

考虑扰动与输入饱和的机械臂连续非奇异快速终端滑模控制

陈正升, 王雪松[†], 程玉虎

(1. 中国矿业大学 地下空间智能控制教育部工程研究中心, 江苏 徐州 221116;
2. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 针对机械臂控制过程中由于扰动与输入饱和造成的控制精度低的问题, 提出一种连续非奇异快速终端滑模控制算法. 首先, 针对输入饱和问题, 设计饱和补偿系统以消除输入饱和特性; 其次, 为避免滑模控制的抖振问题, 设计二阶模型不确定与扰动估计器 (UDE) 对扰动项进行估计; 同时, 为进一步提高控制精度, 采用自适应方法对扰动估计误差进行控制; 在此基础上, 设计基于二阶模型不确定与扰动估计器及输入饱和补偿的自适应连续非奇异快速终端滑模控制算法, 并采用 Lyapunov 函数证明该算法的有限时间收敛特性; 最后, 以 3 自由度并联机械臂为控制对象进行仿真, 并开展算法对比研究. 仿真结果表明, 该方法可以实现考虑扰动与输入饱和时的机械臂高精度有限时间轨迹跟踪控制.

关键词: 机械臂; 滑模控制; 有限时间收敛; 输入饱和; 扰动估计; 自适应控制

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1335

引用格式: 陈正升, 王雪松, 程玉虎. 考虑扰动与输入饱和的机械臂连续非奇异快速终端滑模控制 [J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 903-912.

Continuous non-singular fast terminal sliding mode control of robotic manipulators considering disturbance and input saturation

CHEN Zheng-sheng, WANG Xue-song[†], CHENG Yu-hu

(1. Engineering Research Center of Intelligent Control for Underground Space, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Aiming at the problem of low control accuracy caused by disturbance and input saturation in the process of manipulator control, a continuous non-singular fast terminal sliding mode control (CNFTSMC) algorithm is proposed in this article. Firstly, for the input saturation problem, a saturation compensation system is designed to eliminate the input saturation characteristics. Then, in order to avoid the chattering problem of sliding mode control (SMC), a second-order model uncertainty and disturbance estimator (UDE) is designed to estimate the disturbance term. At the same time, an adaptive method is used to control the disturbance estimation error to further improve the tracking accuracy. On this basis, an adaptive CNFTSMC algorithm based on the second-order UDE and input saturation compensation is designed. The Lyapunov function is used to prove the finite-time convergence characteristics of the algorithm. Finally, a 3-degree-of-freedom parallel manipulator is used as the control object to conduct simulation research, and comparison studies are carried out. The results show that the proposed method can achieve accurate finite-time trajectory tracking control considering disturbances and input saturation.

Keywords: robot manipulators; sliding mode control; finite-time convergence; input saturation; disturbance estimation; adaptive control

0 引言

随着技术的不断发展及生产效率与操作精度的不断提高, 机械臂已被广泛应用于对轨迹跟踪精度有

较高要求的机械加工、装配及焊接等行业. 然而, 由于机械臂由一系列杆件与关节组成, 其动力学模型呈现出非线性强耦合特性, 同时由于参数不确定、摩擦及

收稿日期: 2020-09-24; 录用日期: 2021-02-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61903347, 61976215).

责任编辑: 关新平.

[†]通讯作者. E-mail: wangxuesongcumt@163.com.

未建模项等造成的扰动问题以及电机输入饱和问题的存在,开展机械臂高速高精度轨迹跟踪控制受到了广泛关注,这也是目前的研究难点与热点.神经网络控制^[1]、自适应控制^[2]以及滑模控制^[3]等已被应用于机械臂的轨迹跟踪控制中.

由于具有鲁棒性强、响应速度快及实现简单等优点,滑模控制被广泛应用于存在参数不确定及外部扰动的线性及非线性系统控制中,然而,传统的线性滑模控制仅能保证渐近收敛.文献[4-5]在滑模面设计时采用非线性超平面代替传统滑模面中的线性超平面,提出了终端滑模控制(TSMC)与快速终端滑模控制(FTSMC),该方法不仅具有有限时间收敛特性,同时还降低了控制增益,然而TSMC和FTSMC的控制输入会出现奇异问题;文献[6]在滑模面设计时通过合理选择分数型次幂提出了非奇异终端滑模控制(NTSMC),解决了TSMC和FTSMC中的奇异问题;针对NTSMC到达滑模面后收敛速度慢的问题,文献[7]提出了非奇异快速终端滑模控制(NFTSMC).

有限时间滑模控制虽然具有更快的收敛特性,但同样面临高频抖振问题,抖振会加剧机械元件磨损并激发高频未建模动态,导致系统性能下降,甚至失去稳定性.采用观测器对扰动项进行估计来取代传统滑模控制中的不连续项是解决抖振问题的重要方法,国内外学者分别采用扩张观测器^[8]、时延观测器^[9]及滑模观测器^[10]等方法开展了相关研究.

UDE方法采用滤波器对扰动项进行估计,已应用于机械臂^[11]、四旋翼无人机^[12]及人机交互^[13]等控制中的扰动估计,与时延观测器相比,UDE可以取得更好的扰动估计效果^[14].现有文献虽有将一阶UDE与滑模控制相结合的相关研究,但并未考虑扰动估计误差^[15],且尚未发现采用UDE方法对NFTSMC中扰动估计的相关研究.由于实际系统中电机初始位置误差的存在及输入力/力矩的限制,采用观测器对扰动估计时电机输入饱和问题通常无法避免,现有研究采用了平滑函数、动态辅助系统及神经网络等方法对输入饱和进行处理^[16],但在有限时间控制中考虑输入饱和的相关研究较少.针对机械臂控制过程中存在的扰动和输入饱和问题,本文提出一种自适应非奇异快速终端滑模控制算法,做出以下工作:1)将二阶UDE与非奇异快速终端滑模控制相结合,提出一种连续非奇异快速终端滑模控制算法,在避免抖振的情况下实现机械臂的有限时间控制;2)在有限时间控制基础上,设计饱和补偿系统,解决输入饱和问题;3)采用自适应方法对扰动观测误差进行控制,通

过Lyapunov函数证明了算法的有限时间收敛特性.

1 问题描述

1.1 机械臂动力学模型

考虑模型不确定和外界扰动,具有 n 个自由度 m 个驱动的机械臂,其刚体动力学模型可表示为

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

其中: $\eta = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m]^T \in \mathbf{R}^n$ 为描述机械臂运动的独立变量, $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m]^T \in \mathbf{R}^m$ 为电机驱动力/力矩, $M \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为系统惯性矩阵, $C(\eta, \dot{\eta}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为哥氏力/离心力矩阵, $G \in \mathbf{R}^n$ 为重力项, $d \in \mathbf{R}^n$ 为模型不确定项与外部扰动组成的扰动项, $B \in \mathbf{R}^{n \times m}$ 为电机参数传输矩阵.

假设1 假设扰动项 d 有界且一阶可导,其导数 $\dot{d} = [\dot{d}_1, \dot{d}_2, \dots, \dot{d}_n]^T \in \mathbf{R}^n$ 有界,并满足 $|\dot{d}_i| \leq \dot{d}_i^*$ 及 $\dot{d}^* = [\dot{d}_1^*, \dot{d}_2^*, \dots, \dot{d}_n^*]^T \in \mathbf{R}^n$.

