

潘宇健, 张兆麒. 物联网环境下并联柔索驱动机械手解耦控制[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(5): 125–129. DOI:10.20169/j. issn. 2095–2163. 24112601

物联网环境下并联柔索驱动机械手解耦控制

潘宇健¹, 张兆麒²

(1 北京中关村航天创新园科技发展有限公司, 北京 100190; 2 重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 机械手在物联网组网环境下存在刚体与作业线跟踪耦合问题, 为提高渐进跟踪精度, 提出基于交叉耦合和滑模变结构解耦控制的并联柔索驱动机械手控制律设计方法。构建并联柔索驱动机械手的简化动力学模型和空间状态方程, 根据滑模自适应迭代的方法构建物联网组网环境下的机械手扰动抑制迭代学习控制器, 根据机械手单轴动作时的多组驱动作用跟踪曲线构建机械手解耦控制的多静力学模型, 结合预设性能参数分析, 采用交叉耦合控制的方法实现对机械手完整连续运动学转化和参数动态解算, 在滑模控制器的基础上引入自适应积分项, 构建变结构滑模控制实现对物联网环境下并联柔索驱动机械手解耦控制。仿真测试结果表明, 该控制算法能有效实现对机械手的作业位姿参数的精确解算, 末端位姿跟踪稳定性较好。

关键词: 物联网; 耦合; 机械手; 解耦; 控制; 滑模

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 2095–2163(2025)05–0125–05

Decoupling control of parallel flexible cable driven robotic arm in the Internet of Things environment

PAN Yujian¹, ZHANG Zhaoqi²

(1 Beijing Zhongguancun Aerospace Innovation Park Technology Development Co., Ltd., Beijing 100190, China; 2 School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: There is a coupling problem between rigid body and work line tracking in the IoT networking environment for robotic arms. To improve the asymptotic tracking accuracy, a control law design method for parallel flexible cable driven robotic arms based on cross coupling and sliding mode variable structure decoupling control is proposed. The paper constructs a simplified dynamic model and spatial state equation for a parallel flexible cable driven robotic arm, and uses the sliding mode adaptive iteration method to construct an iterative learning controller for disturbance suppression of the robotic arm in the Internet of Things networking environment. Based on the tracking curves of multiple sets of driving effects during the single axis action of the robotic arm, a multi static model for decoupling control of the robotic arm is constructed. Combined with the analysis of preset performance parameters, the cross coupling control method is adopted to achieve complete continuous kinematic transformation and parameter dynamic calculation of the robotic arm. On the basis of the sliding mode controller, an adaptive integral term is introduced to construct a variable structure sliding mode control to achieve decoupling control of the parallel flexible cable driven robotic arm in zero gravity environment. The simulation test results show that the control algorithm can effectively achieve accurate calculation of the working pose parameters of the robotic arm, and the stability of the end effector pose tracking is good.

Key words: Internet of Things; coupling; manipulator; decoupling; control; sliding mode

0 引言

随着物联网不断应用在智能制造控制等领域, 机械手作用在物联网环境下的组网联合控制研究受到人们的持续关注, 通过物联网组网控制, 能提高机械手的并行工作能力, 从而提高联合工作效率, 然

而, 在物联网组网环境下, 机械手受到协同作业并联构件的影响和干扰, 存在机构组件耦合的问题, 需要研究有效的解耦控制方法, 提高机械手作业的稳定性和精度, 使得机械手装备能够高精度地重复跟踪作业曲线, 避免物联网组网环境下的耦合和干扰, 研究并联柔索驱动机械手解耦控制方法, 在促进智能

作者简介: 潘宇健(1978—), 男, 工程师, 主要研究方向: 智能制造与控制。Email: 1198301462@qq.com; 张兆麒(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 信息与通信工程, 人工智能。

收稿日期: 2024–11–26

哈尔滨工业大学主办 ◆ 系统开发与应用

控制产业发展中具有中重要意义^[1]。

机械手解耦控制是机械控制的重要组成。当前方法中,对智能机械手的控制方法主要有末端执行器跟踪稳定型控制方法、PID 神经网络控制方法、滑模控制、预设模型参数控制等^[2]。梁旭等学者^[3]设计冗余并联机构控制方法,采用多变量多目标优化方案构建机械手的工作空间跟踪控制模型。文献[4]中,提出基于渐开线轮廓凸轮的杠杆式偏角解耦变刚度控制方法,通过对刚度与偏角关系的仿真实验得出驱动模型的可靠性,但模型可能存在抗阻尼干扰欠佳的问题。文献[5]中面向多关节训练的并联柔索驱动下机械手进行训练参数自适应调整和学习,实现对机械手的主动报告位置参数辨识。传统方法在对机械手解耦控制设计中,特别是在航天器的物联网环境下存在人机兼容性不佳,训练模式空间受限等问题^[5]。

