

基于迭代滑模的机械臂控制策略^{*}

鲁文儒¹, 张鑫^{1,2}, 张靛¹, 徐文波¹

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省人工智能与图形图像处理工程研究中心, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 针对机械臂这类非线性的不确定性系统, 基于迭代学习控制与滑模控制策略, 提出了一种有效的迭代滑模控制方法。该控制方法通过将滑模控制律引入到迭代学习控制中, 并运用 Lyapunov 理论对控制律进行证明, 从而确保系统的稳定性。基于拉格朗日力学法建立动力学模型, 得到相对简化的 n 关节机械臂模型。以一个二关节机械臂为例, 通过 MATLAB 仿真验证所提控制策略可有效提高关节的跟踪速度与跟踪精度, 并且在一定程度上可减缓传统滑模控制的抖振现象, 与传统迭代学习控制相比, 系统具有鲁棒性。物理试验验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 机械臂; 迭代学习控制; 滑模控制; Lyapunov 理论

中图分类号: TP 242.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)12-0033-07

Manipulator Control Strategy Based on Iterative Sliding Mode^{*}

LU Wenru¹, ZHANG Xin^{1,2}, ZHANG Jing¹, XU Wenbo¹

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Provincial Engineering Research Center for Artificial Intelligence and Graphics & Image Processing, Lanzhou 730070, China)

Abstract: An effective iterative sliding mode control (SMC) method based on iterative learning control and SMC strategy for such nonlinear uncertain systems as manipulator was proposed. The control method introduced the SMC law into the iterative learning control, and proved the control law by using Lyapunov theory to ensure the stability of the system. A relatively simplified n -joint manipulator model was obtained via the dynamics model which was established based on Lagrangian mechanics method. It was verified by a two-joint manipulator simulation on MATLAB that the proposed control strategy could effectively improve the tracking speed and tracking accuracy and alleviate the chattering phenomenon of the traditional SMC to a certain extent, and its robustness was better than the traditional iterative learning control. Finally, the effectiveness of the control strategy designed was verified by physical experiments.

Key words: manipulator; iterative learning control; sliding mode control; Lyapunov theory

0 引言

机械臂是一种多输入多输出的复杂系统, 具有非线性、时变不确定等特点^[1-2]。机械臂种类多样、操作灵活, 在反恐防爆、工业装配等领域应用广泛。中国相继出台了《关于推进机器人产业的指导意见》和《机器人产业发展规划(2016—

2020 年)》等, 同时科技部通过 863 项目对机器人相关技术研究给予扶持。

迭代学习控制是具有严格数学描述的一个分支, 适合于解决强非线性、强耦合、难建模、运动具有重复性的高精度控制问题。迭代学习控制与其他控制算法相比, 数学模型精确、算法简单且能够实现完全跟踪, 但是系统存在鲁棒性问题^[3]。滑

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(61663022)

作者简介: 鲁文儒(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为工业机器人控制。

模控制的突出特点之一是在其设计过程中不需要系统提供十分精确的动力学模型,只需要利用轨迹的跟踪误差或者位置控制误差合理设计滑模面即可,并且具有响应速度快、鲁棒性良好等特点。这种方法在此类非线性、不确定性系统中应用十分广泛,但是最大缺点是在控制过程中存在抖振,会影响控制过程的精确性^[4]。研究发现,在迭代学习控制理论中引入滑模控制理论后,可以增强系统的鲁棒性来抑制各种不确定的扰动,同时可以降低控制过程的抖动特性,从而来提高机械臂的控制精度。文献[5]为了对优化三轴直角坐标机器人末端执行器位姿精度,设计了一种迭代滑模交叉耦合控制器。文献[6]为了解决卫星姿态控制问题,提出了一种基于迭代学习观测器的姿态容错控制方法,并利用所观测的结果设计了滑模控制器。文献[7]提出采用 RBF 神经网络滑模变结构控制来确定学习律的方法,并运用 Simulink 对该方法进行了仿真研究,结果表明,具有学习速度快、跟踪精度高、鲁棒性强等优点。文献[8]针对三自由度欠驱动船舶的路径跟踪问题,提出了一种自适应迭代滑模控制方法。文献[9]设计了一种鲁棒迭代学习控制策略,以滑模控制和迭代学习控制为核心,有效抑制望远镜伺服控制系统的周期性转矩脉动,提高了速度和位置的跟踪精度。