1.2 UDE方法

UDE方法根据系统模型和控制律得到扰动表达式,并采用滤波器对扰动进行估计^[17].扰动估计值 \hat{d} 可表示为

$$\hat{d} = d * L^{-1}(G_f). \quad (2)$$

其中: G_f 为滤波器 g_f 的频域表达式, L^{-1} 为Laplace逆变换,*为卷积运算.为提高扰动估计精度,本文采用二阶滤波器对扰动进行估计,即

$$G_f = \frac{2Ts + 1}{T^2s^2 + 2Ts + 1}. \quad (3)$$

其中: T 为时间常数, s 为Laplace微分算子.式(2)可表示为

$$T^2\ddot{\hat{d}} + 2T\dot{\hat{d}} + \hat{d} = 2T\dot{d} + d. \quad (4)$$

由式(4)可知,扰动估计值 \hat{d} 由扰动 d 及其导数 \dot{d} 决定.定义 $\tilde{d} = d - \hat{d} = [\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_n]^T$ 为扰动估计误差,对式(4)两边积分并减去 \hat{d} ,可得扰动估计误差

$$\dot{\tilde{d}} + \frac{2}{T}\tilde{d} + \frac{1}{T^2} \int_0^t \tilde{d} dt = \dot{d}. \quad (5)$$

定义 $\varsigma = [\varsigma_1; \varsigma_2] = \left[\int_0^t \tilde{d} dt; \tilde{d} \right]$,由式(5)可得

$$\dot{\varsigma} = \exp(\mathbf{A}t)\varsigma(0) + \int_0^t \exp[\mathbf{A}(t - \tau)]\mathbf{b}\dot{d}\tau. \quad (6)$$

其中: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & \mathbf{E}_n \\ -\frac{1}{T^2}\mathbf{E}_n & -\frac{2}{T}\mathbf{E}_n \end{bmatrix}$, $\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} \\ \mathbf{E}_n \end{bmatrix}$, \mathbf{E}_n 为 $n \times n$ 的单位矩阵.由于时间常数 T 是正值, \mathbf{A} 为Hurwitz矩阵.根据假设1和式(6),存在正向量 $\tilde{d}^{\max} = [\tilde{d}_1^{\max}, \tilde{d}_2^{\max}, \dots, \tilde{d}_n^{\max}]^T$,使得 $|\tilde{d}_i| \leq \tilde{d}_i^{\max}$ 成立,因此扰动估计误差是有界的.

注1 对于真实的机械臂系统,扰动 d 由模型不确定项及外部扰动组成,模型不确定项主要由关节摩

摩擦力与机械本体及负载参数不确定性产生, 由于质量阵 M 、哥氏力/离心力矩阵 C 、重力项 G 、运行轨迹 η 及摩擦力的主要组成部分均有界可导, 且其一阶导数有界, 模型不确定项满足假设1; 机械臂正常工作时, 外部扰动主要为机械臂与外界之间的交互力, 仅在初始时刻或运行阶段极短时间内交互力的导数可能不存在或数值较大, 但由于作用时间较短, 其仅可能对作用时间内的扰动估计值或跟踪误差产生影响, 不影响系统的收敛特性。

1.3 饱和问题

考虑到机械臂实际应用中的安全与成本因素, 电机不能完全满足计算得到的驱动力/力矩, 因此需要考虑电机的输入饱和问题。

假设2 根据输入力矩约束, 假设作用于机械臂的驱动力/力矩 τ_i 具有非对称饱和特性, 描述电机输入约束的饱和函数可表示为

$$u_i = \begin{cases} u_{\max}, & \tau_i \geq u_{\max}; \\ \tau_i, & u_{\min} \leq \tau_i \leq u_{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \\ u_{\min}, & \tau_i \leq u_{\min}. \end{cases} \quad (7)$$

其中: u_i 为电机 i 的实际输出力/力矩, u_{\max} 和 u_{\min} 为驱动力/力矩的最大值和最小值。根据式(7), 式(1)可表示为

$$M\ddot{\eta} + C(\eta, \dot{\eta})\dot{\eta} + G + d = B(\tau + \Delta u). \quad (8)$$

其中: $\Delta u = u - \tau$ 为输入饱和力/力矩, 记为 $u = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$ 。

2 控制算法设计

引理1^[18] 对于连续正定函数 $V(t)$, 当 $t > 0$ 时不等式 $\dot{V}(t) \leq -a_0V(t) - b_0V^\alpha(t) + c_0$ 成立。其中: a_0 、 b_0 、 c_0 和 α 均为正值, 并满足 $0 < \alpha < 1$, 则存在 $0 < \theta_0 < 1$, 使得 $V(t)$ 在有限时间 T_r 内收敛到 V_0 , 且 V_0 和 T_r 的上界分别为

$$V_0 = \lim_{t \rightarrow T_r} V(t) \leq \min \left\{ \frac{c_0}{(1 - \theta_0)a_0}, \left(\frac{c_0}{(1 - \theta_0)b_0} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right\},$$

$$T_r \leq \max \left\{ \frac{1}{(1 - \alpha)\theta_0 a_0} \ln \frac{\theta_0 a_0 V^{1-\alpha}(0) + b_0}{b_0}, \frac{1}{(1 - \alpha)a_0} \ln \frac{a_0 V^{1-\alpha}(0) + \theta_0 b_0}{b_0} \right\}.$$

2.1 考虑输入饱和的终端滑模控制器设计

为解决输入饱和问题, 构造以下饱和补偿系统:

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_1 = -C_1 \lambda_1 + \lambda_2, \\ \dot{\lambda}_2 = -C_2 \lambda_2 - \lambda_1 + M^{-1} B \Delta u. \end{cases} \quad (9)$$

其中: C_1 和 C_2 是对角线元素均为正值的常数对角矩阵; λ_1 和 λ_2 为补偿系统的状态变量, 即由 Δu 产生的

跟踪误差。为验证饱和补偿系统的稳定性, 构造如下 Lyapunov 函数:

$$V_2 = \lambda_1^T \lambda_1 + \lambda_2^T \lambda_2. \quad (10)$$

对式(10)求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \lambda_1^T \dot{\lambda}_1 + \lambda_2^T \dot{\lambda}_2 = \\ &= \lambda_1^T (-C_1 \lambda_1 + \lambda_2) + \lambda_2^T (-C_2 \lambda_2 - \lambda_1 + M^{-1} B \Delta u) = \\ &= -\lambda_1^T C_1 \lambda_1 - \lambda_2^T C_2 \lambda_2 - \lambda_2^T M^{-1} B \Delta u \leq \\ &= -\alpha_2 (\lambda_1^T \lambda_1 + \lambda_2^T \lambda_2) + |\lambda_2^T M^{-1} B \Delta u| = \\ &= -\alpha_2 V_2 + \eta_2. \end{aligned} \quad (11)$$

其中: $\eta_2 = |\lambda_2^T M^{-1} B \Delta u|$, 且 $\alpha_2 = \min(C_1, C_2)$ 为常矩阵的最小值。对式(11)两边积分可得

$$V_2(t) \leq \left(V_2(0) - \frac{\eta_2}{\alpha_2} \right) e^{-\alpha_2 t} + \frac{\eta_2}{\alpha_2}. \quad (12)$$

由式(12)可知, Lyapunov 函数 V_2 为非增函数, 根据 Barbala 引理, 系统是渐近稳定的。

根据系统动力学模型(8)及饱和补偿系统(9), 定义跟踪误差为

$$\begin{cases} e_1 = \eta - \eta_d - \lambda_1, \\ e_2 = \dot{e}_1 = \dot{\eta} - \dot{\eta}_d - \dot{\lambda}_1, \end{cases} \quad (13)$$

其中 η_d 和 $\dot{\eta}_d$ 分别为期望的位置和速度。对式(13)求导, 并将式(8)和(9)代入后

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2, \\ \dot{e}_2 = \ddot{\eta} - \ddot{\eta}_d - \ddot{\lambda}_1 = \\ M^{-1}(B(\tau + \Delta u) - C\dot{\eta} - G - d) - \ddot{\eta}_d + \\ (E_n - C_1^2)\lambda_1 + (C_1 + C_2)\lambda_2 - M^{-1}B\Delta u = \\ M^{-1}(B\tau - C\dot{\eta} - G - d) - \ddot{\eta}_d + \\ (E_n - C_1^2)\lambda_1 + (C_1 + C_2)\lambda_2. \end{cases} \quad (14)$$

定义非奇异快速终端滑模控制的滑模面为

$$s = e_1 + K_1 \text{sig}^{\beta_1}(e_1) + K_2 \text{sig}^{\beta_2}(e_2). \quad (15)$$