针对上述问题,本文提出基于交叉耦合和滑模变结构解耦控制的并联柔索驱动机械手控制律设计方法。首先,构建研究对象机械手的动力学模型和空间状态方程,然后进行参数优化机械设计,构建变结构滑模控制,实现控制律优化设计,最后进行仿真测试,展示了本文方法在提高并联柔索驱动机械手参数解算和控制稳定性及精度方面的优越性能。

1 并联柔索驱动机械手动力学模型

1.1 模型参数标定和运动模型

首先构建并联柔索驱动机械手的简化动力学模型和空间状态方程,采用 D-H 参数测量的方法,通过最小、连续、完整的模型参数设计^[6],构建机械手的位姿参数标定模型,在 D-H 坐标系中,选定某个位姿为初始位姿,从杆件坐标系以机械手在静态下的状态作为基座坐标系,机械手杆件坐标系确定模型如图 1 所示。

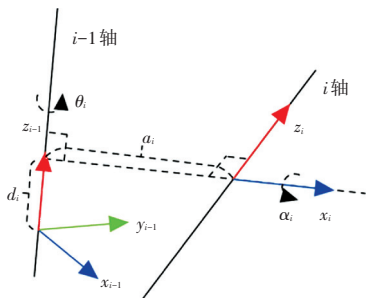


图 1 机械手杆件坐标系确定模型

Fig. 1 Model for determining the coordinate system of robotic arm components

根据图 1,机械手第 i 号杆件两端的关节旋转轴分别为 $i-1$ 轴和 i 轴, i 轴旋转的正方向作为机械手的旋转法相向量, T_i 表示沿 X 轴平移 d 的齐次变换,坐标系设定为 $T_0^{\text{base}} \text{rot}(x, 180^\circ)$, 在肩腕矢量与固定矢量共线时构建全局配置参数,设置参考平面进行机械手运动参数标定^[7],对单轴动作时的多组 DH 参数进行齐次变换,得到齐次变换矩阵:

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & p_i^{i-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, θ_i 表示第 i 个连杆、关节连接组成扭转角; α_i 表示 i 个关节的连杆角; d_i 表示第 i 个关节的连杆偏移量; R_i^{i-1} 表示在固定矢量的臂型角位置下第 i 关节在第 $i-1$ 关节坐标系; p_i^{i-1} 表示逆运动学解析模型 $T_7^0 = (T_0^{\text{base}})^{-1} T_7^{\text{base}}$ 下第 i 关节在第 $i-1$ 关节坐标系中的位置矢量。基于并联机构工作空间的并行 D-H 理论^[8],需要构建并联机构的工作空间的末端位姿矩阵,得到:

$$T_7^{\text{base}} = T_0^{\text{base}} T_7^0 = T_0^{\text{base}} T_1^0 T_2^1 \cdots T_7^6 \quad (2)$$

其中, T_0^{base} 表示变刚度关节的目标位形。各被动旋转偏角值 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7)$, 在 T_7^{base} 确定下,根据刚度与偏角耦合节点的矢量分布,得到柔索驱动单元及其支撑框架的弹性伸缩矢量为:

$$\begin{aligned} l_{\text{bs}}^0 &= [0 \quad 0 \quad -d_{\text{bs}}]^T \\ l_{\text{se}}^3 &= [0 \quad d_{\text{se}} \quad 0]^T \\ l_{\text{ew}}^4 &= [0 \quad 0 \quad -d_{\text{ew}}]^T \\ l_{\text{wf}}^7 &= [0 \quad 0 \quad -d_{\text{wf}}]^T \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $d_{\text{bs}}, d_{\text{se}}, d_{\text{ew}}, d_{\text{wf}}$ 分别表示机器人骨骼、软骨、骨骼肌、肌腱的协同耦合参数。考虑外部扰动,基于通过减速电机转动的迭代学习方法^[9],构建并联柔索驱动机械手的简化动力学模型:

$$T_7^0 = (T_0^{\text{base}})^{-1} T_7^{\text{base}} \quad (4)$$

其中, T_0^{base} 表示末端坐标系 x 轴的方向矢量, T_7^{base} 表示末端坐标系 y 轴的方向矢量。在基座坐标系中,根据基座平面的投影之间的平台姿态转换模型,实现运动模型参数分析^[10]。

