

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.052

X 射线移动平台柔性机械臂姿态单一轨迹高精度控制方法

张朝

(首都医科大学附属北京妇产医院, 北京 100026)

摘 要: X 射线源扫描路径输出过程中存在意外抖动干扰和多轨迹最优选择的问题, 容易降低柔性机械臂控制效果。因此, 在考虑抖动抑制的基础上提出 X 射线移动平台柔性机械臂姿态单一轨迹高精度控制方法。根据柔性机械臂结构获取机械臂动力学方程, 使用小波变换对柔性机械臂干扰抖动偏差数据进行去噪处理, 实现抖动抑制。对去噪后的柔性机械臂多轨迹姿态数据进行融合处理, 形成单一轨迹。根据融合系数和偏移误差建立柔性机械臂姿态单一轨迹约束条件, 调节机械臂角速度和姿态角, 实现 X 射线移动平台柔性机械臂姿态的高精度控制。实验结果表明: 该控制方法能够有效地提高 X 射线移动平台柔性机械臂的轨迹跟踪性能和姿态控制精度。

关键词: X 射线移动平台; 柔性机械臂; 姿态控制; 单一轨迹; 抖动抑制; 数据融合

中图分类号: TP241.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)02-0266-05

High-precision Control Method for Single Trajectory of Flexible Manipulator of X-ray Mobile Platform

ZHANG Chao

(Beijing Obstetrics and Gynecology Hospital, Capital Medical University, Beijing 100026, China)

Abstract: For the reduced control effect of flexible mechanical arm caused by accidental jitter interference and multi-trajectory optimal selection in the path output, the high precision control method of single trajectory attitude of flexible mechanical arm of X-ray mobile platform considering jitter suppression is proposed. According to the structure of the flexible arm, the dynamic equation is obtained, and the wavelet transform is used to denoise the interference and jitter deviation data of the flexible arm to realize jitter suppression. The multi-trajectory pose data is fused to form a single trajectory. According to the fusion coefficient and deviation error, the single trajectory constraint of the flexible arm attitude is established, and the Angle velocity and attitude of the arm are adjusted realizing the high precision control of the flexible arm attitude of the X-ray mobile platform. The experimental results show that the proposed method can effectively improve the trajectory tracking performance and attitude control accuracy of the flexible manipulator of X-ray mobile platform.

Keywords: X-ray moving platform; flexible manipulator; attitude control; single trajectory; jitter suppression; data fusion

0 引言

当前医疗智能化机器人的控制精度、操作稳定性和运动控制能力均得到了极大的改进, 使得医疗机器人能够更加准确地完成医疗任务^[1]。柔性机械臂作为医疗智能化机器人中的重要组成部分^[2], 与 X 射线移动平台结合后, 在不同 X 射线源的扫描路径规划和控制方面具有巨大潜力。但是, 由于柔性机械臂自身的结构特性, 在路径输出过程中可能会产生不可忽视的抖动, 这种抖动会造成柔性机械臂控制失稳, 对 X 射线移动平台的路径输出产生负面影响, 造成扫描结果存在误差。

同时, 在 X 射线移动平台应用中, 柔性机械臂姿态存在多个轨迹可供选择, 不同轨迹之间的优劣并不明确, 容易影响控制效果。

曹燕等^[3]提出柔性双臂医疗机器人无传感器零力控制算法研究, 通过建立机器人动力学模型对高频噪声驱动器数据进行滤波, 采用切比雪夫拟合法辨识摩擦力模型补偿加减速过程中的摩擦力, 完成医疗机器人柔性双臂姿态控制。但是, 该方法未考虑柔性机械臂姿态多轨迹选择问题, 所以方法的综合效果有待验证。张智豪等^[4]提出空间机器人机械臂无扰快速终端滑模控制方法, 利用拉格朗日第二类方程建立空间机械臂动力学模

基金项目: 2018 年首都医科大学附属北京妇产医院管理专项课题项目 (FCYYGL201808)

作者简介: 张朝 (1987—), 男, 北京人, 工程师, 本科, 研究方向为大型设备配置许可及分析、大型设备预控评质控、医疗设备维护保养质控巡检等, 15010203511@163.com。

