

引用格式: 徐宝珍, 宋公飞, 王超, 等. 机械臂自适应非奇异快速终端滑模控制[J]. 电光与控制, 2021, 28(5): 46-50. XU B Z, SONG G F, WANG C, et al. Adaptive non-singular fast terminal sliding mode control of manipulator[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(5): 46-50.

机械臂自适应非奇异快速终端滑模控制

徐宝珍¹, 宋公飞^{1,2,3}, 王超¹, 曹广旭⁴

(1. 南京信息工程大学自动化学院, 南京 210044; 2. 化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室, 上海 200237; 3. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 4. 中国电子科技集团公司第二十八研究所, 南京 210044)

摘要: 针对刚性机械臂有限时间鲁棒控制问题, 提出了一种新的自适应非奇异快速终端滑模控制方法。该方法将非奇异快速终端滑模控制与自适应律相结合, 使用非奇异快速终端滑模面加快机械臂轨迹跟踪误差的收敛速度, 解决了终端滑模中的奇异问题; 通过双曲正切函数代替符号函数减小控制输入的抖振; 利用自适应律对未知的外部扰动和系统的不确定性进行估计, 实现了在集总扰动未知情况下的轨迹跟踪。构造 Lyapunov 函数, 证明机械臂系统能够在有限时间内稳定收敛。最后二自由度机械臂仿真实验结果验证了所设计控制器的有效性和鲁棒性。

关键词: 终端滑模控制; 机械臂; 轨迹跟踪; 自适应律; 有限时间收敛

中图分类号: TP242 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2021.05.011

Adaptive Non-singular Fast Terminal Sliding Mode Control of Manipulator

XU Baozhen¹, SONG Gongfei^{1,2,3}, WANG Chao¹, CAO Guangxu⁴

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Advanced Control and Optimization for Chemical Processes, Shanghai 200237, China; 3. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China; 4. The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210044, China)

Abstract: For the finite-time robust control of a rigid robot manipulator, a new adaptive non-singular fast terminal sliding mode control method is proposed. This method combines non-singular fast terminal sliding mode control with adaptive law. Firstly, the non-singular fast terminal sliding surface is selected, which is used to accelerate the convergence rate of trajectory tracking error of manipulator and solve singular problems in terminal sliding surface. Then, hyperbolic tangent function replaces sign function to reduce chattering of control input. Moreover, the adaptive law estimates the unknown external disturbance and uncertainties, so as to achieve trajectory tracking with unknown lumped disturbance. It is proved that the robot manipulator system can converge stably in finite time by establishing the Lyapunov function. Finally, the simulation results of a two-DOF robot manipulator are presented to illustrate the effectiveness and robustness of the proposed control method.

Key words: terminal sliding mode control; robot manipulator; trajectory tracking; adaptive law; finite-time convergence

0 引言

随着材料、电子和机械工业的快速发展, 高性能机

器人系统被越来越多地应用于生产和生活^[1]。因此, 如何设计高性能的控制器一直是机械臂研究领域中的热门话题^[2]。

在机械臂的工作空间中, 外部扰动和系统的不确定性是未知的。针对刚性机械臂轨迹跟踪的问题, 文献[3]利用 RBF 神经网络补偿系统不确定性, 采用终端滑模面加快系统收敛速度, 但未能解决终端滑模的奇异问题; 文献[4]采用鲁棒自适应控制律估计不确定

收稿日期: 2020-11-06

修回日期: 2021-04-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61973170); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020AC0CP02)

作者简介: 徐宝珍(1997—), 女, 江西宜春人, 硕士生, 研究方向为机器人轨迹跟踪控制。

通讯作者: 宋公飞(1987—), 男, gfsong@nuist.edu.cn。

参数,提高机械臂的轨迹跟踪精度,但未能使轨迹跟踪误差在有效时间内收敛;文献[5]设计了基于积分滑模面的有限时间稳定的滑模控制方法,但运用于机械臂轨迹跟踪的任务空间时利用到了机械臂的加速度,这在现实应用中是不可接受的。

