

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514608

# 基于非奇异终端积分滑模的高空机械臂 视觉伺服扰动快速控制方法

杜冰焯, 张震, 刘瞰东

(厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院 厦门 361102)

**摘要:**高空机械臂是变电站检修作业中拆装引流线夹螺栓的关键设备,针对其在视觉伺服跟踪螺栓目标过程中存在的误差收敛慢及未知扰动影响的问题,提出了一种基于积分滑模扰动观测器的非奇异终端积分滑模控制方法。该方法建立了图像视觉伺服的运动学模型,并分析外部扰动对模型不确定性的影响,进而利用等效扰动项对其进行表征。设计了一种引入积分幂次项和非奇异终端项的非奇异终端积分滑模控制器,结合指数趋近律推导出非奇异终端积分滑模控制律,保证系统跟踪误差在有限时间内快速收敛。在此基础上,利用积分滑模变量构建动态观测方程,进而推导出积分滑模扰动观测器的系统状态与扰动估计方程,并将扰动估计值前馈补偿至滑模控制律中,提升系统的抗扰性能。通过 Lyapunov 理论证明所提方法的系统稳定性和跟踪误差的有限时间收敛特性。最后,通过仿真实验验证了本文方法的可行性;同时搭建了高空作业模拟平台,设计不同扰动工况下的机械臂视觉伺服目标跟踪实验。实验结果表明,所提方法相较对比方法平均收敛时间缩短 4.92 s,均方根误差平均减少 11.03 pixels,并且在多种未知扰动工况下均能提高收敛速度与跟踪精度;同时,所提方法所设计的滑模面拥有良好的动态品质,且扰动观测器能准确估计外部扰动,具备良好的工程应用前景。

**关键词:**视觉伺服;非奇异终端积分滑模控制;积分滑模扰动观测器

中图分类号: TH39 TP241 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.80

## Fast disturbance control method for aerial manipulator visual servoing based on non-singular terminal integral sliding mode

Du Bingchuan, Zhang Zhen, Liu Tundong

(Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

**Abstract:** The aerial manipulator is a crucial equipment for dismantling and installing current-carrying clip bolts during substation maintenance operations. To address the issues of slow error convergence and performance degradation caused by unknown disturbances during the visual servoing tracking of the bolts, this paper proposes a non-singular terminal integral sliding mode control method based on an integral sliding mode disturbance observer. The proposed method establishes the kinematic model of the image-based visual servoing system and analyzes the effect of external disturbances on model uncertainty, which is further characterized using an equivalent disturbance term. A non-singular terminal integral sliding mode controller incorporating an integral power term and a non-singular terminal term is designed. Combining with an exponential reaching law, the non-singular terminal integral sliding mode control law is derived, guaranteeing the rapid convergence of the system tracking error in finite time. Furthermore, an integral sliding mode variable is used to construct a dynamic observation equation, from which the system state and disturbance estimation equations of the integral sliding mode disturbance observer are derived. The estimated disturbance values are then feedforward compensated into the sliding mode control law, enhancing the system's disturbance rejection performance. The stability of the system and the finite-time convergence of the tracking error are proven using Lyapunov theory. Finally, simulation experiments verify the feasibility of the proposed method. Additionally, an aerial operation simulation platform is constructed to design dynamic target tracking experiments under various disturbance conditions. The experimental results show that the proposed method reduces the average convergence time by 4.92 s and decreases the root mean square error by an average of 11.03 pixels compared to the benchmark methods. It consistently improves convergence speed and tracking accuracy under

various unknown disturbance conditions. Furthermore, the designed sliding surface exhibits favorable dynamic performance, and the disturbance observer accurately estimates external disturbances, indicating strong potential for practical engineering applications.

**Keywords:** visual servoing; non-singular terminal integral sliding mode control; sliding mode disturbance observer

## 0 引 言

在变电站检修作业中,高空作业机械臂是引流线拆接的关键设备<sup>[1]</sup>。机械臂通过末端装配电动拧紧枪和相机,实现对引流线夹螺栓的视觉伺服跟踪与自动拆装。视觉伺服方法<sup>[2]</sup>主要分为基于位置的视觉伺服(position based visual servoing, PBVS)和基于图像的视觉伺服(image based visual servoing, IBVS)。其中,IBVS 技术通过实时图像反馈构建闭环控制<sup>[3]</sup>,对相机标定误差等因素不敏感,更适用于上述动态目标跟踪场景。

目前,许多学者围绕理想环境下的 IBVS 系统模型<sup>[4-6]</sup>和控制算法<sup>[7-9]</sup>进行了大量研究,但在外部扰动未知的情况下,难以保证系统的控制精度和鲁棒性。滑模控制(sliding mode control, SMC)是一种基于变结构系统理论的控制方法,其核心思想是通过设计合适的滑模面,驱动系统状态到达并保持在滑模面上运动。SMC 通过切换控制实现对系统不确定性和外部扰动的鲁棒抑制<sup>[10]</sup>,已被成功应用于视觉伺服跟踪等任务。然而,为了有效抑制扰动,传统 SMC 通常采用较大的切换增益,导致系统产生显著的抖振现象。为了提高系统的稳定性,Liu 等<sup>[11]</sup>在混合视觉伺服控制器中引入滑模变量的幂次项和积分项,从而提供连续的控制信号,消除了因高频开关特性引起的抖振问题,但该方法的收敛精度有限,且无法保证系统状态在有限时间内收敛。