其中: $s = [s_1, s_2, \dots, s_n]^T \in \mathbf{R}^n$; K_1 和 K_2 为正常数对角矩阵; $\text{sig}^p(\cdot) = [|\cdot|^p \text{sgn}(\cdot), |\cdot|^p \text{sgn}(\cdot), \dots, |\cdot|^p \text{sgn}(\cdot)]^T$, p 为正数; 满足 $1 < \beta_2 < 2$ 和 $\beta_1 > \beta_2$ 。

引理2^[19] 对于式(15)所示滑模面, 当 $s = \mathbf{0}_{n \times 1}$ 时, e_1 和 e_2 有限时间收敛于 $\mathbf{0}_{n \times 1}$ 。

根据式(15), 滑模面的导数可表示为

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \\ \dot{e}_1 + \beta_1 K_1 \text{diag}_{\text{abs}}^{\beta_1-1}(e_1) \dot{e}_1 + \beta_2 K_2 \text{diag}_{\text{abs}}^{\beta_2-1}(e_2) &= \\ (E_n + \beta_1 K_1 \text{diag}_{\text{abs}}^{\beta_1-1}(e_1)) \dot{e}_1 + & \\ \beta_2 K_2 \text{diag}_{\text{abs}}^{\beta_2-1}(e_2) (M^{-1}(B\tau - C\dot{\eta} - G - d) - & \\ \ddot{\eta}_d + (E_n - C_1^2)\lambda_1 + (C_1 + C_2)\lambda_2), & \end{aligned} \quad (16)$$

其中 $\text{diag}_{\text{abs}}^p(\cdot) = \text{diag}([|\cdot|^p, |\cdot|^p, \dots, |\cdot|^p]^T)$ 。根

据式(16)可定义控制律

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{eq} + \boldsymbol{\tau}_{es} + \boldsymbol{\tau}_{di}. \quad (17)$$

其中: $\boldsymbol{\tau}_{eq}$ 为根据理想模型计算的控制律, $\boldsymbol{\tau}_{es}$ 为扰动估计项, $\boldsymbol{\tau}_{di}$ 为鲁棒控制项. 根据机械臂模型(8)、补偿系统(9)及滑模面方程(13), $\boldsymbol{\tau}_{eq}$ 可表示为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{eq} = & \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{M}(\ddot{\boldsymbol{\eta}}_d - (\mathbf{E}_n - \mathbf{C}_1^2)\boldsymbol{\lambda}_1 - (\mathbf{C}_1 + \mathbf{C}_2)\boldsymbol{\lambda}_2 - \\ & \beta_2^{-1}\mathbf{K}_2^{-1}(\mathbf{E}_n + \beta_1\mathbf{K}_1\text{diag}_{\text{abs}}^{\beta_1-1}(\mathbf{e}_1)) \cdot \\ & \text{sig}^{2-\beta_2}(\mathbf{e}_2)) + \mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{G}). \end{aligned} \quad (18)$$

扰动估计项可表示为

$$\boldsymbol{\tau}_{es} = \mathbf{B}^{-1}\hat{\mathbf{d}}. \quad (19)$$

鲁棒控制项可表示为

$$\boldsymbol{\tau}_{di} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{M}(-\mathbf{K}_3\mathbf{s} - \mathbf{K}_4\text{sig}^{\beta_3}(\mathbf{s})). \quad (20)$$

其中: β_3 为正数, 且满足 $0 < \beta_3 < 1$; $\mathbf{K}_3 = \text{diag}(\mathbf{k}_3)$ 为对角线元素均为正值的常数矩阵. 由于扰动估计误差上界未知, 且为保证扰动估计误差控制有限时间收敛, 选择右侧第2项为针对扰动估计误差的鲁棒控制项, 本文将采用自适应方法对该项系数进行估计, $\mathbf{K}_4 = \text{diag}(\hat{\mathbf{k}}_4)$ 为对应的对角阵, 且自适应项更新率为

$$\dot{\hat{\mathbf{k}}}_4 = -\rho_1\hat{\mathbf{k}}_4 + \rho_2\beta_2\mathbf{K}_2\text{diag}_{\text{abs}}^{\beta_2-1}(\mathbf{e}_2)\text{abs}^{\beta_3+1}(\mathbf{s}). \quad (21)$$

其中: $\text{abs}^{\beta_3+1}(\cdot) = [|\cdot_1|^{\beta_3+1}, |\cdot_2|^{\beta_3+1}, \dots, |\cdot_n|^{\beta_3+1}]^T$; ρ_1 和 ρ_2 均为正常数. 根据式(2)和(8), 扰动估计值 $\hat{\mathbf{d}}$ 表示为

$$\hat{\mathbf{d}} = (\mathbf{B}(\boldsymbol{\tau} + \Delta\mathbf{u}) - \mathbf{M}\dot{\boldsymbol{\eta}} - \mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}} - \mathbf{G}) * g_f. \quad (22)$$

将式(22)代入(19), 并根据(16)~(20)可得到扰动估计值 $\hat{\mathbf{d}}$ 为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{d}} = & (-\mathbf{M}\dot{\mathbf{e}}_2 - \beta_2^{-1}\mathbf{K}_2^{-1}\mathbf{M}(\mathbf{E}_n + \\ & \beta_1\mathbf{K}_1\text{diag}_{\text{abs}}^{\beta_1-1}(\mathbf{e}_1))\text{sig}^{2-\beta_2}(\mathbf{e}_2) - \mathbf{K}_3\mathbf{M}\mathbf{s} - \\ & \mathbf{K}_4\mathbf{M}\text{sig}^{\beta_3}(\mathbf{s})) * L^{-1}\left(\frac{\mathbf{G}_f}{1 - \mathbf{G}_f}\right) = \\ & -\mathbf{M}\left(2\mathbf{e}_2 + \frac{\mathbf{e}_1}{T}\right) - \mathbf{M}(\beta_2^{-1}\mathbf{K}_2^{-1}(\mathbf{E}_n + \\ & \beta_1\mathbf{K}_1\text{diag}_{\text{abs}}^{\beta_1-1}(\mathbf{e}_1))\text{sig}^{2-\beta_2}(\mathbf{e}_2) + \mathbf{K}_3\mathbf{s} + \\ & \mathbf{K}_4\text{sig}^{\beta_3}(\mathbf{s})) * L^{-1}\left(\frac{2}{s} + \frac{1}{Ts^2}\right). \end{aligned} \quad (23)$$

注2 扰动项 \mathbf{d} 由式(23)中 $\hat{\mathbf{d}}$ 进行估计, 并通过式(21)对扰动观测误差进行控制, 由式(4)、(5)、(21)和(23)可知, 扰动估计值 $\hat{\mathbf{d}}$ 及自适应项系数 $\hat{\mathbf{k}}_4$ 连续可导, 而传统滑模控制算法通过调整滑模面符号函数 $\text{sgn}(\mathbf{s})$ 增益对扰动进行控制, 产生了切换效应即抖振, 因此本文方法避免了抖振.

2.2 算法收敛性证明

定理1 考虑机械臂系统模型(8), 采用饱和补偿系统(9)、扰动估计值(23)、控制律(18)~(20)、自适应律(21), 则滑模面 \mathbf{s} 和跟踪误差 \mathbf{e}_1 及 \mathbf{e}_2 是有限时间收敛的.