为了提高二自由度机械臂的控制性能,加快轨迹跟踪误差的收敛速度,本文选取非奇异快速终端滑模面,结合自适应律估计参数,设计出一种新的自适应非奇异快速终端滑模控制器,加快了系统的收敛速度,使得轨迹跟踪误差和参数估计误差在有限时间内趋近于零。

1 自适应非奇异快速终端滑模控制器

1.1 刚性 n 自由度机械臂动态模型

机械臂系统数学模型为

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

式中: $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ 分别为机械臂系统的关节位置、速度和加速度矢量; $M(q) \in R^{n \times n}$ 为对称正定惯性矩阵; $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 为哥氏力和离心力矩阵; $G(q) \in R^n$ 为重力矢量; $\tau_d \in R^n$ 为外部扰动; $\tau \in R^n$ 为控制器输入矢量; $R^n, R^{n \times n}$ 均表示空间。

引理 1^[6] 全局有限时间稳定的 Lyapunov 函数定理。

对于一个非线性系统,假设存在一个连续的正定函数 $V(t): D \rightarrow R^+$ 和两个正常数 $\eta \in R^+$ 和 $\alpha \in (0, 1)$ (D 为定义域),以至于正定函数 $V(t)$ 在原点的邻域 $W \subseteq D \subseteq R^n$ 内满足

$$\dot{V}(t) + \eta V^\alpha(t) \leq 0 \quad (2)$$

则系统为有限时间稳定。即系统状态能在有限时间内收敛到平衡点,且收敛时间满足

$$T < \frac{1}{\eta(1-\alpha)} V^{1-\alpha}(t_0) \quad (3)$$

1.2 非奇异快速终端滑模控制器

定义系统跟踪误差为

$$\begin{cases} e = q - q_d \\ \dot{e} = \dot{q} - \dot{q}_d \\ \ddot{e} = \ddot{q} - \ddot{q}_d \end{cases} \quad (4)$$

图 1 所示为滑模状态。

图中: A 被称为终止点,状态轨迹趋于滑模面 $s=0$; B 被称为起始点,指系统的状态轨迹从此点离开滑模面 $s=0$; C 被称为通常点,指系统的状态轨迹运行至 $s=0$ 并穿过此面、系统状态轨迹与滑模面 $s=0$ 相交的点^[7]。

为设计控制器控制机械臂系统轨迹跟踪^[8-9],设计如下非奇异快速终端滑模面^[10]

$$s = \dot{e} + \alpha e + \beta |e|^{a/b} \text{sgn}(e) \quad (5)$$

式中: α, β 为正常数; a, b 为正奇数,且 $a > b$ 。

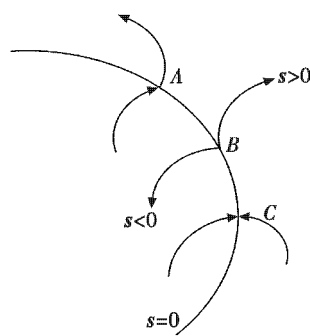


图 1 滑模状态图

Fig. 1 Sliding mode status

对式(5)求导可得

$$\dot{s} = \ddot{e} + \alpha \dot{e} + \beta \frac{a}{b} |e|^{a/b-1} \dot{e} \quad (6)$$

根据选取的非奇异快速终端滑模面,设计如下控制器

$$\tau = \tau_{eq} + \tau_u \quad (7)$$

式中: τ_{eq} 为当系统到达滑模面 $s = \dot{s} = 0$ 时得到的等效控制器,并且此时的外部扰动为零;鲁棒控制器 τ_u 为鲁棒控制部分,主要用于消除模型不确定性和外部扰动对机器人轨迹跟踪系统控制品质的影响。

设计等效控制器为

$$\begin{aligned} \tau_{eq} = & M(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - \\ & M(q) \left((\alpha \dot{e} + \beta \frac{a}{b} |e|^{a/b-1} \text{sgn}(e) \dot{e}) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