在滑模面中引入终端项可以实现系统状态的有限时间收敛,如非奇异终端滑模控制<sup>[12]</sup>(non-singular terminal sliding mode control, NTSMC)及其相关改进算法<sup>[13-15]</sup>。其中,Zhang 等<sup>[12]</sup>提出了一种基于非奇异快速终端滑模的关节伺服控制器,通过引入幂次项构建滑模面,利用非线性指数律加速大误差阶段的收敛过程,同时避免了因状态接近零而产生的奇异性问题。Liu 等<sup>[16]</sup>则针对全向移动机械臂跟踪任务中的不匹配扰动问题,提出了基于积分终端滑模控制的鲁棒视觉伺服控制器,保证系统在有限时间内收敛到平衡点附近。但上述方法要求控制增益大于扰动估计的上界,本质上仍是依靠控制器的鲁棒性覆盖残余扰动。滑模扰动观测器则通过构造一个辅助动态系统,使其输出与真实系统状态的误差驱动不连续项,能够在有限时间内精确估计并重构出扰动和系统状态<sup>[17]</sup>,具有对系统参数不敏感等特点,为工业系统的扰动估计与补偿提供了有效手段。Moosapour<sup>[18]</sup>提出了一种适用非线性系统的滑模扰动观测器,依赖扰动导数的

上界实现精准估计,并设计了任意选择收敛时间的反步控制技术。

综上所述,上述方法在其他场景中成效显著,但鉴于高空作业环境中的风载扰动、平台晃动等扰动具有幅值较大、时变性强且难以精确建模的特点,在实现高精度螺栓跟踪任务时仍面临较大挑战。因此,本文提出一种基于积分滑模扰动观测器的非奇异终端积分滑模控制方法。为了反映实际高空受扰环境下的系统模型以及为控制器的设计提供明确的补偿目标,建立等效扰动表征的 IBVS 运动学模型;通过在滑模面中引入积分幂次项,保证 IBVS 系统的跟踪误差在有限时间内快速收敛并避免奇异性;采用积分滑模扰动观测器实现对外部扰动的实时估计,并将估计值前馈至控制器中,以减小扰动对系统跟踪性能的影响;通过 Lyapunov 理论证明了闭环控制系统的稳定性。最后,搭建了高空作业的仿真与实物实验平台,实验验证了本文方法在提升跟踪精度和收敛速度方面的有效性。

## 1 图像视觉伺服系统建模与扰动表征

图像视觉伺服的核心思想是将相机获取的图像特征信息与机械臂控制相结合,构建基于视觉的闭环反馈控制系统。而系统建模是控制器设计的基础,为了实现精准控制,首先需要建立其系统运动学模型,并对系统中的关键扰动进行表征。

IBVS 运动学模型通过图像特征变量关于时间的导数与相机速度之间的映射关系建立。设相机速度表示为  $\mathbf{u}_c = (\mathbf{v}_c, \boldsymbol{\omega}_c)$ ,其中相机线速度为  $\mathbf{v}_c = (v_{cx}, v_{cy}, v_{cz})$ ,相机角速度为  $\boldsymbol{\omega}_c = (\omega_{cx}, \omega_{cy}, \omega_{cz})$ , $f$  为相机焦距。假设在相机坐标系下某一特征点为  $\mathbf{P}(X, Y, Z)$ ,其在图像坐标系中的投影为  $\mathbf{p}(x, y)$ ,深度值为  $Z$ 。通过相机透视成像模型建立两者的映射关系<sup>[19]</sup>,并结合刚体运动学方程得到图像特征点速度与相机速度之间的关系<sup>[20]</sup>,如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & \frac{xy}{f} & \frac{f^2+x^2}{f} & y \\ 0 & -\frac{f}{Z} & \frac{y}{Z} & \frac{f^2+y^2}{f} & \frac{xy}{f} & -x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \\ v_{cz} \\ \omega_{cx} \\ \omega_{cy} \\ \omega_{cz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)表示单一特征点的运动学方程,而引流线与母线的连接部分由母线线夹、引流线夹和螺栓螺母组成,并使用4组螺栓螺母固定。因此,选取4个螺栓作为跟踪目标,符合IBVS至少选取3个特征点以避免图像雅可比矩阵奇异性和局部极小值的要求<sup>[21]</sup>,4个视觉特征点构建的IBVS运动学模型如式(2)所示。

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_{comb} \mathbf{u}_c \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3, \mathbf{q}_4]^T$  表示图像特征状态变量,  $\mathbf{J}_{comb} \in \mathbb{R}^{8 \times 6}$  表示图像雅可比矩阵,其具体形式如式(3)所示。

$$\mathbf{J}_{comb} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_p |_{p=p_1} \\ \mathbf{J}_p |_{p=p_2} \\ \mathbf{J}_p |_{p=p_3} \\ \mathbf{J}_p |_{p=p_4} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(1)可知,图像雅可比矩阵  $\mathbf{J}_{comb}$  与图像特征状态变量  $\mathbf{q}$  具有紧密联系。外部扰动会引入扰动量  $\Delta\mathbf{q}$ , 直接影响图像平面上特征点的运动速度变化  $\Delta\dot{\mathbf{q}}$ , 同时间接导致系统的模型不确定性  $\mathbf{J}_{comb}(\mathbf{q} + \Delta\mathbf{q})$ 。因此,考虑扰动的运动学模型如式(4)所示。

$$\dot{\mathbf{q}} + \Delta\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_{comb}(\mathbf{q} + \Delta\mathbf{q}) \mathbf{u}_c \quad (4)$$

