

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104262

基于非线性终端滑模的码垛机械臂轨迹跟踪控制

季晓明¹ 文怀海²

(1. 江苏安全技术职业学院 电气工程系 徐州 221011; 2. 大连理工大学 机械工程学院 大连 116024)

摘要:针对码垛机械臂的轨迹跟踪控制,提出了一种基于数据驱动的非线性终端滑模控制方法。首先,利用牛顿-欧拉法推导出码垛机械臂的动力学模型,进而将模型等效成离散形式;接着,设计非线性终端滑模面来加快关节角的收敛速度,引入等效趋近律来抑制系统的抖振效应;同时,在萤火虫寻优算法的帮助下解决控制器参数整定问题,以便获得最优的控制性能;最后,通过仿真和试验对所提控制方法的有效性进行了验证。结果表明,该控制方法比积分滑模控制具有更高的跟踪精度,能保证码垛机械臂较好地跟踪上参考轨迹,具有一定的工程应用价值。

关键词:码垛机械臂;数据驱动;终端滑模;萤火虫算法;轨迹跟踪控制

中图分类号: TP242; TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.50

Trajectory tracking control for a palletizing manipulator based on nonlinear terminal sliding mode

Ji Xiaoming¹ Wen Huaihai²

(1. Department of Electrical Engineering, Jiangsu College of Safety Technology, Xuzhou 221011, China;
2. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Aiming at the trajectory tracking control of the palletizing manipulator, a nonlinear sliding mode control method is proposed. Firstly, the Newton-Euler method is used to derive the dynamic model of the palletizing manipulator, which is then equivalent to a discrete form. Then, the nonlinear terminal sliding mode surface is designed to accelerate the convergence speed of the joint angles, and the equivalent reaching law is introduced to suppress the chattering effect of the system. At the same time, the problem of parameter tuning of the controller is solved with the help of the glowworm swarm optimization algorithm which is used to obtain the optimal control performance. Finally, the effectiveness of the proposed control method in this paper is verified by simulation and experiment. The results show that the control method in this paper has higher tracking accuracy than integral sliding mode control, and can ensure that the palletizing manipulator can better track the upper reference trajectory, which has certain engineering application value.

Keywords: palletizing manipulator; data-driven control; terminal sliding mode; glowworm swarm optimization algorithm; trajectory tracking control

0 引言

中国制造 2025 明确提出将工业机器人(一般为机械臂)作为推动我国实施制造强国战略的重点领域之一。工业应用场景中,机械臂的广泛使用不仅提高了产品的质量,也缩减了制造时间,提升了劳动效率。机械臂是一个涉及机构学、人工智能、机器视觉、控制技术等多学科交叉的研究对象,学术上对其在上述几方面的研究从未

停止过^[1-3]。其中,机械臂运动的平稳性和精确性很大程度上依赖于高性能的控制算法,故对于其控制策略的研究至关重要。

作为多刚体结构的机械臂,其控制策略一般可分为基于模型的控制与基于数据驱动的控制两种形式^[4]。基于模型的控制需要机械臂动力学模型的先验知识,然后根据模型信息设计相应的控制器。例如,Caccavale 等^[5]利用最小二乘法辨识出 SMART-3.6 机械臂的动力学参数,进而引入前馈控制的思想实现了机械臂关节空间的

跟踪控制。然而机械臂的未建模特性会降低控制器性能,有时甚至会导致控制器失效。为此,陈超^[6]将辨识获得动力学模型补偿到观测器中,设计出一种新型鲁棒控制算法,克服了驱动力矩依赖精确模型的缺点,提高了控制器的适应能力。相比而言,基于数据驱动的控制,在控制器设计时不依赖模型的具体信息,仅利用输入输出数据,故其适应能力与鲁棒性就要好很多。常见的方法有反步法控制^[7]、线性自抗扰控制^[8]、自适应控制^[9]等。在这些控制算法中,滑模控制(sliding mode control, SMC)具有结构简单、响应速度快、鲁棒性强等特点,普遍受到了人们的喜爱。但是,普通的 SMC 因控制结构上的不连续切换开关而易引起系统存在抖振现象。为此, Wang 等^[10]利用非奇异终端滑模函数来缩减饱和函数的边界层厚度,降低系统抖振,并将该控制算法成功应用到绳驱动机械臂的控制中。Lee 等^[11]利用时延估计来补偿外界干扰与未建模特性,设计积分滑模控制器(integral SMC, ISMC)来消除系统的静态误差,降低系统抖振,提高工业机械臂的控制精度。

