



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



多自由度机器人自适应滑模迭代学习跟踪控制

张程琳, 桑文闯, 孙宁, 邱泽昊, 吴庆祥, 方勇纯

引用本文:

张程琳, 桑文闯, 孙宁, 邱泽昊, 吴庆祥, 方勇纯. 多自由度机器人自适应滑模迭代学习跟踪控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1819–1828.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1923>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制](#)

Coordinated impedance control for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller
控制与决策. 2021, 36(6): 1311–1323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>

[磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制](#)

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor
控制与决策. 2021, 36(6): 1449–1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

[输入约束不确定系统的点对点迭代学习控制与优化](#)

Point-to-point iterative learning control and optimization for uncertain systems with constrained input
控制与决策. 2021, 36(6): 1435–1441 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0908>

[带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制](#)

Prescribed performance adaptive control of flexible-joint manipulators with output constraints
控制与决策. 2021, 36(2): 387–394 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0974>

[航天器输入受限的鲁棒自适应姿态跟踪控制](#)

Robust adaptive attitude tracking control of spacecraft with constrained inputs
控制与决策. 2021, 36(9): 2297–2304 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0013>

多自由度机器人自适应滑模迭代学习跟踪控制

张程琳¹, 桑文闯^{2,3}, 孙宁^{2,3}, 邱泽昊^{2,3}, 吴庆祥^{2,3†}, 方勇纯^{2,3}

(1. 中国飞机强度研究所, 西安 710065; 2. 南开大学人工智能学院, 天津 300350;
3. 南开大学深圳研究院 智能技术与机器人系统研究院, 广东 深圳 518083)

摘要: 机械臂可代替人工完成繁重工作、降低生产风险、提高生产效率, 被广泛应用于制造业和生产业中. 工业生产的高质量需求对机械臂的操作精度提出了较高要求, 考虑有色金属工厂中铸锭打磨的应用场景, 该任务的作业轨迹均具有较强重复性. 此外, 实际应用环境复杂, 存在如环境干扰及系统参数变化等多种不确定性, 固定的控制参数难以保证系统持续稳定运行. 基于上述考虑, 针对多自由度机械臂系统, 设计一种自适应滑模迭代学习跟踪控制方法, 控制器包含参数自整定的比例-微分项、基于滑模的符号函数项和上一次迭代的控制输入, 其中 PD 项的控制参数通过模糊逻辑系统实时调整, 在保证控制系统正常运行的情况下提高系统的鲁棒性. 同时, 在理论上证明迭代域闭环系统的稳定性和跟踪误差的收敛性. 最后通过仿真验证所提出控制方法的有效性和鲁棒性.

关键词: 多自由度机械臂; 迭代学习控制; 滑模控制; 模糊自适应控制; 参数自整定; 轨迹跟踪控制

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyj.2022.1923

引用格式: 张程琳, 桑文闯, 孙宁, 等. 多自由度机器人自适应滑模迭代学习跟踪控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1819-1828.

Adaptive sliding mode iterative learning tracking control of multi-degree-of-freedom robots

ZHANG Cheng-lin¹, SANG Wen-chuang^{2,3}, SUN Ning^{2,3}, QIU Ze-hao^{2,3}, WU Qing-xiang^{2,3†}, FANG Yong-chun^{2,3}

(1. Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China; 2. College of Artificial Intelligence, Nankai University, Tianjin 300350, China; 3. Institute of Intelligence Technology and Robotic Systems, Shenzhen Research Institute of Nankai University, Shenzhen 518083, China)

Abstract: Manipulators are widely used in manufacturing to replace manual work, reduce production risk, and improve production efficiency. However, the high-quality demand of industrial production puts forward specific requirements for the operation accuracy of manipulators. Considering the application scenario of ingot grinding in non-ferrous metal factories, the operation tracks of the task are highly repetitive. In addition, the practical application environment is complex and there are many uncertainties such as environmental interferences and system parameter changes, which result in that fixed control parameters are difficult to ensure the continuous and stable operation of the system. Therefore, an adaptive sliding mode iterative learning tracking control method is designed in this paper. The controller includes a PD term with parameter self-tuning, the symbolic function term based on sliding mode, and a control input of the last iteration. Especially, the PD control parameters are adjusted by the fuzzy logic system to improve the robustness of the system. Furthermore, the closed-loop stability is proven by using Lyapunov techniques. Finally, the effectiveness and robustness of the proposed control method are verified through several numerical simulations.

Keywords: multi-degree-of-freedom (DOF) manipulator; iterative learning control; sliding mode control; fuzzy adaptive control; parameter self-tuning; trajectory tracking control

0 引言

机器人^[1-6]作为 20 世纪最引人瞩目的科技成就之一, 被广泛应用于各行各业. 随着相关技术不断进

步和完善, 机器人不断智能化, 逐渐成为人们生活和工业生产的得力助手. 《中国制造 2025》战略将机器人作为重要领域, 提出机器人产业发展要围绕机械、

收稿日期: 2022-11-08; 录用日期: 2023-03-12.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1309000); 国家自然科学基金项目(52205019); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2023A1515012669); 中国博士后科学基金项目(2021M701779).

责任编辑: 誉斌.

†通讯作者. E-mail: wuqx@nankai.edu.cn.

危险品制造、国防军工等工业应用,要求以技术为支撑,发展下一代工业机器人.现代工业不断发展,生产要求随之提高,传统的人工操作效率低且存在一定安全隐患,机械臂作为机器人领域中应用极为广泛的装置,能够代替人工完成繁重工作、避免人身伤害事故发生、提高生产效率、降低生产成本,成为诸多学者研究的热点.

在制造业和生产业中,机械臂广泛应用于大型工厂的生产线上,执行繁重且重复性较强的任务,如工件打磨、物体切割、边界焊接、码垛堆料、投放装填等.上述工作对机械臂的位置和速度控制精度都有较高要求,机械臂未按既定位置和速度运行很有可能对工件造成不可逆转的损坏,影响产品的质量和产量.因此,实现机械臂高精度的位置控制显得尤为重要,包括定点控制、轨迹跟踪控制等.

针对机械臂位置控制,学者们提出了诸多控制策略.具体而言,当机械臂自由度较低且系统参数可精确获得时,可以通过计算得到准确的动力学模型,从而基于精确模型设计控制方法,如最优控制^[7-8]、模型预测控制^[9-10]、反步控制^[11-12]等.文献[13]提出了一种基于粒子群优化的机器人最优控制方法,利用在线传感器的输出数据,结合离线模式下获得的粒子群优化结果,以优化不确定性下的控制信号.上述方法能够充分利用模型提供的信息,达到良好的控制效果,但对模型准确度的依赖性较高也决定了此类方法的控制性能易受模型准确度的严重影响.

考虑到机械臂系统中存在以下不确定性:1)结构参数不确定性.高自由度机械臂系统的机械结构复杂、质量分布不均,使得质心位置、转动惯量等参数无法准确获取.2)非系统结构的未建模动态.关节间的摩擦、关节及连杆柔性、执行器饱和及死区问题以及复杂工作环境带来的测量噪声等,这些未建模动态无法准确测量.基于上述不确定性,诸多无需精确模型参数的控制方法被提出,如比例-积分-微分(proportional-integral-differential, PID)控制^[14-17]、滑模控制^[18-21]、自适应控制^[22-27]、迭代学习控制^[28-32]等.文献[33]从机电一体化设计出发,考虑到一些基于模型的非线性控制器存在的不足,提出了一种新的无抖振滑模PID控制器. Tutsoy等^[34]针对具有输入延迟、执行器饱和等不确定性的欠驱动机械臂,提出了一种无模型自适应控制方法. Uchiyama^[35]于1978年首先提出迭代学习控制方法,该方法在重复跟踪相同轨迹的过程中,根据当前和历史迭代步骤的误差和控制输入等信息修正控制输入,以达到良好的控制效

果.

