

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306337

绳驱动空中机械臂的自适应分数阶终端滑模控制*

戚荣志 丁 力

(江苏理工学院机械工程学院 常州 213001)

摘 要:针对集总干扰下绳驱动空中机械臂关节空间内高精度轨迹跟踪控制问题,提出了一种基于时延估计技术的自适应鲁棒控制策略。在控制框架中,引入时延估计技术来补偿系统未建模特性、外界扰动及动力学耦合效应;采用分数阶非奇异终端滑模面来加快系统状态量的收敛速度和保证轨迹跟踪控制的精度;添加自适应律来增加控制器的鲁棒性。同时,基于李雅普诺夫稳定性理论分析了闭环系统的稳定性。最后,通过可视化仿真和地面试验对本文所设计控制器的有效性进行了验证,结果表明:与其他两种控制器相比,本文控制器具有较高的轨迹跟踪精度、较好的鲁棒性和较强的抗干扰能力。

关键词: 空中机械臂;绳驱动;分数阶;终端滑模;自适应律

中图分类号: TP242;TN99 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.50

Adaptive fractional-order terminal sliding mode control for cable-driven aerial manipulators

Qi Rongzhi Ding Li

(College of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: Aiming at the high-precision trajectory tracking control in joint space for cable-driven aerial manipulator subjected to lumped disturbances, this article proposes an adaptive robust control strategy based on time delay estimation technique. In the control frame, a time delay estimation technique is introduced to compensate the unmodelled characteristic, external disturbances and dynamic coupling effects. A fractional-order nonsingular terminal sliding mode controller has been designed to improve the convergence speed of the system states and ensure the control precision of trajectory tracking. Meanwhile, an adaptive law is designed to enhance the robustness of the controller. The stability analysis of the closed-loop system has been conducted based on Lyapunov theory. Lastly, the effectiveness of the proposed controller has been verified through a visual simulation and ground tests. The results show that our proposed controller has higher tracking precision, better robustness and stronger ability of disturbance rejection.

Keywords: aerial manipulator; cable-driven; fractional-order; terminal sliding mode; adaptive law

0 引 言

空中机器人是集机械、电子、控制、视觉等技术为一体的智能化设备,被广泛应用于民用和军用领域。目前,大多数空中机器人仅充当“监视器”的角色,无法与周围环境产生交互^[1-2]。为此,机械臂与空中机器人结合成为趋势,这可以极大拓展空中机器人的作业领域,并具备与环境主动交互作业的能力。根据文献报道^[3-4],空中机械

臂仍采用少自由度电驱动机械臂,驱动模块被安装在关节处,会增大臂身惯量,加大空中机器人与机械臂之间的耦合效应,不利于作业时系统位姿的保持。在系统中引入绳驱动机构可有效解决上述问题,即将驱动模块外置于机械臂基座处,通过柔绳实现力矩的远程传递,这样可以有效降低机械臂重量。然而,系统面临的参数不确定性及外界干扰会增加空中机械臂控制难度,同时绳驱动机构的引入也会进一步加剧控制器设计的难度,故研究绳驱动空中机械臂的高性能控制器具有一定的挑战。

收稿日期: 2023-03-13 Received Date: 2023-03-13

* 基金项目:国家自然科学基金(52005231)、江苏省自然科学基金(BK20170315)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX21_1313, SJCX21_1314)、江苏省“青蓝工程”资助

迄今为止,国内外的学者们对绳驱动机械臂控制器的设计进行了不少研究,如自适应控制^[5]、前馈补偿控制^[6]、神经网络控制^[7]和迭代学习控制^[8]等。然而,上述控制策略大都需要模型信息和大量的动力学参数,这不利于在绳驱动机械臂实际控制中的推广。时延估计(time delay estimation, TDE)能够较好地估计与补偿被控对象中不确定的动力学特性及未知干扰,故常被结合到现有的控制技术中。例如, Lee 等^[9]将 TDE 和积分滑模(sliding mode, SM)结合,实现了工业机械臂的抗干扰自适应控制。Wang 等^[10]利用 TDE 补偿水下机械臂的集总干扰,完成了机械臂轨迹跟踪控制。近年来,分数阶非奇异终端滑模面(fractional-order nonsingular terminal SM, FONTSM)越来越受到人们的青睐,被广泛应用机器人控制中^[11-12]。它可以克服传统 SM 存在的抖振、奇异、收敛速度慢等问题,能够保证系统状态量有限时间收敛和较高的跟踪精度。结合 TDE 技术和 FONTSM 的绳驱动空中机械臂控制的研究鲜有报道。

根据上述分析,本文提出了一种结合 TDE 技术和 FONTSM 的自适应鲁棒控制策略,旨在提高绳驱动空中机械臂在关节空间中轨迹跟踪控制的性能。本文设计绳驱动空中机械臂的三维样机,阐述了其工作原理,推导了其动力学模型,并根据不基于模型的思想设计了各个关节的控制器,实现了机械臂的抗干扰控制。最后,通过仿真和试验对本文所提控制策略的有效性进行了验证。

1 系统建模

图1为所设计的绳驱动空中机械臂三维模型,主要包括四旋翼飞行器、航空吊舱和二自由度绳驱动机械臂。其中,机械臂的驱动模块被放置在吊舱内,通过柔绳以对拉的方式实现关节轴的正反转。在系统中, $\{1\}$ 、 $\{2\}$ 和 $\{e\}$ 分别为关节1、关节2和末端执行器坐标系。将绳驱动机构的柔性变形等价成关节柔性,由拉格朗日方程可得机械臂的动力学方程为^[13]:

$$J_m \ddot{\theta} + D_m \dot{\theta} = \tau_m - K_E(\theta - q) - K_D(\dot{\theta} - \dot{q}) \quad (1)$$