基于上述研究成果的分析,本文拟采用非线性终端滑模控制(nonlinear terminal sliding mode control, NTSMC)来解决机械臂的轨迹跟踪控制问题。再者,引入萤火虫算法(glowworm swarm optimization, GSO)来整定 NTSMC 中的诸多控制器参数,优化控制性能。进而,在仿真环境中,通过一个算例比较 NTSMC 和 ISMC 的控制效果。最后,搭建码垛机械臂的试验平台,测试 NTSMC 的实际控制效果,验证本文所提方法的有效性。

1 机械臂动力学

本文研究的码垛机械臂由 3 个伺服驱动电机、两根连杆与吸盘组成,如图 1 所示。该机械臂将 3 个主驱动电机都安装在基座上,大大减轻了关节处的惯量比,提高了关节的响应速率。通过牛顿-欧拉法可推导出上述串联机械臂的动力学模型^[12-13],即:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + d \quad (1)$$

式中: $q = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T$ 为关节角变量; $\dot{q}$ 和 $\ddot{q}$ 分别为关节变量的一阶导数和二阶导数; $M(q)$ 为对称正定的惯量矩阵; $C(q, \dot{q})$ 为离心力和哥氏力项; $G(q)$ 为重力项; τ 为输入力矩; d 为扰动力矩。

将式(1)改成为采样时刻 k 时的离散形式,有:

$$\tau(k) = M(k)\ddot{q}(k) + C(k)\dot{q}(k) + G(k) + d(k) \quad (2)$$

设上述模型的输入为 $u(k) = \tau(k)$, 输出为 $y(k) = \dot{q}(k)$, 则式(2)变为:

$$\dot{y}(k) = \frac{y(k+1) - y(k)}{T} = \frac{u(k)}{M(k)} - \frac{C(k)}{M(k)}y(k) -$$

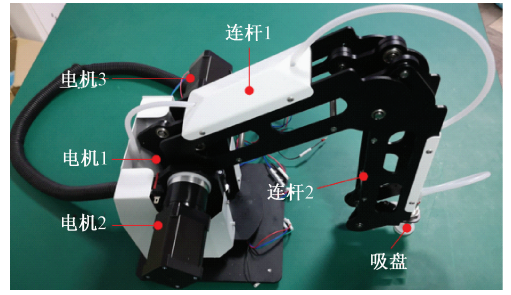


图 1 码垛机械臂样机

Fig. 1 Palletizing arm prototype

$$\frac{G(k) + d(k)}{M(k)} \quad (3)$$

式中: T 为采样时间序列。

结合式(2)和(3),码垛机械臂的离散模型可变成:

$$y(k+1) = \left(I - \frac{TC(k)}{M(k)}\right)y(k) + \frac{T}{M(k)}u(k) - \frac{T(G(k) + d(k))}{M(k)} \quad (4)$$

对于名义模型,有 $d(k) = 0$ 。假设 $y(k+1)$ 对于输入量 $u(k)$ 和输出量 $y(k)$ 偏导数是连续的,那么该系统就是广义利普希茨的^[14]。对于任意 k 有 $\|\Delta y(k), \Delta u(k)\|^T \neq 0$, 存在一个伪偏导数 $\Phi(k)$ 使得式(4)等价成一个线性模型,即:

$$\Delta y(k+1) = \Phi(k)(\Delta y(k), \Delta u(k))^T \quad (5)$$

式中: $\Phi(k) = [f_1(k), f_2(k)]$, $f_1(k)$ $f_2(k)$ 分别为 $n \times n$ 的惯性矩阵, $\|\Phi(k)\| < b$, b 为正数。