结合式(2)得到等效扰动项  $\mathbf{d}_{eq}$  表征的IBVS运动学

模型,如式(5)所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}}_t = \mathbf{J}_{comb}(\mathbf{q}_t) \mathbf{u}_c + \mathbf{d}_{eq} \\ \mathbf{d}_{eq} = \left( \sum_{i=1}^8 \frac{\partial \mathbf{J}_{comb}}{\partial \mathbf{q}_i} \Delta\mathbf{q}_i \right) \mathbf{u}_c - \Delta\dot{\mathbf{q}} + o(\|\Delta\mathbf{q}^2\|) \end{cases} \quad (5)$$

在高空作业环境中,外部扰动主要来源于作业平台的晃动。考虑到平台及搭载平台的绝缘臂的机械结构特性,扰动幅值不会无限增大。因此可以假设扰动幅值存在已知的有限上界,即存在正实数向量  $\mathbf{d}_{max} > 0$ , 使得扰动始终满足  $|\mathbf{d}_{eq}| < \mathbf{d}_{max}$ 。

## 2 基于积分滑模扰动观测器的非奇异终端积分滑模控制

在高空受扰作业环境中,需要保证机械臂视觉伺服系统能在有限时间内从系统任意初始状态到达滑模面,以实现目标精准跟踪。为此,引入非奇异终端积分滑模控制(non-singular terminal integral sliding mode control, NTISM),保证系统有限时间收敛并避免奇异性;其次,通过积分滑模扰动观测器(integral sliding mode disturbance observer, ISMDO)估计系统外部扰动,并推导出扰动估计前馈补偿的ISMDO-NTISM控制律,完整的控制系统结构框图如图1所示。

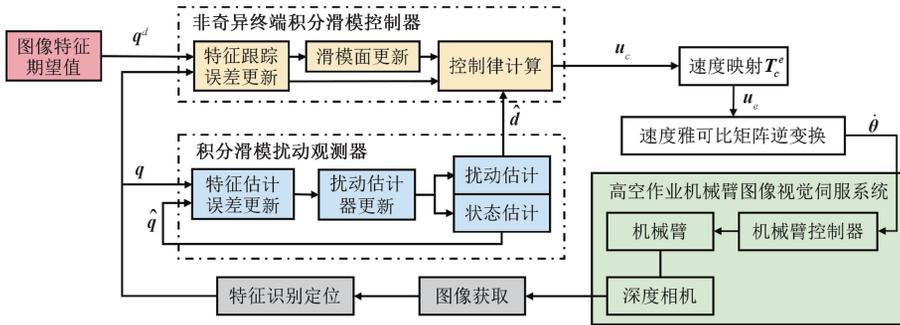


图1 基于滑模观测器扰动补偿的非奇异终端积分滑模控制结构  
Fig. 1 Non-singular terminal integral sliding mode control structure based on sliding mode observer disturbance compensation

定义IBVS系统的跟踪误差如式(6)所示。

$$\mathbf{e} = \mathbf{q} - \mathbf{q}^d \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{q}$  表示当前的特征状态变量,  $\mathbf{q}^d$  表示期望的特征状态变量,在实际应用场景中  $\mathbf{q}^d$  可以保持静止或者动态轨迹运动。

### 2.1 非奇异终端积分滑模控制器设计

由式(5)可知,IBVS运动学模型表现为强耦合的一阶非线性模型,其动态特性受图像雅可比矩阵的影响而存在模型不确定性和扰动影响。NTISM通过将分数幂与线性项组合,保证跟踪误差  $\mathbf{e}$  趋向于0时有界,从而避免奇异性。但是对于持续性扰动,其只能通过增大控制

增益来对抗,将导致引入更大的抖振。为此,设计非奇异终端积分滑模面如式(7)所示。

$$s_c = \alpha \mathbf{e}^{p_1/p_2} + \beta \int_0^t \mathbf{e}(\tau) d\tau + \gamma \left( \int_0^t \mathbf{e}(\tau) d\tau \right)^{q_1/q_2} \quad (7)$$

其中,滑模面参数  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$  为正数。  $p_1, p_2, q_1$  和  $q_2$  均为正奇数,且满足  $1 < p_1/p_2 < 2$  和  $p_1/p_2 < q_1/q_2$ 。通过上述设计,滑模面及其导数中均没有负指数项,避免了传统滑模控制器中存在的奇异性问题。同时,在积分项基础上结合非线性幂次项,保证跟踪误差有限时间收敛的同时,有效减弱高频控制抖荡。

令  $p_r = p_1/p_2, q_r = q_1/q_2$ , 对式(7)求导后得到滑模面

的微分形式,如式(8)所示。

$$\dot{s}_c = \alpha p_r e^{p_r - 1} \dot{e} + \beta e + \gamma q_r e \left( \int_0^t e(\tau) d\tau \right)^{q_r - 1} \quad (8)$$