分析机械臂在工业生产中的实际应用场景(例如有色金属工厂内的铸锭打磨)可以发现其需要按照相同的预定轨迹进行重复性操作,适合应用迭代学习控制.针对一般连续系统,迭代学习控制一般为PD型迭代学习控制,这一结构使其面临与PID控制同样的控制参数调节问题.工业实际生产中存在许多不确定性,这些未知情况可能使原控制参数无法保证系统稳定运行,影响控制质量.基于上述考虑,本文针对多自由度机械臂系统,设计自适应滑模迭代学习跟踪控制方法,具体贡献如下:

1) 基于 n 自由度机械臂模型及其沿目标轨迹的线性化模型,设计自适应滑模迭代学习跟踪控制器,其包括参数自整定的PD项、基于滑模的符号函数项和上一次迭代的控制输入.特别地,设计了PD控制参数的自适应模糊整定方法,可实时调整控制参数,在保证控制系统正常运行的情况下,提高系统的鲁棒性,而基于滑模的符号函数项的引入可进一步提高鲁棒性.

2) 对所提出控制器作用下的闭环系统在迭代域的稳定性及跟踪误差的收敛性进行分析,利用李雅普诺夫方法证得随着迭代次数增加,跟踪误差趋近于零,能够实现目标轨迹的准确跟踪.

3) 考虑有色金属工厂内金属铸锭打磨的应用场景,基于搭建的仿真平台进行3组数值仿真,充分验证了所提出控制器具有令人满意的控制性能.

1 n 自由度机械臂模型说明

对于 n 自由度机械臂,其动力学模型^[36]如下:

$$\mathbf{u}^i(t) = M(\mathbf{q}^i(t))\ddot{\mathbf{q}}^i(t) + C(\mathbf{q}^i(t), \dot{\mathbf{q}}^i(t))\dot{\mathbf{q}}^i(t) + \mathbf{G}(\mathbf{q}^i(t), \dot{\mathbf{q}}^i(t)). \quad (1)$$

其中:上标 i 代表第 i 次迭代; $t \in [0, t_i]$, t_i 为有限时间; $\mathbf{u}^i(t) \in \mathbb{R}^n$ 为输入力矩矢量; $\mathbf{q}^i(t)$ 、 $\dot{\mathbf{q}}^i(t)$ 和 $\ddot{\mathbf{q}}^i(t) \in \mathbb{R}^n$ 分别为关节位置、速度和加速度矢量,后续直接用 \mathbf{q}^i 、 $\dot{\mathbf{q}}^i$ 和 $\ddot{\mathbf{q}}^i$ 代替; $M(\mathbf{q}^i(t)) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为机械臂质量矩阵; $C(\mathbf{q}^i(t), \dot{\mathbf{q}}^i(t)) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为离心力和哥氏力矩阵; $\mathbf{G}(\mathbf{q}^i(t), \dot{\mathbf{q}}^i(t)) \in \mathbb{R}^n$ 为重力和摩擦力矢量.

下面给出机械臂模型的相关性质.

性质1 $M(\mathbf{q}^i)$ 是一个有界的对称正定矩阵.

性质2 $\dot{M}(\mathbf{q}^i) - 2C(\mathbf{q}^i, \dot{\mathbf{q}}^i)$ 是一个斜对称矩阵,满足^[37]

$$\mathbf{x}^T(\dot{M}(\mathbf{q}^i) - 2C(\mathbf{q}^i, \dot{\mathbf{q}}^i))\mathbf{x} = 0, \forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n.$$

此外,针对跟踪目标关节角轨迹 $\mathbf{q}_d(t)$ 的控制任务,给出如下性质.

性质3 q_d 在 $t \in [0, t_l]$ 上是三阶连续的.

性质4 对于多次迭代,初始状态可重复,即

$$\begin{cases} q_d(0) - q^i(0) = \mathbf{0}, \\ \dot{q}_d(0) - \dot{q}^i(0) = \mathbf{0}, \forall i \in N. \end{cases}$$

沿着上述目标关节角轨迹 q_d , 模型(1)可线性化^[36]为

$$F(t) - u^i(t) = M(t)\ddot{e}^i(t) + [C(t) + C_1(t)]\dot{e}^i(t) + P(t)e^i(t) + \eta(\ddot{e}^i, \dot{e}^i, e^i, t). \quad (2)$$

其中: $e^i(t) = q_d(t) - q^i(t) = [e_1^i, e_2^i, \dots, e_n^i]^T$ 为关节角跟踪误差, \dot{e}^i 和 \ddot{e}^i 分别为 e^i 关于时间的一阶和二阶导数, $\eta(\ddot{e}^i, \dot{e}^i, e^i, t)$ 为可被忽略的高阶项, $M(t)$ 、 $C(t)$ 、 $C_1(t)$ 、 $P(t)$ 和 $F(t)$ 表达式如下:

$$\begin{cases} M(t) = M(q_d), \\ C(t) = C(q_d, \dot{q}_d), \\ C_1(t) = \frac{\partial C}{\partial \dot{q}} \Big|_{q_d, \dot{q}_d} \dot{q}_d + \frac{\partial G}{\partial \dot{q}} \Big|_{q_d, \dot{q}_d}, \\ P(t) = \frac{\partial M}{\partial q} \Big|_{q_d} \ddot{q}_d + \frac{\partial C}{\partial q} \Big|_{q_d, \dot{q}_d} \dot{q}_d + \frac{\partial G}{\partial q} \Big|_{q_d}, \\ F(t) = M(q_d)\ddot{q}_d + C(q_d, \dot{q}_d)\dot{q}_d + G(q_d). \end{cases}$$

2 自适应滑模迭代学习跟踪控制器设计

本节基于闭环PD迭代学习控制器,考虑系统存在的不确定性,设计PD控制参数的自适应模糊整定方法,实时调整比例和微分控制参数,同时设计基于滑模的符号函数项,提高系统的鲁棒性,以保证系统正常运行,实现轨迹跟踪的精准控制.

首先,定义如下与关节角跟踪误差相关的变量:

$$s^i(t) = \dot{e}^i + k_s e^i, \quad (3)$$

$$\delta e^i(t) = e^{i+1} - e^i = [e_1^{i+1}, e_2^{i+1}, \dots, e_n^{i+1}]^T - [e_1^i, e_2^i, \dots, e_n^i]^T, \quad (4)$$

$$\delta s^i(t) = s^{i+1} - s^i = \delta \dot{e}^i + k_s \delta e^i = [\delta s_1^i, \delta s_2^i, \dots, \delta s_n^i]^T, \quad (5)$$

其中 $k_s \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为正定对角增益矩阵.

设计如下自适应滑模迭代学习控制器:

$$u^{i+1}(t) = k_p^{i+1}(t)e^{i+1}(t) + k_d^{i+1}(t)\dot{e}^{i+1}(t) + k_t \text{SGN}(\delta s^i(t)) + u^i(t),$$

$$k_p^{i+1}(t) = k_s k_d^{i+1}(t),$$

$$\text{SGN}(\delta s^i(t)) \triangleq [\text{sgn}(\delta s_1^i), \dots, \text{sgn}(\delta s_n^i)]^T. \quad (6)$$

其中: $i = 0, 1, \dots, N, k_t \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为正定对角增益矩阵. 基于滑模的符号函数 $\text{sgn}(\cdot)$ 的加入是为了在进一步提高控制系统鲁棒性的同时,有助于后续的稳定分析,此外 $u^0 = \mathbf{0}$.

综合考虑控制效果和计算实时性,设定 k_t 为常数增益矩阵. 控制参数 $k_p^{i+1} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和 $k_d^{i+1} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 由如下模糊逻辑系统^[38]自适应更新:

$$k_p^{i+1}(j, j) = k_{p0}(j, j) + W_j^T \varphi(x^{i+1}(:, j)), \quad (7)$$

$$k_d^{i+1}(j, j) = \frac{k_p^{i+1}(j, j)}{k_s(j, j)} = k_{d0}(j, j) + \frac{W_j^T \varphi(x^{i+1}(:, j))}{k_s(j, j)}. \quad (8)$$

其中: $j = 0, 1, \dots, n, x^{i+1}(:, j) = [e_j^{i+1}, \dot{e}_j^{i+1}]^T$ 为矩阵 x^{i+1} 的第 j 列元素, $X(j, j)$ 为矩阵 X 的第 j 个主对角元素, $k_{p0} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和 $k_{d0} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为正定对角增益矩阵, $\varphi(x^{i+1}(:, j))$ 为所有元素均为正的模糊基函数. 给出如下更新律:

$$\dot{W}_j = k_{w_j} \beta_p \alpha_p \pi_p \varphi(x^{i+1}(:, j)),$$

其中 k_{w_j} 、 β_p 、 α_p 和 π_p 均为正的控制增益.

