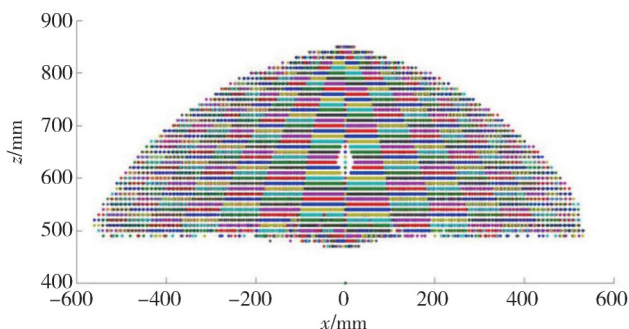
间,如图 16 所示。



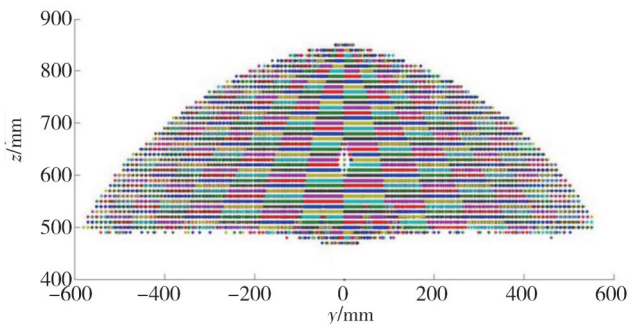
(a) 最大工作空间



(b) xy 平面投影



(c) xz 平面投影



(d) yz 平面投影

图 16 任意姿态角最大可达工作空间

Fig. 16 Maximum achievable workspace for any attitude angle

由图 16(a) 可以看出,随着远离机器人原始姿态,机器人的工作空间逐渐减小,整个工作空间呈现一种规则的圆锥体,机器人在沿 z 轴(500~800 mm)处有较大的工作空间。由图 16(b) 可以看出,沿着 z 轴切割的工作空间在 xy 平面上的工作空间为圆形。由图 16(c) 和图 16(d) 可以看

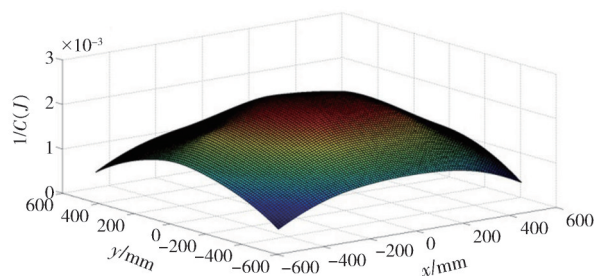
出,在 xz 平面和 yz 平面上的工作空间投影完全一致,说明机器人绕 y 轴和 z 轴的运动性能一样。

4 可重构并联机器人灵巧度分析

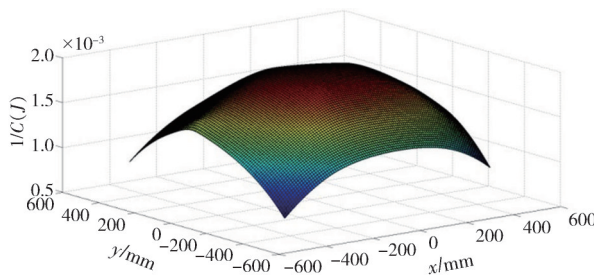
机器人通过若干“散件”重构后,通过灵巧度分析,能够了解机器人的运动学性能,从而辅助机器人系统的重构设计。由工作空间分析可知, $z \in [500 \text{ mm}, 800 \text{ mm}]$ 时工作空间最大,取此空间为分析区域,分别考虑定姿态下和任意姿态下的灵巧度。评价机器人运动学性能的指标很多,比较常见的为雅可比矩阵条件数倒数,该指标数值越大代表机构的运动学性能越好。

4.1 定姿态下的条件数倒数

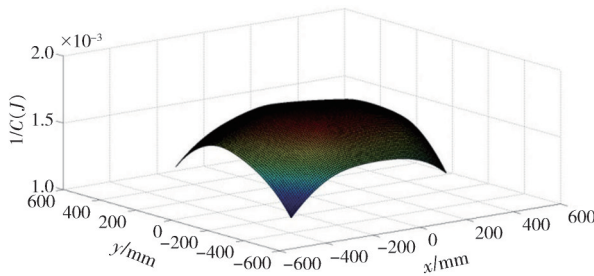
当可重构并联机器人以固定姿态 $\alpha=0, \beta=0, \gamma=0$ 在工作空间执行作业时,分别取 $z=500, 600, 700, 800 \text{ mm}$ 时,对其进行灵巧度分析,得到不同 z 值时的条件数倒数分布图,如图 17 所示。