根据滑模等效控制法求解滑模控制律,包括等效控制项和切换控制项。当系统状态到达理想滑模面时  $\dot{s}_c = 0$ , 结合指数趋近律  $\dot{s}_c = -K_c \text{sgn}(s_c) - \eta s_c$ , 计算得到 NTISM 控制律,如式(9)所示。

$$u_c = -\hat{J}_{comb}^+ \left( \frac{\gamma q_r e^{2-p_r}}{\alpha p_r} \left( \int_0^t e(\tau) d\tau \right)^{q_r - 1} + K_c \text{sgn}(s_c) + \eta s_c + \frac{\beta e^{2-p_r}}{\alpha p_r} \right) \quad (9)$$

其中,  $\hat{J}_{comb}^+$  表示图像雅可比矩阵的伪逆估计值,  $K_c$  表示切换增益,  $\eta$  表示比例增益。

为了验证所设计的控制器的稳定性,构造 Lyapunov 函数  $V_c = s_c^T s_c / 2$ , 对  $V_c$  求导并将式(8)和(9)代入可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_c &= s_c^T \dot{s}_c = s_c^T (\alpha p_r e^{p_r - 1} (J_{comb} u_c + d_{eq}) + \\ &\beta e + \gamma q_r e \left( \int_0^t e(\tau) d\tau \right)^{q_r - 1}) = \\ &\alpha p_r e^{p_r - 1} s_c^T (-K_c \text{sgn}(s_c) - \eta s_c + d_{eq}) = \\ &C (-\eta s_c^T s_c - (s_c^T K_c \text{sgn}(s_c) - s_c^T d_{eq})) < \\ &C (-\eta s_c^T s_c - (K_c - d_{max}) |s_c|) \end{aligned} \quad (10)$$

其中,  $C = \alpha p_r e^{p_r - 1} > 0$ 。当满足  $K_c > d_{max}$  时, 有  $\dot{V}_c(s_c) \equiv 0, \dot{s}_c \equiv 0$ 。因此,根据 LaSalle 原理<sup>[22]</sup>可以判断系统渐近稳定。

## 2.2 基于积分滑模扰动观测器的扰动估计与前馈控制

在高空作业场景中,机械臂搭载视觉系统定位跟踪螺栓目标时,主要面临风扰和平台晃动导致的机械臂位姿持续波动以及模型不确定性问题,表现为不可预测的扰动  $d_{eq}$ , 严重影响跟踪的精度与稳定性。为了减小上述扰动的影响,滑模控制通常采用较大的切换增益或者以扰动上界作为扰动估计值,从而引起显著的抖振现象。为解决上述问题,受文献[23]启发,本节提出积分滑模扰动观测器与前馈补偿相结合的控制策略,通过实时估计并补偿扰动,提升系统的抗扰能力。

定义滑模扰动观测器的状态估计误差  $\tilde{q}$  和扰动估计误差  $\tilde{d}$  如式(11)所示。

$$\begin{cases} \dot{\tilde{q}} = q - \hat{q} \\ \dot{\tilde{d}} = d - \hat{d} \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $\hat{d}$  表示图像特征状态变量  $q$  的估计值,  $\hat{d}$  表示外部扰动  $d$  的估计值。

滑模扰动观测器的关键性能指标是对外部扰动的准确估计和快速收敛,因此引入积分滑模变量,其形式如式(12)所示。

$$s_o = \tilde{q} + k_i \int_0^t \tilde{q}(\tau) d\tau \quad (12)$$

基于式(5)的系统运动学模型,设计 ISMDO 的动态观测方程如式(13)所示。

$$\begin{cases} \dot{\hat{q}} = J_{comb}(\hat{q}) u_c + \hat{d} + \varepsilon_1 s_o \\ \dot{\hat{d}} = \varepsilon_2 s_o + K_o \text{sgn}(s_o) \end{cases} \quad (13)$$

将式(5)与(13)相减得到积分滑模扰动观测器的状态估计方程及扰动估计式,如式(14)所示。

$$\begin{cases} \dot{\tilde{q}} = (J_{comb}(q) - J_{comb}(\hat{q})) u_c - \tilde{d} - \varepsilon_1 s_o \\ \dot{\tilde{d}} = \int_0^t \varepsilon_2 s_o(\tau) + K_o \text{sgn}(s_o(\tau)) d\tau \end{cases} \quad (14)$$

将 ISMDO 的扰动估计结果前馈补偿至非奇异终端积分滑模控制律,结合式(8)、(9)和(14)得到 ISMDO-NTISM 的完整控制律,如式(15)所示。

$$\begin{cases} \dot{\hat{q}} = (J_{comb}(q) - J_{comb}(\hat{q})) u_c - \tilde{d} - \varepsilon_1 s_o \\ \dot{\hat{d}} = \int_0^t \varepsilon_2 s_o(\tau) + K_o \text{sgn}(s_o(\tau)) d\tau \\ u_c = -\hat{J}_{comb}^+ \left( \frac{\gamma q_r e^{2-p_r}}{\alpha p_r} \left( \int_0^t e(\tau) d\tau \right)^{q_r - 1} + \right. \\ \left. K_c \text{sgn}(s_c) + \eta s_c + \frac{\beta e^{2-p_r}}{\alpha p_r} \right) \end{cases} \quad (15)$$

## 2.3 稳定性分析

本文在前述章节中完成了非奇异终端积分滑模控制器的设计以及基于积分滑模观测器的滑模控制律推导。为了确保闭环系统的渐近稳定以及系统跟踪误差的有限时间内收敛,本节通过 Lyapunov 稳定性理论对系统的稳定性进行严格证明。