此外,增益选择如下:

$$L_1 = \lambda_{\min}(k_d + 2C_1 - 2Mk_s) > 0, \quad (9)$$

$$L_2 = \lambda_{\min}\left(2C + \frac{2P}{k_s} - \frac{2\dot{C}_1}{k_s}\right) > 0, \quad (10)$$

$$L_3 = \lambda_{\min}(2C_1 - 2Mk_s) > 0, \quad (11)$$

$$L_1 L_2 \geq \left\| \frac{P}{k_s} - (C + C_1 - Mk_s) + k_d \right\|_{\max}^2. \quad (12)$$

其中: k_d 指代 $k_d^{i+1}, \forall i \in N; \lambda_{\min}(X)$ 为矩阵 X 的最小特征值, $\|X\|$ 为矩阵 X 的欧几里得范数. 在 $0 \leq t \leq t_l$

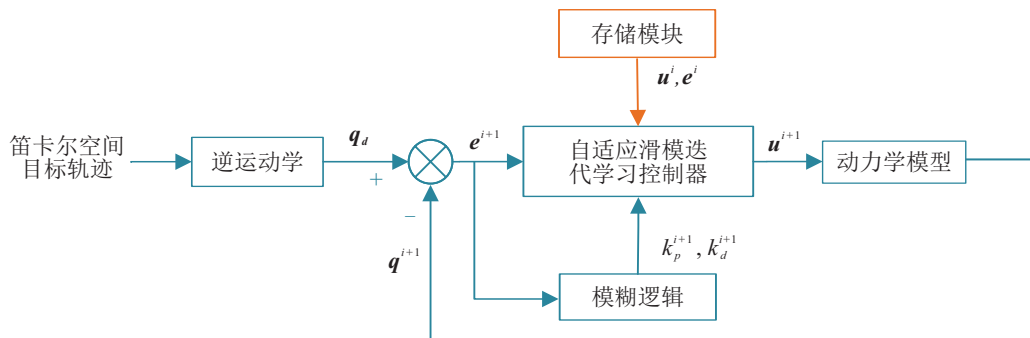


图1 自适应滑模迭代学习控制结构

时间范围内,有 $\|X\|_{\max} = \max \|X(t)\|$.

完整的控制结构如图1所示.

3 稳定性与收敛性分析

本节对所提出控制器作用下的闭环系统进行迭代域稳定性分析和跟踪误差的收敛性分析.

定理1 对于机械臂系统(1),在所提出控制器(6)和PD控制参数自更新律(7)、(8)的作用下,随着迭代次数增加,机械臂可准确跟踪关节空间目标轨迹,即

$$\begin{cases} \mathbf{q}_d(t) - \mathbf{q}^i(t) \rightarrow \mathbf{0}, \\ \dot{\mathbf{q}}_d(t) - \dot{\mathbf{q}}^i(t) \rightarrow \mathbf{0}, \end{cases} \quad i \rightarrow \infty, t \in [0, t_l].$$

证明 首先,根据模型(2)分别给出第*i*次和第*i*+1次迭代的表达式如下:

$$M\ddot{\mathbf{e}}^i + [C + C_1]\dot{\mathbf{e}}^i + P\mathbf{e}^i = \mathbf{F} - \mathbf{u}^i, \quad (13)$$

$$M\ddot{\mathbf{e}}^{i+1} + [C + C_1]\dot{\mathbf{e}}^{i+1} + P\mathbf{e}^{i+1} = \mathbf{F} - \mathbf{u}^{i+1}. \quad (14)$$

式(14)减(13),可得

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^i - \mathbf{u}^{i+1} &= M(\ddot{\mathbf{e}}^{i+1} - \ddot{\mathbf{e}}^i) + P(\mathbf{e}^{i+1} - \mathbf{e}^i) + \\ &\quad [C + C_1](\dot{\mathbf{e}}^{i+1} - \dot{\mathbf{e}}^i). \end{aligned} \quad (15)$$

将式(3)~(5)所定义的变量代入控制器(16),式(15)可整理为

$$\begin{aligned} M\delta\ddot{\mathbf{e}}^i + [C + C_1]\delta\dot{\mathbf{e}}^i + P\delta\mathbf{e}^i &= \\ -k_p^{i+1}\mathbf{e}^{i+1} - k_d^{i+1}\dot{\mathbf{e}}^{i+1} - k_t\text{SGN}(\delta\mathbf{s}^i). \end{aligned} \quad (16)$$

整理式(16)等号左边前两项可得

$$\begin{aligned} M\delta\dot{\mathbf{s}}^i - Mk_s\delta\dot{\mathbf{e}}^i + [C + C_1]\delta\dot{\mathbf{e}}^i &= \\ M\delta\dot{\mathbf{s}}^i + [C + C_1 - Mk_s][\delta\dot{\mathbf{s}}^i - k_s\delta\dot{\mathbf{e}}^i]. \end{aligned}$$

为便于书写,后续证明过程中直接将 k_d^{i+1} 写为 k_d . 已知 $k_p = k_s k_d$,整理式(16)等号右边可得

$$\begin{aligned} -k_p^{i+1}\mathbf{e}^{i+1}(t) - k_d^{i+1}\dot{\mathbf{e}}^{i+1}(t) - k_t\text{SGN}(\delta\mathbf{s}^i) &= \\ -k_d\mathbf{s}^{i+1} - k_t\text{SGN}(\delta\mathbf{s}^i) &= \\ -k_d\mathbf{s}^i - k_d\delta\mathbf{s}^i - k_t\text{SGN}(\delta\mathbf{s}^i). \end{aligned}$$

最终可得到

$$\begin{aligned} -k_d\mathbf{s}^i &= M\delta\dot{\mathbf{s}}^i + [C + C_1 - Mk_s + k_d]\delta\dot{\mathbf{s}}^i + \\ &\quad [P - k_s(C + C_1 - Mk_s)]\delta\mathbf{e}^i + \\ &\quad k_t\text{SGN}(\delta\mathbf{s}^i). \end{aligned} \quad (17)$$

定义以下李雅普诺夫函数:

$$V^i = \int_0^t \mathbf{s}^{i\top} k_d \mathbf{s}^i d\tau \geq 0. \quad (18)$$

同样,对于第*i*+1次迭代,可以给出

$$V^{i+1} = \int_0^t \mathbf{s}^{i+1\top} k_d \mathbf{s}^{i+1} d\tau. \quad (19)$$

式(19)减(18),得到

$$\begin{aligned} \Delta V^i &= V^{i+1} - V^i = \\ &\int_0^t [(\delta\mathbf{s}^i + \mathbf{s}^i)^\top k_d (\delta\mathbf{s}^i + \mathbf{s}^i) - \mathbf{s}^{i\top} k_d \mathbf{s}^i] d\tau = \\ &\int_0^t [\delta\mathbf{s}^{i\top} k_d \delta\mathbf{s}^i + 2\delta\mathbf{s}^{i\top} k_d \mathbf{s}^i] d\tau. \end{aligned} \quad (20)$$

将式(17)代入(20),可得

$$\begin{aligned} \Delta V^i &= V^{i+1} - V^i = \\ &\int_0^t \delta\mathbf{s}^{i\top} k_d \delta\mathbf{s}^i d\tau - 2 \int_0^t \delta\mathbf{s}^{i\top} M \delta\dot{\mathbf{s}}^i d\tau - \\ &2 \int_0^t \delta\mathbf{s}^{i\top} (C + C_1 - Mk_s + k_d) \delta\mathbf{s}^i d\tau - \\ &2 \int_0^t \delta\mathbf{s}^{i\top} [P - k_s(C + C_1 - Mk_s)] \delta\mathbf{e}^i d\tau - \\ &2 \int_0^t \delta\mathbf{s}^{i\top} k_t \text{SGN}(\delta\mathbf{s}^i) d\tau. \end{aligned} \quad (21)$$