设计鲁棒控制器为

$$\tau_u = -M(q) [k_1 s + k_2 \text{sgn}(s)] \quad (9)$$

式中, $k_1, k_2 > 0$, 为鲁棒控制器增益。

非奇异快速终端滑模控制器设计为

$$\begin{aligned} \tau = \tau_{eq} + \tau_u = & M(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - \\ & M(q) \left((\alpha \dot{e} + \beta \frac{a}{b} |e|^{a/b-1} \text{sgn}(e) \dot{e}) - \right. \\ & \left. M(q) [k_1 s + k_2 \text{sgn}(s)] \right) \end{aligned} \quad (10)$$

稳定性分析。设计正定 Lyapunov 函数 $V_0 = \frac{1}{2} s^T s$,

对 V_0 求导

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 = s^T \dot{s} = & s^T (\ddot{e} + \alpha \dot{e} + \beta \frac{a}{b} |e|^{a/b-1} \text{sgn}(e) \dot{e}) = \\ & s^T (-k_1 s - k_2 \text{sgn}(s)) \leq -k_2 \text{sgn}(s) s \leq \\ & -k_2 |s| \leq -k_2 \|s\| \end{aligned} \quad (11)$$

因此 $\dot{V}_0 = \frac{dV_0}{dt} \leq -\sqrt{2}k_2 V_0^{1/2}$, 可得

$$dt \leq \frac{-dV_0}{\sqrt{2}k_2 V_0^{1/2}} \quad (12)$$

设 t_r 为系统的收敛时间, $V_0(0)$ 为初始状态,此时 $V_0(t_r) = 0$ 。对式(12)两边积分

$$\int_0^{t_r} dt \leq \int_{V_0(0)}^{V_0(t_r)} \frac{-dV_0}{\sqrt{2}k_2 V_0^{1/2}} = \sqrt{2}k_2 V_0^{1/2} \Big|_{V_0(0)}^{V_0(t_r)} \quad (13)$$

可计算出收敛时间为

$$t_r \leq \sqrt{2} \frac{V_0^{1/2}(0)}{k_2} \quad (14)$$

可知,机械臂系统轨迹跟踪误差能在有限时间内趋于零。

1.3 自适应非奇异快速终端滑模控制器

在考虑系统参数不确定和外部扰动情况下的刚性机械臂的动态模型可表示为

$$\mathbf{M}_0(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}_0(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_d + \boldsymbol{\rho} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{M}_0(\mathbf{q}) \in R^{n \times n}$, $\mathbf{C}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^{n \times n}$, $\mathbf{G}_0(\mathbf{q}) \in R^n$ 均为机械臂的标称模型; $\boldsymbol{\rho}$ 为系统参数的不确定项,且 $\boldsymbol{\rho} = \Delta\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \Delta\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \Delta\mathbf{G}(\mathbf{q})$ 。

假设^[11]: $\|H(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})\| < b_0 + b_1 \|\mathbf{q}\| + b_2 \|\dot{\mathbf{q}}\|^2$, b_0, b_1, b_2 为未知的正常数, $H(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) = \mathbf{M}_0^{-1}(\mathbf{q})(\boldsymbol{\tau}_d + \boldsymbol{\rho})$ 为机械臂系统的集总扰动。

根据 1.2 节中设计的非奇异快速终端滑模控制,通过自适应律对集总扰动的未知参数进行估计,设计自适应非奇异快速终端滑模控制器。

等效控制器

$$\boldsymbol{\tau}_{eq} = \mathbf{M}_0(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{C}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}_0(\mathbf{q}) - \mathbf{M}_0(\mathbf{q})(\alpha\dot{e} + \beta \frac{a}{b} |e|^{a/b-1} \text{sgn}(e) \dot{e}) \quad (16)$$

鲁棒控制器

$$\boldsymbol{\tau}_u = -\mathbf{M}_0(\mathbf{q}) [ks + (\hat{b}_0 + \hat{b}_1 \|\mathbf{q}\| + \hat{b}_2 \|\dot{\mathbf{q}}\|^2) \text{sgn}(s)] \quad (17)$$