联合式(3)~(5),可得码垛机械臂的离散动力学模型为:

$$y(k+1) = f_1(k)\Delta y(k) + f_2(k)\Delta u(k) + y(k) \quad (6)$$

即:

$$q(k+1) = f_1(k)\Delta q(k) + f_2(k)\Delta u(k) + q(k) \quad (7)$$

2 控制器设计

定义码垛机械臂关节角序列的跟踪误差为 $e(k) = q(k) - q_r(k)$ 。为了加快系统变量的收敛速度,选择非线性终端滑模函数为:

$$s(k) = \gamma_1 e(k) + \gamma_2 e^{p_1/q_1}(k-1) \quad (8)$$

式中: $q_r(k)$ 为 k 时刻的参考关节角, $\gamma_1 = \text{diag}[\gamma_{11}, \dots, \gamma_{14}]$, $\gamma_2 = \text{diag}[\gamma_{21}, \dots, \gamma_{24}]$, 并且 γ_{1i} 和 γ_{2i} ($i = 1, 2, 3, 4$) 均为正数。 p_1 和 q_1 为奇数, 并且有 $0 < p_1/q_1 < 1$, 这里选择 $p_1 = 3, q_1 = 5$ 。

由于离散滑模面(8)的一阶导数为:

$$\Delta s(k+1) = s(k+1) - s(k) = 0 \quad (9)$$

故联立式(7)~(9)可得机械臂系统的等效控制

律为:

$$\Delta u_e(k) = \frac{1}{f_2(k)\gamma_1} [\gamma_1 q_r(k+1) - \gamma_2 e^{p_1/q_1}(k) - \gamma_1 f_1(k) \Delta q(k) - \gamma_1 q(k)] \quad (10)$$

进而,为抑制滑模控制中的抖振效应,引入等效趋近律为:

$$\Delta u_r(k) = \frac{1}{f_2(k)\gamma_1} [-\varepsilon \text{sign}(s(k))] \quad (11)$$

式中: $\varepsilon = \text{diag}[\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_4]$, $\varepsilon_i > 0 (i = 1, 2, 3, 4)$ 为切换因子。

因此,整个系统的控制律 NTSMC 为:

$$\Delta u(k) = \Delta u_e(k) + \Delta u_r(k) \quad (12)$$

离散系统的控制律 NTSMC 为:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (13)$$

3 参数整定

参数整定是提升控制器性能的重要环节,本文设计的 NTSMC 有 12 个参数需要调整,故引入 GSO 算法进行离线调节。

1) 设定目标函数,选择误差平方乘以时间性能指标作为 GSO 算法优化中的目标函数^[15],即:

$$F_j = \sum_i^4 \int_0^T k(e(k))^2 dk \quad (14)$$

2) 算法初始化,设 GSO 算法的种群数目为 N ,随机产生 i 只萤火虫的位置,即:

$$P_i(t) = P_L + \text{rand}(0,1) \cdot (P_U - P_L) \quad (15)$$

式中: $\text{rand}(\cdot)$ 为 0~1 的随机函数; P_U 与 P_L 为待整定参数的阈值; t 为迭代次数。

3) 更新决策阈,萤火虫群体间的信息交互能力是通过决策阈大小来决定的,决策阈的更新公式为:

$$r_d^i(t+1) = \min\{r_s, \max[0, r_d^i(t) + \beta(n_i - |N_i(t)|)]\} \quad (16)$$

式中: $r_d^i(t)$ 表示第 i 只萤火虫在第 t 次迭代时的决策阈半径,满足 $0 < r_d^i < r_s$, r_s 为最大感知半径; β 为权重因子; n_i 为控制参数; $N_i(t)$ 为第 i 只萤火虫在第 t 次迭代时邻域集合,满足约束条件式(17)。

$$N_i(t) = \{j: \|g_j(t) - g_i(t)\| < r_d^i; l_i(t) < l_j(t)\} \quad (17)$$

式中: $g_j(t)$ 为邻域内第 j 只萤火虫位置; $l_i(t)$ 和 $l_j(t)$ 分别为两只萤火虫的荧光素值。

4) 更新萤火虫位置与荧光素值,比较当前萤火虫和邻域萤火虫之间的荧光素值大小,种群选择朝荧光素值较大的萤火虫方向移动,移动的概率为:

$$Q_{ij}(t) = \frac{l_j(t) - l_i(t)}{\sum_{k \in N_i(t)} [l_k(t) - l_i(t)]} \quad (18)$$