对式(21)等号右边第2项使用分部积分法,有

$$\begin{aligned} \int_0^t \delta\mathbf{s}^{i\top} M \delta\dot{\mathbf{s}}^i d\tau &= \\ \delta\mathbf{s}^{i\top} M \delta\mathbf{s}^i \Big|_0^t - \int_0^t (\delta\mathbf{s}^{i\top} M)' \delta\mathbf{s}^i d\tau &= \\ \delta\mathbf{s}^{i\top} M \delta\mathbf{s}^i - \int_0^t \delta\mathbf{s}^{i\top} \dot{M} \delta\mathbf{s}^i d\tau - \\ \int_0^t \delta\mathbf{s}^{i\top} \dot{M} \delta\mathbf{s}^i d\tau. \end{aligned}$$

随后由机械臂模型的性质2不难得出

$$\begin{aligned} 2 \int_0^t \delta\mathbf{s}^{i\top} M \delta\dot{\mathbf{s}}^i d\tau &= \\ \delta\mathbf{s}^{i\top} M \delta\mathbf{s}^i - 2 \int_0^t \delta\mathbf{s}^{i\top} C \delta\mathbf{s}^i d\tau. \end{aligned} \quad (22)$$

将式(22)代入(21),可得

$$\begin{aligned} \Delta V^i &= -\delta\mathbf{s}^{i\top} M \delta\mathbf{s}^i - \\ &2 \int_0^t \delta\mathbf{s}^{i\top} [P - k_s(C + C_1 - Mk_s)] \delta\mathbf{e}^i d\tau - \\ &\int_0^t \delta\mathbf{s}^{i\top} (2C_1 - 2Mk_s + k_d) \delta\mathbf{s}^i d\tau - \\ &2 \int_0^t \delta\mathbf{s}^{i\top} k_t \text{SGN}(\delta\mathbf{s}^i) d\tau. \end{aligned}$$

根据式(5),对 ΔV^i 进行整理得到

$$\begin{aligned} \Delta V^i &= \\ &-\delta\mathbf{s}^{i\top} M \delta\mathbf{s}^i - \\ &2 \int_0^t \delta\dot{\mathbf{e}}^{i\top} [P - k_s(C + C_1 - Mk_s)] \delta\mathbf{e}^i d\tau - \\ &2k_s \int_0^t \delta\mathbf{e}^{i\top} [P - k_s(C + C_1 - Mk_s)] \delta\mathbf{e}^i d\tau - \\ &\int_0^t \delta\dot{\mathbf{e}}^{i\top} (2C_1 - 2Mk_s + k_d) \delta\mathbf{e}^i d\tau - \\ &2k_s \int_0^t \delta\mathbf{e}^{i\top} (2C_1 - 2Mk_s) \delta\mathbf{e}^i d\tau - \\ &k_s^2 \int_0^t \delta\mathbf{e}^{i\top} (2C_1 - 2Mk_s + k_d) \delta\mathbf{e}^i d\tau - \\ &2k_s \int_0^t \delta\mathbf{e}^{i\top} k_d \delta\dot{\mathbf{e}}^i d\tau - 2 \int_0^t \delta\mathbf{s}^{i\top} k_t \text{SGN}(\delta\mathbf{s}^i) d\tau. \end{aligned} \quad (23)$$

对式(23)等号右边倒数第4项使用分部积分法^[36],得到

$$\begin{aligned} & \int_0^t \delta e^{i\top} (2C_1 - 2Mk_s) \delta \dot{e}^i d\tau = \delta \dot{e}^{i\top} [k_d + 2C_1 - 2Mk_s] \delta \dot{e}^i + 2k_s \delta \dot{e}^{i\top} R_2 \delta e^i. \\ & \delta e^{i\top} (2C_1 - 2Mk_s) \delta e^i - \text{此后,结合式(9)和(10),可以推出} \\ & \int_0^t [\delta e^{i\top} (2C_1 - 2Mk_s)]' \delta e^i d\tau = R_1 \geq L_1 \|\delta \dot{e}^i\|^2 + k_s^2 L_2 \|\delta e^i\|^2 + 2k_s \delta \dot{e}^{i\top} R_2 \delta e^i. \\ & \delta e^{i\top} (2C_1 - 2Mk_s) \delta e^i - \text{由柯西-施瓦茨不等式可知} \\ & \int_0^t \delta \dot{e}^{i\top} (2C_1 - 2Mk_s) \delta e^i d\tau + |\delta \dot{e}^{i\top} R_2 \delta e^i| \leq \|\delta \dot{e}^i\| \|R_2\|_{\max} \|\delta e^i\|, \\ & 2 \int_0^t \delta e^{i\top} (\dot{M}k_s - \dot{C}_1) \delta e^i d\tau. \quad (24) \end{aligned}$$

考虑性质2,对式(24)进行整理得

$$\begin{aligned} & 2 \int_0^t \delta e^{i\top} (2C_1 - 2Mk_s) \delta \dot{e}^i d\tau = \\ & \delta e^{i\top} (2C_1 - 2Mk_s) \delta e^i + \\ & 4 \int_0^t \delta e^{i\top} C k_s \delta e^i d\tau - 2 \int_0^t \delta e^{i\top} \dot{C}_1 \delta e^i d\tau. \quad (25) \end{aligned}$$

将式(25)代入(23),有

$$\begin{aligned} \Delta V^i = & -\delta s^{i\top} M \delta s^i - k_s \delta e^{i\top} (2C_1 - 2Mk_s) \delta e^i - \\ & 2 \int_0^t \delta \dot{e}^{i\top} [P - k_s(C + C_1 - Mk_s)] \delta e^i d\tau - \\ & \int_0^t \delta \dot{e}^{i\top} (2C_1 - 2Mk_s + k_d) \delta \dot{e}^i d\tau - \\ & 2k_s \int_0^t \delta e^{i\top} P \delta e^i d\tau - 2k_s^2 \int_0^t \delta e^{i\top} C \delta e^i d\tau + \\ & 2k_s \int_0^t \delta e^{i\top} \dot{C}_1 \delta e^i d\tau - 2k_s \int_0^t \delta e^{i\top} k_d \delta \dot{e}^i d\tau - \\ & k_s^2 \int_0^t \delta e^{i\top} k_d \delta e^i d\tau - 2 \int_0^t k_t |\delta s^i| d\tau. \end{aligned}$$

为便于后续分析,定义如下变量:

$$\begin{aligned} R_1 = & 2\delta \dot{e}^{i\top} [P - k_s(C + C_1 - Mk_s)] \delta e^i + \\ & \delta \dot{e}^{i\top} (2C_1 - 2Mk_s + k_d) \delta \dot{e}^i + \\ & 2k_s \delta e^{i\top} P \delta e^i + 2k_s^2 \delta e^{i\top} C \delta e^i - \\ & 2k_s \delta e^{i\top} \dot{C}_1 \delta e^i + 2k_s \delta e^{i\top} k_d \delta \dot{e}^i. \end{aligned}$$

那么 ΔV^i 可写作

$$\begin{aligned} \Delta V^i = & -\delta s^{i\top} M \delta s^i - k_s \delta e^{i\top} (2C_1 - 2Mk_s) \delta e^i - \\ & k_s^2 \int_0^t \delta e^{i\top} k_d \delta e^i d\tau - 2 \int_0^t k_t |\delta s^i| d\tau - \int_0^t R_1 d\tau. \end{aligned}$$

对 R_1 进行重新整理,得到

$$\begin{aligned} R_1 = & k_s^2 \delta e^{i\top} \left[2C + \frac{2P}{k_s} - \frac{2\dot{C}_1}{k_s} \right] \delta e^i + \\ & 2k_s \delta \dot{e}^{i\top} \left[\frac{P}{k_s} - (C + C_1 - Mk_s) + k_d \right] \delta e^i + \\ & \delta \dot{e}^{i\top} (k_d + 2C_1 - 2Mk_s) \delta \dot{e}^i. \end{aligned}$$