证明 构造如下 Lyapunov 函数:

$$V = \mathbf{s}^T\mathbf{s} + \frac{1}{\rho_2}\tilde{\boldsymbol{\xi}}^T\tilde{\boldsymbol{\xi}}. \quad (24)$$

其中: $\tilde{\boldsymbol{\xi}} = \boldsymbol{\xi} - \hat{\mathbf{k}}_4$ 为自适应控制误差, $\boldsymbol{\xi}$ 为任意时刻与扰动估计误差绝对值相关的物理量, 且满足 $\hat{\mathbf{k}}_4 \leq \boldsymbol{\xi} \leq \alpha_3\tilde{\mathbf{d}}^{\max}$, $\alpha_3 > 0$ 为关于质量阵 \mathbf{M} 及滑模面 \mathbf{s} 的函数. 对式(24)求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \mathbf{s}^T\dot{\mathbf{s}} + \frac{1}{\rho_2}\tilde{\boldsymbol{\xi}}^T\dot{\tilde{\boldsymbol{\xi}}} = \\ & \mathbf{s}^T(\dot{\mathbf{e}}_1 + \beta_1\mathbf{K}_1\text{diag}_{\text{abs}}^{\beta_1-1}(\mathbf{e}_1)\dot{\mathbf{e}}_1 + \\ & \beta_2\mathbf{K}_2\text{diag}_{\text{abs}}^{\beta_2-1}(\mathbf{e}_2)\dot{\mathbf{e}}_2) - \frac{1}{\rho_2}\tilde{\boldsymbol{\xi}}^T\dot{\hat{\mathbf{k}}}_4. \end{aligned} \quad (25)$$

由于 $\text{abs}^{\beta_3+1}(\mathbf{s}) = \text{diag}_{\text{abs}}^{\beta_3}(\mathbf{s})\text{abs}(\mathbf{s})$, 将式(17)~(23)代入(25), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\mathbf{s}^T\beta_2\mathbf{K}_2\text{diag}_{\text{abs}}^{\beta_2-1}(\mathbf{e}_2)(\mathbf{K}_3\mathbf{s} + \\ & \mathbf{K}'_4\text{sig}^{\beta_3}(\mathbf{s}) + \mathbf{M}^{-1}\tilde{\mathbf{d}}) + \frac{\rho_1}{\rho_2}\tilde{\boldsymbol{\xi}}^T\hat{\mathbf{k}}_4, \end{aligned} \quad (26)$$

其中 $\mathbf{K}'_4 = \text{diag}(\hat{\mathbf{k}}_4 + \tilde{\boldsymbol{\xi}}) = \text{diag}(\boldsymbol{\xi})$. 由杨氏不等式有 $\tilde{\boldsymbol{\xi}}^T\hat{\mathbf{k}}_4 = \tilde{\boldsymbol{\xi}}^T(\boldsymbol{\xi} - \tilde{\boldsymbol{\xi}}) \leq \frac{1}{2}(\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{\xi} - \tilde{\boldsymbol{\xi}}^T\tilde{\boldsymbol{\xi}})$, 将其代入式(26)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\mathbf{s}^T(\mathbf{K}_3^u\mathbf{s} + \mathbf{K}_4^u\text{sig}^{\beta_3}(\mathbf{s}) + \mathbf{M}^u\tilde{\mathbf{d}}) + \\ & \frac{\rho_1}{2\rho_2}(\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{\xi} - \tilde{\boldsymbol{\xi}}^T\tilde{\boldsymbol{\xi}}). \end{aligned} \quad (27)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_3^u &= \beta_2\mathbf{K}_2\text{diag}_{\text{abs}}^{\beta_2-1}(\mathbf{e}_2)\mathbf{K}_3, \\ \mathbf{K}_4^u &= \beta_2\mathbf{K}_2\text{diag}_{\text{abs}}^{\beta_2-1}(\mathbf{e}_2)\mathbf{K}'_4, \\ \mathbf{M}^u &= \beta_2\mathbf{K}_2\text{diag}_{\text{abs}}^{\beta_2-1}(\mathbf{e}_2)\mathbf{M}^{-1}. \end{aligned}$$

由于 $\hat{\mathbf{k}}_4 \leq \boldsymbol{\xi}$, 可以得到 $0 \leq \tilde{\boldsymbol{\xi}} \leq \boldsymbol{\xi}$ 及 $\frac{\rho_1}{2\rho_2}(\tilde{\boldsymbol{\xi}}^T\tilde{\boldsymbol{\xi}})^{\frac{1+\beta_3}{2}} \leq \frac{\rho_1}{2\rho_2}(\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{\xi})^{\frac{1+\beta_3}{2}}$, 将其代入式(27)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\left(\lambda_{\min}^{\mathbf{K}_3^u}\mathbf{s}^T\mathbf{s} + \lambda_{\min}^{\mathbf{K}_4^u}(\mathbf{s}^T\mathbf{s})^{\frac{1+\beta_3}{2}} - \lambda_{\max}^{\mathbf{M}^u}|\mathbf{s}|^T\tilde{\mathbf{d}}^{\max} + \right. \\ & \left. \frac{\rho_1}{2\rho_2}\tilde{\boldsymbol{\xi}}^T\tilde{\boldsymbol{\xi}} + \frac{\rho_1}{2\rho_2}(\tilde{\boldsymbol{\xi}}^T\tilde{\boldsymbol{\xi}})^{\frac{1+\beta_3}{2}}\right) + \\ & \frac{\rho_1}{2\rho_2}\left(\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{\xi} + (\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{\xi})^{\frac{1+\beta_3}{2}}\right) = \\ & -\left(\lambda_{\min}^{\mathbf{K}_3^u}(1 - \gamma_1)\mathbf{s}^T\mathbf{s} + \lambda_{\min}^{\mathbf{K}_4^u}(1 - \gamma_2) \cdot \right. \\ & \left. (\mathbf{s}^T\mathbf{s})^{\frac{1+\beta_3}{2}} + \frac{\rho_1}{2\rho_2}\tilde{\boldsymbol{\xi}}^T\tilde{\boldsymbol{\xi}} + \frac{\rho_1}{2\rho_2}(\tilde{\boldsymbol{\xi}}^T\tilde{\boldsymbol{\xi}})^{\frac{1+\beta_3}{2}}\right) + \\ & \left(\frac{\rho_1}{2\rho_2}\left(\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{\xi} + (\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{\xi})^{\frac{1+\beta_3}{2}}\right) - \lambda_{\min}^{\mathbf{K}_4^u}\gamma_2(\mathbf{s}^T\mathbf{s})^{\frac{1+\beta_3}{2}}\right) + \end{aligned}$$

$$(\lambda_{\max}^u |s|^T \tilde{d}^{\max} - \lambda_{\min}^{K_3^u} \gamma_1 s^T s) \leq -\sigma_1 V - \sigma_2 V^{\frac{1+\beta_3}{2}} + \eta, \quad (28)$$

其中: γ_1 和 γ_2 为常数, 且满足 $0 < \gamma_1, \gamma_2 < 1$; $\eta = (\lambda_{\max}^u s^T \tilde{d}^{\max} - \lambda_{\min}^{K_3^u} \gamma_1 s^T s) + \left(\frac{\rho_1}{2\rho_2} (\xi^T \xi + (\xi^T \xi)^{\frac{1+\beta_3}{2}}) - \lambda_{\min}^{K_4^u} \gamma_2 (s^T s)^{\frac{1+\beta_3}{2}}\right)$; $\sigma_1 = \min\left(\lambda_{\min}^{K_3^u} (1 - \gamma_1), \frac{\rho_1}{2\rho_2}\right)$, $\sigma_2 = \min\left(\lambda_{\min}^{K_4^u} (1 - \gamma_2), \frac{\rho_1}{2\rho_2}\right)$, $\lambda_{\min}(\cdot)$ 和 $\lambda_{\max}(\cdot)$ 分别为矩阵 \cdot 的最小和最大特征值. 因此, 由引理 1 可知, 当 $|s_i| \geq \delta_{2i} = \max\left(\frac{\lambda_{\max}^u \tilde{d}_i^{\max}}{\lambda_{\min}^{K_3^u} \gamma_1}, \sqrt{\frac{\rho_1 (|\xi_i|^2 + |\xi_i|^{1+\beta_3})}{2\rho_2 \lambda_{\min}^{K_4^u} \gamma_2}}\right)$ 时, $\eta \leq 0$ 成立, s_i 是有限时间收敛的, 收敛域的上界为 δ_{2i} .