由于工业机器人的滑模控制与迭代学习控制结合的控制策略研究仍然较少,所以本文以机械臂作为研究对象,提出了滑模控制与迭代学习控制相结合的控制策略,即用滑模控制律替代迭代学习控制律,并通过 MATLAB 对所提控制策略的有效性进行了仿真验证。

1 迭代学习控制及滑模控制

1.1 迭代学习控制

迭代学习控制是现在的研究热点之一,是研究者们对高速运行的机械手进行控制时提出的。迭代学习控制用以往的控制经验来改变目前的控制效果,是通过被控对象的该次控制结果来指导下次控制的方法,并通过多次重复控制来进行自我完善,使控制效果在不断的改进中逐步趋于完善^[10]。迭代学习控制的基本控制思想:给定期望输出 $y_d(t)$ 以及每一次所运行时的初始状态

$x_k(0)$, 在时间 t 内按照一定的算法经过多次重复计算,使得控制输入 $u_k(t)$ 趋近于 $u_d(t)$, 输出 $y_k(t)$ 趋近于 $y_d(t)$ 。

迭代学习控制包括开环控制和闭环控制。开环控制是系统第 k 次的控制加第 k 次输出误差的校正项来等于第 $k+1$ 次的控制,即:

$$u_{k+1}(t) = L[u_k(t), e_k(t)] \quad (1)$$

式中: L ——线性或非线性算子;

$e_k(t)$ ——跟踪误差。

闭环学习控制的学习修正项取第 $k+1$ 次运行的误差,即:

$$u_{k+1}(t) = L[u_k(t), e_{k+1}(t)] \quad (2)$$

Arimoto 等^[11]在 1984 年提出了线性时变连续系统的 D 型迭代学习控制律:

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Gamma \dot{e}_k(t) \quad (3)$$

式中: Γ ——常数增益矩阵。

在 D 型算法的基础之上又相继出现了 P 型、PI 型、PD 型、PID 型等学习算法。虽然迭代学习控制的控制精度较高,几乎可以跟踪任意精度的运行轨迹,但是系统鲁棒性较差,而且机械臂在动作过程中伴随着各种扰动存在,影响迭代学习控制在机械臂高精度控制中的使用。

1.2 滑模控制

滑模控制是一种非线性控制,具有对不确定参数和外界干扰具有强鲁棒性等优点^[12],在很多领域得到了广泛的应用,如航空航天、机器人控制以及化工控制等^[13]。

滑模控制的设计包括滑模面和滑模控制律的设计。滑模面主要有线性和非线性滑模面、积分滑模面、移动滑模面等。本文定义的滑模面为

$$s = ce + \dot{e} \quad (4)$$

其中: $c = \text{diag}(c_1, \dots, c_n)$, $c_n > 0$ 。

滑模控制的核心思想是控制律的设计。趋近运动是滑模运动中的一个重要组成部分,其过程指系统由任意的初始位置向切换面趋近,最终到达切换面的一种运动。滑模控制理论中并没有限制趋近运动中的具体运动轨迹,因此若趋近律选用合理,则可以在很大程度上加快趋近速度,并减缓系统抖振,从而使整个趋近过程获得更好的动态品质。在传统滑模控制理论中,常用的趋近律有等速趋近律、指数趋近律、幂次趋近律、一般趋近律^[14]。本文选用指数趋近律,即:

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sign}(s) - ks \quad (5)$$

其中: $\varepsilon > 0, k > 0$ 为待设参数, 通过调节参数 ε 和 k 来调节系统整个趋近阶段的收敛速度。

滑模控制系统在运行过程中会反复切换, 实际系统能量有限, 即控制力是有限的, 此外还存在惯性力使系统在切换时出现滞后, 产生抖振。为此, 针对迭代学习控制的鲁棒性问题以及滑模控制的抖振现象, 本文利用滑模控制律结合迭代学习控制设计了一个具有鲁棒性且可以减缓抖振现象的控制系统。

2 机械臂动力学模型

机械臂结构如图 1 所示。

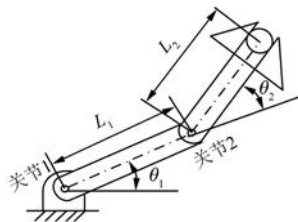


图 1 机械臂结构

本文采用拉格朗日法建立机器人动力学模型^[4]。拉格朗日函数 L 为系统动能 K_t 和势能 P 之差:

$$L = K_t - P \quad (6)$$

描述系统动力学状态的拉格朗日方程为

$$F_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中: F_i ——作用在第 i 个坐标上的广义力矩;

$\dot{q}_i$ ——广义速度;

q_i ——广义坐标;

n ——连杆数目。

因此, 多关节机器人系统的总动能为

$$K_t = K + K_a = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{tr} \left(\frac{\partial T_i}{\partial \dot{q}_j} I_i \frac{\partial T_i^T}{\partial \dot{q}_k} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_{ai} \dot{q}_i^2 \quad (8)$$

式中: K —— n 连杆多关节机器人总动能;

K_a ——传动装置总动能;

tr ——矩阵的迹;

I_i ——伪惯性矩阵;

I_{ai} ——传动装置的等效转动惯量。

多关节机器人的总势能为

$$P = - \sum_{i=1}^n m_i g^T T_i^i r_i \quad (9)$$

式中: m_i ——连杆的质量;

g^T ——重力加速度项;

r_i ——连杆相对于前端关节坐标系的重心位置。

将式(8)、式(9)代入式(6), 可得:

$$L = K_t - P = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{tr} \left(\frac{\partial T_i}{\partial \dot{q}_j} I_i \frac{\partial T_i^T}{\partial \dot{q}_k} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_{ai} \dot{q}_i^2 + \sum_{i=1}^n m_i g^T T_i^i r_i \quad (10)$$

将式(10)代入式(7)整理可得:

$$\tau_i = \sum_{j=1}^n D_{ij} \ddot{q}_j + I_{ai} \ddot{q}_i + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_i \quad (11)$$

式中: τ_i —— n 连杆多关节机器人系统动力学方程。

D_{ij} 、 D_{ijk} 、 D_i 分别表示为

$$\begin{cases} D_{ij} = \sum_{p=\max(i,j)}^n \text{tr} \left(\frac{\partial T_p}{\partial \dot{q}_j} I_p \frac{\partial T_p^T}{\partial \dot{q}_i} \right) \\ D_{ijk} = \sum_{p=\max(i,j,k)}^n \text{tr} \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial \dot{q}_j \partial \dot{q}_k} I_p \frac{\partial T_p^T}{\partial \dot{q}_i} \right) \\ D_i = \sum_{p=i}^n -m_p g^T \frac{\partial T_p}{\partial \dot{q}_i} r_p \end{cases} \quad (12)$$

对式(12)进行简化处理, 得到相对简化的动力学模型。通过对式(12)规范整理并简化可得动力学模型:

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = \tau + f(t) \quad (13)$$

其中: $q \in R^n$ 为机械臂的关节位置; $\dot{q} \in R^n$ 与 $\ddot{q} \in R^n$ 为速度矢量和加速度矢量; $M(q) \in R^{n \times n}$ 为惯性矩阵; $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 为离心力与哥氏力矩阵; $G(q) \in R^n$ 为重力项; $\tau \in R^n$ 为控制力矩。