式中: $k > 0$, 为鲁棒控制器增益; $\hat{b}_0, \hat{b}_1, \hat{b}_2$ 为参数估值。

自适应非奇异终端滑模控制设计为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{eq} + \boldsymbol{\tau}_u = & \mathbf{M}_0(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{C}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}_0(\mathbf{q}) - \\ & \mathbf{M}_0(\mathbf{q})(\alpha\dot{e} + \beta \frac{a}{b} |e|^{a/b-1} \text{sgn}(e) \dot{e}) - \\ & \mathbf{M}_0(\mathbf{q}) [ks + (\hat{b}_0 + \hat{b}_1 \|\mathbf{q}\| + \hat{b}_2 \|\dot{\mathbf{q}}\|^2) \text{sgn}(s)] \end{aligned} \quad (18)$$

参数自适应律为

$$\begin{cases} \dot{\hat{b}}_0 = \Gamma_1 \|s\| \\ \dot{\hat{b}}_1 = \Gamma_2 \|s\| \|\mathbf{q}\| \\ \dot{\hat{b}}_2 = \Gamma_3 \|s\| \|\dot{\mathbf{q}}\|^2 \end{cases} \quad (19)$$

式中, $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ 为正常数。

2 稳定性分析

选取如下正定 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{s} + \frac{1}{2} \frac{1}{\Gamma_1} (\hat{b}_0 - b_0)^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{\Gamma_2} (\hat{b}_1 - b_1)^2 +$$

$$\frac{1}{2} \frac{1}{\Gamma_3} (\hat{b}_2 - b_2)^2 \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} + \frac{1}{\Gamma_1} (\hat{b}_0 - b_0) \dot{\hat{b}}_0 + \frac{1}{\Gamma_2} (\hat{b}_1 - b_1) \dot{\hat{b}}_1 + \\ & \frac{1}{\Gamma_3} (\hat{b}_2 - b_2) \dot{\hat{b}}_2 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \|H(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})\| \|\mathbf{s}\| - (b_0 + b_1 \|\mathbf{q}\| + b_2 \|\dot{\mathbf{q}}\|^2) \cdot \\ & \|\mathbf{s}\| \leq -c \|\mathbf{s}\| \end{aligned} \quad (22)$$

式中: c 为正定常数, $c = (b_0 + b_1 \|\mathbf{q}\| + b_2 \|\dot{\mathbf{q}}\|^2) - H(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) > 0$, 可得 $\dot{V} \leq 0$, 由 Lyapunov 稳定性理论可知, 系统最终能够趋于稳定。

令 $V_0 = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{s}$, $\tilde{b}_i = b_i - \hat{b}_i$, 可知

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 = & \dot{V} + \tilde{b}_0 \dot{\hat{b}}_0 + \tilde{b}_1 \dot{\hat{b}}_1 + \tilde{b}_2 \dot{\hat{b}}_2 \leq -c \|\mathbf{s}\| + (b_0 - \hat{b}_0) \dot{\hat{b}}_0 + \\ & (b_1 - \hat{b}_1) \dot{\hat{b}}_1 + (b_2 - \hat{b}_2) \dot{\hat{b}}_2 \end{aligned} \quad (23)$$

存在正定常数 c , 使得 $\dot{V}_0(t) \leq -c \|\mathbf{s}\| \leq -\sqrt{2}cV_0^{1/2}$, 因此可计算出收敛时间 $t_r \leq \sqrt{2} \frac{V_0^{1/2}(0)}{c}$, 系统跟踪误差和参数的估计误差能够在有限时间内收敛至零。