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + G + \tau_d = K_E(\theta - q) - K_D(\dot{\theta} - \dot{q}) \quad (2)$$

式中: $q = [q_1, q_2]^T$ 为机械臂的关节角, $\dot{q}$ 和 $\ddot{q}$ 分别为关节角速度和角加速度, θ 、 $\dot{\theta}$ 和 $\ddot{\theta}$ 分别为电机转角、角速度和角加速度, J_m 为电机转动惯量, D_m 为电机阻尼矩阵, K_E 和 K_D 分别为关节的刚度和阻尼矩阵, M 为质量矩阵, C 为科氏力和离心力项, G 为重力项, τ_d 为扰动力矩。

联立式(1)和(2)可得计及柔性关节的机械臂动力学模型为:

$$J_m \ddot{\theta} + D_m \dot{\theta} + M\ddot{q} + C\dot{q} + G + \tau_d = \tau_m \quad (3)$$

引入 TDE 技术,则式(3)可被改写成^[14]:

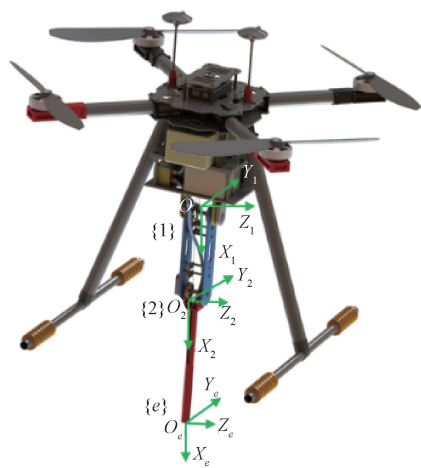


图1 绳驱动空中机械臂的受力图

Fig. 1 Forces on cable-driven aerial manipulator

$$\bar{M}\ddot{q} + H = \tau_m \quad (4)$$

$$H = (M - \bar{M})\ddot{q} + C\dot{q} + G + J_m \ddot{\theta} + D_m \dot{\theta} + \tau_d \quad (5)$$

式中: $\bar{M}$ 为对角增益常数矩阵。 H 为包含了系统不确定性和外界干扰的集总干扰项,这里通过 TDE 技术来估计 H 的值,即:

$$\hat{H} = H(t - L) = \tau_m(t - L) - \bar{M}\ddot{q}(t - L) \quad (6)$$

式中: $\hat{H}$ 为 H 的估计量, t 为当前时间, L 为延时时间。

2 控制器设计

本节以关节1来演绎 FONTSMC 的设计过程。定义 $e_1 = q_{1r} - q_1$, $\dot{e}_1 = \dot{q}_{1r} - \dot{q}_1$, $\ddot{e}_1 = \ddot{q}_{1r} - \ddot{q}_1$ 分别为关节1的角跟踪误差及其一阶导数与二阶导数, q_{1r} 为关节1的参考值。设计 FONTSM 滑模面为:

$$s_1 = \dot{e}_1 + \mu_1 D_1^{\lambda_1 - 1} \text{sig}(e_1)^{a_1} \quad (7)$$

式中: $\text{sig}(e_1)^{a_1} = |q_1|^{a_1} \tanh(e_1)$, $0 < a_1 < 1$, $0 < \lambda_1 < 1$, μ_1 为常数。 $\tanh(\cdot)$ 为双曲正切函数,用来替换常规的 $\text{sign}(\cdot)$ 函数,可有效抑制抖振。

进一步地,引入一个自适应快速终端滑模律来加快系统状态量的收敛速度和增加对集总干扰的鲁棒性,即:

$$\dot{s}_1 = -k_{11}s_1 - k_{12}\text{sig}(s_1)^{b_1} - \hat{K}_1 \tanh(s_1) \quad (8)$$

式中: k_{11} 、 k_{12} 为控制器参数, $0 < b_1 < 1$ 。 $\hat{K}_1$ 为自适应算子,其数学描述为:

$$\hat{K}_1 = K_{1\max} \tanh(\hat{K}_1/K_{1\max}) \quad (9)$$

$$\dot{\hat{K}}_1 = p_1(-h_1 \hat{K}_1 + |s_1|) \quad (10)$$

式中: p_1 、 h_1 为大于0的常数, $K_{1\max}$ 为 $\hat{K}_1$ 的上限。

联立式(4)和(7),可得:

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 = & \dot{q}_{1r} - \dot{q}_1 + \mu_1 D_1^{\lambda_1} \text{sig}(e_1)^{a_1} = \\ & \dot{q}_{1r} - \bar{M}_1^{-1}(\tau_{1m} - H_1) + \mu_1 D_1^{\lambda_1} \text{sig}(e_1)^{a_1} \end{aligned} \quad (11)$$

用 TDE 技术估计集总干扰,则可通过式(11)推导出关节 1 的等效控制力矩为:

$$\tau_{1m} = \bar{M}_1(\ddot{q}_{1r} + \mu_1 D_1^{\lambda_1} \text{sig}(e_1)^{a_1}) + \hat{H}_1 \quad (12)$$

式中: $\hat{H}_1$ 为 H_1 的估计值。

最后,结合式(8)和(12),可得关节 1 的自适应鲁棒控制律为:

$$\begin{aligned} \tau_{1m} = & \bar{M}_1[\ddot{q}_{1r} + \mu_1 D_1^{\lambda_1} \text{sig}(e_1)^{a_1}] + k_{11}s_1 + \\ & k_{12}\text{sig}(s_1)^{b_1} + \hat{K}_1 \tanh(s_1) + \hat{H}_1 \end{aligned} \quad (13)$$