系统建模误差、参数变化和其他因素看作外界扰动, 用 $f(t)$ 表示。

3 机械臂迭代滑模控制器设计

根据已推导的机械臂动力学模型, 取 $q_d(t)$ 为关节理想位置, $q(t)$ 为关节实际位置, 机械臂

各关节的位置跟踪误差定义为

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{q}_d(t) - \mathbf{q}(t) \quad (14)$$

对式(14)求二次导,得:

$$\ddot{\mathbf{e}} = \ddot{\mathbf{q}}_d - \ddot{\mathbf{q}} \quad (15)$$

滑模面为

$$\mathbf{s} = \mathbf{c}\mathbf{e} + \dot{\mathbf{e}} \quad (16)$$

对式(16)求导,得:

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{c}\dot{\mathbf{e}} + \ddot{\mathbf{e}} \quad (17)$$

将式(13)、式(15)代入(17),得:

$$\mathbf{s} = \mathbf{c}\dot{\mathbf{e}} + \ddot{\mathbf{q}} - \mathbf{M}^{-1}[\boldsymbol{\tau} + \mathbf{f}(t) - \mathbf{G} - \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}] \quad (18)$$

取指数趋近律为

$$\dot{\mathbf{s}} = -\varepsilon \text{sign}(\mathbf{s}) - k\mathbf{s} \quad (19)$$

将式(18)与式(19)进行合并化简后可得控制律为

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}[\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{e}} + \varepsilon \text{sign}(\mathbf{s}) + k\mathbf{s}] + \mathbf{G} + \mathbf{C} - \mathbf{f} \quad (20)$$

整个迭代滑模算法控制率为

$$\mathbf{u}_{k+1}(t) = \mathbf{u}_k(t) + \boldsymbol{\tau} \quad (21)$$

对式(21)稳定性进行证明,选取 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2}\mathbf{s}^2 \quad (22)$$

式(22)大于零,两侧求导,引入式(17)得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{s}\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{s}(\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{e}}) = \\ &\mathbf{s}\{\ddot{\mathbf{q}} - \mathbf{M}^{-1}(\boldsymbol{\tau} + \mathbf{f} - \mathbf{C} - \mathbf{G}) + \mathbf{c}\dot{\mathbf{e}}\} \end{aligned} \quad (23)$$

将式(20)引入式(23)得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{s}(-\mathbf{c}\dot{\mathbf{e}} - \varepsilon \text{sign}(\mathbf{s}) - k\mathbf{s} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{e}}) \leq \\ &-k\mathbf{s}^2 - \varepsilon|\mathbf{s}| \end{aligned} \quad (24)$$

显然式(24)小于零。根据 Lyapunov 稳定性判据第二法(直接法),因为 $V>0$, 且 $\dot{V}<0$, 所以判断出该系统是渐进稳定的。文献[15]从数学角度证明,当选取合适的参数时,跟踪误差可收敛到零,实现了精确跟踪。

系统的控制结构图如图 2 所示。其中, $u_k(t)$ 和 $u_{k+1}(t)$ 为前一次控制和当前控制的信号, $y_r(t)$ 和 $y_{k+1}(t)$ 为输入信号和反馈信号, $e_k(t)$ 为误差。

4 控制器有效性验证

4.1 仿真参数设定

为了验证迭代学习控制与滑模控制律结合的有效性,引用文献[3]中的二关节机器臂仿真例子,将其与上文所提方法相结合,采用 MATLAB

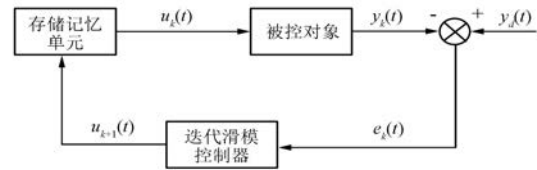


图 2 系统控制结构图

对系统进行仿真试验。

采用式(13)的二关节机械臂的系统模型,其机构的具体参数选取如下:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} v + q_{01} + 2q_{02}\cos(q_2) & q_{01} + q_{02}\cos(q_2) \\ q_{01} + q_{02}\cos(q_2) & q_{01} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} -q_{02}\dot{q}_2\sin(q_2) & -q_{02}(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)\sin(q_2) \\ q_{02}\dot{q}_1\sin(q_2) & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 15g\cos q_1 + 8.75g\cos(q_1 + q_2) \\ 8.75g\cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{f}(t) = 3\sin(2\pi t) \quad (28)$$