为减小控制器中符号函数 $\text{sgn}(s)$ 带来的抖振, 利用双曲正切函数 $\tanh(s/\varphi)$ 代替鲁棒控制器中的符号函数

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{eq} + \boldsymbol{\tau}_u = & \mathbf{M}_0(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{C}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}_0(\mathbf{q}) - \\ & \mathbf{M}_0(\mathbf{q})(\alpha\dot{e} + \beta \frac{a}{b} |e|^{a/b-1} \text{sgn}(e) \dot{e}) - \mathbf{M}_0(\mathbf{q}) [ks + \\ & (\hat{b}_0 + \hat{b}_1 \|\mathbf{q}\| + \hat{b}_2 \|\dot{\mathbf{q}}\|^2) \tanh(s/\varphi)] \end{aligned} \quad (24)$$

式中, φ 为边界层厚度^[12]。

3 仿真实验

图 2 为二自由度机械臂仿真示意图。

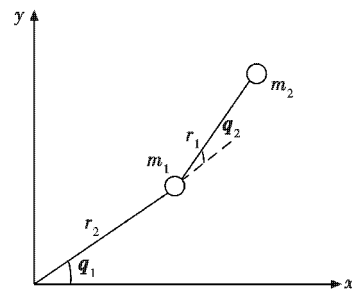


图 2 二自由度机械臂示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a robotic arm with two degrees of freedom

图中: r_1, r_2 为连杆长度; m_1, m_2 为连杆质量; q_1, q_2 为双关节机械臂的关节角。

对于二自由度关节型机器人系统, 有

$$\begin{bmatrix} M_{11}(\mathbf{q}) & M_{12}(\mathbf{q}) \\ M_{21}(\mathbf{q}) & M_{22}(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) & C_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \\ C_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) & C_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1(q) \\ G_2(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中：

$$\begin{cases} M_{11}(q) = (m_1 + m_2)r_1^2 + m_2r_2^2 + 2m_2r_1r_2\cos q_2 + j_1 \\ M_{12}(q) = M_{21}(q) = m_2r_2^2 + m_2r_1r_2\cos q_2 \\ M_{22}(q) = m_2r_2^2 + j_2 \\ C_{11}(q, \dot{q}) = -2m_2r_1r_2\sin q_2 \cdot \dot{q}_2 \\ C_{12}(q, \dot{q}) = -m_2r_1r_2\sin q_2 \cdot \dot{q}_2 \\ C_{21}(q, \dot{q}) = m_2r_1r_2\sin q_2 \cdot \dot{q}_1 \\ C_{22}(q, \dot{q}) = 0 \\ G_1(q) = (m_1 + m_2)gr_1\cos q_1 + m_2gr_2\cos(q_1 + q_2) \\ G_2(q) = m_2gr_2\cos(q_1 + q_2) \end{cases} \quad (26)$$

式中, j_1, j_2 为惯性力。

二自由度机械臂系统的相关参数: $m_1^0 = 1.5 \text{ kg}, m_2^0 = 0.5 \text{ kg}, r_1 = 1 \text{ m}, r_2 = 0.8 \text{ m}, m_1 = 1.8 \text{ kg}, m_2 = 0.8 \text{ kg}, j_1 = 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, j_2 = 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。其中, m_1^0, m_2^0 为标称质量。

给定期望轨迹分别为 $q_{d1} = 1.35 - \frac{4}{3}e^{-t} + \frac{7}{12}e^{-4t}$; $q_{d2} = 1.25 + e^{-t} + \frac{1}{4}e^{-4t}$ 。初始状态: $q_1(0) = 1.5 \text{ rad}, \dot{q}_1(0) = 0 \text{ rad/s}, q_2(0) = 2 \text{ rad}, \dot{q}_2(0) = 0 \text{ rad/s}$ 。外部扰动: $\tau_d = [\tau_{d1} \ \tau_{d2}]^T = [2\sin t \ 2\cos t]^T$ 。初始参数: $b_0(0) = b_1(0) = b_2(0) = 0; \Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_3 = 0.001; k = 200, \varphi = 0.1, \alpha = 20, \beta = 16; a = 15, b = 7$ 。