同理,基于自适应鲁棒控制器的设计思想也可获得关节 2 的控制律为:

$$\begin{aligned} \tau_{2m} = & \bar{M}_2[\ddot{q}_{2r} + \mu_2 D_2^{\lambda_2} \text{sig}(e_2)^{a_2}] + k_{21}s_2 + \\ & k_{22}\text{sig}(s_2)^{b_2} + \hat{K}_2 \tanh(s_2) + \hat{H}_2 \end{aligned} \quad (14)$$

式中: k_{21} 、 k_{22} 为控制器参数, μ_2 为常数, $0 < b_2 < 1$, $0 < a_2 < 1$, $0 < \lambda_2 < 0$, $\hat{K}_2$ 为自适应算子。

3 稳定性分析

引理 1^[15] 若分数阶算子 I_{a+}^c 和 I_{b-}^c 有界,则 $\|I_{a+}^c y\|_p \leq K \|y\|_p$, $\|I_{b-}^c y\|_p \leq K \|y\|_p$, $p > 0$ 。

引理 2^[16] 对于任意的 a, b 和 c , 若 $a + b = c$, $h \geq 0.5$, 则有 $ab \leq \frac{2h-1}{2h}a^2 + \frac{h}{2}c^2$ 。

引理 3^[17] 对于系统 $\dot{x} = f(x, u)$, 若存在连续的函数 $V(x)$, $\lambda > 0$, $0 < \mu < 1$, $\omega > 0$, 则有 $\dot{V}(x) \leq -\lambda V^\mu(x) + \omega$ 。同时,系统的状态量是有限时间收敛的,其收敛时间满足 $T \leq \frac{V^{1-\mu}(x_0)}{\lambda\theta_0(1-\mu)}$ 。

本节以关节 1 来分析闭环系统的稳定性,证明过程包含以下 3 部分。

1) TDE 估计误差的有界性。

联立式(4)和(13)可得:

$$\begin{aligned} \ddot{e}_1 + \mu_1 D_1^{\lambda_1} \text{sig}(e_1)^{a_1} + \\ k_{11}s_1 + k_{12}\text{sig}(s_1)^{b_1} + \hat{K}_1 \tanh(s_1) = \varepsilon_1 \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $\varepsilon_1 = -\bar{M}_1^{-1}(\hat{H} - H_1)$ 为 TDE 估计误差。

令 Γ_1 为:

$$\begin{aligned} \Gamma_1 = & \ddot{q}_{1r} + \mu_1 D_1^{\lambda_1} \text{sig}(e_1)^{a_1} + \\ & k_{11}s_1 + k_{12}\text{sig}(s_1)^{b_1} + \hat{K}_1 \tanh(s_1) \end{aligned} \quad (16)$$

则式(15)可被改写成:

$$\varepsilon_1 = \Gamma_1 - \ddot{q}_1 \quad (17)$$

联立式(3)、(6)与(17),有:

$$M_1 \varepsilon_1 = (M_1 - \bar{M})\Gamma_1 + Y_1 - H(t-L) \quad (18)$$

式中: $Y_1 = J_{1m}\ddot{\theta}_1 + D_{1m}\dot{\theta}_1 + C_1\dot{q}_1 + G_1 + \tau_{1d}$ 。

进一步地,有:

$$M_1 \varepsilon_1 = (M_1 - \bar{M})\Gamma_1 - (M_1(t-L) - \bar{M}_1)\ddot{q}_1(t-L) + \Gamma_1 - \Gamma(t-L) \quad (19)$$

把式(17)代入到式(19)中,有:

$$\begin{aligned} M_1 \varepsilon_1 = & (M_1 - \bar{M}_1)\Gamma_1 - (M_1 - \bar{M}_1)\ddot{q}_1(t-L) + \\ & (M_1(t-L) - \bar{M}_1)\ddot{q}_1(t-L) + Y_1 = \\ & (M_1 - \bar{M}_1)\Gamma_1(t-L) + (M_1 - \bar{M}_1)(\Gamma_1 - \Gamma_1(t-L)) + \\ & ((M_1 - M_1(t-L))\ddot{q}_1(t-L)) + Y_1 \end{aligned} \quad (20)$$

对式(20)改写可得:

$$\varepsilon_1 = E_1 \varepsilon_1(t-L) + E_1 \psi_{11} + E_1 \psi_{12} \quad (21)$$

式中: $E_1 = 1 - M_1^{-1}\bar{M}_1$, $\psi_{11} = \Gamma_1 - \Gamma_1(t-L)$, $\psi_{12} = M^{-1}((M_1 - M_1(t-L))\ddot{q}(t-L)) + Y_1$ 。由于 ψ_{11} 和 ψ_{12} 在有限的延时时间 L 内是有界的。同时,选择合适的 $\bar{M}_1$ 能使得 $\|E_1\| < 1$ 。此时, ε_1 是有界的。

2) 滑模面的有界性。

设自适应律调整误差为 $\tilde{K}_1 = K_1 - \hat{K}$, 考虑一 Lyapunov 函数为:

$$V_1 = \frac{1}{2}s_1^2 + \frac{1}{2p_1}\tilde{K}_1^2 \quad (22)$$

对式(22)求导可得:

$$\dot{V}_1 = s_1\dot{s}_1 + \tilde{K}_1\dot{\tilde{K}}_1 =$$

$$\begin{aligned} s_1(\ddot{e}_1 + \mu_1 D_1^{\lambda_1} \text{sig}(e_1)^{a_1}) - \tilde{K}_1(-h_1\hat{K}_1 + |s_1|) = \\ s_1[-k_{11}s_1 - k_{12}\text{sig}(s_1)^{b_1} - \hat{K}_1 \tanh(s_1)] - \tilde{K}_1\dot{\tilde{K}}_1/p_1 \end{aligned} \quad (23)$$