定义 $R_2 = P/k_s - (C + C_1 - Mk_s) + k_d$, 为便于分析, R_1 可表示为

$$R_1 = k_s^2 \delta e^{i\top} \left[2C + \frac{2P}{k_s} - \frac{2\dot{C}_1}{k_s} \right] \delta e^i +$$

由柯西-施瓦茨不等式可知

$$|\delta \dot{e}^{i\top} R_2 \delta e^i| \leq \|\delta \dot{e}^i\| \|R_2\|_{\max} \|\delta e^i\|,$$

从而有

$$\delta \dot{e}^{i\top} R_2 \delta e^i \geq -\|\delta \dot{e}^i\| \|R_2\|_{\max} \|\delta e^i\|.$$

由式(9)和(10)和(12)推出

$$\begin{aligned} R_1 \geq & L_1 \|\delta \dot{e}^i\|^2 + k_s^2 L_2 \|\delta e^i\|^2 - \\ & 2k_s \|\delta \dot{e}^i\| \|R_2\|_{\max} \|\delta e^i\| = \\ & L_1 \left(\|\delta \dot{e}^i\| - \frac{k_s}{L_1} \|R_2\|_{\max} \|\delta e^i\| \right)^2 + \\ & k_s^2 \left(L_2 - \frac{1}{L_1} \|R_2\|_{\max}^2 \right) \|\delta e^i\|^2 \geq 0. \end{aligned}$$

结合式(11),可以得出如下结论:

$$\begin{aligned} \Delta V^i \leq & -\delta s^{i\top} M \delta s^i - k_s \delta e^{i\top} L_3 \delta e^i - \\ & k_s^2 \int_0^t \delta e^{i\top} k_d \delta e^i d\tau - 2 \int_0^t k_t |\delta s^i| d\tau - \int_0^t R_1 d\tau \leq 0, \end{aligned}$$

即 $V^{i+1} \leq V^i$. 又已知 $V^i \geq 0$, 于是 V^i 有界, 因此闭环系统在平衡点处渐近稳定, 可得

$$\lim_{i \rightarrow \infty} s^i = 0.$$

此外, 由于 k_s 是正定参数矩阵, e^i 和 \dot{e}^i 是两个自变量, 可推出

$$\begin{cases} e^i(t) \rightarrow 0, \\ \dot{e}^i(t) \rightarrow 0, \end{cases} \quad i \rightarrow \infty, t \in [0, t_i],$$

即

$$\begin{cases} q_d(t) - \hat{q}^i(t) \rightarrow 0, \\ \dot{q}_d(t) - \dot{\hat{q}}^i(t) \rightarrow 0, \end{cases} \quad i \rightarrow \infty, t \in [0, t_i].$$

综合上述分析过程和结果, 定理1得证, 即在所提控制器作用下, 随着迭代次数增加, 跟踪误差趋近于0, 能够准确实现目标轨迹跟踪. \square

4 仿真结果及分析

根据实际需求, 考虑有色金属工厂内金属铸锭打磨的应用场景, 基于一种典型构型的六自由度工业机械臂, 设计3组仿真以验证所提出控制方法的有效性和鲁棒性.

仿真1 给定目标轨迹跟踪. 本组仿真旨在验证所提出控制方法的跟踪性能. 给出机械臂各连杆质量, 如表1所示. 控制参数如表2所示. 对于控制增益 k_{p0} 和 k_{d0} , 参考PID控制器参数调整规则选择其值, k_s 的值随之确定. 此外, 无需耗费太多精力, k_t 、

α_p, β_p 和 π_p 易于通过试错进行调整.

表1 连杆质量

连杆 j	1	2	3	4	5	6
质量/kg	95.53	53.49	33.80	20.63	4.73	0.48

表2 控制参数

关节 j	$k_{p0}(j, j)$	$k_{d0}(j, j)$	$k_s(j, j)$	$k_t(j, j)$
1	80	80	1	20
2	800	500	1.6	2
3	520	260	2	2
4	20	0.4	50	100
5	40	0.8	50	40
6	3	0.06	50	100

考虑到隶属度函数通常是对称和平衡的,模糊系统的隶属度函数选择如下:

$$\begin{cases} \mu_{F_k^1} = 1/[1 + \exp(4(x_k + 0.6))], \\ \mu_{F_k^2} = 2 + \exp(-(x_k + 0.4)^2), \\ \mu_{F_k^3} = 2 + \exp(-(x_k + 0.2)^2), \\ \mu_{F_k^4} = 2 + \exp(-x_k^2), \\ \mu_{F_k^5} = 2 + \exp(-(x_k - 0.2)^2), \\ \mu_{F_k^6} = 2 + \exp(-(x_k - 0.4)^2), \\ \mu_{F_k^7} = 1/[1 + \exp(4(x_k - 0.6))]. \end{cases}$$

基于以尽量少次迭代实现控制目标的原则,进行10次迭代验证所提出算法.图2和图3分别为第1、第5和第10次迭代的关节1~关节3和关节4~关节6的轨迹跟踪效果.可以发现,随着迭代次数增加,关节角跟踪效果越来越好.由于前3个关节主要影响机械臂末端的位置,优化效果非常明显.第1次迭代时,关节1最大跟踪误差在0.02 rad左右,关节2跟踪误差在0.1 rad左右,关节3跟踪误差超过0.35 rad,且整个过程中均不同程度地存在无法跟上和超调的问题.第5次迭代时,误差已经大大减小但依旧存在,特别体现在关节2和关节3上.第10次迭代时,6个关节角都能快速准确地跟踪目标轨迹.

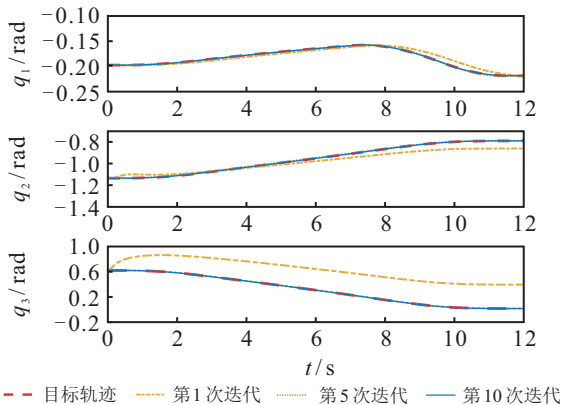


图2 关节1~关节3轨迹跟踪效果(仿真1)

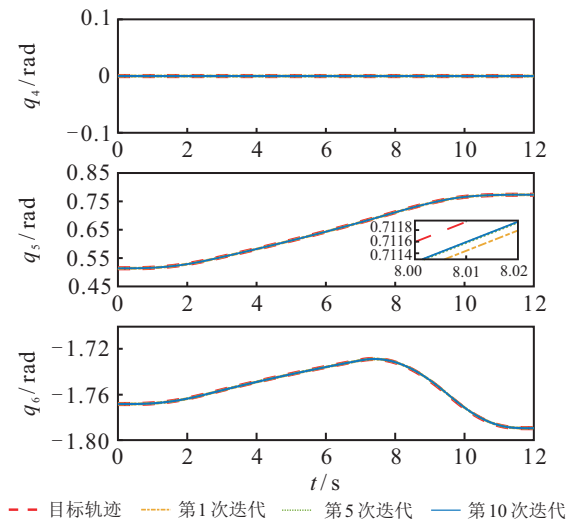


图3 关节4~关节6轨迹跟踪效果(仿真1)

图4和图5分别是第1、第5和第10次迭代的关节1~关节3和关节4~关节6的速度跟踪效果.速度跟踪优化效果依旧在前3个关节上体现得非常明显.第1次迭代时,关节1最大速度跟踪误差在0.01 rad/s左右,关节2跟踪误差在0.1 rad/s左右,关节3跟踪误差