1.2 并联柔索驱动机械手的运动参数解析

根据滑模自适应迭代的方法构建物联网环境下

的机械手扰动抑制迭代学习控制器,获取并联柔索驱动机械手杆件 D-H 参数^[11],通过空间圆拟合得到空间平面方程表示为:

$$\mathbf{p}_s^0 = \mathbf{l}_{bs}^0 = [0 \quad 0 \quad -d_{bs}]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{p}_w^0 = \mathbf{p}_7^0 - \mathbf{R}_7^0 \mathbf{p}_6^7 = \mathbf{p}_7^0 - \mathbf{R}_7^0 \mathbf{l}_{wf}^7 \quad (6)$$

其中, $\mathbf{p}_7^0$ 表示髋关节伸展惯性参数; $\mathbf{R}_7^0$ 表示膝关节的伸展及屈曲参数; $\mathbf{p}_6^7$ 表示足底末端坐标参数; $\mathbf{l}_{wf}^7$ 表示各个连杆的运动参考量。通过几何参数模型力矩扰动分析^[12],寻找互相耦合的参数,得到同平行轴的变参数表示为:

$$\cos \gamma = \frac{d_{sw}^2 + d_{se}^2 - d_{ew}^2}{2d_{sw}d_{se}} \quad (7)$$

其中, γ 表示各连杆的位置偏角。综合考虑机械手变刚度关节的尺寸、调节范围等参数,采用杠杆机构刚度调节^[13],在零臂角姿态下,得到杠杆机构部分矢量表示为:

$$\mathbf{p}_{s^*w^*}^0 = [-d_{se} \sin \gamma \quad 0 \quad -d_{se} \cos \gamma]^T \quad (8)$$

设线性弹簧的弹簧刚度的基准角运动的旋转轴为:

$$\mathbf{V}^0 = \mathbf{p}_{s^*w^*}^0 \times \mathbf{p}_{s^0w^0}^0 \quad (9)$$

其中, $\mathbf{p}_{s^0w^0}^0$ 表示初始足底末端位置, $\mathbf{p}_{s^*w^*}^0$ 表示足底末端方向。力矩平衡关系融合下,得到机械臂的旋转角 δ 满足:

$$\cos \delta = \frac{\mathbf{p}_{s^*w^*}^0 \cdot \mathbf{p}_{s^0w^0}^0}{\|\mathbf{p}_{s^*w^*}^0\| \cdot \|\mathbf{p}_{s^0w^0}^0\|} = \frac{\mathbf{p}_{s^*w^*}^0 \cdot \mathbf{p}_{s^0w^0}^0}{(d_{sw})^2} \quad (10)$$

其中, d_{sw} 表示足底末端的位置和角度的联合互信息量。建立其刚度静力学模型^[14],线性弹簧的弹簧刚度矩阵记作 $\mathbf{R}_3^{0,\phi=0}$,拆成3个方向余弦单位矢量为:

$$\mathbf{R}_3^{0,\phi=0} = [\mathbf{x}_3^{0,\phi=0} \quad \mathbf{y}_3^{0,\phi=0} \quad \mathbf{z}_3^{0,\phi=0}] \quad (11)$$

其中, $\mathbf{x}_3^{0,\phi=0}, \mathbf{y}_3^{0,\phi=0}, \mathbf{z}_3^{0,\phi=0}$ 分别表示在三轴坐标系下矢状面内关节变量的运动空间。由此根据滑模自适应迭代的方法构建物联网环境下的机械手扰动抑制和参数解析模型,可以求得其刚度静力学模型,根据并联柔索驱动机械手的运动参数解析结果进行机械手的解耦控制设计^[15]。