当 $\hat{K}_1 \leq K_{1\max}$, $\dot{\hat{K}}_1 = p_1(-h_1\hat{K}_1 + |s_1|)$, 式(23)可被改写为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & s_1(\varepsilon_1 - k_{11}s_1 - k_{21}\text{sig}(s_1)^{b_1} - \hat{K}_1 \tanh(s_1)) - \\ & \tilde{K}_1(-h_1\hat{K}_1 + |s_1|) = \\ & -k_{11}s_1^2 - k_{21}|s_1|^{b_1+1} - K_1|s_1| + s_1\varepsilon_1 + h_1\tilde{K}_1\hat{K}_1 \leq \\ & -k_{11}s_1^2 - k_{21}|s_1|^{b_1+1} - (K_1 - |\varepsilon_1|)s_1 + h_1\tilde{K}_1\hat{K}_1 \end{aligned} \quad (24)$$

选择合适的 K_1 使得 $K_1 - |\varepsilon_1| > 0$, 则有:

$$\dot{V}_1 \leq -k_{11}s_1^2 - k_{21}|s_1|^{b_1+1} + h_1\tilde{K}_1\hat{K}_1 \quad (25)$$

当 $\hat{K}_1 = K_{1\max}$, $\dot{\hat{K}}_1 = 0$ 时,有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & -k_{11}s_1^2 - k_{21}|s_1|^{b_1+1} - K_{1\max}|s_1| + s_1\varepsilon_1 \leq \\ & -k_{11}s_1^2 - k_{21}|s_1|^{b_1+1} - (K_{1\max} - \delta_1)|s_1| \end{aligned} \quad (26)$$

选择合适的 $K_{1\max}$, 使得 $K_{1\max} \geq \delta$, 则式(26)可改写为:

$$\dot{V}_1 \leq -k_{11}s_1^2 - k_{21}|s_1|^{b_1+1} \quad (27)$$

明显地,式(27)是式(25)的特殊情况。接下来,仅分析式(27)即可,其满足以下两个不等式:

$$\dot{V}_1 \leq -k_{21} |s_1|^{b_1+1} + h_1 \tilde{K}_1 \hat{K}_1 \quad (28)$$

$$\dot{V}_1 \leq -k_{21} |s_1|^2 + h_1 \tilde{K}_1 \hat{K}_1 \quad (29)$$

对于式(28)来说,其满足:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &\leq -2^{\frac{b_1+1}{2}} k_{21} \left(\frac{1}{2} s_1^2 \right)^{\frac{b_1+1}{2}} - \left(\frac{h_1(2l_1-1)}{2l_1} \tilde{K}_1^2 \right)^{\frac{b_1+1}{2}} + \\ &\left(\frac{h_1(2l_1-1)}{2l_1} \tilde{K}_1^2 \right)^{\frac{b_1+1}{2}} + h_1 \tilde{K}_1 \hat{K}_1 \end{aligned} \quad (30)$$

式中: $l_1 \geq 0.5$ 。

根据引理2,有以下不等式:

$$h_1 \tilde{K}_1 \hat{K}_1 \leq \frac{h_1(2l_1-1)}{2l_1} \tilde{K}_1^2 + \frac{h_1 l_1}{2} K_1^2 \quad (31)$$

若 $h_1(2l_1-l) \tilde{K}_1^2/2l_1 > 1, b_1 < 1$, 则:

$$\begin{aligned} &\left(\frac{h_1(2l_1-1)}{2l_1} \tilde{K}_1^2 \right)^{\frac{b_1+1}{2}} + h_1 \tilde{K}_1 \hat{K}_1 < \frac{h_1(2l_1-1)}{2l_1} \tilde{K}_1^2 + \\ &h_1 \tilde{K}_1 \hat{K}_1 \leq \frac{h_1 l_1}{2} K_1^2 \end{aligned} \quad (32)$$

若 $h_1(2l_1-l) \tilde{K}_1^2/2l_1 > 1, b_1 < 1$, 则:

$$\begin{aligned} &\left(\frac{h_1(2l_1-1)}{2l_1} \tilde{K}_1^2 \right)^{\frac{b_1+1}{2}} \bigg|_{\frac{h_1(2l_1-1)}{2l_1} \tilde{K}_1^2 \leq 1} \leq \\ &\left(\frac{h_1(2l_1-1)}{2l_1} \tilde{K}_1^2 \right)^{\frac{b_1+1}{2}} \bigg|_{\frac{h_1(2l_1-1)}{2l_1} \tilde{K}_1^2 > 1} \end{aligned} \quad (33)$$

结合式(32)和(33),有:

$$\left(\frac{h_1(2l_1-1)}{2l_1} \tilde{K}_1^2 \right)^{\frac{b_1+1}{2}} + h_1 \tilde{K}_1 \hat{K}_1 \leq \frac{h_1 l_1}{2} K_1^2 \quad (34)$$

进而,式(30)可被改写成:

$$\dot{V}_1 \leq -\nu_1 \left(\left(\frac{1}{2} s_1^2 \right)^{\frac{b_1+1}{2}} + \left(\frac{1}{2} \tilde{K}_1^2 \right)^{\frac{b_1+1}{2}} \right) + \frac{h_1 l_1}{2} K_1^2 \quad (35)$$

式中: $\nu_1 = 2^{\frac{b_1+1}{2}} k_{21}, \bar{\omega}_1 = \frac{2l_1 k_{21}^{2/(b_1+1)}}{h_1(2l_1-1)}$ 。

由于 $(|x_1| + \dots + |x_n|)^{a_1} \leq |x_1|^{a_1} + \dots + |x_n|^{a_1}$ 成立,对于,则式(36)能改写成:

$$\dot{V}_1 \leq -\nu_1 V_1^{\frac{b_1+1}{2}} + \frac{h_1 l_1}{2} K_1^2 \quad (36)$$