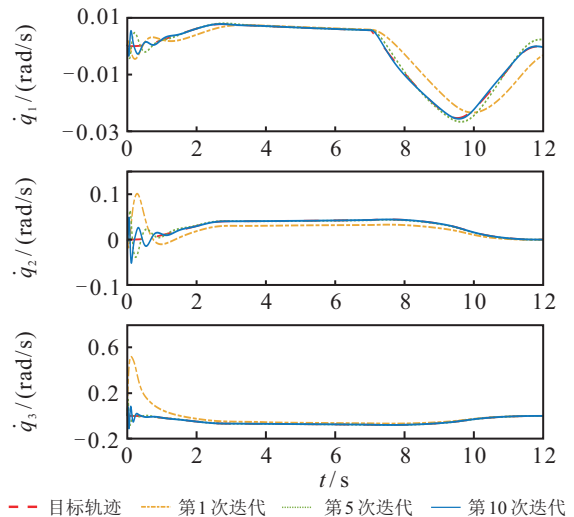


图4 关节1~关节3速度跟踪效果(仿真1)

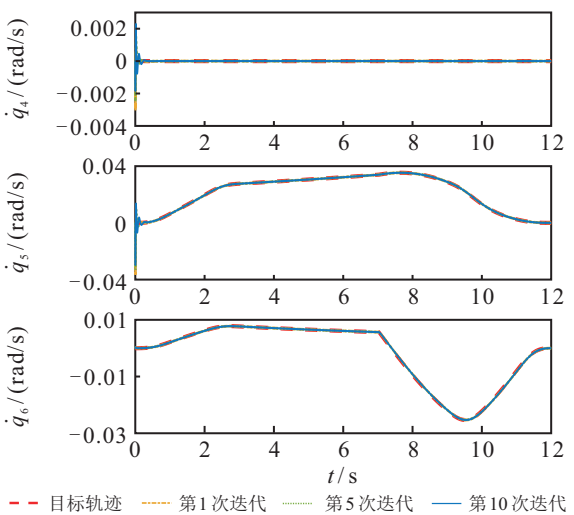


图5 关节4~关节6速度跟踪效果(仿真1)

超过0.5 rad/s. 第5次迭代时,误差已经大大减小但依旧存在,特别体现在关节1上. 第10次迭代时,关节角速度都能快速准确地跟踪目标速度轨迹.

下面根据机械臂正运动学,将第1、第5和第10次迭代的关节角映射为机械臂末端在笛卡尔空间中的位置,绘制了三维空间路径跟踪图6. 第1次迭代时,路径误差在0.15 m左右,明显偏离期望路径,到第5次迭代时路径误差已大幅减小至0.007 m左右,第10次迭代时,机械臂末端可以准确地沿期望路径运动.

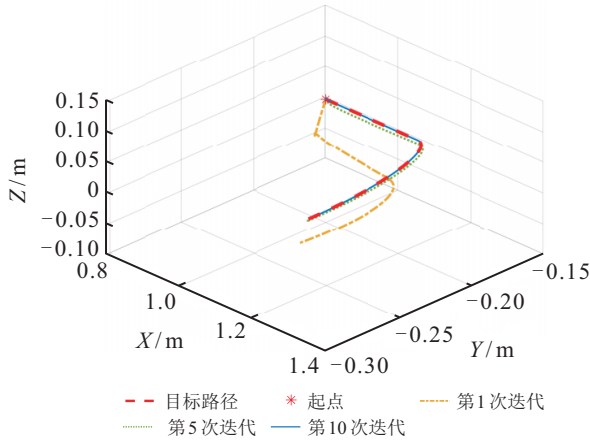


图6 笛卡尔空间路径跟踪效果(仿真1)

通过对比第1、第5、第10次迭代的跟踪效果,可以发现第1次迭代时控制效果不够理想,而在第10次迭代所得控制参数的作用下,已经能够实现令人满意的效果,充分表明了所提出迭代控制方法的有效性. 在实际机器人系统中,可采用第10次迭代所得控制器参数作为训练初始值,加快训练速度,并降低对机器人本体损伤的可能性,进而提高安全性.

仿真2 变质量及施加外部干扰情况下的目标轨迹跟踪. 本组仿真旨在验证所提出控制方法对参数不确定性和外部干扰的鲁棒性. 目标路径与仿真1相同,改变连杆质量,如表3所示,并在系统运行至6 s时分别给关节1~关节6施加幅值为0.02 rad、0.05 rad、0.05 rad、0.02 rad、0.05 rad和0.01 rad的正向阶跃扰动,6.5 s时施加等幅反向阶跃扰动. 控制参数、隶属度函数和模糊系统相关参数与仿真1保持相同,进行10次迭代.

表3 改变后的连杆质量

连杆 j	1	2	3	4	5	6
质量/kg	45.5	27.7	17.4	10.33	2.36	0.25

图7和图8分别是第1、第5和第10次迭代关节1~关节3和关节4~关节6的轨迹跟踪效果,图9和图10分别是第1、第5和第10次迭代的关节1~关节3和关节4~关节6的速度跟踪效果.

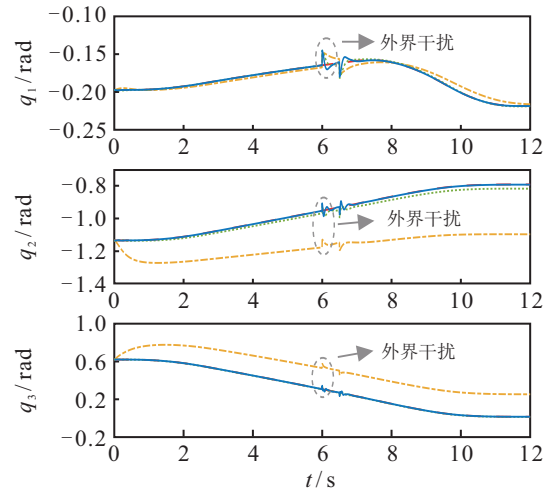


图7 关节1~关节3轨迹跟踪效果(仿真2)

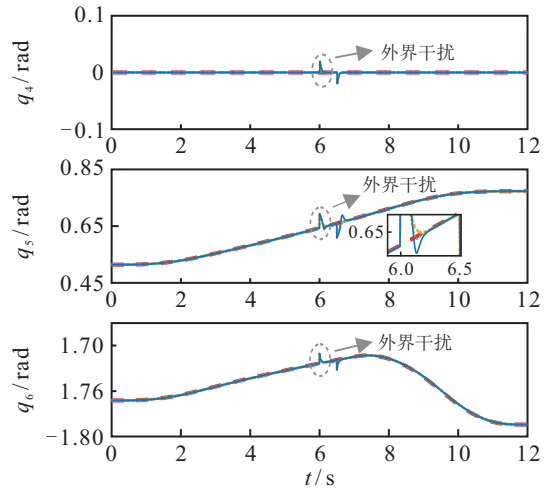


图8 关节4~关节6轨迹跟踪效果(仿真2)

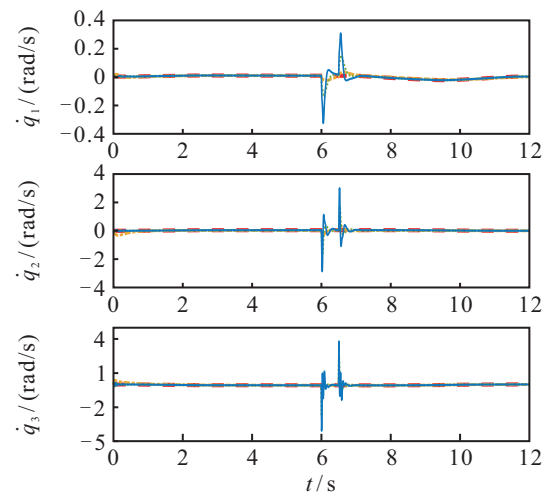


图9 关节1~关节3速度跟踪效果(仿真2)

通过前3个关节角对比不同迭代次数的跟踪情况可以发现,当连杆质量发生变化且存在外界干扰时,随着迭代次数增加,所提出控制方法依旧能够实现较好的跟踪效果. 具体而言,第1次迭代时,前3个

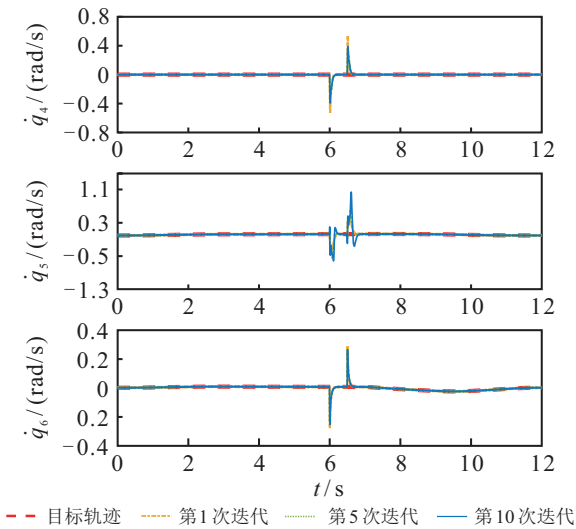


图10 关节4~关节6速度跟踪效果(仿真2)

关节角跟踪误差较大,到第5次迭代时跟踪误差已大幅减小,第10次迭代时能够实现准确地跟踪目标轨迹.此外,对于外界干扰,控制器在3次迭代中均能快速响应,消除外界干扰带来的关节角偏移.观察第10次迭代跟踪结果,对于正向干扰,控制器能在0.3s内消除干扰带来的影响;对于6.5s时施加的反向干扰,控制器能够在0.8s内使关节角重新实现准确跟踪.