### 1) 非奇异终端积分滑模控制器的稳定性证明

NTISM 通过调节控制器参数  $\alpha, \beta, \gamma, p_r, q_r, K_c$  和  $\eta$ , 能够使得系统能够在有限时间  $t^*$  内到达滑模面  $s_c = 0$ , 且系统跟踪误差能够收敛至平衡状态  $e = 0$ 。

证明: 令式(7)中  $s_c = 0$ , 并对  $e$  求导可得:

$$\alpha p_r e^{p_r - 1} \dot{e} + \beta e + \gamma q_r e \left( \int_0^t e(\tau) d\tau \right)^{q_r - 1} = 0 \quad (16)$$

对式(16)等式两边同时求导可得:

$$\alpha e^{p_r - 2} \frac{de}{dt} = -\beta - \gamma \left( \int_0^t e(\tau) d\tau \right)^{q_r - 1} \quad (17)$$

令  $S(t) = \int_0^t e(\tau) d\tau$ , 根据链式法则可以得到  $e$  对  $S$  的导数如式(18)所示。

$$\frac{de}{dS} = \frac{1}{e} \cdot \frac{de}{dt} \quad (18)$$

将式(18)代入式(17)可得:

$$\alpha e^{p_r - 1} \frac{de}{dS} = -\beta - \gamma S^{q_r - 1} \quad (19)$$

将式(19)等式两边分离变量并积分,求解微分方程通解得到  $e$  与  $S$  的代数关系,如式(20)所示。

$$\mathbf{e}^{p_r}(\mathbf{S}) = \mathbf{e}^{p_r} - \frac{P_r}{\alpha} \left( \beta \mathbf{S} + \frac{\gamma}{q_r} \mathbf{S}^{q_r} \right) \quad (20)$$

存在  $\mathbf{S}^* > 0$  使得  $\mathbf{e}(\mathbf{S}^*) = 0$ , 即系统跟踪误差在时刻  $t^*$  收敛, 具体形式如式(21)所示。

$$t^* = \int_0^{\mathbf{S}^*} \left[ \mathbf{e}^{p_r} - \frac{P_r}{\alpha} \left( \beta \mathbf{S} + \frac{\gamma}{q_r} \mathbf{S}^{q_r} \right) \right]^{-1/p_r} d\mathbf{S} \quad (21)$$

综上, NTISMIC 的系统跟踪误差能在有限时间内收敛。

2) 基于积分滑模扰动观测器的非奇异终端积分滑模控制器的稳定性证明

为了验证 ISMDO-NTISMIC 的稳定性, 构造 Lyapunov 函数  $V_o = \mathbf{s}_c^T \mathbf{s}_c / 2$  并对其求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_o = & \mathbf{s}_c^T \dot{\mathbf{s}}_c = \mathbf{s}_c^T \left( \alpha p_r \mathbf{e}^{p_r-1} (\mathbf{J}_{comb} \mathbf{u}_c + \mathbf{d}_{eq}) + \beta \mathbf{e} + \right. \\ & \left. \gamma q_r \mathbf{e} \left( \int_0^t \mathbf{e}(\tau) d\tau \right)^{q_r-1} \right) = \alpha p_r \mathbf{s}_c^T \mathbf{e}^{p_r-1} (-\mathbf{K}_c \text{sgn}(\mathbf{s}_c) - \eta \mathbf{s}_c + \\ & \mathbf{d}_{eq} - \hat{\mathbf{d}}) = \mathbf{C} (-\eta \mathbf{s}_c^T \mathbf{s}_c - \mathbf{K}_c |\mathbf{s}_c| - \mathbf{s}_c^T (\hat{\mathbf{d}} - \mathbf{d}_{eq})) \end{aligned} \quad (22)$$

其中,  $\mathbf{C} = \alpha p_r \mathbf{e}^{p_r-1}$ 。在扰动估计值的原值基础上引入正数常量  $\sigma$ , 使得  $\dot{V}_o(\mathbf{s}_c) \equiv 0, \dot{\mathbf{s}}_c \equiv 0$ 。因此, 根据 LaSalle 原理可以判断系统是渐近稳定的。进一步由式(22)分析可得:

$$\dot{V}_o < \mathbf{C} (-\eta \mathbf{s}_c^T \mathbf{s}_c - \mathbf{K}_c |\mathbf{s}_c|) < -\sqrt{2} \mathbf{K}_c \mathbf{C} V_o^{1/2} \quad (23)$$

求解式(23)得到其解析解, 如式(24)所示。

$$t^* < \frac{\sqrt{2} V_o^{1/2}(0)}{\mathbf{K}_c \mathbf{C}} \quad (24)$$

由式(24)可知, 从任意初始状态出发, IBVS 系统的跟踪误差均能够在有限时间内收敛至 0。综上, 理论推导证明了本文控制方法在扰动环境下具备快速收敛与抗扰的能力。

### 3 实验与结果分析

分别通过视觉伺服目标跟踪的仿真和实物实验来验证本文方法的有效性。首先通过仿真实验验证基于 ISMDO 的扰动估计性能和系统的跟踪性能, 并将所提方法与文献[24]的积分滑模控制(integral sliding mode control, ISMC)方法、文献[13]的 NTSMC 方法以及 2.1 节的 NTISMIC 方法进行对比。然后在高空作业模拟平台上进行了机械臂视觉伺服任务的目标跟踪实验, 验证所提方法在实物场景的有效性。