2 机械手控制律设计优化

2.1 预设性能参数分析及动态解算

根据机械手单轴动作时的多组驱动作用跟踪曲线构建机械手解耦控制的多静力学模型^[16],结合预设性能参数分析,构建机构轮廓几何关系方程:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_k(t) = & \mathbf{M}(\mathbf{q}_k(t))\ddot{\mathbf{q}}_k(t) + \mathbf{C}(\mathbf{q}_k(t), \dot{\mathbf{q}}_k(t))\dot{\mathbf{q}}_k(t) + \\ & \mathbf{G}(\mathbf{q}_k(t)) + \mathbf{f}(\mathbf{q}_k(t), \dot{\mathbf{q}}_k(t), \ddot{\mathbf{q}}_k(t)) + \mathbf{d}(\mathbf{x}, t) \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{q}_k(t)$ 表示关节角度变量; $\mathbf{M}, \mathbf{G}$ 和 $\mathbf{f}$ 分别表示机械手运动空间的函数; $\mathbf{d}(\mathbf{x}, t)$ 表示误差项。采用支点移动距离的参数动态融合方法确定各个机构的布置模型参数,得到机械手的轨迹跟踪控制中的误差为:

$$\mathbf{e}_k(t) = \mathbf{q}_d(t) - \mathbf{q}_k(t), \dot{\mathbf{e}}_k(t) = \dot{\mathbf{q}}_d(t) - \dot{\mathbf{q}}_k(t) \quad (13)$$

其中, $\mathbf{q}_d(t)$ 表示独立的位置空间参数, $\mathbf{q}_k(t)$ 表示关节空间的维度。采用分数阶的滑模控制方案,结合动态参数估计得到滑模面:

$$\mathbf{s}_k(t) = \mathbf{c}_1 \mathbf{e}_k(t) + \dot{\mathbf{e}}_k(t) \quad (14)$$

其中, $\mathbf{c}_1$ 为正定系数。根据滑模面的输出不确定性和干扰抑制结果^[17],采用关节空间中的动力学模型控制,构建 Lyapunov 函数表示为:

$$V_0 = W_0 + \frac{1}{2\xi} \int_0^t \tilde{\delta}_0^2(\boldsymbol{\sigma}) d\boldsymbol{\sigma} \quad (15)$$

其中, W_0 表示系统各个连杆上主动力; ξ 表示正定型对称惯性矩阵; $\boldsymbol{\sigma}$ 表示离心力; $\tilde{\delta}_0(\boldsymbol{\sigma})$ 表示系统选定的动能和势能广义坐标。根据系统控制输入向量和控制输出向量关系^[18],在滑模面增加积分项,对 Lyapunov 函数求导,得到:

$$\dot{V}_0 = \dot{W}_0 + \frac{1}{2\xi} \tilde{\delta}_0^2 = \mathbf{M}\dot{\mathbf{s}}_0 + \mathbf{C}\mathbf{s}_0 + \frac{1}{2\xi} \tilde{\delta}_0^2 \quad (16)$$

其中, $\mathbf{C}$ 表示重力矢量, $\mathbf{s}_0$ 表示支撑腿的踝关节在全局坐标的力矩,另可得到:

$$\dot{W}_0 = \mathbf{M}\dot{\mathbf{s}}_0 + \mathbf{C}\mathbf{s}_0 \leq \tilde{\delta}_0 |s_0| - \psi \mathbf{s}_0^T \mathbf{s}_0 \quad (17)$$

采用 Bellman-Gronwall 定理,结合交叉耦合控制的方法实现对机械手完整连续运动学转化和参数动态解算^[19]。

2.2 解耦控制稳定性分析

在上述控制律设计的基础上,采用交叉耦合控制的方法进行稳定性测试,结合 Lyapunov 函数稳定性分析结果,建立滑模积分控制模型,根据输出轴力矩的大小,在完成变刚度关节的性能测试的基础上,迭代学习控制初始条件可得:

$$|s_0| = \frac{\hat{\delta}_0 - \hat{\delta}_{-1}}{\xi} = \frac{\hat{\delta}_0}{\xi} \quad (18)$$

其中, $\hat{\delta}_0$ 表示各连杆绕质心的转动惯量, $\hat{\delta}_{-1}$ 表示弹性势能。那么时间与变刚度关节角位移关系满足:

$$\dot{V}_0 \leq \tilde{\delta}_0 \frac{\hat{\delta}_0}{\xi} - \psi \mathbf{s}_0^T \mathbf{s}_0 + \mathbf{M}\dot{\mathbf{s}}_0 + \mathbf{C}\mathbf{s}_0 + \frac{1}{2\xi} \tilde{\delta}_0^2 \quad (19)$$