第 i 只萤火虫的位置更新公式为:

$$g_i(t+1) = g_i(t) + s \left(\frac{g_j(t) - g_i(t)}{\|g_j(t) - g_i(t)\|} \right) \quad (19)$$

式中: s 为步长大小。

荧光素值的大小取决于目标函数值的大小,其更新公式为:

$$l_i(t) = (1 - \rho)l_i(t-1) + \gamma f(g_i(t)) \quad (20)$$

式中: ρ 为 0~1 的常数,表示荧光素挥发值; γ 为荧光素值的更新速度。

5) 终止条件,在邻域集合内,萤火虫 i 遇到荧光素值更高的萤火虫 j 时,若两者距离小于感知半径,则前者以概率 $Q_{ij}(t)$ 选择邻域个体并其靠拢。接着,萤火虫 i 更新位置与荧光素值,直到算法迭代次数等于最大值 $T_{\max}$,算法终止。

基于 GSO 算法优化的 NTSMC 的结构框图如图 2 所示。表 1 为 GSO 算法的运行条件及结构参数。

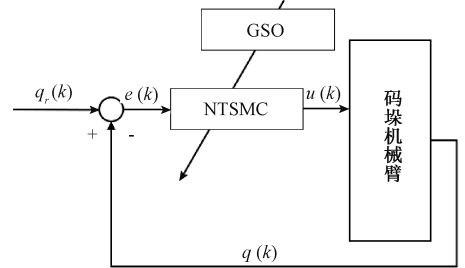


图 2 基于 GSO 整定的控制框架图

Fig. 2 Control frame diagram based on GSO tuning

表 1 GSO 算法的参数

Table 1 Parameters of GSO algorithm

算法	参数
GSO	$\gamma = 0.6, \rho = 0.4, s = 0.03, \beta = 0.1, n_i = 8, T_{\max} = 100$

4 仿真与实验

分别通过仿真与实物试验来验证所提控制方法的有效性。选用的码垛机械臂的标准 DH 参数如表 2 所示,其中 a_i 是连杆长度、 α_i 是连杆转角、 d_i 是连杆偏距、 q_i 是关节角。进而,在 MALTAB2017b 中编写机械臂的正逆运动学程序,利用蒙特卡罗法^[16]计算出机械臂的工作空间,以便选择合理的参考轨迹,即从关节空间映射到工作空间的轨迹必须是存在的。另外,本文选用的码垛机械臂末端执行器位置变化依赖前 3 个关节(这 3 个关节靠拓达 36 V 200 W 伺服电机驱动),最后一个关节(吸盘)只提供吸力,故在仿真与试验中仅分析前三关节即可。

表 2 码垛机械臂的标准 DH 参数
Table 2 Standard DH parameters for
palletizing manipulators

i	a_i/m	$\alpha_i/(\text{^\circ})$	d_i/m	$q_i/(\text{^\circ})$
1	0	90°	0.080	-135~135
2	0.135	0	0	-15~85
3	0.160	0	0	-20~95
4	0.070	0	0	-90~90

4.1 仿真结果

仿真中采用 Cycloidal 曲线^[17]来设计码垛机械臂各关节的参考轨迹:

$$q_i(t) = q_i(0) + \frac{q_i(T) - q_i(0)}{T} \left(t - \frac{T}{2\pi} \sin \frac{2\pi t}{T} \right) \tag{21}$$

式中: $q_i(T)$ 和 $q_i(0)$ 分别为各关节角的目标值与初始值, $i = 1, \dots, 4$; t 和 T 分别为当前迭代时间和终止时间。