#### 3.1 仿真验证与结果分析

为验证本文所提方法的可行性, 本节在 ROS2 与 Gazebo 仿真环境中搭建了视觉伺服实验平台, 并在 Ubuntu22.04 系统上运行仿真实验。选择 ISMC、NTSMC、NTISMIC 以及 ISMDO-NTISMIC 作比较。各控制器的仿真参数设置为: ISMC 采用指数趋近律  $\dot{\mathbf{s}} = -\mathbf{K}_1 \text{sgn}(\mathbf{s}) - \eta_1 \mathbf{s}$ , 其参

数为  $K_1 = 0.8, \eta_1 = 0.1$ , 积分增益  $k_{i1} = 0.08$ ; NTSMC 参数设置为  $p_1 = 39, p_2 = 31, \alpha = 0.2, \beta = 0.01, K_2 = 1.8, \eta_2 = 0.5$ ; NTISMIC 参数设置为  $p_1 = 39, p_2 = 31, q_1 = 43, q_2 = 31, \alpha = 0.1, \beta = 0.005, \gamma = 0.7, K_3 = 1.2, \eta_2 = 0.5$ ; ISMDO 的参数为  $\varepsilon_1 = 0.3, K_4 = 0.1, \varepsilon_2 = 0.15, k_{i2} = 0.01$ 。

视觉伺服系统的控制目标为图像特征坐标在有限时间内收敛至期望图像特征坐标, 并在进入稳态跟踪阶段后维持尽可能小的跟踪误差。设定期望图像特征坐标  $\mathbf{q}^d$  如式(25)所示。

$$\mathbf{q}^d = \begin{bmatrix} 260 & 300 \\ 400 & 300 \\ 400 & 160 \\ 260 & 160 \end{bmatrix} \quad (25)$$

为了量化跟踪性能, 定义了收敛速度和跟踪精度评价指标。跟踪速度使用由初始位置首次到达收敛位置的收敛时间(convergence time, CT)来表示。使用均方根误差(root mean square error, RMSE)和最大绝对值偏差(maximum absolute deviation, MAD)来衡量系统的跟踪性能<sup>[23]</sup>。各个衡量指标的计算公式如式(26)~(30)所示。

$$\mathbf{e}_i^R = \sqrt{(\mathbf{e}_{2i-2}^R)^2 + (\mathbf{e}_{2i-1}^R)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (26)$$

$$\bar{\mathbf{e}}^R = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\mathbf{e}_i^R)^2} \quad (27)$$

$$t_{CT} = \inf \{ t \geq 0 \mid \forall \tau \geq t, |\bar{\mathbf{e}}^R(\tau) - \mathbf{e}_{ss}| \leq \xi \} \quad (28)$$

$$\mathbf{e}_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{\mathbf{e}}^R(i))^2} \quad (29)$$

$$\mathbf{e}_{MAD} = \max_{t \in [t_{CT}, TT]} |\bar{\mathbf{e}}^R(t)| \quad (30)$$

其中,  $\mathbf{e}_i^R$  表示第  $i$  个图像特征点的跟踪误差,  $\bar{\mathbf{e}}^R$  表示所有图像特征点的平均误差,  $n$  表示特征点个数,  $\mathbf{e}_{ss}$  表示稳态误差值,  $N$  表示总采样点数,  $TT$  表示完整运行时间。

在仿真实验开始时, 对目标施加  $xy$  平面内大小为  $[d_x(t), d_y(t)] = [0.1 \sin(0.2t), 0.1 \cos(0.2t)]$  的外部扰动。在上述扰动形式的实验环境中, 分别基于本文方法和对比方法进行了目标跟踪实验, 不同控制方法下的系统跟踪误差结果曲线如图 2 所示。

由图 2 可以看出, NTISMIC 能够缩短系统状态到达滑模面的时间, 从而加快误差收敛至稳态邻域的过程。与 ISMC、NTSMC 和未加入 ISMDO 的 NTISMIC 方法相比, ISMDO-NTISMIC 方法分别提前 0.58、1.13 和 0.17 s 到达稳态跟踪阶段。在稳态邻域内, 本文方法的 MAD 相较于对比方法分别降低 42.77、61.46 和 16.47 pixels; 在 0~50 s 区间的 RMSE 分别减小 6.29、8.45 和 5.44 pixels。上述结果表明, 在引入 ISMDO 后, NTISMIC 的控制精度和动态性能均得到有效提高, 增强了系统在未知扰动下的鲁棒性, 验证了本文方法的可行性和有效性。