其中, ψ 表示弹簧刚度; $\mathbf{C}$ 表示弹性势能; $\dot{V}_0$ 表

示碰撞相动力势能; s_0 表示碰撞时地面对机械手的冲击力。加入自适应更新律对误差收敛性进行分析,得到:

$$\sum_{i=1}^k s_{k-1}^T M s_{k-1} \leqslant 2(V_0 - V_k) \leqslant 2V_0 \quad (20)$$

由于 V_0 有界,可得 $\lim_{k \rightarrow \infty} s_k(t) = 0$, 可见设计的并联柔索驱动机械手控制律是稳定的。

3 仿真实验与结果分析

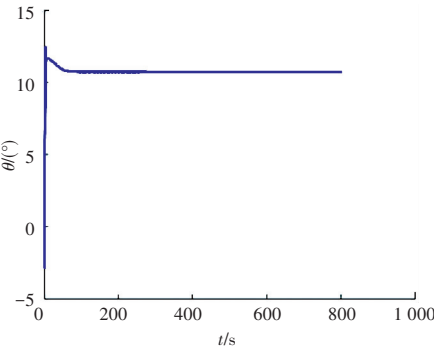
为了验证本文方法在实现并联柔索驱动机械手控制中的应用性能,进行仿真实验,实验采用 AmphiHex-I 系列机械手作为研究对象,对机械手的姿态参数采样时间设为 0.002 s,在物联网环境下机械手的初始位姿参数为 $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$,机械手关节的位置误差为 2 mm,对采摘过程中的力矩参数采样时间为 0.018 s,对目标采摘物的位置误差阈值设定为 2 mm,D-H 参数表见表 1。

表 1 D-H 参数表
Table 1 D-H parameter table

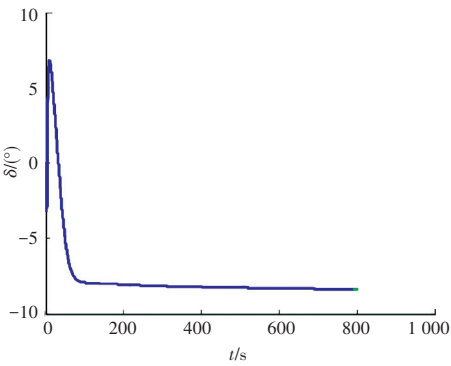
杆件	$\theta_i / (^\circ)$	d_i / mm	$\alpha_i / (^\circ)$	$\beta_i / (^\circ)$
1	0	0	153.435	0
2	-76.745	0	872.716	-
3	-0.820	4.806	885.554	0
4	183.378	-964.830	0.045	0
5	184.268	0.034	6.884	0
6	0	-719.790	0	0

根据上述参数配置,进行并联柔索驱动机械手的俯仰倾角、导引跟踪角、投放俯仰角的参数稳定性控制结果如图 2 所示。

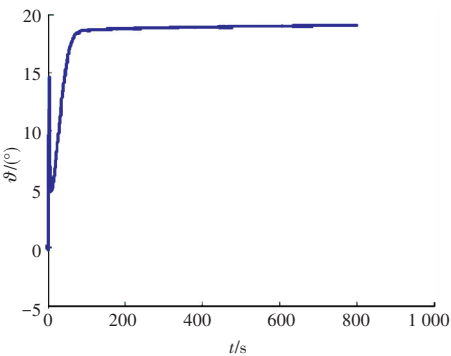
分析图 2 可见,采用本文方法对机械手的 D-H 参数进行补偿,可以实现刚度的快速调整,提高输出稳定性和参数解耦能力,测试机械手姿态角偏差,如图 3 所示。



(a) 俯仰倾角



(b) 导引跟踪角



(c) 投放俯仰角

图 2 参数稳定跟踪控制结果

Fig. 2 Parameter stability tracking control results

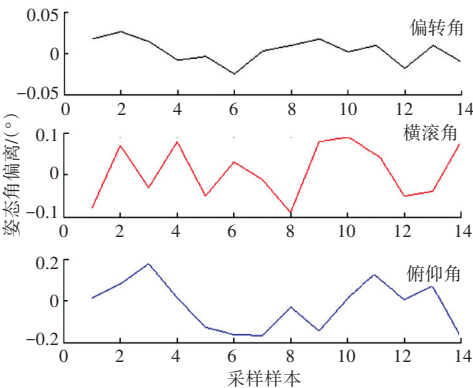


图 3 偏差测试

Fig. 3 Deviation test

采用本文方法通过改进的解耦控制律进行误差修正和反馈调节,俯仰角和横滚角的偏差波动性较小,控制误差得到有效抑制,最大误差降到 0.62°,且控制过程的平稳性具有很大提升,在迭代时间 25 s 后收敛到 0,其中最大控制误差降低到 0.5°,且能在迭代时间 14 s 控制误差收敛到 0,过程平滑性较好。