同样地,将第1、第5和第10次迭代的关节角映射为笛卡尔空间中的位置,如图11所示.可以看出,在机械臂质量发生变化且存在外界干扰时,第10次迭代时所提出控制方法仍然能够实现准确的目标路径跟踪,且能够快速消除外界干扰带来的偏移.

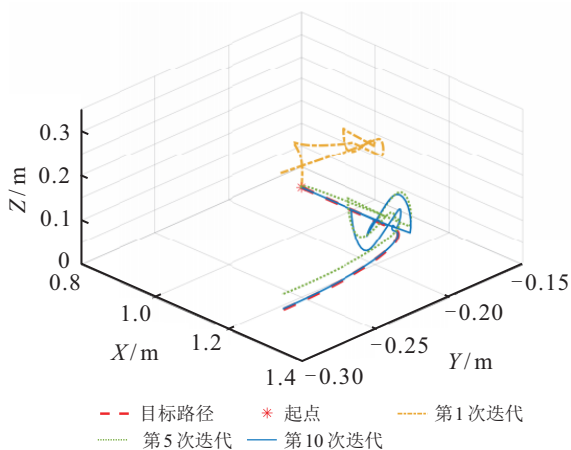


图11 笛卡尔空间路径跟踪效果(仿真2)

综合上述分析,在改变系统参数并施加外部干扰的情况下,所提出控制器具有令人满意的鲁棒性.

仿真3 固定PD参数情况下的目标轨迹跟踪.本组仿真旨在验证PD参数自整定算法可有效地提高系统鲁棒性.机械臂的模型参数及外部干扰均设定与仿真2相同,PD控制器的参数设定为固定值,如表2所示,其余参数与仿真2一致.进行10次迭代,将

本仿真的关节角跟踪效果与仿真2进行对比.

由于前3个关节的跟踪优化效果非常明显,此处仅给出前3个关节角的跟踪效果对比.图12、图13和图14分别为第1、第5和第10次迭代的关节1~关节3轨迹跟踪效果对比,其中黄色点划线表示固定PD参数情况下的轨迹跟踪效果,蓝色实线表示自适应更新PD参数情况下的轨迹跟踪效果.不难发现,在PD控制参数随跟踪误差自适应变化的情况下,系统的跟踪误差更小.以第1次迭代时的关节角2和关节角3为例,自适应参数的跟踪误差较固定参数情况下的跟踪误差分别小0.05 rad和0.1 rad左右;同时当存在外部干扰时,也能更快地消除干扰带来的影响,使关节角朝向期望轨迹运动,如从第10次迭代时关节角1和关节角2的跟踪效果可以看出,自适应参数的控制器在面对干扰时响应更快.这些均表明基于模糊逻辑系统的PD参数自整定算法可有效提高系统鲁棒性.

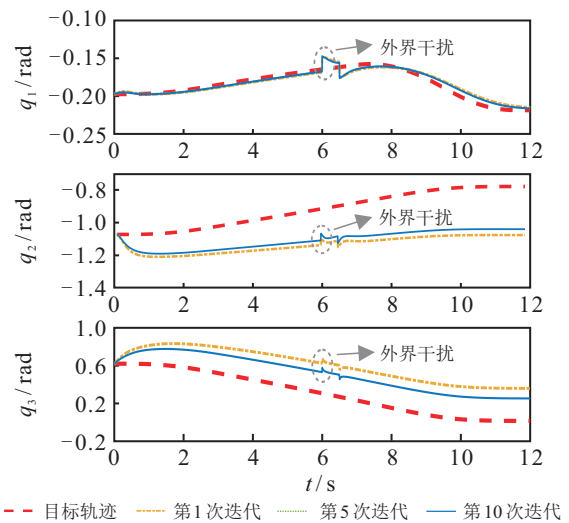


图12 第1次迭代关节1~关节3轨迹跟踪效果对比(仿真3)

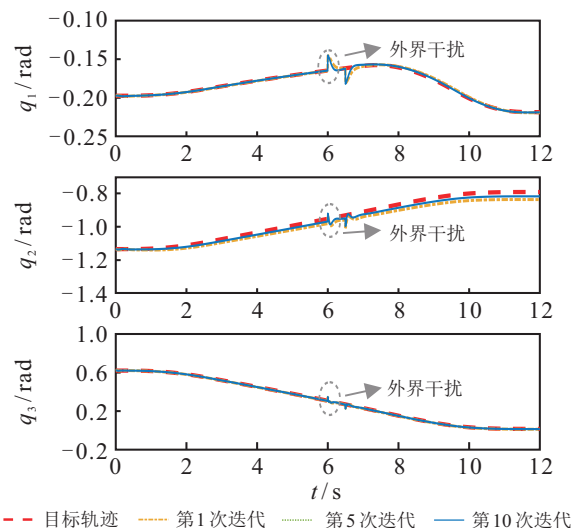


图13 第5次迭代关节1~关节3轨迹跟踪效果对比(仿真3)

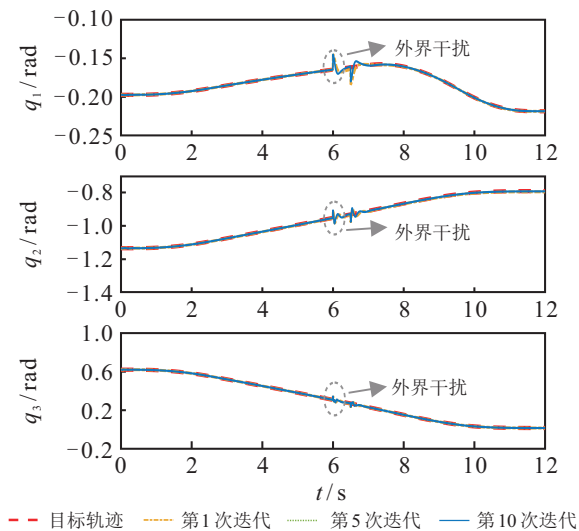


图14 第10次迭代关节1~关节3轨迹跟踪效果对比(仿真3)

5 结论

考虑到机械臂在工业生产中的大多数任务符合迭代学习控制的应用特点,且实际环境复杂多变,固定控制参数可能无法实现较好的控制效果,本文针对多自由度机械臂系统,设计了一种自适应滑模迭代学习跟踪控制算法.具体而言,首先给出了 n 自由度机械臂模型及其沿目标轨迹的线性化模型;然后,设计了自适应滑模迭代学习跟踪控制器,包含参数自整定的PD项、基于滑模的符号函数项和上一次迭代的控制输入;进一步地,使用李雅普诺夫方法证明了闭环系统在迭代域的稳定性和跟踪误差的收敛性;最后,基于六自由度机械臂模型进行数值仿真,验证了所提出方法具有令人满意的控制性能.