为进一步证明 e_1 和 e_2 的收敛特性, 将式 (15) 所示滑模面改写为

$$e_1 + \left(K_1 - \text{diag}\left(\frac{s}{\text{sig}^{\beta_1}(e_1)}\right)\right) \text{sig}^{\beta_1}(e_1) + K_2 \text{sig}^{\beta_2}(e_2) = \mathbf{0}_{n \times 1}. \quad (29)$$

根据引理 2, 当 $K_1 - \text{diag}\left(\frac{s}{\text{sig}^{\beta_1}(e_1)}\right)$ 对角线上元素均大于 0 时, 式 (29) 有限时间收敛于 $\mathbf{0}_{n \times 1}$, 此时 e_1 各项的收敛域上界为

$$|e_{1i}| < \left(\frac{\delta_{2i}}{K_{1i}}\right)^{\frac{1}{\beta_1}}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (30)$$

其中 e_{1i} 和 K_{1i} 分别为 e_1 和对角阵 K_1 的第 i 项. 同理, 滑模面 (15) 可被改写为

$$e_1 + \left(K_2 - \text{diag}\left(\frac{s}{\text{sig}^{\beta_2}(e_2)}\right)\right) \text{sig}^{\beta_2}(e_2) + K_1 \text{sig}^{\beta_1}(e_1) = \mathbf{0}_{n \times 1}. \quad (31)$$

根据引理 2, 当 $K_2 - \text{diag}\left(\frac{s}{\text{sig}^{\beta_2}(e_2)}\right)$ 对角线上元素均大于 0 时, 式 (31) 有限时间收敛于 $\mathbf{0}_{n \times 1}$, 此时 e_2 各项的收敛域上界为

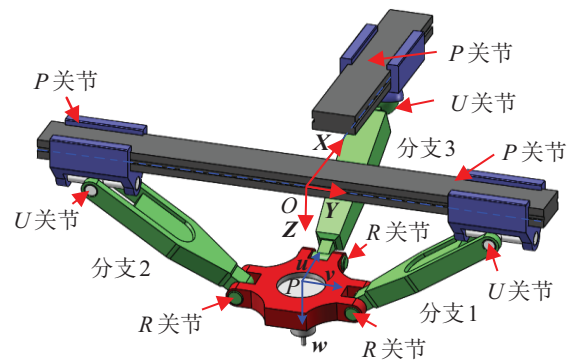
$$|e_{2i}| < \left(\frac{\delta_{2i}}{K_{2i}}\right)^{\frac{1}{\beta_2}}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (32)$$

其中 e_{2i} 和 K_{2i} 分别为 e_2 和对角阵 K_2 的第 i 项. \square

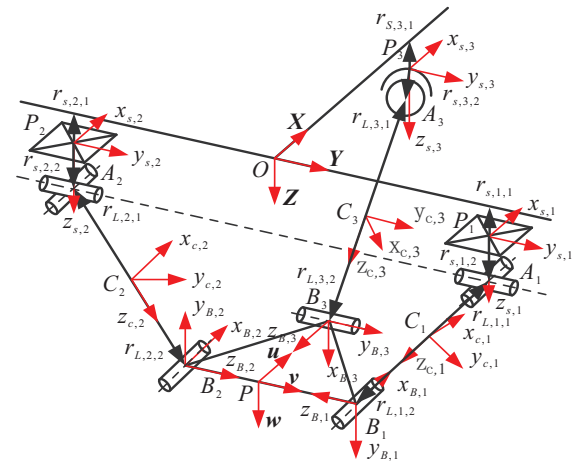
3 算法仿真与验证

为验证控制算法的有效性, 本文将以图 1 所示的 3 自由度 2PUR-PSR 并联机械臂为控制对象, 根据文献 [20] 中建立的动力学模型, 采用 Matlab/Simulink 软件进行控制算法仿真, 其中 P 、 U 和 R 分别代表移动关节、万向关节及转动关节. 该机械臂由基座与动平台组成, 两者通过两个相同结构的 PUR 分支和一个 PSR 分支连接, A_1 和 A_2 代表万向关节的交点, A_3 为球形关节的中心, $P_i (i = 1, 2, 3)$ 代表每支链上移动关节和驱动电机位置, 前两个移动关节的运动在一

条直线上且垂直于第 3 个关节. $B_i (i = 1, 2, 3)$ 代表动平台上的旋转关节与每个分支相连的位置点, $C_i (i = 1, 2, 3)$ 代表第 i 个杆件的重心. 参考坐标系 $O\text{-}XYZ$ 和移动坐标系 $P\text{-}uvw$ 分别与基座和动平台固结, 以 O 和 P 为坐标系原点 (即 $A_1 A_2$ 和 $B_1 B_2$ 的中点), X 和 u 轴分别与 $A_1 A_2$ 和 $B_1 B_2$ 平行, Z 和 w 轴与基座和动平台垂直, 而 Y 和 v 轴方向可以通过右手法则确定. 机械臂 3 个自由度分别为 z 方向的平移运动、绕 x 轴的旋转运动、绕 y 轴的旋转运动, 分别用 z 、 ϕ 和 θ 表示. 此外, 分支 1 与分支 2 的几何参数相同, l_1 和 l_3 为 PB_1 与 $A_1 B_1$ 之间的距离, 分支 3 对应的参数分别为 l_2 和 l_4 .



(a) 机械臂原理



(b) 机械臂坐标系

图 1 机械臂原理和坐标系

为对本文提出的算法进行验证, 将分别对不考虑输入饱和和考虑输入饱和两种情况进行仿真. 在不考虑输入饱和情况下, 为对本文提出的自适应连续 NFTSMC 算法进行验证, 将分别对以下算法进行仿真: 本文算法 (算法 1)、文献 [21] 的自适应 NFTSMC (算法 2)、不考虑扰动观测误差情况下的 NFTSMC 加 UDE (算法 3)、文献 [22] 用到的时延观测器加 NTSMC (算法 4). 由于滑模面本身对控制性能存在较大影

响,为了合理地对控制算法性能进行对比,仿真时4种算法均采用NFTSMC,即将算法4中NTSMC改为NFTSMC.

在控制算法仿真中,为合理比较上述算法性能,对各算法用到的NFSMC参数、UDE及时延观测器中时间常数以及算法1和算法2中的自适应项系数均尽可能选取相同值.机械臂的运动学参数设置为:动平台边长 $l_1 = 30\text{ mm}$ 及 $l_2 = 35\text{ mm}$,各分支杆件长度 $l_3 = 90\text{ mm}$ 及 $l_4 = 95\text{ mm}$;其他的几何与惯性参数见表1,且各部件的惯性张量在其质心处的固连坐标系下测量;设置扰动 $\mathbf{d} = 0.1(\mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{G}) + (500 \sin t + 500 \sin(4t)) \times \mathbf{1}_{3 \times 1}$;选取机械臂的初始位姿为 $z_0 = 19.5\text{ mm}$, $\theta_0 = 0.05\pi$, $\phi_0 = 0.05\pi$;算法1和算法3中UDE的时间常数及算法4中时延观测器的时间常数均为 $T = 0.005\text{ s}$;4种算法的

滑模面参数为 $\mathbf{K}_1 = \text{diag}([400, 100, 100])$, $\mathbf{K}_2 = \text{diag}([10, 5, 5])$, $\beta_1 = 1.8$, $\beta_2 = 1.5$;鲁棒控制项参数为 $\mathbf{K}_3 = \text{diag}([400, 100, 100])$;算法2~算法4中 $\mathbf{K}_4 = \text{diag}([10, 10, 10])$;算法1中 $\hat{\mathbf{k}}_4$ 的初始值为 $[10, 10, 10]^T$,自适应控制参数为 $\rho_1 = 0.001$, $\rho_2 = 25$, $\beta_3 = 0.4$;算法2中自适应项参数 $\lambda_0 = \lambda_1 = \lambda_3 = 50$;算法1中输入饱和系统参数为 $\mathbf{C}_1 = \text{diag}([50, 50, 50])$, $\mathbf{C}_2 = \text{diag}([50, 50, 50])$;机械臂期望运行轨迹为

$$\begin{cases} z = 60(6t^5/t_d^5 - 15t^4/t_d^4 + 10t^3/t_d^3) + 20, \\ \theta = \pi(6t^5/t_d^5 - 15t^4/t_d^4 + 10t^3/t_d^3)/9 - \pi/18, \\ \phi = \pi(6t^5/t_d^5 - 15t^4/t_d^4 + 10t^3/t_d^3)/9 - \pi/18. \end{cases} \quad (33)$$

其中: $0 \leq t \leq 1$, $t_d = 1\text{ s}$ 为时间常数.