设定 $\mathbf{q}(T) = [80 \ 60 \ 50 \ 0]^T$, $\mathbf{q}_i(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, $T = 10 \text{ s}$, 其他仿真条件均为 0。同时, 引入积分滑模控制 (integral sliding mode control, ISMC)^[18] 与 NTSMC 进行比较, 两种控制器的参数均由 GSO 算法进行整定, 迭代次数为 40, 迭代曲线如图 3 所示, 控制器整定结果如表 3 所示。另外, 仿真中整定的控制器参数也将提供给试验环节使用。

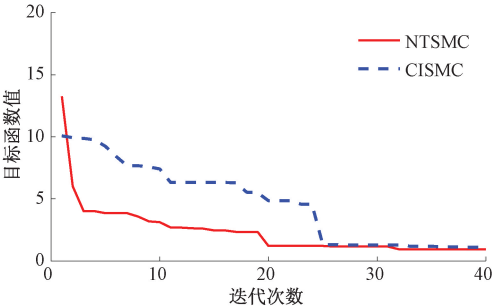


图 3 GSO 算法的迭代曲线

Fig. 3 Iteration curve of GSO

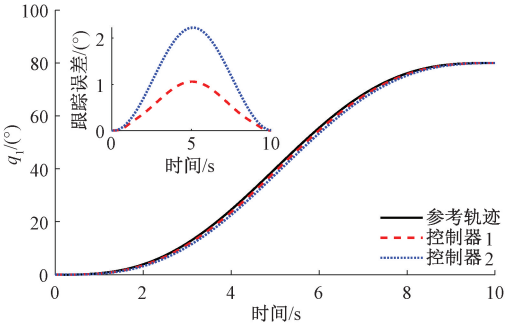
表 3 两种控制器参数

Table 3 Two kinds of controller parameters

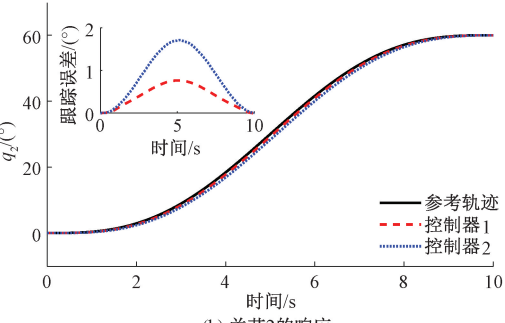
控制器	控制器参数
NTSMC (控制器 1)	$\gamma_1 = \text{diag}[128, 147, 144, 13]$,
	$\gamma_2 = \text{diag}[41, 40, 56, 5]$,
	$\varepsilon = \text{diag}[8, 11, 18, 1]$
	$K_e = \text{diag}[300, 489, 480, 0]$,
ISMC (控制器 2)	$K_p = \text{diag}[972, 1\ 000, 1\ 000, 0]$,
	$K_D = \text{diag}[150, 150, 150, 0]$

两种控制器作用下的码垛机械臂各关节的响应曲线如图 4 所示, 可以看出两种控制器均能保证各关节角较好地跟踪上参考轨迹, NTSMC 的跟踪误差均控制在 1° 以内, 而 ISMC 的跟踪误差在 2°。说明 GSO 算法能有效解

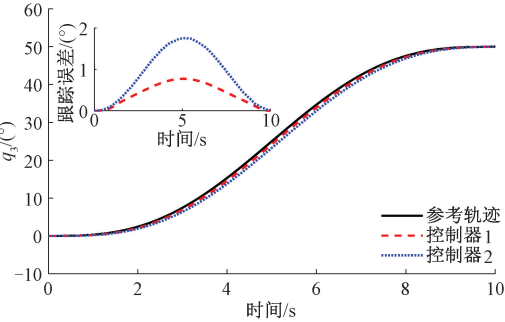
决控制器参数整定问题; NTSMC 的跟踪精度要优于 ISMC, 其具有更好的控制性能。



(a) 关节 1 的响应
(a) Response of joint 1



(b) 关节 2 的响应
(b) Response of joint 2



(c) 关节 3 的响应
(c) Response of joint 3

图 4 仿真中关节角的响应

Fig. 4 Response of joint angle in simulation

4.2 实验结果

图 5 所示为搭建的码垛机械臂试验平台, 其工作原理为: 先将宿主机的 Simulink 程序编译、下载到目标机 xPC 中^[19-20], 目标机通过 NI PCI 6229 和 PCI 6602 数据采集板卡采集到的编码器信息计算关节角, 控制程序根据跟踪误差计算所需关节力矩给驱动器控制相应的伺服电机转动。