型,根据反作用零空间数学模型获取无扰动期望轨迹,采用变系数双幂次趋近率弥补死区特性,完成空间机械臂姿态无扰控制。但是,该方法仅从反作用力与力矩角度分析机械臂扰动,未考虑抖动扰动问题,所以该方法无扰控制精度有待提高。PAVLICHENKO 等^[5]提出前向动力学学习模型的柔性关节机械臂轨迹跟踪方法,采用正向动态未来预测器和反向动态估计器组成两阶段模型,基于非线性动力学算子逼近机器人机械臂前馈关节位置和速度指令,完成柔性关节机械臂轨迹跟踪。但是,该方法未对机械臂进行抖动抑制,容易影响机械臂轨迹跟踪效果。

基于此,本文提出 X 射线移动平台柔性机械臂姿态单一轨迹高精度控制方法。通过小波变换对柔性机械臂多轨迹抖动进行抑制,采用扩展卡尔曼滤波方法融合去噪后的姿态数据,使姿态形成单一轨迹。根据柔性机械臂姿态单一轨迹约束条件,实现 X 射线移动平台柔性机械臂姿态的高精度控制,以期在柔性机械臂在医学影像领域的应用开辟更加广阔的空间,为医疗智能化机器人的发展做出积极贡献。

1 柔性机械臂姿态高精度控制方法

1.1 基于小波变换的柔性机械臂抖动抑制

柔性机械臂由多个关节和连接件组成,其结构具有一定的复杂性。在机械臂控制过程中,通过对每个关节进行力矩控制,可以实现不同姿态运动^[6-7]。以 4 自由度柔性机械臂作为研究对象建立柔性机械臂动力学方程,描述机械臂在运动过程中的姿态行为。4 自由度柔性机械臂简易物理模型如图 1 所示。

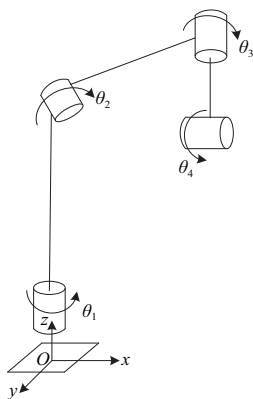


图 1 柔性机械臂物理模型示意图

根据图 1 可知, $(O-xyz)$ 表示底部浮动坐标

系, θ 表示机械臂各关节转动角度。

设定柔性机械臂广义模态坐标矢量为 $\mathbf{m}_j$, 建立柔性机械臂动力方程:

$$\mathbf{w}(x, t) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p \mathbf{m}_j U_k \dot{q}_v \dot{q}_a - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p \mathbf{m}_j U_k \dot{q}_v \dot{q}_a \quad (1)$$

式中: n 表示采样次数; p 表示机械臂关节数; U_k 表示 k 关节机械臂的臂展范围; $\dot{q}_v$ 表示速度; $\dot{q}_a$ 表示加速度。

X 射线源扫描路径输出涉及柔性机械臂的位置和姿态控制, X 射线移动平台柔性机械臂结构如图 2 所示。

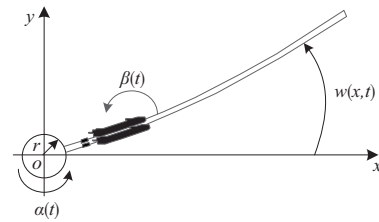


图 2 柔性机械臂混合坐标二维示意图

根据图 2 所示, $\alpha(t)$ 表示机械臂的电机驱动角位移系数, $\beta(t)$ 表示力矩, $w(x, t)$ 表示柔性机械臂横向弯曲振动位移系数, r 表示最大作用半径。

由于机械臂内部的动力学因素, 路径输出过程容易产生抖动现象。机械臂 i 阶模态抖动函数为

$$\zeta_i(x) = w(x, t) (\cos \chi_i - \cosh x) + \delta (\sin \chi_i - \sinh x) \quad (2)$$