根据引理3, FONTSM 变量 s_1 会在有限时间内收敛以下区域内:

$$|s_1| \leq \left(\frac{h_1 l_1 K_1^2}{2(1-\theta_1) k_{21}} \right)^{\frac{1}{b_1+1}} \quad (37)$$

同样地,对于式(29)也能得到如下结论:

$$|s_1| \leq \left(\frac{h_1 l_1 K_1^2}{2(1-\theta_1) k_{11}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (38)$$

整理式(37)和(38),可得 $\Delta_1 =$

$$\min \left[\left(\frac{h_1 l_1 K_1^2}{2(1-\theta_1) k_{11}} \right)^{\frac{1}{2}}, \left(\frac{h_1 l_1 K_1^2}{2(1-\theta_1) k_{21}} \right)^{\frac{1}{b_1+1}} \right] \text{ 在有限时间内趋于的区域为:}$$

$$\Delta_1 = \min \left[\left(\frac{h_1 l_1 K_1^2}{2(1-\theta_1) k_{11}} \right)^{\frac{1}{2}}, \left(\frac{h_1 l_1 K_1^2}{2(1-\theta_1) k_{21}} \right)^{\frac{1}{b_1+1}} \right] \quad (39)$$

3) 跟踪误差的有界性。

结合式(7)和(39),可得:

$$s_1 = e_1 + \mu_1 D_1^{\lambda_1-1} \text{sig}(e_1)^{a_1}, |s_1| \leq \Delta_1 \quad (40)$$

当 $D_1^{\lambda_1-1} \text{sig}(e_1)^{a_1} \neq 0, k_1 - s_1 (D_1^{\lambda_1-1} \text{sig}(e_1)^{a_1})^{-1} > 0$, 由 FONTSM 滑模面式(7)可得:

$$\dot{e}_1 + (\mu_1 - s_1 (D_1^{\lambda_1-1} \text{sig}(e_1)^{a_1})^{-1}) D_1^{\lambda_1-1} \text{sig}(e_1)^{a_1} = 0 \quad (41)$$

考虑到 $|s_1| \leq \Delta_1$ 及引理1,选择 $p_1 = \infty$, 有:

$$D_1^{\lambda_1-1} \text{sig}(e_1)^{a_1} \leq k_1^{-1} \Delta_1 \Rightarrow$$

$$\text{esssup} |D_1^{\lambda_1-1} \text{sig}(e_1)^{a_1}| \leq K_1 \text{esssup} |e_1|^{a_1} = K_1 |e_1|_{\max}^{a_1} \quad (42)$$

式中: $\text{esssup}(x)$ 为 $f(x)$ 的最大值。

选择合适的参数 $\sigma_1 \geq 1$ 使得 $D_1^{\lambda_1-1} \text{sig}(e_1)^{a_1} = \sigma_1^{-1} K_1$

$|e_1|_{\max}^{a_1}$ 。考虑到 $|D_1^{\lambda_1-1} \text{sig}(e_1)^{a_1}| \leq \text{esssup} |D_1^{\lambda_1-1} \text{sig}(e_1)^{a_1}|$, 可得 $\sigma_1^{-1} K_1 |e_1|_{\max}^{a_1} \leq k_1^{-1} \Delta_1$ 。因此,关节角1的跟踪误差是有界的,即:

$$|e_1| \leq |e_1|_{\max} \leq (\Delta_1 k_1^{-1} K_1^{-1} \sigma_1)^{1/a_1} \quad (43)$$

联立式(7)和(43),可得:

$$|\dot{e}_1| \leq |s_1| + k_1 |D_1^{\lambda_1-1} \text{sig}(e_1)^{a_1}| \leq 2\Delta_1 \quad (44)$$

因此,关节角1的跟踪误差是有限时间收敛的。同理,也能证明关节角2的滑模面和跟踪误差是有界的。

4 仿真与试验

4.1 可视化仿真

在 Simscape 环境中对绳驱动空中机械臂的运动进行仿真,验证本文所提控制器的有效性。同时,分别采用文献[18]提出的 PD-LESO 和文献[19]提出的 FONTSMC 与本文控制器比较。设置两关节的参考轨迹为 $q_r = [50\cos(t) \ 50\sin(t)]^\circ$, 系统初始状态可在 Simscape 软

件中测量而来,即 $\boldsymbol{q}(0)=[0\ 82.6]^\circ$,外部干扰力矩选择均值为 0、方差为 0.01 的高斯噪声,仿真时间持续 20 s。3 种控制器的参数均通过经验试凑法整定^[20],整定好的参数如表 1 所示,这些参数也将用于试验中。

表 1 3 种控制器参数
Table 1 Controller parameters

控制器	控制器参数
本文控制器	$\mu_1 = \mu_2 = 1, k_{11} = k_{12} = 2,$
	$\lambda_1 = \lambda_2 = 1.5, a_1 = a_2 = 0.5$
	$b_1 = b_2 = 0.5, h_1 = h_2 = 0.000\ 1, p_1 = p_2 = 500,$
PD-LESO	$K_{1\max} = K_{2\max} = 50$
	$\omega_{e1} = 30, \omega_{e2} = 88, \omega_{o1} = 346, \omega_{o2} = 110$
	$\mu_1 = \mu_2 = 1, k_{11} = k_{12} = 2,$
FONTSMC	$\lambda_1 = \lambda_2 = 1.5, a_1 = a_2 = 0.5$
	$b_1 = b_2 = 0.5, h_1 = h_2 = 0.000\ 1, p_1 = p_2 = 500$