(a) $z=500 \text{ mm}$



(b) $z=600 \text{ mm}$



(c) $z=700 \text{ mm}$

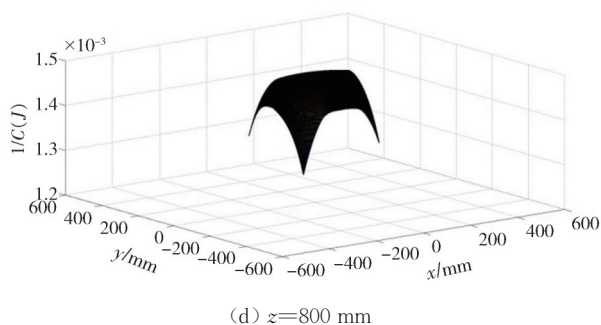


图 17 定姿态时的条件数倒数

Fig. 17 Reciprocal condition number for fixed attitude

由图 17 可知, 定姿态条件下在工作空间中心处的运动学性能要优于远离中心处的性能。因此, 在工作空间沿 z 轴剪切面的中心处, 执行器更容易操作。

4.2 任意姿态下的条件数倒数

当可重构并联机器人以任意姿态 $(\alpha, \beta, \gamma) \in [-60^\circ, 60^\circ]$ 在工作空间执行作业时, 分别取 $z=500, 600, 700, 800$ mm 时, 对其进行灵巧度分析, 得到不同 z 值时的条件数倒数分布图, 如图 18 所示。

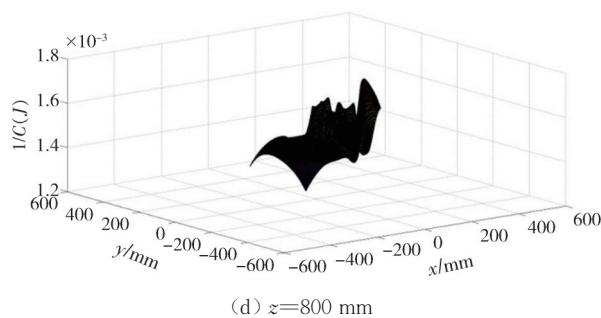


图 18 任意姿态时的条件数倒数

Fig. 18 Reciprocal of conditions at any pose

由图 18 可知: 当 $z=500$ mm 和 $z=600$ mm 时, 机器人有较好的运动学性能, 且运动学性能分布比较均衡; 当 $z=700$ mm 和 $z=800$ mm 时, 条件数倒数有所降低, 执行器的运动学性能有所降低。

对比定姿态和任意姿态机器人的运动学性能可知, 任意姿态的平均条件数倒数数值要大于固定姿态对应 z 轴坐标系下的值, 因此以任意姿态下的运动学性能要优于固定姿态时的运动学性能。在两种情形下, 随着 z 值的增加执行器的运动学性能有所降低。

5 结 论

本文基于模块化可重构机器人散件, 在 Adams 平台上采用数字孪生技术设计了一种虚实结合的实验系统。该实验平台将基于可重构理论的机器人散件组装成六自由度经典的 6-SPS 并联机器人平台, 建立了经典构型的运动学逆解理论模型, 得到了机构的雅可比矩阵; 通过规划一段轨迹, 对运动学反解进行了仿真和实物验证, 得出驱动杆的位移、速度和加速度的变化规律曲线; 根据约束条件, 得到机器人最大可达工作空间; 分别计算出机器人在定姿态下和变姿态下条件数倒数在工作空间的分布规律, 得出机构的灵巧度的分布规律。通过使用该实验系统有助于提高学生的创新能力和综合运用多学科知识解决复杂工程问题的能力。

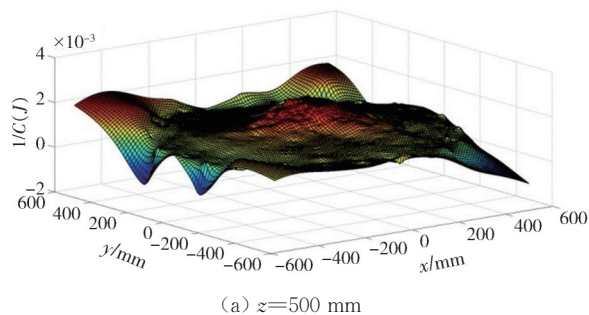
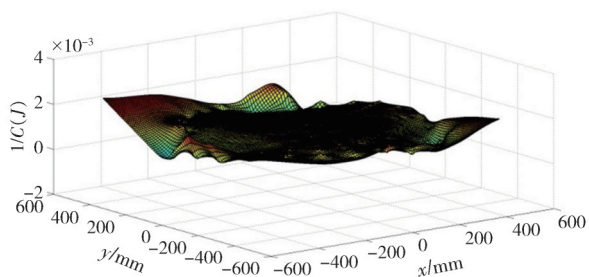
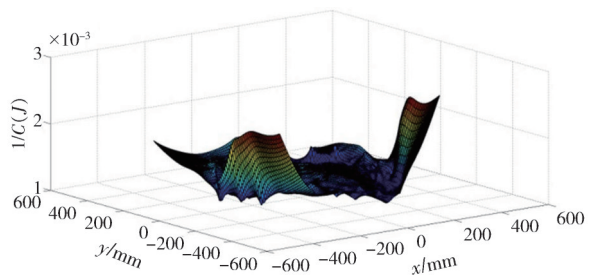
利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 王鹏家, 朱昱硕, 彭宝营, 等. 6SPS 型并联机床铣削参数优化[J]. 机床与液压, 2024, 52(17): 82-86.
Wang Pengjia, Zhu Yushuo, Peng Baoying, et al. Optimization of milling parameters for 6SPS-type parallel machine tool[J]. Machine Tool & Hydraulics,