式中: χ_i 表示柔性机械臂 i 阶模态等效特征频率值; δ 表示特征参数^[8]; $\cosh x$ 表示双曲余弦函数; $\sinh x$ 表示双曲正弦函数; $\sin \chi_i$ 、 $\cos \chi_i$ 分别表示正弦函数与余弦函数。

设定 I_b 为柔性机械臂运行过程中关节与轮毂之间的等效转动惯量, 获取 X 射线源扫描路径输出时产生的干扰抖动偏差:

$$Y = \frac{\zeta_i(x) I_b \sigma}{Nd} \quad (3)$$

式中: I_b 表示机械臂与制动器之间等效惯量; σ 表示工作行程; N 表示减速器比值; d 表示机械臂最小直径。

小波变换具有较强的时频局部化特性, 选择合适的小波基函数对柔性机械臂干扰抖动偏差数据进行去噪处理, 消除机械臂抖动数据中的噪声干扰。采用 Meyer 小波基函数设计柔性机械臂抖动抑制函数:

$$\tau_n(t) = \cos\left\{\frac{\pi}{2}\beta(t)\left[Y\frac{q(t)}{2}(1-\tau)^2\right]\right\} \quad (4)$$

式中: $q(t)$ 表示柔性机械臂状态数据; τ 表示小波系数中的平移参数。

1.2 柔性机械臂姿态轨迹融合

在柔性机械臂姿态控制中,关节或末端执行器可能会发生突变,导致柔性机械臂动态运行过程中可能存在多条姿态轨迹,对轨迹进行融合处理可以平滑过渡不同路径之间的连接、提供更灵活的轨迹规划和控制。因此,对去噪后的柔性机械臂多轨迹姿态数据进行融合处理,形成单一轨迹,为后续机械臂角速度和姿态角的调控提供基础参考,从而减小姿态轨迹控制误差。

鉴于柔性机械臂具有非线性的动力学特性和姿态变化特征。在考虑系统动态变化的基础上,通过状态空间模型融合柔性机械臂多轨迹姿态数据^[9-10]。柔性机械臂运动描述如图3所示。

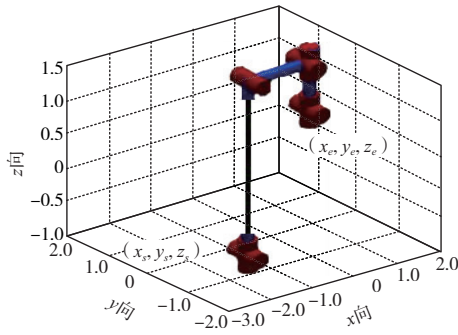


图3 柔性机械臂运动三维示意图

为了便于多姿态轨迹的数据融合处理,利用近似函数来估计未知的多轨迹数据点,将估计值作为原始数据近似值,为后续柔性机械臂多轨迹姿态分析和控制决策提供数据支撑。具体的近似函数表达为

$$\varpi_n(t) = \frac{\eta[\tau_n(t), \theta_n(t)]}{\psi(c_s, u_s)} \quad (5)$$

式中: η 表示细节系数; $\theta_n(t)$ 表示经验尺度函数; c_s 表示傅里叶变换; u_s 表示逆变换; ψ 表示轴工作范围。

将得到的估计值看作离散数据,通过对每个原始的轨迹姿态数据进行时间缩放,得到 j 次采样下待融合的多个轨迹 $W(j, k)$:

$$\begin{cases} f_n = \varpi_n(t)[w(x, t)c(n) + e(n)] \\ W(j, k) = 2^{-j/2} \sum_{n=1}^{N-1} f_n \varepsilon(2^{-j}n) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $c(n)$ 表示柔性机械臂最大总负载; $e(n)$ 表