图 2 和 3 给出了关节角在 3 种控制器作用下的轨迹跟踪结果,从图中可以看出虽然 3 种控制器均能有效跟踪上参考轨迹,但是相较于 PD-LESO 和 FONTSMC,本文控制器收敛速度更快、跟踪精度更高、鲁棒性更强。图 4 给出了 3 种控制器作用下机械臂两关节的输入力矩,可以看出 FONTSMC 存在明显抖振现象,而本文控制器和 PD-LESO 的控制力矩则更为光滑且没有抖振,这主要是由于前者结构中的 TDE 和后者结构中的 LESO 能够有效补偿集总干扰。上述仿真结果验证了本文提出的 FONTSMC 和 TDE 结合有效性,同时也证明了其具有较强的鲁棒性和出色的控制性能。

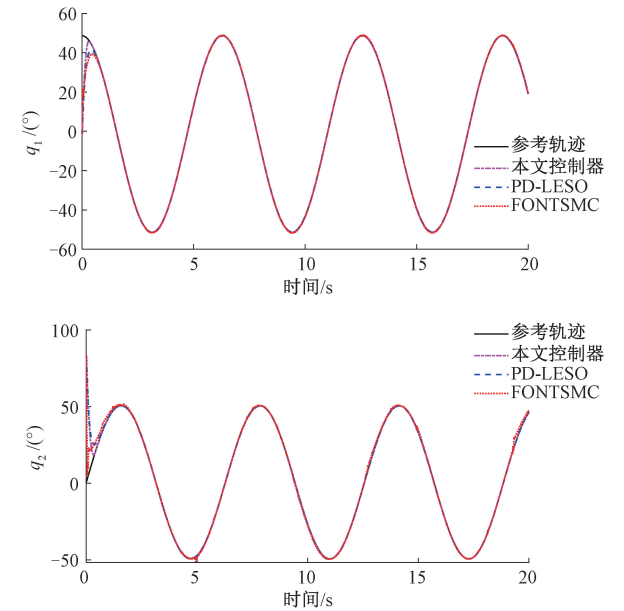


图 2 仿真中关节角位移响应
Fig. 2 Simulation results of tracking performance

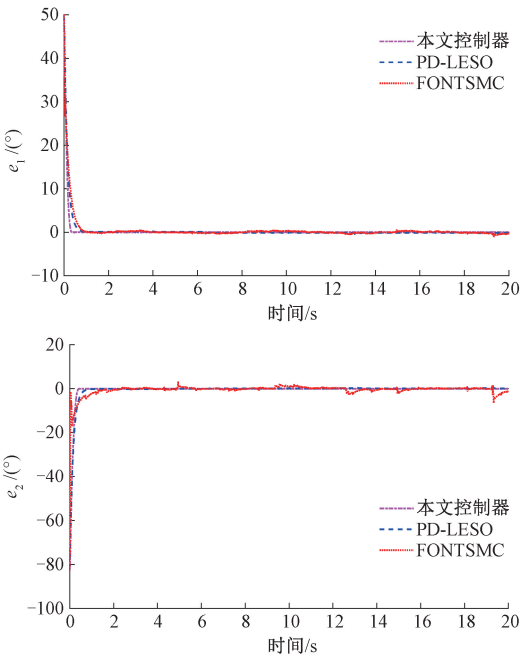


图 3 仿真中关节角跟踪误差
Fig. 3 Simulation results of tracking errors

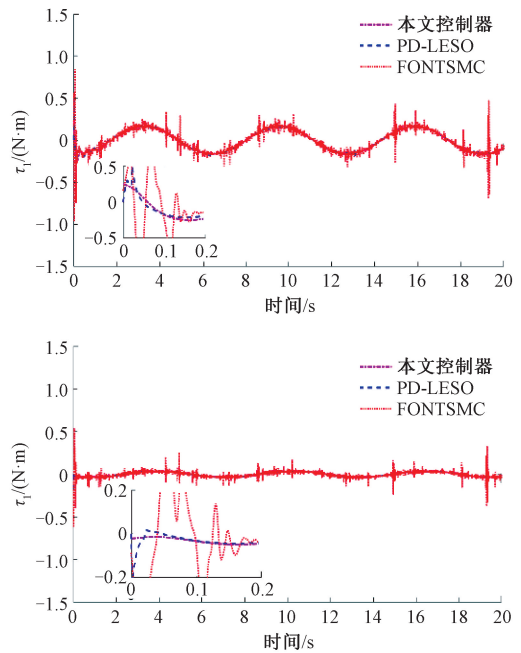


图 4 仿真中关节力矩响应
Fig. 4 Simulation results of control torques

最后,图 5 给出了绳驱动空中机械臂的可视化仿真。从图中可以直观地观测到空中机械臂的运动过程较为平滑柔顺。

4.2 地面试验

为了进一步验证本文所提控制算法的实用性,搭建

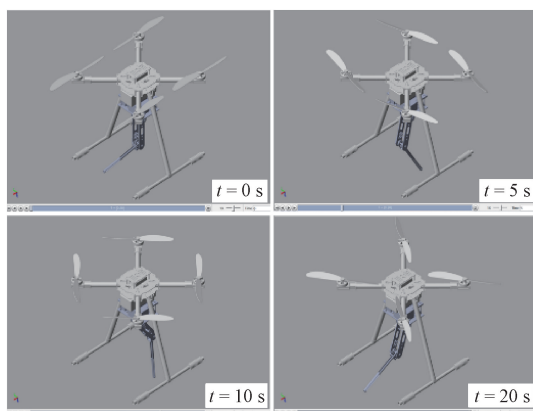


图5 绳驱动空中机械臂的可视化运动

Fig. 5 Visualization of cable-driven aerial manipulator movements

了地面试验平台,如图6所示。在宿主机中 MATLAB/Simulink 平台上搭建控制器,编译后下载到目标机中,目标机根据 PCI6225e 板卡采集关节位置信号,再由与期望关节位置的误差计算出所需的控制力矩信号,再将力矩信号经 PCI6225e 板卡传送至吊舱内的驱动电机中,实现关节空间的闭环控制。驱动电机选用 RoboMaster M2006 直流减速电机,额定转速为 500 rpm,额定力矩为 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$;驱动器的型号为 RoboMaster C610;关节处安装的编码器型号为 AMT102-V,测量精度为 0.044° 。设置两个关节角的参考轨迹为正弦信号,采样频率为 1 000 Hz,截取 20 s 试验结果进行分析。