表1 并联机械臂的质量与惯性张量

部件	质量/kg	质心到上下运动副位置矢量/mm	惯性张量/(kg·mm ²)
滑块	0.05	(0, 0, -5)(0, 0, -5)	$\text{diag}([5 \times 10^{-4}, 5 \times 10^{-4}, 5 \times 10^{-4}])$
杆件1和杆件2	0.1	(0, 0, -48.9)(0, 0, 41.1)	$\text{diag}([0.59, 6.4 \times 10^{-2}, 5.9 \times 10^{-3}])$
杆件3	0.17	(0, 0, -44.8)(0, 0, 50.2)	$\text{diag}([0.15, 0.15, 6.5 \times 10^{-3}])$
平台	10	-	$\text{diag}([0.72, 0.15, 6.5 \times 10^{-3}])$

位置跟踪误差及驱动力是算法性能的重要体现,图2和图3分别为不考虑输入饱和时4种算法的位置跟踪误差及驱动力对比,在位置跟踪误差方面,在 z 平动方向算法4跟踪误差最大,在0.5 s后最大跟踪误差在0.4 mm左右,算法3在0.6 s附近出现了明显的局部最大误差,在0.02 mm左右,算法1和算法2均在0.005 mm以下,对于 x 和 y 转动方向,算法2跟踪误差明显较大,其他3种算法在0.75 s以后,其跟踪误差均小于0.001 2 rad;对于图3所示各轴驱动力,算法2在整个运行阶段出现了连续的波动,且局部驱动力达到了3 000 N以上,这是由于时变扰动 \mathbf{d} 使得自适应项系数连续变化引起的,其他3种算法在初始时刻出现了较大驱动力,但持续时间在10 ms以内,这是由于初始时刻位置误差较大使得扰动估计值较大造成的,其他时刻驱动力均较平滑,但通过局部放大图可以看出,算法1即本文算法出现了局部的小幅驱动力波动,这是由于扰动估计误差较小且扰动估计误差波动使得自适应项系数变化产生的,由于大部分扰动由UDE估计,扰动估计误差较小,驱动力波动较小.可以看出,与其他算法相比,本文算法在3个方向上均可取得最好的位置跟踪精度,除初始10 ms时间内驱动力较大外,其他时刻驱动力均较平稳,虽有小幅波动,但在可接受范围内.

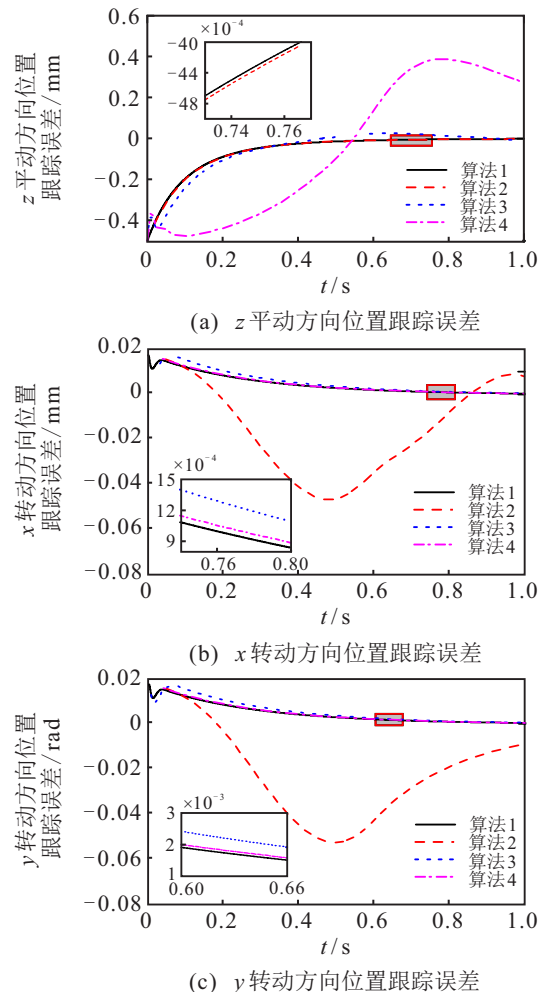


图2 4种算法的位置跟踪误差对比

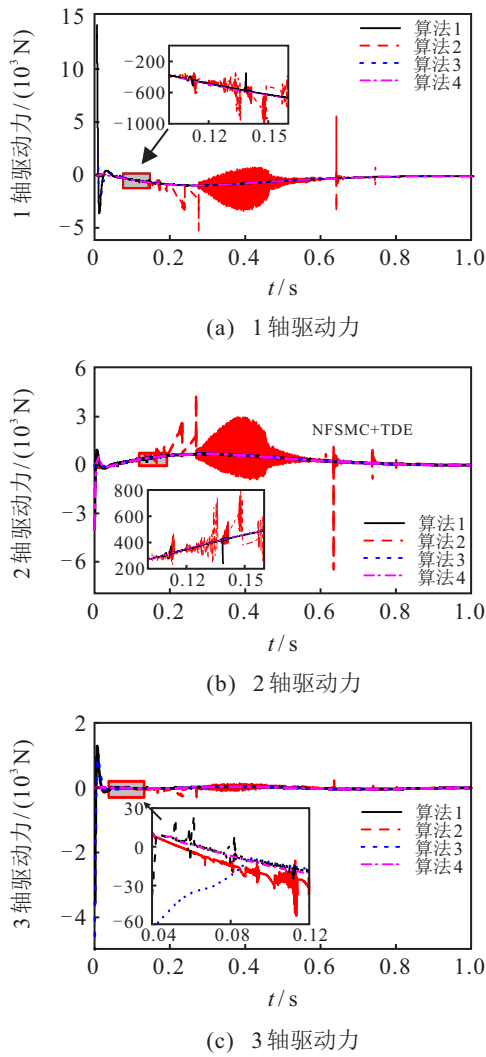


图3 4种算法的驱动力对比

图4为采用本文算法时的速度跟踪误差、自适应项系数估计及扰动估计. 可以看出: x 和 y 转动方向跟踪误差及自适应项系数估计值基本重合, 3个方向的位置与速度跟踪误差在0.4s时都接近于0; 对于扰动估计误差的自适应控制, z 平动方向的自适应项系数约为5778, 其他两方向约为44.7, z 平动方向较其他两方向明显偏大, 这是由于该方向的速度和加速度较大造成的, 符合预期结果; 3个方向的扰动估计值在初始时刻都在10000以上, 远大于实际值, 这是由初始位置误差造成的, 由于本文采用的2阶UDE包含跟踪误差的2阶积分项, 在0.02s以后 z 方向的扰动估计值与实际值基本保持重合, 其他两方向估计误差也小于0.2%, 因此可以实现高精度的扰动估计; 由于初始时刻的扰动估计值较大, 使得初始时刻的驱动力大于10000N, 远大于电机的输出能力.

从图2~图4所示仿真结果可以看出, 在不考虑输入饱和时, 采用本文方法可以取得良好的跟踪精度及扰动估计精度, 然而由于实际系统中电机初始位置误差的存在及输入力/力矩的限制, 电机输入饱和问

题通常无法避免, 为保证系统稳定性必须考虑输入饱和.