为了不使仿真中整定的控制器参数失效, 选取与仿真类似的码垛机械臂参考关节角轨迹, 即 $\mathbf{q}(T) = [90 \ 30 \ 60 \ 0]^T$, $\mathbf{q}_i(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, $T = 3 \text{ s}$, 其余初始条件均为 0, 采样时间为 0.001 s。试验结果如图 6 和 7 所示, 其中前者为关节角跟踪响应曲线, 后者为关节角跟踪误差曲线。从图 6 可以看出, 随着参考关节角的陡增

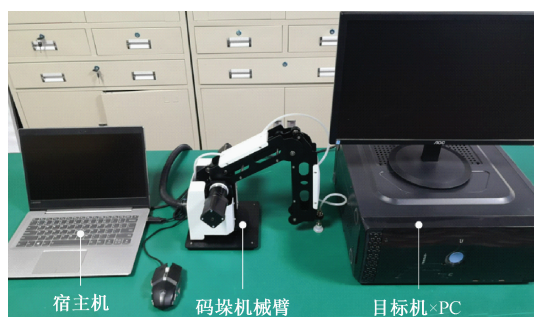


图5 码垛机械臂试验平台

Fig. 5 Test platform for palletizing manipulator

(0.5~2.5 s), 关节角的跟踪误差明显增大, 这可能是由于系统延时或采样延时导致。从图7可以看出, 越靠近末端执行器, 关节角的跟踪误差越大, 这可能是由于编码器安装在关节处, 装配误差、传动误差、测量累计误差等所致, 不过总误差控制在 6° 以内。这说明当系统状态量轨迹偏离滑模面时, NTSMC 能以较快的趋近速度将状态量拉回至滑模面。

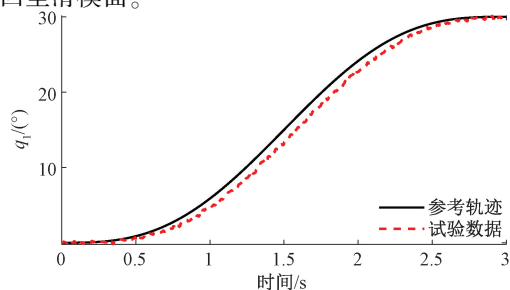
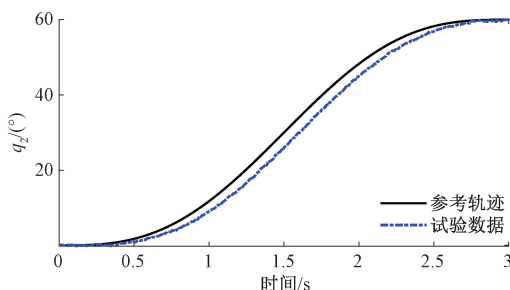
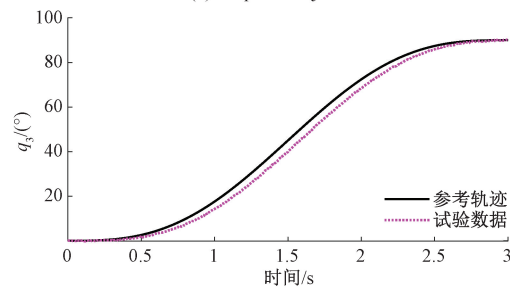
(a) 关节1的响应
(a) Response of joint 1(b) 关节2的响应
(b) Response of joint 2(c) 关节3的响应
(c) Response of joint 3