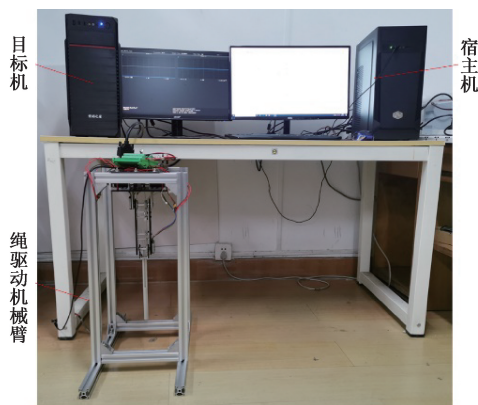


图6 试验平台

Fig. 6 Experimental setup

同样地,在相同环境下采用 PD-LESO 和 FONTSMC 分别来控制绳驱动空中机械臂,从而比较 3 种控制器的实用性。图7给出了3种控制器下两个关节角的输出响应,可以看出3种控制器均能使关节角较好地跟踪上参考轨迹。进一步地,图8给出了基于不同控制器的关节角跟踪误差,可以看出本文控制器所获得轨迹跟踪误

差最小。采用均方根误差 RMSE 来评价跟踪精度。对于 q_1 ,本文控制器的 RMSE 为 0.817,分别比 PD-LESO 和 FONTSMC 的 RMSE 低了 0.204 和 0.496;对于 q_2 ,本文控制器的 RMSE 为 0.781 1,分别比后两者的 RMSE 低了 0.112 和 0.269。这说明本文控制器具有较高的跟踪精度,且能够有效抑制系统的集总干扰。这里需要补充的是,本文控制器下关节角的控制精度约为 2° ,这是由于柔绳传递动力时放大了误差。最后,图9给出了3种控制器的控制力矩比较,从图中可以看出本文控制器最为平坦,几乎没有抖振现象,不会对执行器产生危害。

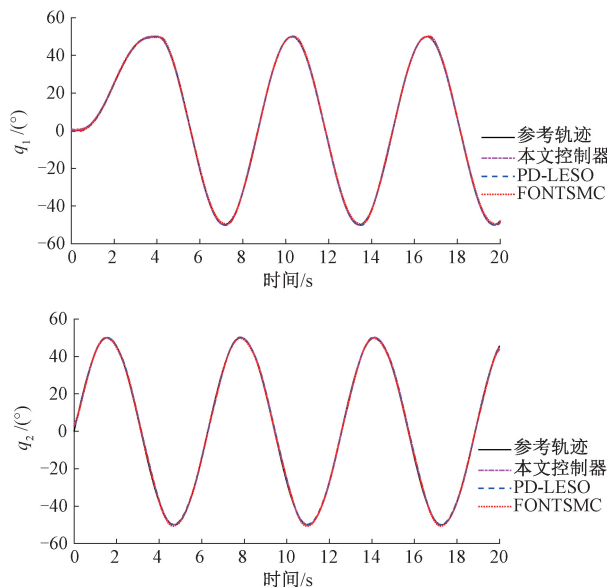


图7 试验中关节角的响应

Fig. 7 Experiment results of tracking performance

5 结 论

本文设计了一种自适应分数阶终端滑模控制器,解决了绳驱动空中机械臂在关节空间内的轨迹跟踪控制问题。得到的结论归纳如下:

1) 本文控制器结合了 TDE 技术、FONTSMC 技术和自适应律,极大地改善了原 SMC 的控制性能。其中, TDE 能较好地补偿集总干扰, FONTSM 能加快系统状态量收敛速度及跟踪精度, 自适应律能提高控制器的鲁棒性与适应性。

2) 仿真和试验结果都验证了本文控制器比 PD-LESO 和 FONTSMC 具有较高的控制精度、较强抗干扰能力和较好的鲁棒性。

在今后的研究中, 本文将设计旋翼飞行器的控制策略, 并在户外实飞试验中测试本文所设计的机械臂控制器的有效性。此外, 还将进一步研究旋翼飞行器和绳驱动机械臂之间的动力学耦合规律。