其中: $v = 14$; $q_{01} = 8.98$; $q_{02} = 8.75$; $g = 9.8$ 。

二关节机械臂系统初始状态为 $[q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4] = [0 \ 3 \ 1 \ 0]$ 。控制参数取 $\text{diag}(c_1, c_2) = \text{diag}(40, 40)$; 趋近律系数为 $\varepsilon = 0.5$, $k = 50$ 。

设迭代次数为 5 次,二关节位置指令为 $q_{1d} = \sin(3t)$ 和 $q_{2d} = \cos(3t)$ 。分别用以下 3 种控制方法进行比较分析。

方法一:传统滑模控制

$$\begin{cases} \mathbf{s}_1 = \mathbf{c}\mathbf{e} + \dot{\mathbf{e}} \\ \boldsymbol{\tau}_1 = \mathbf{M}[\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{e}} + \varepsilon \text{sign}(\mathbf{s}) + k\mathbf{s}] + \mathbf{G} + \mathbf{C} - \mathbf{f} \end{cases} \quad (29)$$

方法二:传统迭代学习控制

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{k+1}(t) = \mathbf{u}_k(t) + \mathbf{K}_p[\mathbf{q}_d(t) - \mathbf{q}_{k+1}(t)] + \\ \mathbf{K}_d[\dot{\mathbf{q}}_d(t) - \dot{\mathbf{q}}_{k+1}(t)] \\ \mathbf{K}_p = [100 \ 0; 0 \ 100] \\ \mathbf{K}_d = [500 \ 0; 0 \ 500] \end{cases} \quad (30)$$

方法三:迭代滑模控制

$$\begin{cases} \mathbf{s}_1 = \mathbf{c}\mathbf{e} + \dot{\mathbf{e}} \\ \mathbf{u}_{k+1}(t) = \mathbf{u}_k(t) + \mathbf{M}[\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{e}} + \varepsilon \text{sign}(\mathbf{s}) + k\mathbf{s}] + \\ \mathbf{G} + \mathbf{C} - \mathbf{f} \end{cases} \quad (31)$$

4.2 仿真结果

将所给出的 3 种控制方法, 利用上述参数进行仿真。给定期望轨迹为正弦信号时, 图 3 所示为传统滑模控制的位置跟踪。图 4 所示为传统迭代学习控制的 5 次迭代跟踪过程与第 5 次迭代位置跟踪。图 5 所示为迭代滑模控制的 5 次迭代的跟踪过程与第 5 次迭代位置跟踪。

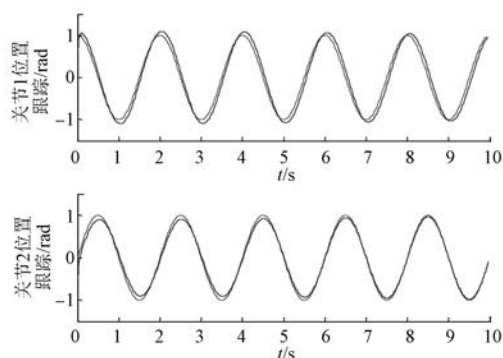
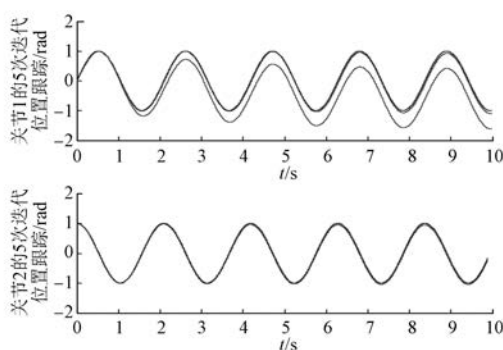
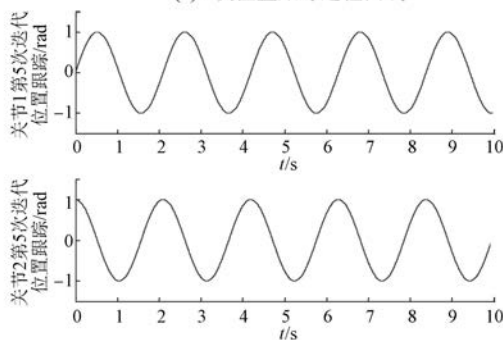