示柔性机械臂姿态偏移量; f_n 表示经过时间缩放的轨迹数据。

对姿态轨迹数据标准化融合处理,得到单一轨迹结果:

$$x_m = \frac{aW(j, k) - Z_m}{Q_m} \quad (7)$$

式中: x_m 表示姿态数据的标准化单一轨迹结果; a 表示融合系数; Z_m 表示姿态轨迹数据均值; Q_m 表示数据标准差。

1.3 基于多轨迹数据融合的柔性机械臂姿态约束控制

将多轨迹数据融合后,根据融合系数和偏移误差建立柔性机械臂姿态单一轨迹约束条件,调节机械臂角速度和姿态角,实现X射线移动平台柔性机械臂姿态的高精度控制。具体约束条件表达式为

$$\begin{bmatrix} \theta(n+1) \\ \phi(n+1) \\ \omega(n+1) \\ \sigma(n+1) \end{bmatrix}' = \frac{x_m(G_{1\varpi} + G_{2\varpi})}{T_{\varpi} + x_m} \begin{bmatrix} \theta(n+1) \\ \phi(n+1) \\ \omega(n+1) \\ \sigma(n+1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: ϕ 表示采集数据获取的机械臂位姿角度值; θ 表示采集数据获取的角速度姿态角; ω 表示设备采集数据输出值; σ 表示偏移误差; T_{ϖ} 表示数据拟合周期; $G_{1\varpi}$ 、 $G_{2\varpi}$ 表示融合系数。

利用CAN-BUS模块对多轨迹数据融合的柔性机械臂姿态约束控制数据进行传输,提高机械臂姿态控制精度,实现X射线移动平台柔性机械臂姿态自动调节。

2 实验与分析

2.1 实验准备

为了验证X射线移动平台柔性机械臂姿态单一轨迹高精度控制方法的有效性和可靠性,选择4自由度柔性机械臂模拟动脉剥离手术,获取将人造血管从组织中钝性分离过程中的柔性机械臂控制数据。实验室内设置一个X射线移动平台,该平台搭载了可编程控制器(PLC)和X射线源,通过预先设定的路径将X射线源移动到指定位置。在X射线移动平台上安装4自由度柔性机械臂,模拟动脉剥离手术过程,反馈机械臂的位置和姿态信息,实现对机械臂姿态控制。实验现场环境如图4所示。

通过PLC设定X射线移动平台柔性机械臂姿态轨迹,启动X射线移动平台按照预定条件输

出 X 射线源扫描路径,融合多轨迹数据并记录机械臂的位置和姿态变化。柔性机械臂参数如表 1 所示。

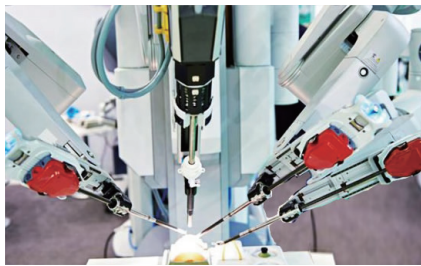


图 4 实验现场示意图

表 1 柔性机械臂相关参数

参数	数值
初始位置/mm	(-1 100, 200, 520)
终点位置/mm	(1 000, 210, 700)
臂展范围/mm	2 200~3 000
最大作用半径/mm	800
最小直径/mm	2.3
工作行程/mm	620
最大总负载能力/kg	8.4
轴 1 工作范围/(°)	± 180

根据表 1 参数,完成实验测试。具体实验步骤为:

步骤 1,设置 X 射线移动平台柔性机械臂姿态的初始位置和运动轨迹等参数;

步骤 2,通过高精度位置传感器采集手术模拟过程中的机械臂位置和姿态信息;

步骤 3,调整控制算法参数,对机械臂姿态进行高精度控制,直到完成 X 射线源扫描路径抖动抑制测试、柔性机械臂姿态多轨迹融合测试、柔性机械臂姿态控制精度测试;