(a) $z=500$ mm(b) $z=600$ mm(c) $z=700$ mm

- 2024, 52(17): 82-86. (in Chinese)
- [2] Fujimoto K, Fujimoto H, Isaoka Y, et al. High precision control for twin-drive machine tool based on mode decoupling with virtual viscosity[J]. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 2025, 30(4): 3054-3062.
- [3] Mu C Y, Lü M, Ge Z. Experimental investigation of influencing factors of surface roughness engraved by CNC engraving machine[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 159: 122-126.
- [4] Zhang Q S, Li R Q, Liang J J. Dynamics analysis of a modular reconfigurable parallel robot[C]//Mechanism and Machine Science, 2017: 1069-1082.
- [5] Cai Y L, Xu H K, Wang Y F, et al. Modular self-reconfigurable continuum robot for general purpose loco-manipulation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2025, 10(2): 1976-1983.
- [6] Liang G Q, Wu D, Tu Y X, et al. Decoding modular reconfigurable robots: a survey on mechanisms and design[J]. International Journal of Robotics Research, 2025, 44(5): 740-767.
- [7] 熊雪平, 戴春祥, 史桂蓉. NX 机电一体化概念设计系统的研究与应用[J]. 计量与测试技术, 2016, 43(12): 9-11.
Xiong Xueping, Dai Chunxiang, Shi Guirong. Research and application of mechatronics concept designer in NX [J]. Metrology & Measurement Technique, 2016, 43(12): 9-11. (in Chinese)
- [8] 杨亮, 邓伟俊, 沈慧, 等. 多机器人系统虚拟仿真实验教学平台设计与实现[J]. 现代电子技术, 2025, 48(14): 147-153.
Yang Liang, Deng Weijun, Shen Hui, et al. Design of virtual simulation experimental teaching platform for multi-robot system and its implementation[J]. Modern Electronics Technique, 2025, 48(14): 147-153. (in Chinese)
- [9] 韩亚辉, 王琢, 刘佳鑫, 等. 森林防火机器人的研究现状与发展趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2020, 48(3): 4-9.
Han Yahui, Wang Zhuo(Zuo), Liu Jiaxin, et al. Research status and development trend of forest fire protection robots [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2020, 48(3): 4-9. (in Chinese)
- [10] 王飞龙, 李小兵, 王翠, 等. 虚实结合的机械臂视觉抓取实验平台设计[J]. 工业和信息化教育, 2025(10): 71-76.
- [11] 林润泽, 王行健, 冯毅萍, 等. 基于数字孪生的智能装配机械臂实验系统[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(12): 83-88.
- Lin Runze, Wang Xingjian, Feng Yiping, et al. Experimental system of intelligent assembly manipulator based on digital twin[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2019, 38(12): 83-88. (in Chinese)
- [12] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
Tao Fei, Liu Weiran, Liu Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18. (in Chinese)
- [13] Schroeder G N, Steinmetz C, Pereira C E, et al. Digital twin data modeling with AutomationML and a communication methodology for data exchange[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(30): 12-17.
- [14] 陆康, 武嘉年, 李红. 基于 Unity3D 的 UR5e 协作机器人的数字孪生系统[J]. 绿色科技, 2022, 24(12): 247-251.
Lu Kang, Wu Jianian, Li Hong. Digital twin systems of UR5e collaborative robot based on Unity3D [J]. Journal of Green Science and Technology, 2022, 24(12): 247-251. (in Chinese)
- [15] 董靖川, 谭志兰, 武晓鑫, 等. 并联机器人数字孪生实验系统设计[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(7): 142-147.
Dong Jingchuan, Tan Zhilan, Wu Xiaoxin, et al. Design of digital-twin experiment system for parallel robot[J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(7): 142-147. (in Chinese)
- [16] 孟庆森, 张宏伟, 王新环. 基于 SIMIT 和 MCD 的并联机器人数字孪生实验系统设计[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(6): 135-141.
- Meng Qingsen, Zhang Hongwei, Wang Xinhuan. Design of digital twin experiment system for parallel robot based on SIMIT and MCD[J]. Experimental Technology and Management, 2023, 40(6): 135-141. (in Chinese)
- [17] 李公文. 基于数字孪生的机器人综合实验系统研究[J]. 电脑编程技巧与维护, 2023(3): 124-126.
- [18] 李福, 吴益飞, 孔维一, 等. 数字孪生趋势下机器人虚拟仿真实验建设[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(10): 265-268.
- Li Fu, Wu Yifei, Kong Weiyi, et al. Construction of robot virtual simulation experiment under trend of digital twinning[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(10): 265-268. (in Chinese)

(下转第 448 页)