图 3 传统滑模控制位置跟踪



(a) 5次位置跟踪过程曲线

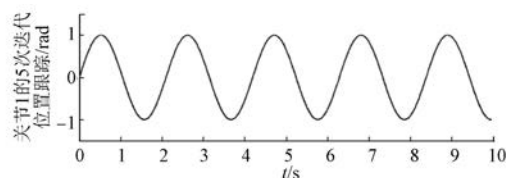


(b) 第5次位置跟踪曲线

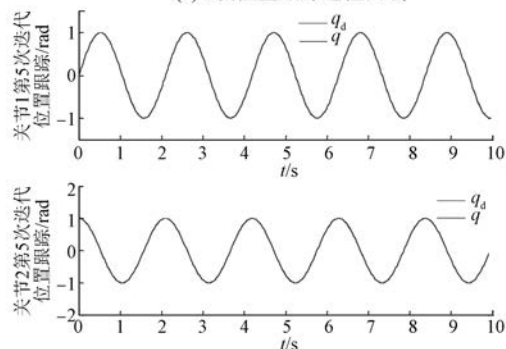
图 4 传统迭代学习控制 5 次跟踪及第 5 次位置跟踪

由图 3~图 5 可以得出, 选取迭代学习控制结合滑模控制可以在一定程度上使各关节的跟踪速度显著加快, 且跟踪性能更好, 即采用迭代滑模控

制策略进行 5 次迭代后的位置跟踪结果优于采用传统迭代学习控制策略迭代 5 次后的结果。



(a) 5次位置跟踪过程曲线



(b) 第5次位置跟踪曲线

图 5 迭代滑模控制 5 次跟踪及第 5 次位置跟踪

图 6 所示为迭代滑模控制的控制输入。图 7 所示为传统滑模控制的控制输入。由图 6、图 7 可以看出, 迭代滑模控制策略本身抑制了抖振现象, 采用迭代滑模控制策略产生的控制输入信号更加平滑, 优于传统滑模控制。