参考文献(References)

- [1] Quarta D, Pogliani M, Polino M, et al. An experimental security analysis of an industrial robot controller[C]. IEEE Symposium on Security and Privacy. San Jose, 2017: 268-286.
- [2] 都海波, 葛展展, 张金锋, 等. 基于改进天牛须算法的电力攀爬机器人运动学逆解算法[J]. 控制与决策, 2022, 37(9): 2217-2225.
(Du H B, Ge Z Z, Zhang J F, et al. Inverse kinematics solution algorithm of electric climbing robot based on improved beetle antennae search algorithm[J]. Control and Decision, 2022, 37(9): 2217-2225.)
- [3] Sun J K, Yang J, Li S H. Reduced-order GPIO based dynamic event-triggered tracking control of a networked one-DOF link manipulator without velocity measurement[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2019, 7(3): 725-734.
- [4] 陈强, 丁科新, 南余荣. 带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(2): 387-394.
(Chen Q, Ding K X, Nan Y R. Prescribed performance adaptive control of flexible-joint manipulators with output constraints[J]. Control and Decision, 2021, 36(2): 387-394.)
- [5] Mariotti E, Magrini E, de Luca A. Admittance control for human-robot interaction using an industrial robot equipped with a F/T sensor[C]. Proceedings of 2019 International Conference on Robotics and Automation. Montreal: IEEE, 2019: 6130-6136.
- [6] Zhang M H, Jing X J. Switching logic-based saturated tracking control for active suspension systems based on disturbance observer and bioinspired X-dynamics[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 155: 107611.
- [7] Lin F, Brandt R D. An optimal control approach to robust control of robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(1): 69-77.
- [8] Bobrow J E, Dubowsky S, Gibson J S. Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths[J]. The International Journal of Robotics Research, 1985, 4(3): 3-17.
- [9] Buizza Avanzini G, Zanchettin A M, Rocco P. Constrained model predictive control for mobile robotic manipulators[J]. Robotica, 2018, 36(1): 19-38.
- [10] Kleff S, Meduri A, Budhiraja R, et al. High-frequency nonlinear model predictive control of a manipulator[C]. Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Xi'an, 2021: 7330-7336.
- [11] Liu H, Tian X, Wang G, et al. Finite-time H_∞ control for high-precision tracking in robotic manipulators using back stepping control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(9): 5501-5513.
- [12] Nikdel N, Badamchizadeh M A, Azimirad V, et al. Adaptive backstepping control for an n -degree of freedom robotic manipulator based on combined state augmentation[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 44: 129-143.
- [13] Hashem Zadeh S M, Khorashadizadeh S, Fateh M M, et al. Optimal sliding mode control of a robot manipulator under uncertainty using PSO[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 84(4): 2227-2239.
- [14] Cervantes I, Alvarez-Ramirez J. On the PID tracking control of robot manipulators[J]. Systems & Control Letters, 2001, 42(1): 37-46.
- [15] Delavari H, Ghaderi R, Ranjbar N A, et al. Adaptive fractional PID controller for robot manipulator[J/OL]. 2012, arXiv: 1206.2027.
- [16] Perez J, Perez J P, Soto R, et al. Trajectory tracking error using PID control law for two-link robot manipulator via adaptive neural networks[J]. Procedia Technology, 2012, 3: 139-146.
- [17] Tan F X, Guan X P, Chen Y, et al. Tracking control of nonholonomic mobile robot based on unfalsified

- adaptive PID theory[C]. Proceedings of 2010 World Congress on Intelligent Control and Automation. Ji'nan, 2010: 2598-2603.
- [18] Piltan F, Sulaiman N B. Review of sliding mode control of robotic manipulator[J]. World Applied Sciences Journal, 2012, 18(12): 1855-1869.
- [19] Islam S, Liu X P. Robust sliding mode control for robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(6): 2444-2453.
- [20] Wang J, Zhou Y D, Bao Y L, et al. Trajectory tracking control using fractional-order terminal sliding mode control with sliding perturbation observer for a 7-DOF robot manipulator[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(4): 1886-1893.
- [21] 赵振华, 肖亮, 姜斌, 等. 基于扩张状态观测器的四旋翼无人机快速非奇异终端滑模轨迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(9): 2201-2210.
(Zhao Z H, Xiao L, Jiang B, et al. Fast nonsingular terminal sliding mode trajectory tracking control of a quadrotor UAV based on extended state observers[J]. Control and Decision, 2022, 37(9): 2201-2210.)
- [22] Li Y X, Yang G H. Adaptive asymptotic tracking control of uncertain nonlinear systems with input quantization and actuator faults[J]. Automatica, 2016, 72: 177-185.
- [23] 翟艳霞, 胡庆雷, 徐梁, 等. 输入有界的自由漂浮柔性空间机器人轨迹跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(3): 395-400.
(Zhai Y X, Hu Q L, Xu L, et al. Trajectory tracking control of free-floating flexible space robot with bounded input[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(3): 395-400.)
- [24] Liu A Q, Zhao H H, Song T, et al. Adaptive control of manipulator based on neural network[J]. Neural Computing and Applications, 2021, 33(9): 4077-4085.
- [25] Yang T, Sun N, Fang Y C, et al. New adaptive control methods for n -link robot manipulators with online gravity compensation: Design and experiments[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1): 539-548.
- [26] Zhou Q, Zhao S Y, Li H Y, et al. Adaptive neural network tracking control for robotic manipulators with dead zone[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2019, 30(12): 3611-3620.
- [27] Wang H L. Adaptive control of robot manipulators with uncertain kinematics and dynamics[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(2): 948-954.
- [28] Fujimoto K, Sugie T. Iterative learning control of Hamiltonian systems: I/O based optimal control approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(10): 1756-1761.
- [29] Oh S R, Bien Z, Suh I H. An iterative learning control method with application to robot manipulators[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1988, 4(5): 508-514.
- [30] Choi J Y, Uh J, Lee J S. Iterative learning control of robot manipulator with I-type parameter estimator[C]. Proceedings of 2001 American Control Conference. Arlington, 2001, 1: 646-651.
- [31] Tayebi A, Abdul S, Zaremba M B, et al. Robust iterative learning control design: Application to a robot manipulator[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2008, 13(5): 608-613.
- [32] Saab S S, Shen D, Orabi M, et al. Iterative learning control: Practical implementation and automation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2): 1858-1866.
- [33] Parra-Vega V, Arimoto S, Liu Y H, et al. Dynamic sliding PID control for tracking of robot manipulators: Theory and experiments[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(6): 967-976.
- [34] Tutsoy O, Barkana D E. Model free adaptive control of the under-actuated robot manipulator with the chaotic dynamics[J]. ISA Transactions, 2021, 118: 106-115.
- [35] Uchiyama M. Formation of high-speed motion pattern of a mechanical arm by trial[J]. Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, 1978, 14(6): 706-712.
- [36] Ouyang P R, Zhang W J, Gupta M M. An adaptive switching learning control method for trajectory tracking of robot manipulators[J]. Mechatronics, 2006, 16(1): 51-61.
- [37] Slotine J J E, Li W. On the adaptive control of robot manipulators[J]. International Journal of Robotics Research, 1987, 6(3): 49-59.
- [38] Li Y M, Li K W, Tong S C. Finite-time adaptive fuzzy output feedback dynamic surface control for MIMO nonstrict feedback systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 27(1): 96-110.

作者简介

张程琳(1998—),女,助理工程师,硕士,从事飞机气候环境适应性的研究, E-mail: zhangchenglin@mail.nankai.edu.cn;

桑文闯(1998—),男,硕士生,从事机器人规划与控制的研究, E-mail: sangwc@mail.nankai.edu.cn;

孙宁(1988—),男,教授,博士生导师,从事欠驱动机器人、气动人工肌肉系统的控制及应用等研究, E-mail: sunn@nankai.edu.cn;

邱泽昊(1997—),男,博士生,从事气动软体机器人的研究, E-mail: qzhao@mail.nankai.edu.cn;

吴庆祥(1991—),男,助理研究员,博士,从事欠驱动系统智能控制与工业应用的研究, E-mail: wuqx@nankai.edu.cn;

方勇纯(1973—),男,教授,博士生导师,从事非线性控制、机器人视觉伺服、无人机、桥式吊车等研究, E-mail: fangyc@nankai.edu.cn.