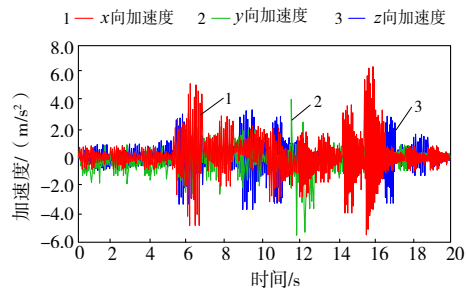
步骤 4,收集并分析测试数据,评估控制算法和性能。

2.2 实验测试结果

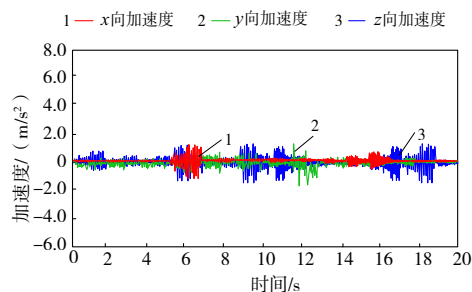
1) X 射线源扫描路径抖动抑制测试

在医疗领域 X 射线系统广泛应用于图像检测和分析。在 X 射线移动平台中,精确控制机械臂的姿态非常重要,以保持扫描路径的稳定性,从而获得清晰的手术图像。抖动是机械臂姿态发生微小变化的现象,会影响图像的清晰度和准确性。因此,有效抑制抖动是高精度控制的一个关键方

面。设置运动时间为 20 s,关节角速度为 1 rad/s,分别获取 x 向、 y 向、 z 向运动后的机械臂末端加速度,幅值变化越小表明机械臂末端抖动抑制效果越优,具体结果如图 5 所示。



(a) 优化前机械臂末端抖动情况



(b) 优化后机械臂末端抖动情况

图 5 柔性机械臂末端抖动结果

根据图 5 可知,采用本文方法优化后的柔性机械臂抖动抑制效果较好, x 、 y 、 z 各向的加速度幅值均有不同程度的下降。通过图 5(a) 可知,5.8~17 s 时段内柔性机械臂抖动最剧烈,此时段柔性机械臂正在进行人造血管与组织分离动作,由于血管和组织之间的摩擦力以及机械臂自身的力矩导致工作负载,增加了加速度,从而引起抖动。通过图 5(b) 可知,采用本文方法优化后的柔性机械臂抖动幅值明显减小,在 $\pm 1.5 \text{ m/s}^2$ 之间变化且逐渐趋于平稳。这是因为本文方法使用小波变换计算柔性机械臂干扰抖动偏差数据,进而对柔性机械臂人造血管与组织分离动作过程中的数据进行去噪处理,以此降低抖动幅值的剧烈变化。由此说明,本文方法可以有效抑制 X 射线移动平台柔性机械臂抖动。

2) 柔性机械臂姿态多轨迹融合测试

在高精度控制中,准确地控制机械臂的姿态可以提高机械臂的平稳性和准确性。通过将 X 射线移动平台柔性机械臂姿态多轨迹融合为单一轨迹,减少机械臂在运动过程中的协同误差,降低姿态误差和波动性,提高机械臂的整体协同效率,从而实现高精度控制。采用本文方法优化前后的机械臂末端姿态轨迹运行结果如图 6 所示。

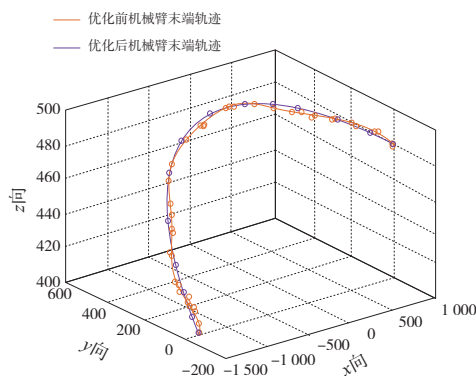


图6 柔性机械臂末端姿态轨迹运行结果

根据图6可知,采用本文方法优化后的机械臂末端姿态轨迹在整个运动过程中呈现平缓变化趋势,且相邻时间点之间的姿态变化量相对平稳,不存在明显的波动点,提高了机械臂末端姿态轨迹顺畅性。

为了进一步验证柔性机械臂姿态多轨迹融合效果,以姿态误差、融合结果平均误差、融合结果方均根误差作为评估指标,量化评估柔性机械臂姿态多轨迹融合效果,如表2所示。

表2 柔性机械臂姿态多轨迹融合结果

指标	优化前多轨迹结果	优化后多轨迹结果
姿态误差	0.44	0.17
融合结果平均误差	0.37	0.11
融合结果方均根误差	0.48	0.19

根据表2可知,本文方法柔性机械臂姿态多轨迹融合效果较优,降低了融合结果平均误差、融合结果方均根误差,以此提高机械臂平稳性。这是因为本文方法采用扩展卡尔曼滤波对机械臂的姿态进行非线性状态转移建模,通过不断更新卡尔曼增益修正机械臂姿态,从而适应不同速度、不同弯曲程度和不同运动特征的姿态轨迹数据的融合需求,以此提高柔性机械臂姿态多轨迹融合效果。