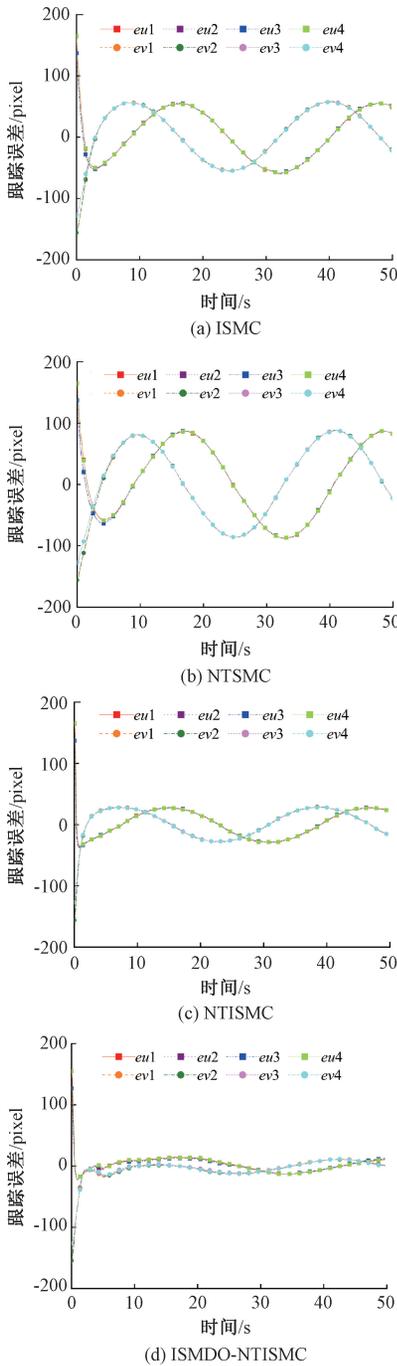


图 2 不同控制方法的跟踪误差对比

Fig. 2 Tracking error comparison of control methods

### 3.2 实物验证与结果分析

为进一步验证本文所提方法在实际场景中的有效性,搭建了以高空拆接引流线夹螺栓为背景的视觉伺服模拟作业平台。实验平台由 UR12e 六自由度机械臂、Intel RealSense D435i 深度相机、六自由度振动模拟平台、引流线夹组件和 PC 等部分组成,如图 3 所示。

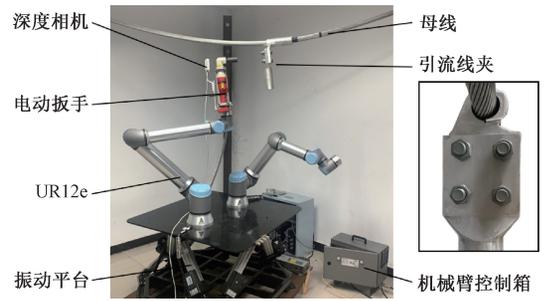


图 3 视觉伺服系统实验平台

Fig. 3 Experimental platform of the IBVS system

在 Ubuntu22.04 系统环境中开发了基于 QT 的机械臂视觉伺服控制系统,其上位机界面如图 4 所示。该系统通过局域网与机械臂连接通讯,实现机械臂的关节控制与状态信息反馈。视觉检测方面,螺栓的识别与定位依赖训练与部署的 YOLO12 目标检测模型,并输出螺栓的中心点像素坐标,如图 4 放大图所示。控制模块实现了本文方法以及对比方法。



图 4 上位机控制系统

Fig. 4 Host computer control system

实物实验中,选择 ISMC、NTSMC、NTISMIC 和 ISMDO-NTISMIC 作为 IBVS 系统的控制器进行对比,ISMDO 采用指数趋近律,其参数为  $K_1 = 0.5, \eta_1 = 0.2$ , 积分增益  $k_{i1} = 0.06$ ; NTSMC 参数设置为  $p_1 = 39, p_2 = 31, \alpha = 1.8, \beta = 0.01, K_2 = 2.8, \eta_2 = 0.5$ ; NTISMIC 参数设置为  $p_1 = 39, p_2 = 31, q_1 = 43, q_2 = 31, \alpha = 1.8, \beta = 0.01, \gamma = 0.07, K_3 = 1.6, \eta_2 = 0.25$ ; ISMDO 的参数为  $\varepsilon_1 = 0.3, K_4 = 0.1, \varepsilon_2 = 0.1, k_{i2} = 0.01$ 。PC 连接并启动振动平台以模拟高空作业过程中的外部扰动,其运动构成形式如式(31)所示。

$$\begin{cases} F_1(t) = F_x(t) + F_y(t) + F_{x-axis}(t) + F_{z-axis}(t) \\ F_x(t) = 0.6\sin(0.4\pi t) \\ F_y(t) = 0.2\sin(0.6\pi t + 0.5\pi) \\ F_{x-axis}(t) = 3\sin(0.6\pi t + 0.5\pi) \\ F_{z-axis}(t) = \sin(\pi t) \end{cases} \quad (31)$$

运行基于 ISMDO 的 NTISM C 方法,根据相机反馈的视觉信息实时生成关节速度指令,机械臂在速度控制模式下执行指令以实现对螺栓目标的动态跟踪。为验证本文方法在收敛速度和抗扰性能上的优势,在相同实验场景下,分别采用 ISMC、NTSM C 和 NTISM C 进行对比实验,图 5 和 6 分别展示了本文方法及对比方法在跟踪误差和控制输入的对比曲线。