图3~图5分别为双关节的机械臂的位置跟踪仿真、位置跟踪误差图、集总扰动参数估计值。

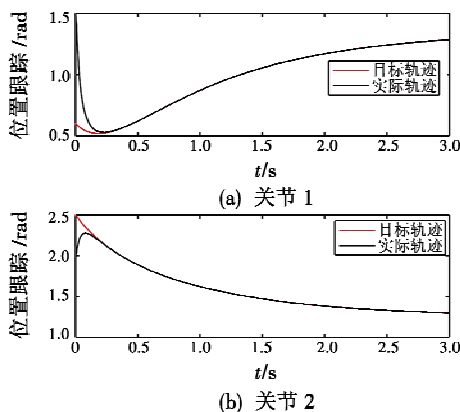


图3 机械臂关节的位置跟踪

Fig. 3 Position tracking of robotic arm joints

仿真结果表明,本文设计的自适应非奇异快速终端滑模控制器输入使得系统机械臂关节位置能够在有限时间内跟踪目标位置,系统的集总扰动参数通过自适应律估值最终趋于稳定值。

为验证本文提出的自适应非奇异快速终端滑模控

制器的收敛性能,与文献[13]提出的控制器进行对比,在上述相同初始条件下,图6所示为机械臂关节的位置跟踪对比,图7所示为机械臂关节位置跟踪误差对比。

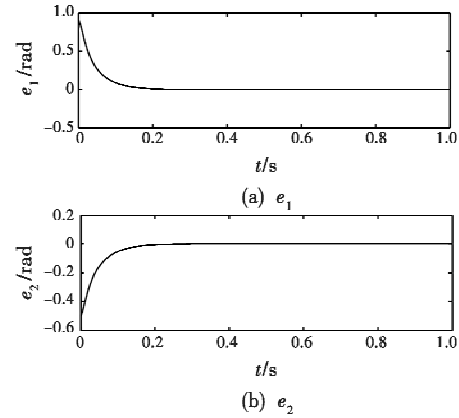


图4 机械臂关节的位置跟踪误差

Fig. 4 Position tracking error of robotic arm joints

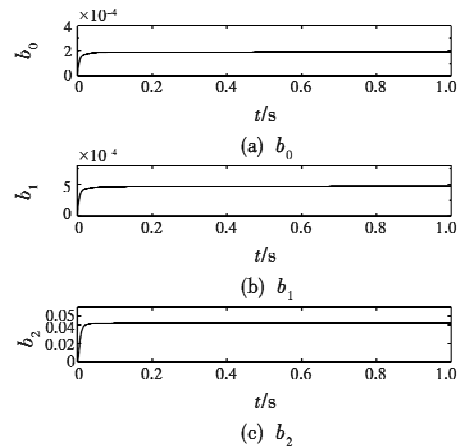


图5 参数估计值

Fig. 5 Parameter estimation

从图6、图7可看出,本文所提控制器使得机械臂关节跟踪误差在0.2 s左右趋近于0,而文献[13]所提控制器使得机械臂系统在1.5 s左右才能跟踪目标轨迹。

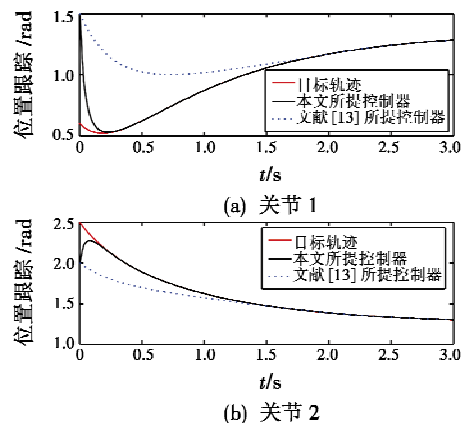


图6 机械臂关节的位置跟踪对比

Fig. 6 Comparison of position tracking of the robotic arm joints

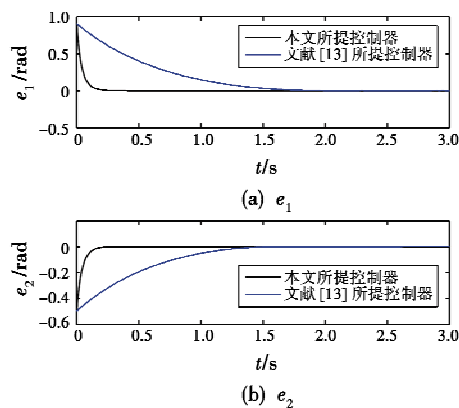


图 7 机械臂关节的位置跟踪误差对比

Fig. 7 Comparison of position tracking error of the robotic arm joints

用以下指标比较两种控制器跟踪响应特性^[14]:
误差绝对值的积分 (IAE)

$$I_{IAE} = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (27)$$

误差平方的积分 (ISE)

$$I_{ISE} = \int_0^{t_f} e^2(t) dt \quad (28)$$

其中: t_f 为仿真时间; $e(t)$ 为每个采样点的跟踪误差。

表 1 所示为跟踪误差情况。

表 1 跟踪误差情况

Table 1 Tracking errors

控制器	关节	IAE	ISE
本文	1	13.802	10.535
	2	7.703	3.246
文献[13]	1	87.344	51.135
	2	43.580	14.030

由表 1 可以明显看出, 本文所提控制器相比文献 [13] 所提控制器的跟踪误差更小、性能更好。

4 总结

本文提出了一种新的自适应非奇异快速终端滑模控制用来控制机械臂系统, 实现了在系统不确定和扰动未知情况下的轨迹跟踪, 自适应律是基于鲁棒非奇异快速终端滑模概念的优点而推导出来的, 可以在有限时间内将系统状态驱动到原点。双曲正切函数可以代替符号函数减小系统的抖振。此外, 本文算法的设计只需要位置和速度测量, 这使得它更适用于实际机械臂。

参考文献

- [1] 张立银. 不确定机器人的滑模轨迹跟踪控制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [2] 曹乾磊. 基于终端滑模的机械臂鲁棒自适应控制方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