3) 柔性机械臂姿态控制精度测试

柔性机械臂姿态由各关节位移决定,通过分析关节位移的变化曲线,可以评估姿态控制的精度和平稳性,从而实现高精度控制。设定动脉剥离手术过程中的机械臂运动轨迹,设置柔性机械臂关节速度为 10 m/s ,节点平均加速度为 12.47 m/s^2 ,设计动作轨迹重复测试。将执行动作轨迹时的机械臂各关节位移进行均值处理,获取各关节位移曲线。柔性机械臂关节位移曲线越

平缓且保持在目标范围内,则表明机械臂姿态控制精度越高,具体结果如图7所示。

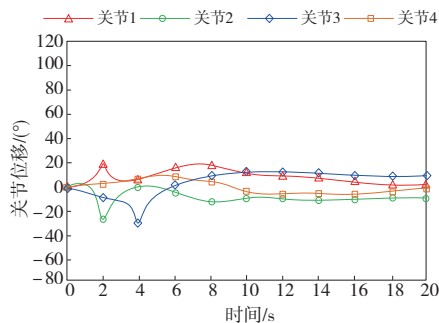


图7 柔性机械臂各关节位移变化曲线

根据图7可知,模拟手术过程中柔性机械臂各关节位移变化幅度较小,运动过程中没有出现较大震荡,在 $-30^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间变化且逐渐趋于平缓。这是因为本文方法建立柔性机械臂姿态单一轨迹约束条件,将机械臂姿态控制过程限制在单一轨迹上,有效约束机械臂角速度和姿态角。通过位姿控制使柔性机械臂的运动更加平缓,进而减少了快速变化带来的位移跳跃,降低位移变化幅度。

3 结语

本文提出了一种针对X射线移动平台的柔性机械臂姿态单一轨迹高精度控制方法。基于对柔性机械臂结构及其动力学方程的理解,分析X射线源扫描路径输出干扰抖动,采用小波变换对干扰抖动偏差进行去噪处理,并利用扩展卡尔曼滤波方法对多轨迹姿态数据进行融合处理,形成单一轨迹。在此基础上建立柔性机械臂姿态单一轨迹约束条件,通过调节机械臂角速度和姿态角实现高精度的机械臂姿态控制。实验结果表明:本文方法可以有效抑制干扰抖动,提高姿态控制精度。在未来研究中,将结合本文研究结果进一步探索更优化的控制算法和姿态估计方法,以提高机械臂的响应速度和适应能力。同时,也将结合更多的应用场景,拓展该方法在医疗领域的应用范围。

参考文献:

- [1] 张宇,刁亚楠,梁升云,等. 认知—运动康复医疗机器人应用设计[J]. 信息与控制, 2021, 50(6): 740-747, 760.
- [2] 程龙,刘泽宇. 柔性触觉传感技术及其在医疗康复机器人的应用[J]. 控制与决策, 2022, 37(6): 1409-1432.

(下转第275页)

从图4中看到,在运行轨迹控制过程中,拖缆机器人的实际轨迹与期望轨迹几乎重合,说明本文方法能够成功地将拖缆机器人引导到预定的路径上,实现了目标控制效果,且具有较高的精度。

4 结语

为了有效地完成煤矿电力设备拖缆机器人的自主控制,提出基于多传感信息融合的煤矿电力设备拖缆机器人自主控制方法。利用多传感信息融合策略辅助完成巡检工作。通过多传感信息融合,计算出机器人当前方位与偏航角信息,利用卡尔曼滤波进行位置校正,使本文方法具备更优的机器人自主控制能力。测试结果表明本文方法获得较为精准的控制结果。在接下来的研究中,伴随设备更新换代,引入深度学习等算法,在更复杂的煤矿环境下也能避免出现控制失败的情况,为煤矿企业的稳定发展发挥更大作用。