4 结束语

本文提出基于交叉耦合和滑模变结构解耦控制的并联柔索驱动机械手控制律设计方法,根据滑模

自适应迭代的方法构建物联网环境下的机械手扰动抑制迭代学习控制器,综合考虑机械手变刚度关节的尺寸、调节范围等参数,采用杠杆机构刚度调节结合交叉耦合控制的方法实现对机械手完整连续运动学转化和参数动态解算。结合 Lyapunov 函数稳定性分析结果,建立滑模积分控制模型,实现控制律优化设计,分析得知,本文算法能有效实现对机械手的作业位姿参数的精确解算,末端位姿跟踪稳定性较好,降低了控制误差。

参考文献

[1] 谢曼,王龙涛,陈中尹,等. 实-虚结合的机械臂与数字孪生体协调控制[J]. 兵器装备工程学报,2024,45(11):243-252.

[2] 李虎林,汪成文,赵二辉,等. 液压直驱手腕基于积分滑模面的自适应鲁棒控制[J]. 机床与液压,2024,52(21):103-111.

[3] 梁旭,张建勇,李国涛,等. 面向骨折复位手术的冗余并联机构:设计、建模与性能分析[J]. 机械工程学报,2024,60(17):133-146.

[4] 唐贵阳,杨晓钧,李兵,等. 基于渐开线轮廓凸轮的杠杆式偏角解耦变刚度关节设计[J]. 机器人,2024,46(5):524-533.

[5] SUN Yu, FALCO J, ROA M A, et al. Research challenges and progress in robotic grasping and manipulation competitions [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 874-881.

[6] 吴培良,李瑶,牛明月,等. 一种视/触觉融合的柔性物体抓取力估计方法[J]. 机器人, 2024, 46(5): 544-553.

[7] 丁戈,李松,付国萍,等. 基于卷积神经网络的机械臂目标轨迹跟踪控制方法研究[J]. 机械与电子,2024,42(11):53-57.

[8] 胡江涛,党玉功,周志刚,等. 基于改进灰狼算法的交叉滚子轴承自动装配机械臂轨迹规划[J]. 机械传动,2024,48(11):71-78.

[9] 余家宸,杨晔. 基于裁剪近端策略优化算法的软机械臂不规则物体抓取[J]. 计算机应用, 2024, 44(11): 3629-3638.

[10] 杨琦,杨芳艳,袁野,等. 基于多层次语音情绪识别网络的机器人表情控制[J]. 智能计算机与应用,2024,14(10):41-49.

[11] 周晓吉. 基于多尺度特征融合的单目深度估计算法[J]. 智能计算机与应用,2024,14(9):34-40.

[12] 齐伟,陈雪艳,迎春,等. 基于 CoppeliaSim 的蛇形机器人建模与运动仿真[J]. 计算机仿真,2024,41(10):443-447.

[13] 李静,罗征,闫振平,等. 基于改进机器学习的图书馆机器人自主避障控制研究[J]. 计算机测量与控制,2024,32(9):200-205.

[14] 刘冰,张岩. 基于多点触摸的协作机器人近似最优人机交互控制算法[J]. 吉林大学学报(理学版),2024,62(5):1211-1218.

[15] 钱书文,郑天江,沈雯钧,等. 基于柔性传感器的绳驱动连续体机器人反馈控制[J]. 传感器与微系统,2024,43(8):87-90.

[16] 胡茂伟. 面向全自主智能机器人的无标定图像视觉伺服控制研究[J]. 计算机测量与控制,2024,32(7):169-175.

[17] 贺宁,范昭,马凯. FDI 攻击下移动机器人弹性预测镇定控制研究[J]. 北京理工大学学报,2024,44(7):722-730.

[18] 刘昱,陶春龙,吕佳洋,等. 气动 3-UPU 型机器人位姿控制[J]. 液压与气动,2024,48(6):56-64.

[19] 刘向磊,郑侃,董松,等. 基于地面实验平台的空间机械臂控制方案[J]. 南京理工大学学报,2024,48(5):596-606.