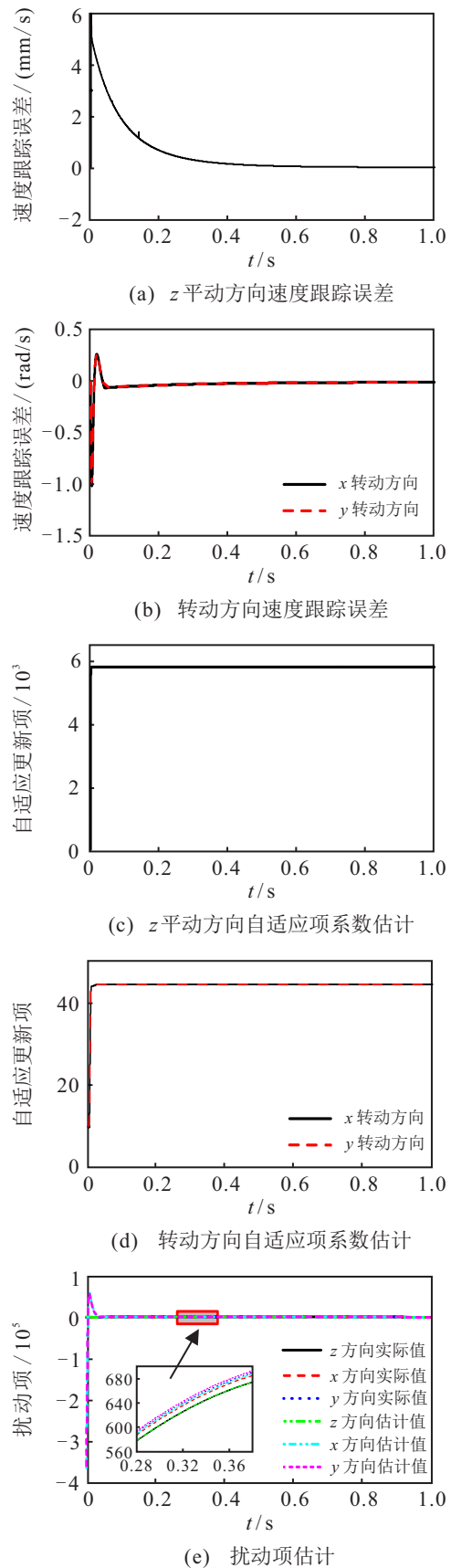
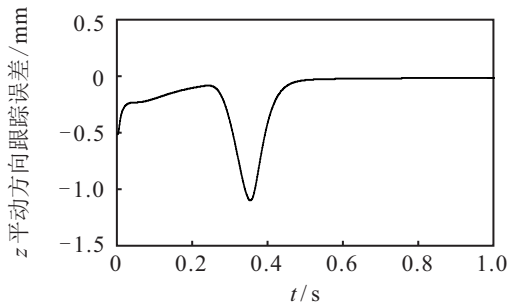


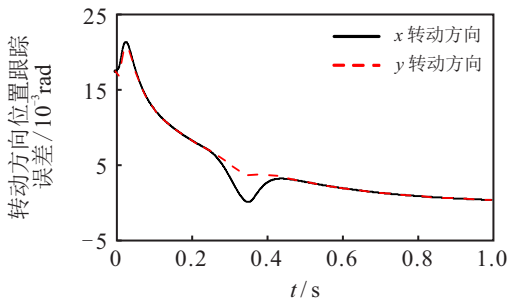
图4 不考虑输入饱和时本文算法仿真结果

在以下仿真中设置最大和最小驱动力为 $u_{max} = 850\text{ N}$ 和 $u_{min} = -850\text{ N}$, 图5~图11所示为考虑输入

饱和时的仿真结果.

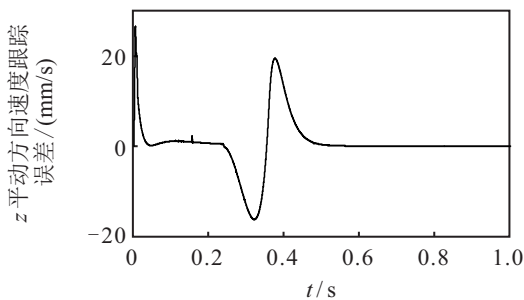


(a) z 平动方向位置跟踪误差

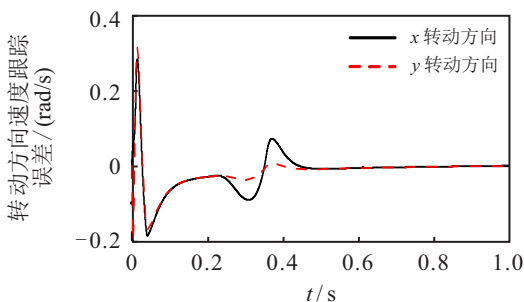


(b) 转动方向位置跟踪误差

图5 考虑输入饱和时本文算法位置跟踪误差



(a) z 平动方向速度跟踪误差



(b) 转动方向速度跟踪误差

图6 考虑输入饱和时本文算法速度跟踪误差

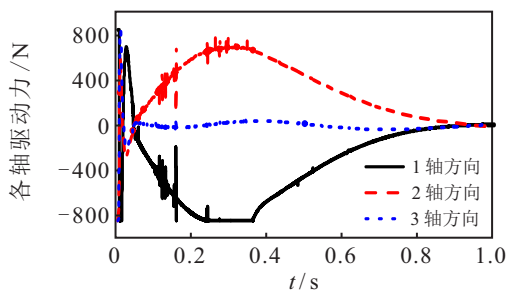
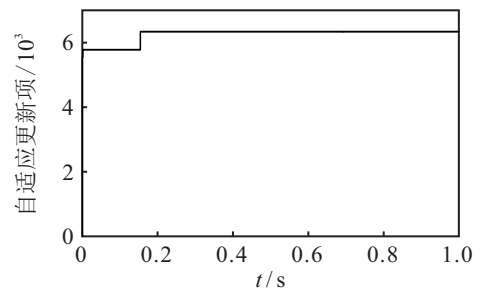
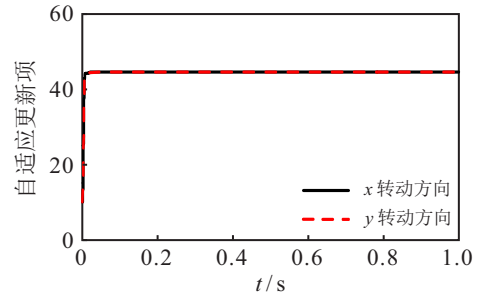


图7 考虑输入饱和时本文算法各轴控制力

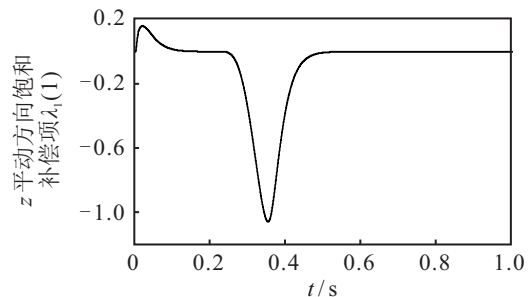


(a) z 平动方向自适应项系数估计

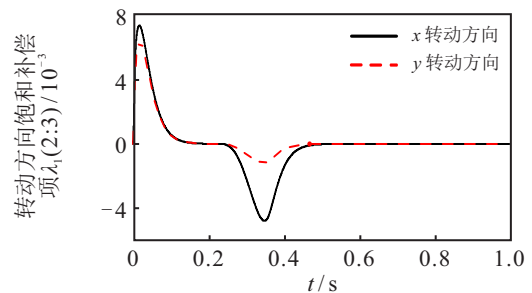


(b) 转动方向自适应项系数估计

图8 考虑输入饱和时本文算法自适应项系数估计



(a) z 平动方向输入饱和补偿项系数 $\lambda_1(1)$



(b) 转动方向输入饱和补偿项系数 $\lambda_1(2:3)$

图9 考虑输入饱和时本文算法输入饱和补偿项系数 (λ_1)

由图5~图11可以看出,各轴驱动力被限制在 $-850\text{ N} \sim 850\text{ N}$ 之间,各轴在初始时刻出现了输入饱和,由于初始时刻的输入饱和持续时间较短,其对跟踪精度影响较小,1轴在 $0.2\text{ s} \sim 0.4\text{ s}$ 之间产生的输入饱和对跟踪精度影响较大; λ_1 对应 z 平动方向最大绝对值为 1.09 mm ,此时位置跟踪误差的最大值为 1.05 ,约为 λ_1 与图2所示不考虑输入饱和时的位置跟踪误差之和,其他两方向也存在类似对应关系,由式(9)所示运动耦合性可知,速度跟踪误差明显小于 λ_2 ,且在 0.5 s 后位置和速度跟踪误差都接近于0;同时可以看