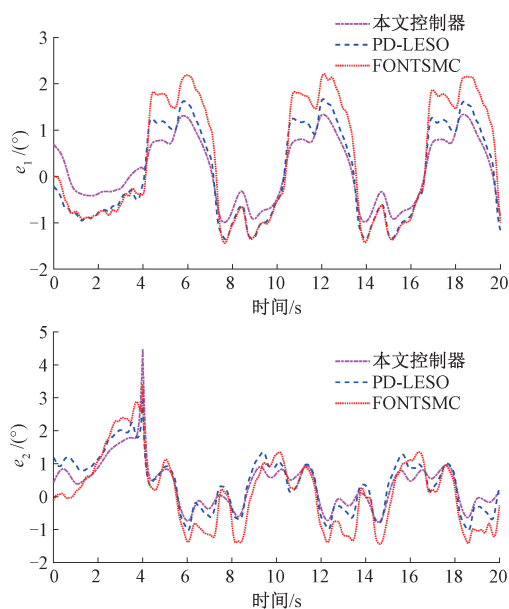


图 8 试验中关节角跟踪误差

Fig. 8 Experiment results of tracking errors

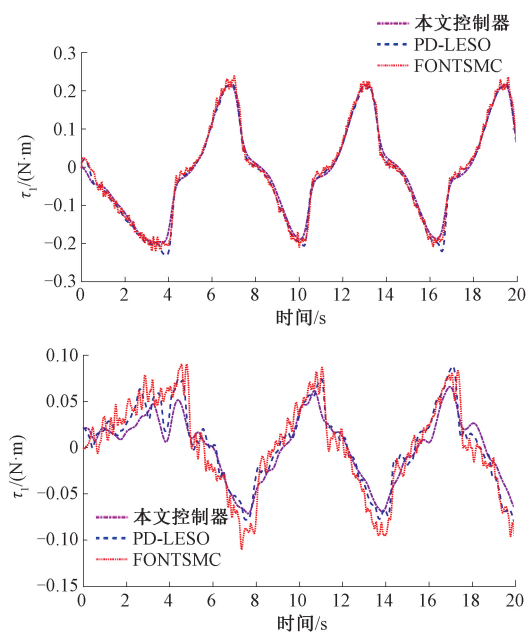


图 9 试验中关节力矩响应

Fig. 9 Experiment results of control torques

参考文献

- [1] FOEHN P, ROMERO A, SCARAMUZZA D. Time-optimal planning for quadrotor waypoint flight [J]. Science Robotics, 2021, 6(56): 1-19.
- [2] ZHANG X, WANG Y, ZHU G, et al. Compound adaptive fuzzy quantized control for quadrotor and its experimental verification [J]. IEEE Transactions on

Cybernetics, 2020, 51(3): 1121-1133.

- [3] 丁力, 夏天, 康绍鹏, 等. 悬停状态下旋翼飞行机器人自适应鲁棒控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 35(9): 73-79.
DING L, XIA T, KANG SH P, et al. Adaptive robust control for a rotary-wing flight robot in hovering [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 35(9): 73-79.
- [4] MENG X, HE Y, HAN J. Survey on aerial manipulator: System, modeling, and control [J]. Robotica, 2020, 38(7): 1288-1317.
- [5] BABAGHASABHA R, KHOSRAVI M A, TAGHIRAD H D. Adaptive robust control of fully constrained cable robots: Singular perturbation approach [J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 85(1): 607-620.
- [6] XU W, LIU T, LI Y. Kinematics, dynamics, and control of a cable-driven hyper redundant manipulator [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(4): 1693-1704.
- [7] CHAOUI H, SICARD P, GUEAIEB W. ANN-based adaptive control of robotic manipulators with friction and joint elasticity [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(8): 3174-3187.
- [8] FAN Y, YUAN J, WU Y, et al. A feedforward compensation approach for cable-driven musculoskeletal systems[J]. Robotica, 2023, 41(4): 1221-1230.
- [9] 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.
- [10] WANG Y, JIANG S, CHEN B, et al. Trajectory tracking control of underwater vehicle-manipulator system using discrete time delay estimation[J]. IEEE Access, 2017, 5: 7435-7443.
- [11] ZHANG Y, YANG X, WEI P, et al. Fractional-order adaptive non-singular fast terminal sliding mode control with time delay estimation for robotic manipulators [J]. IET Control Theory & Applications, 2020, 14(17): 2556-2565.
- [12] AHMED S, WANG H, TIAN Y. Model-free control using time delay estimation and fractional-order non-singular fast terminal sliding mode for uncertain lower-limb exoskeleton[J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 24(22): 5273-5290.
- [13] ZHAO J, WANG Y, WANG D, et al. Practical continuous non-singular terminal sliding mode control of a cable-driven manipulator developed for aerial robots[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,

- Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2020, 234(9): 1011-1023.
- [14] WANG Y, ZHU K, CHEN B, et al. Model-free continuous non-singular fast terminal sliding mode control for cable-driven manipulators [J]. ISA Transactions, 2020, 98: 483-495.
- [15] DING L, LIU K, ZHU G, et al. Adaptive robust control via a nonlinear disturbance observer for cable-driven aerial manipulators[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2023, 21(2): 604-615.
- [16] LIU Y, LI H, LU R, et al. An overview of finite/fixed-time control and its application in engineering systems [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(12): 2106-2120.
- [17] WANG Y, LI B, YAN F, et al. Practical adaptive fractional-order non-singular terminal sliding mode control for a cable-driven manipulator[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2019, 29(5): 1396-1417.
- [18] HUANG J, CEN Y. Research on variable mass control of series manipulator based on linear active disturbance rejection control [J]. Measurement and Control, 2020, 53(7-8): 1194-1202.
- [19] WANG J, LEE M C, KIM J H, et al. Fast fractional-order terminal sliding mode control for seven-axis robot manipulator [J]. Applied Sciences, 2020, 10(21): 7757-7768.

- [20] WAKITANI S, YAMAMOTO T, SATO T. Design of a performance-driven one-parameter tuning controller [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2020, 18(6): 1453-1464.

作者简介



戚荣志, 2020 年于江苏理工学院获得学士学位, 现为江苏理工学院硕士研究生, 主要研究方向为机器人动力学与控制、人工智能。
E-mail: juvenile9527@163.com

Qi Rongzhi received his B. Sc. degree from Jiangsu University of Technology in 2020.

He is now a M.Sc. candidate of Jiangsu University of Technology. His main research interests include dynamics and control of robot and artificial intelligence.



丁力(通信作者), 2011 年于江苏理工学院获得学士学位, 2016 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为江苏理工学院副教授、硕士生导师、河海大学博士后, 主要研究方向为机器人动力学与控制、人工智能。
E-mail: nuaadli@163.com

Ding Li (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jiangsu University of Technology in 2011, and received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2016. He is now an associate professor and a master advisor at Jiangsu University of Technology. Meanwhile, he is a Postdoc of Hohai University. His main research interests include dynamics and control of robot and artificial intelligence.