图6 实验中关节角的响应

Fig. 6 Response of joint angle in experiment

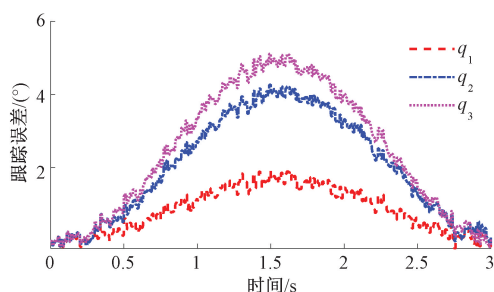


图7 关节角跟踪误差

Fig. 7 Joint angle tracking error

为了测试 NTSMC 的鲁棒性, 让关节角1跟踪一个谐波信号 $0.5\sin(2t)$, 仿真时间为 10 s, 结果如图8和9所示。可以明显看出, 在 NTSMC 的控制器, 码垛机械臂的关节角1能较好地跟踪上参考轨迹, 但是存在 0.5 s 左右的延时, 这可能是由于信号传递过程中的延时所致。图9为关节角1的实际控制力矩, 可以看出 NTSMC 没有出现明显的抖振现象。这些结果充分说明了本文设计的控制器具有较好的鲁棒性。

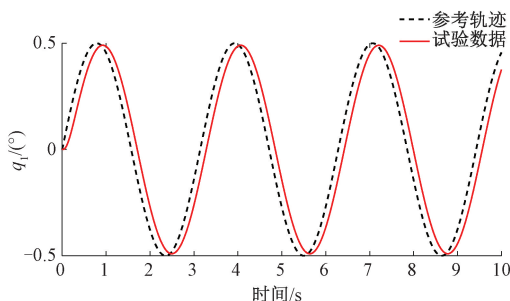


图8 关节角1的响应

Fig. 8 Response of the joint 1 in experiment 2

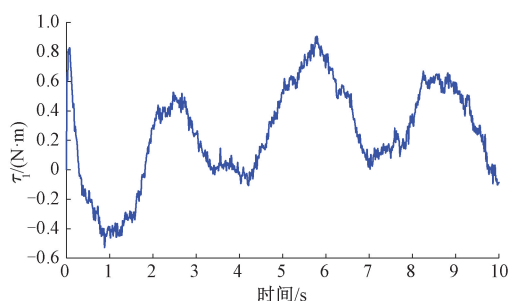


图9 关节力矩响应

Fig. 9 Response of torque

5 结论

本文针对码垛机械臂在关节空间内的轨迹跟踪控制问题, 提出了一种基于数据驱动的非线性滑模控制方法, 结果表明, 在仿真中, NTSMC 比 ISMC 具有更高的跟踪精度, 并且前者的跟踪误差比后者大约降低了 50%; 在试验中, NTSMC 能使得码垛机械臂的各关节较好地跟踪上参

考轨迹,并且能够有效抑制系统抖振,其具有工程易实现以及较强的鲁棒性;结合仿真与试验说明了本文先在仿真中离线整定出控制器的理想参数,再将该参数写入到实际控制器中这一方法的可行性与有效性;GSO算法在处理控制器参数整定方面具有一定的优势,可推广至其他控制算法的参数整定中去。