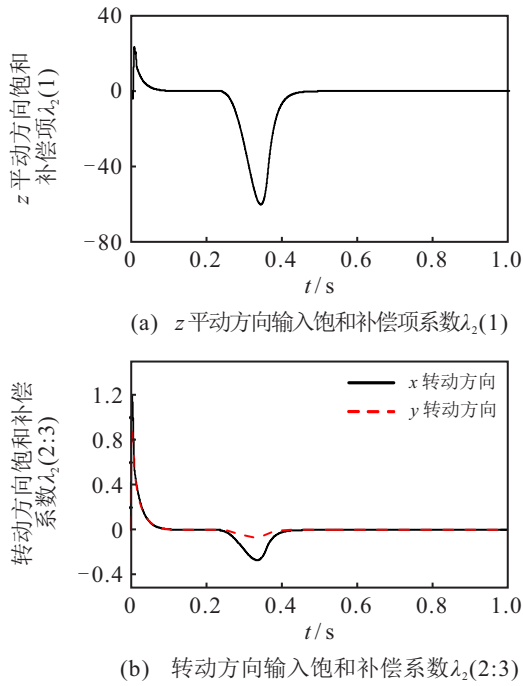


图 10 考虑输入饱和时本文算法输入饱和补偿项系数(λ_2)

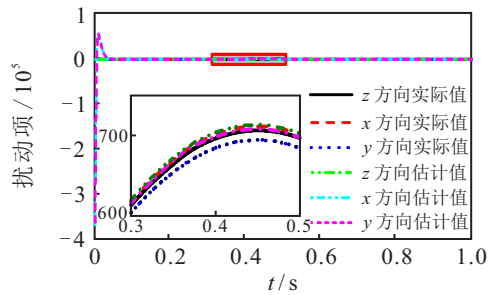


图 11 考虑输入饱和时本文算法扰动项估计

出,转动方向自适应项系数与图2仿真结果基本保持一致, z 平动方向在0.16s左右增加了约9.7%,这是由饱和和补偿项造成的,对系统整体影响较小;由于运行速度的变化,扰动项实际值与图2相比发生最大10N的变化,且估计值也发生相同变化趋势.因此,本文提出的控制算法可以实现在输入饱和与扰动条件下的高精度轨迹跟踪控制.

4 结论

本文提出了一种考虑输入饱和与扰动的机械臂连续非奇异快速终端滑模控制算法.该方法采用二阶UDE对扰动项进行估计,并设计了一种输入饱和和补偿系统解决输入饱和问题,同时对扰动估计误差进行了自适应控制,并采用Lyapunov函数证明了算法的有限时间收敛特性,最后以3自由度并联机械臂为对象采用Matlab/Simulink软件对文中算法进行了仿真验证,结果表明,扰动估计误差小于0.2%,电机出力可限制在设定范围内,位置和速度跟踪误差及输

入饱和和补偿变量均可快速收敛至0附近,进而实现了机械臂的高精度有限时间轨迹跟踪控制.后续工作将搭建实验平台对本文算法进行实验验证,并开展具有有限时间收敛特性的扰动观测器及新型滑模面的研究,为所提算法得以在实际中成功应用奠定基础.

参考文献(References)

[1] 于欣波,贺威,薛程谦,等.基于扰动观测器的机器人自适应神经网络跟踪控制研究[J].自动化学报,2019,45(7):1307-1324.
(Yu X B, He W, Xue C Q, et al. Disturbance observer-based adaptive neural network tracking control for robots[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(7): 1307-1324.)

[2] 杨亮,陈勇,刘治.基于参数不确定机械臂系统的自适应轨迹跟踪控制[J].控制与决策,2019,34(11):2485-2490.
(Yang L, Chen Y, Liu Z. Adaptive trajectory tracking control for manipulator with uncertain dynamics and kinematics[J]. Control and Decision, 2019, 34(11): 2485-2490.)

[3] 李德昀,徐德刚,桂卫华.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[J].控制与决策,2021,36(6):1311-1323.
(Li D Y, Xu D G, Gui W H. Coordinated impedance control for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller[J]. Control and Decision, 2021, 36(6): 1311-1323.)

[4] Man Z H, Paplinski A P, Wu H R. A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(12): 2464-2469.

[5] Zheng N J, Zhang Y, Guo Y B, et al. Hierarchical fast terminal sliding mode control for a self-balancing two-wheeled robot on uneven terrains[C]. The 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian, 2017: 4762-4767.

[6] Feng Y, Yu X H, Man Z H. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators[J]. Automatica, 2002, 38(12): 2159-2167.

[7] Zhai J Y, Song Z B. Adaptive sliding mode trajectory tracking control for wheeled mobile robots[J]. International Journal of Control, 2019, 92(10): 2255-2262.

[8] Wang P C, Zhang D F, Lu B C. ESO based sliding mode control for the welding robot with backstepping[J]. International Journal of Control, 2021, 94(12): 3322-3331.

[9] Wang Y Y, Yan F, Chen J W, et al. A new adaptive time-delay control scheme for cable-driven

- manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(6): 3469-3481.
- [10] 王宁, 吕帅林. 基于有限时间扰动观测器的无人水面艇精确航迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2491-2497.
(Wang N, Lyu S L. Finite-time disturbance observer based accurate trajectory tracking control of an unmanned surface vehicle[J]. Control and Decision, 2019, 34(11): 2491-2497.)
- [11] Kolhe J P, Shaheed M, Chandar T S, et al. Robust control of robot manipulators based on uncertainty and disturbance estimation[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2013, 23(1): 104-122.
- [12] Lu Q, Ren B B, Parameswaran S. Uncertainty and disturbance estimator-based global trajectory tracking control for a quadrotor[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(3): 1519-1530.
- [13] Dong Y T, Ren B B. UDE-based variable impedance control of uncertain robot systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(12): 2487-2498.
- [14] Nam Y J. Comparison study of time delay control (TDC) and uncertainty and disturbance estimation (UDE) based control[C]. The 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). Gyeongju, 2016: 749-756.
- [15] Londhe P S, Dhadekar D D, Patre B M, et al. Uncertainty and disturbance estimator based sliding mode control of an autonomous underwater vehicle[J]. International Journal of Dynamics and Control, 2017, 5(4): 1122-1138.
- [16] Liu K, Wang X X, Wang R J, et al. Antisaturation finite-time attitude tracking control based observer for a quadrotor[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(6): 2047-2051.
- [17] Tian Z, Zhong Q C, Ren B B, et al. Stabilisability analysis and design of UDE-based robust control[J]. IET Control Theory and Applications, 2019, 13(10): 1445-1453.
- [18] Yu J P, Shi P, Zhao L. Finite-time command filtered backstepping control for a class of nonlinear systems[J]. Automatica, 2018, 92: 173-180.
- [19] Yang L, Yang J Y. Nonsingular fast terminal sliding-mode control for nonlinear dynamical systems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2011, 21(16): 1865-1879.
- [20] Chen Z S, Xu L M, Zhang W Z, et al. Closed-form dynamic modeling and performance analysis of an over-constrained 2PUR-PSR parallel manipulator with parasitic motions[J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 96(1): 517-534.
- [21] 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.
- [22] Wang Y Y, Zhu K W, Chen B, et al. Model-free continuous nonsingular fast terminal sliding mode control for cable-driven manipulators[J]. ISA Transactions, 2020, 98: 483-495.

作者简介

陈正升 (1984—), 男, 讲师, 博士, 从事机器人动力学建模与控制的研究, E-mail: chenzhengsheng@cumt.edu.cn;

王雪松 (1974—), 女, 教授, 博士生导师, 从事人工智能、机器学习及模式识别等研究, E-mail: wangxuesongcumt@163.com;

程玉虎 (1973—), 男, 教授, 博士生导师, 从事机器学习、模式识别与智能系统等研究, E-mail: chengyuhu@163.com.

(责任编辑: 闫妍)