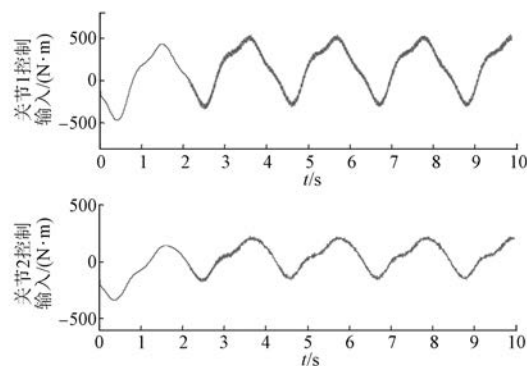


图 6 传统滑模控制的控制输入

图 8 为方法二与方法三的误差范数收敛过程。由图 8 可知, 方法三的性能要优于方法二。表 1、表 2 为关节 1 和关节 2 的误差范数的最大最小值比较。

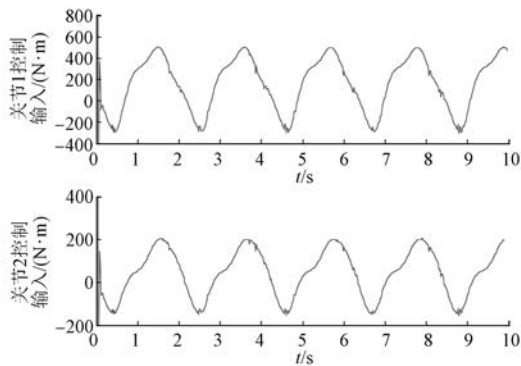


图 7 迭代滑模控制的控制输入

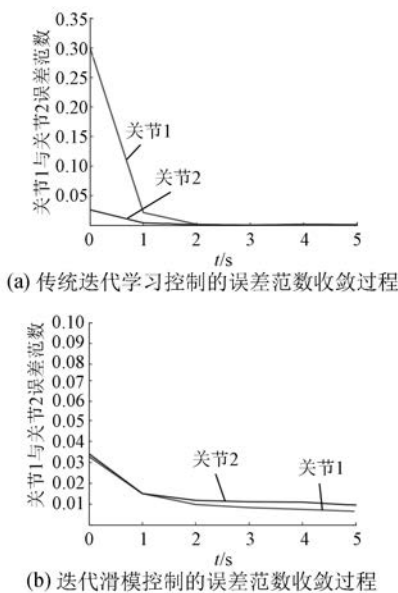


图 8 2 种控制策略下的误差范数收敛过程

表 1 关节 1 的误差范数比较

控制策略	最大值	最小值
传统迭代学习控制	0.229 3	1.422×10^4
迭代滑模控制	0.032 8	0.006 6

表 2 关节 2 的误差范数比较

控制策略	最大值	最小值
传统迭代学习控制	0.026 4	6.709×10^4
迭代滑模控制	0.033 9	0.009 4

当给定期望轨迹为单位阶跃响应时,图 9 所示为 3 种方法下单位阶跃响应曲线。表 3 所示为 3 种方法下的单位阶跃响应性能指标。由图 9、表 3 可知,本文所提方法可以较好地满足单位阶跃

响应中动态性能和稳态性能指标要求。

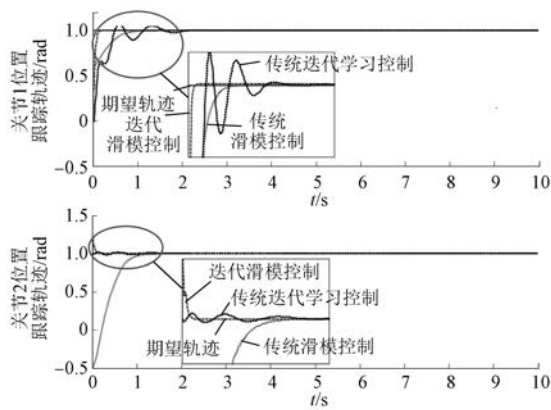


图 9 3 种控制方法的单位阶跃响应

表 3 单位阶跃响应性能指标

控制方法		最大超调量	调整时间	稳态误差
		$\sigma/\%$	t_s/s	e_{ss}/rad
方法一	关节 1	0.01	1.09	$<0.000\ 5$
	关节 2	0.01	1.17	$<0.000\ 8$
方法二	关节 1	6.87	0.46	$<0.000\ 2$
	关节 2	1.98	0.14	$<0.000\ 5$
方法三	关节 1	0.24	0.12	$<0.000\ 1$
	关节 2	24.26	0.14	$<0.000\ 2$
阶跃响应性能指标		≤ 30	≤ 1.5	≤ 0.01

为了验证本文所设计的控制算法在实际应用中的控制性能,在 GRB4016 机械臂的前 2 个关节上进行轨迹跟踪试验,其余关节锁死,如图 10 所示。硬件系统主要包括 GRB4016 机械臂、电控柜、上位机、串口。软件为固高公司开发的能兼容 MATLAB 的编程开发平台 OtoStudio,用户可以在 Simulink 环境下调整内部控制器也可独立设计控制器,通过该软件自动生成可执行文件。