今后的研究中将尝试设计其他基于数据驱动的控制策略去解决码垛机械臂、六轴机械臂乃至七轴冗余机械臂的轨迹跟踪控制问题。

参考文献

- [1] NORSAPPERI N M H, DANAPALASINGAM K A. An improved optimal integral sliding mode control for uncertain robotic manipulators with reduced tracking error, chattering, and energy consumption [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 142: 106747.
- [2] 胡嘉阳, 韦巍. 基于五次 NURBS 曲线的六轴机器人多目标轨迹优化[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(6): 198-203.
HU J Y, WEI W. Multi-objective optimization of six-axis manipulator's trajectory based on five-order nurbs curve[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(6): 198-203.
- [3] 贾林, 王耀南, 何静, 等. 自由曲面打磨机器人非奇异终端滑模阻抗控制[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(5): 89-96.
JIA L, WANG Y N, HE J, et al. Non-singular terminal sliding mode impedance control of free-form surface grinding robot [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(5): 89-96.
- [4] LEWIS F L, DAWSON D M, ABDALLAH C T. *Robot manipulator control: theory and practice* [M]. Los Angeles: CRC Press, 2003.
- [5] CACCAVALE F, CHIACCHIO P. Identification of dynamic parameters and feedforward control for a conventional industrial manipulator [J]. *Control Engineering Practice*, 1994, 2(6): 1039-1050.
- [6] 陈超. 串联机器人高性能运动控制方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
CHEN CH. Research on high-performance motion control method for serial robotic manipulator [D]. Ji'nan: Shangdong University, 2019.
- [7] GUO Q, ZHANG Y, CELLER B G, et al. Neural adaptive backstepping control of a robotic manipulator with prescribed performance constraint [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2018, 30(12): 3572-3583.
- [8] LIU D, GAO Q, CHEN Z, et al. Linear active disturbance rejection control of a two-degrees-of-freedom manipulator[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, DOI: 10.1155/2020/6969207.
- [9] LIU A, ZHAO H, SONG T, et al. Adaptive control of manipulator based on neural network [J]. *Neural Computing and Applications*, 2020, DOI: 10.1007/s00521-020-05515-0.
- [10] WANG Y, LI B, YAN F, et al. Practical adaptive fractional-order nonsingular terminal sliding mode control for a cable-driven manipulator[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2019, 29(5): 1396-1417.
- [11] LEE J, CHANG P H, JIN M. Adaptive integral sliding mode control with time-delay estimation for robot manipulators [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(8): 6796-6804.
- [12] VAN M, DO X P, MAVROVOUNIOTIS M. Self-tuning fuzzy PID-nonsingular fast terminal sliding mode control for robust fault tolerant control of robot manipulators[J]. *ISA transactions*, 2020, 96: 60-68.
- [13] ARIAN A, DANAEI B, TALE MASOULEH M. Kinematic and dynamic analyses of tripteron, an over-constrained 3-DOF translational parallel manipulator, through newton-euler approach [J]. *AUT Journal of Modelling and Simulation*, 2018, 50(1): 61-70.
- [14] WANG X, LI X, WANG J, et al. Data-driven model-free adaptive sliding mode control for the multi degree-of-freedom robotic exoskeleton[J]. *Information Sciences*, 2016, 327: 246-257.
- [15] OSHNOEI A, KHEZRI R, MUYEEN S M, et al. Automatic generation control incorporating electric vehicles[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2019, 47(8): 720-732.
- [16] PEIDRÓ A, REINOSO Ó, GIL A, et al. An improved Monte Carlo method based on Gaussian growth to calculate the workspace of robots[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2017, 64: 197-207.
- [17] QIU Z, ZHANG W. Trajectory planning and diagonal recurrent neural network vibration control of a flexible manipulator using structural light sensor[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 132: 563-594.
- [18] FERRARA A, INCREMONA G P, SANGIOVANNI B. Tracking control via switched Integral Sliding Mode with application to robot manipulators [J]. *Control Engineering Practice*, 2019, 90: 257-266.
- [19] HE Z, FENG Y, LIU Y, et al. Semi-physical real-time control of electro-hydraulic proportional position servo system based on Matlab/xPC [J]. *Journal of*

Engineering, 2019, 2019(13): 144-149.

- [20] SAKI F, BHATTACHARYA A, KEHTARNAVAZ N. Real-time simulink implementation of noise adaptive speech processing pipeline of cochlear implants [J]. Speech Communication, 2018, 96: 197-206.

作者简介

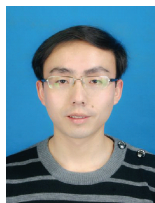


季晓明, 2004 年南京工程学院获得学士学位, 现为江苏安全技术职业学院副教授, 主要研究方向为机器人智能控制。

E-mail: 20592443@qq.com

Ji Xiaoming received his B. Sc. degree from Nanjing Institute of Technology in 2004.

He is currently an associate professor at Jiangsu College of Safety Technology. His main research interest includes intelligence control of robots.



文怀海, 2006 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 现为大连理工大学在读博士, 研究方向为智能制造及控制技术。

E-mail: 2632458027@qq.com

Wen Huaihai received his B. Sc. degree from Liaoning Project Technology University in 2006. Now he is a Ph. D. candidate at Dalian University of Technology. His main research interests include intelligent manufacturing and control technology.