参考文献:

- [1] 黎荣华,汪双,张华.空地协同机器人目标定位方法[J].计算机工程与应用,2022,58(20):305-310.
- [2] 金书奎,寇子明,吴娟.煤矿水泵房巡检机器人路径规划与跟踪算法的研究[J].煤炭科学技术,2022,50(5):253-262.
- [3] 胡琴,赵一亭,夏方平,等.基于Soft-Actor-Critic算法的机器人局部路径规划算法[J].武汉理工大学学报,2021,43(9):79-84.
- [4] 胡钊政,许聪,周哲,等.基于规划路径约束的机器人定位方法[J].电子与信息学报,2022,44(11):3941-3950.
- [5] 廖志涵,吴锋.基于人工路标的易部署室内机器人全局定位系统[J].计算机应用研究,2021,38(9):2741-2745.
- [6] 刘目坤,张飞斌,王天杨,等.多质心有限质点法及其在工业机器人动力学建模的应用[J].振动与冲击,2022,41(18):1-8.
- [7] 王保民,齐湛江,闫瑞翔,等.基于随机权重粒子群算法的SCARA机器人动力学参数辨识[J].西安交通大学学报,2021,55(9):20-27.
- [8] 王立玲,李森,马东.基于单目稀疏法多传感器融合移动机器人定位[J].机床与液压,2021,49(24):17-22.
- [9] 华洪涛,马宏伟,毛清华,等.基于捷联惯导和推移油缸信息融合的智能掘进机器人位姿测量方法[J].煤炭工程,2021,53(11):140-145.
- [10] 崔海华,漏华铨,田威,等.轨道式爬行机器人制孔基准的视觉高精度定位[J].光学学报,2021,41(9):179-188.
- [11] 班朝,任国营,王斌锐,等.融合加权SVD算法的工业机器人运动学标定[J].计量学报,2021,42(9):1128-1135.
- [12] 孟媛,秦云川,蔡宇辉,等.一种用于RPA系统的DOM对象快速搜索与定位算法[J].计算机科学,2022,49(10):252-257.
- [13] 黄山,黄洪钟,曾奇,等.一种室内高动态环境的机器人定位方法[J].电子科技大学学报,2021,50(3):382-390.
- [14] 王红梅,陈冬.多传感器数据融合下机器人路径分段规划仿真[J].计算机仿真,2021,38(10):349-352,418.

收稿日期:2023-06-20

(上接第270页)

- [3] 曹燕,尚万峰,张潇云.柔性双臂医疗机器人无传感器零力控制算法研究[J].机械设计与制造,2021(4):293-295,300.
- [4] 张智豪,于潇雁.存在关节死区的空间机器人无扰快速终端滑模控制[J].力学学报,2022,54(3):777-785.
- [5] PAVLICHENKO D,BEHNKE S.Flexible-joint manipulator trajectory tracking with two-stage learned model utilizing a hardware forward dynamics prediction[J].International Journal of Semantic Computing,2022,16(3):403-423.
- [6] 谭加林,肖正明,伍星,等.柔性关节机械臂轨迹规划及振动抑制研究[J].机械科学与技术,2023,42(4):504-511.
- [7] 欧劲松,李蓉,尹辉,等.基于奇异摄动的柔性关节机械臂约束跟随控制研究[J].应用数学和力学,2023,44(5):513-524.
- [8] 潘昌忠,罗晶,李智靖,等.平面欠驱动柔性机械臂的PSO轨迹优化与自抗扰振动抑制[J].振动与冲击,2022,41(14):181-189.
- [9] 岳胜杰,王红旗,刘群坡,等.结合扩展卡尔曼滤波与基于点线的最近点迭代扫描匹配算法的机器人位姿自适应估计[J].测绘通报,2022(7):49-53.
- [10] 张彦泽,于斌超,马大智,等.自适应扩展卡尔曼滤波机械臂末端定位[J].组合机床与自动化加工技术,2022(10):150-153,158.

收稿日期:2023-11-02