- [3] TRAN M-D, KANG H-J. Adaptive terminal sliding mode control of uncertain robotic manipulators based on local approximation of a dynamic system[J]. Neurocomputing, 2017, 228: 231-240.
- [4] YIN X X, PAN L. Direct adaptive robust tracking control for 6 DOF industrial robot with enhanced accuracy[J]. ISA Transactions, 2018, 72: 178-184.
- [5] GALICKI M. Finite-time control of robotic manipulators[J]. Automatica, 2015, 51: 49-54.
- [6] 姜博严. 二阶系统有限时间控制问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [7] 付家宁. 基于非奇异快速终端滑模的双馈水轮发电机组控制[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [8] 陈晓磊. 四旋翼飞行器的混合轨迹跟踪控制算法[J]. 电光与控制, 2020, 27(7): 58-62, 67.
- [9] 伊戈, 刘忠, 张建强, 等. 基于改进终端滑模控制的 USV 航向跟踪控制方法[J]. 电光与控制, 2020, 27(10): 12-16, 21.
- [10] LIU H T, ZHANG T. Neural network-based robust finite-time control for robotic manipulators considering actuator dynamics[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2013, 29(2): 301-308.
- [11] YI S C, ZHAI J Y. Adaptive second-order fast nonsingular terminal sliding mode control for robotic manipulators[J]. ISA Transactions, 2019, 90: 41-51.
- [12] VIJAY M, JENA D. Backstepping terminal sliding mode control of robot manipulator using radial basis functional neural networks[J]. Computers and Electrical Engineering, 2018, 67: 690-707.
- [13] BOUKATTAYA M, MEZGHANI N, DAMAK T. Adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control for the tracking problem of uncertain dynamical systems[J]. ISA Transactions, 2018, 77: 1-19.
- [14] MOAWAD N M, ELAWADY W M, SARHAN A M. Development of an adaptive radial basis function neural network estimator-based continuous sliding mode control for uncertain nonlinear systems[J]. ISA Transactions, 2019, 87: 200-216.