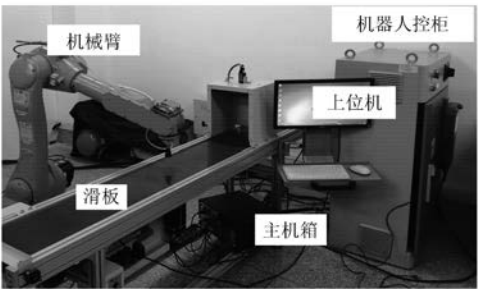


图 10 试验平台

系统控制过程:测量关节电动机角度位置,通过专用电缆传送到电控柜的数据采集模块,再通过串口传输到计算机,通过上位机控制器计算出控制力矩,经数据采集模块送到驱动器,驱动机械臂关节电动机运动,完成机械臂控制任务,以验证本文设计控制策略的有效性。试验结果如图 11 所示。

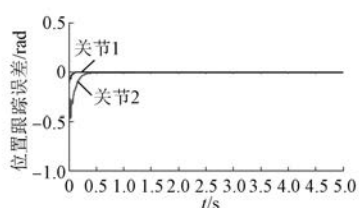


图 11 迭代滑模控制策略下关节的位置跟踪误差

5 结 语

针对迭代学习控制算法和滑模控制算法所存在的鲁棒性和抖振问题,本文提出了将二者相结合的迭代滑模算法。以机械臂为研究对象,提出了基于滑模控制律指数趋近律的迭代学习控制,并利用仿真试验进行了对比分析,得出以下结论:

(1) 与传统滑模控制相比,迭代滑模控制跟踪速度更快,具有更优良的平滑特性,在很大程度上实现了对抖振的削弱,且减小了均方根误差。

(2) 与传统迭代学习控制相比,迭代滑模控制算法不仅控制精度高,而且鲁棒性强,2 个关节的误差范数也有所减小。

(3) 与传统滑模控制方法及迭代学习控制方法相比,将滑模控制律引入迭代学习控制中,可改善各关节跟随速度与跟随效果。与此同时,在物理试验结果中验证了本文所设计控制策略的有效性。

【参考文献】

[1] 史先鹏,刘士荣.机械臂轨迹跟踪控制研究进展[J].控制工程,2011,18(1): 116.

- [2] 陈昱,周勇,高婷婷,等.基于混合滑模的 7DOF 机械臂轨迹跟踪控制策略研究[J].系统科学与数学,2015,35(4): 385.
- [3] 刘金琨.机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社,2008.
- [4] 胡盛斌.非线性多关节机械人系统滑模控制[M].北京:国防工业出版社,2015.
- [5] 许鸣吉,李胜,陈庆伟,等.直角坐标机器人迭代滑模交叉耦合控制器设计[J].组合机床与自动化加工技术,2018,31(5): 78.
- [6] 管宇,张迎春,沈毅,等.基于迭代学习观测器的卫星姿态控制系统的鲁棒容错控制[J].宇航学报,2012,33(8): 1080.
- [7] 张囡,李元明.机械手 RBF 神经网络滑模迭代学习控制[J].电子世界,2013(10): 219.
- [8] 沈智鹏,代昌盛.欠驱动船舶路径跟踪的强化学习迭代滑模控制[J].哈尔滨工程大学学报,2017,38(5): 697.
- [9] 刘京.基于永磁同步电机的大型望远镜低速伺服系统研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2018.
- [10] 贾东明.基于迭代滑模算法的机械臂控制[D].郑州:郑州大学,2011.
- [11] ARIMOTO S, KAWAMURA S, MIYAZAKI F. Bettering operation of robots by learning[J]. Journal of Field Robotics, 1984, 1(2): 123.
- [12] SHTESEL Y, SHKOLNIKOV I A. Aeronautical and space vehicle control in dynamic sliding manifolds [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2003, 36(11): 359.
- [13] LEE S U, CHANG P H. Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface [J]. Control Engineering Practice, 2002, 10(7): 697.
- [14] 刘金琨.滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M].3 版.北京:清华大学出版社,2015.
- [15] DADRAS S, MOMENI H R. Fractional terminal sliding mode control design for a class of dynamical systems with uncertainty [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2012, 17(1): 367.

收稿日期: 2019-09-20