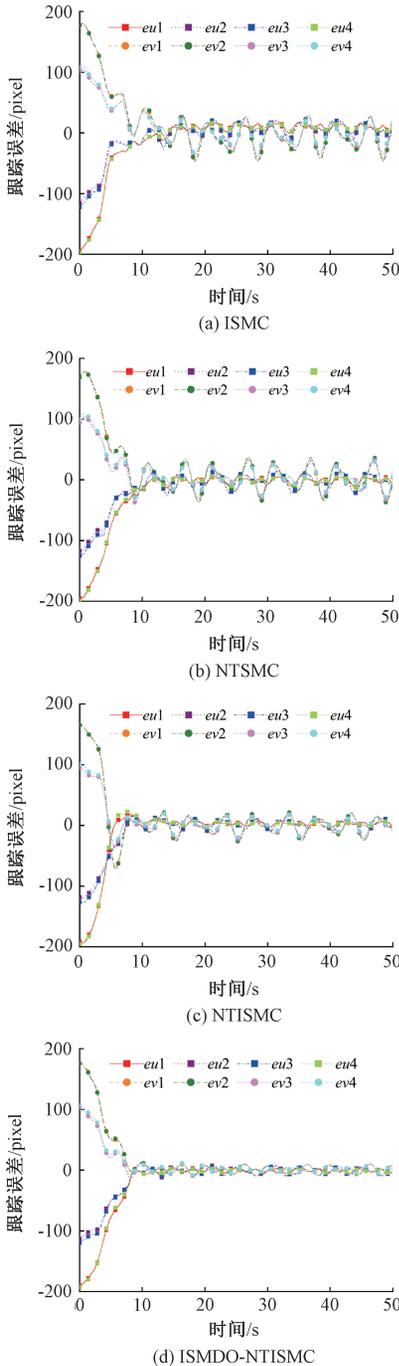


图 5 不同控制方法的跟踪误差对比

Fig. 5 Tracking error comparison of control methods

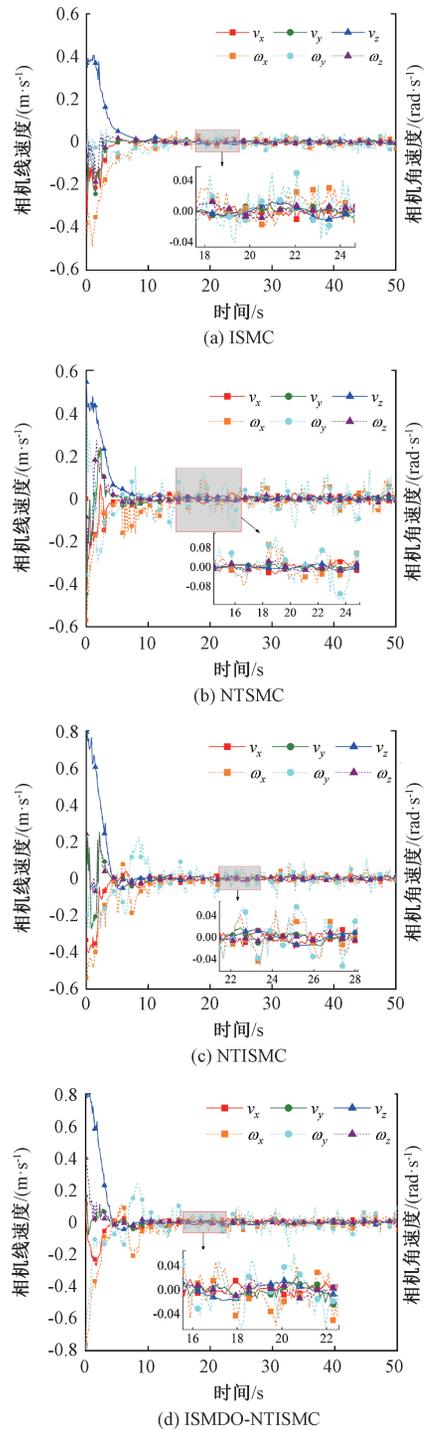


图 6 不同控制方法的控制输入对比

Fig. 6 Control input comparison of control methods

图像特征状态变量的跟踪性能如图 5 所示。实验结果表明,本文方法(图 5(d))在保证较小跟踪误差的同时,能有效抑制抖振现象。在相机初始存在较大位姿偏差的情况下,该方法能够将图像特征坐标迅速收敛至期望位置,收敛时间较短且过渡过程平稳。相比之下,对比方法(图 5(a)~(c))在收敛过程中均出现明显的抖振现象

象,且收敛时间均高于本文方法。在进入稳态跟踪阶段后,对比方法仅依赖扰动上界进行补偿,因而对不确定扰动的适应能力有限,使得跟踪误差在期望位置附近仍存在较大偏离;而本文方法则始终能够将跟踪误差稳定在 0 附近,曲线振荡明显减小,表现出更强的抗扰性和跟踪性能。

控制输入的平稳性对于控制器性能至关重要,不同控制器的控制输入对比如图 6 所示。可以看出,本文方法生成的相机速度各分量更加平滑,在动态调节过程中未出现大幅超调或高频振荡。相比之下,对比方法(图 6(a)~(c))在稳态跟踪阶段均表现出振荡和局部突变现象,如图 6(a)中的角速度分量  $\omega_x$  和  $\omega_y$  多次出现峰值波动。此类控制输入在实际机械臂运行中可能造成机械损坏,甚至因速度突变过大而引发任务运行中断。

当外部干扰的幅值超过系统给定值的 1.1 倍时,可认为系统处于大扰动工况<sup>[25]</sup>。针对高空作业中可能存在的复杂扰动环境,本节进一步引入两类大扰动场景,以验证所提方法的鲁棒性和抗扰性能。第 1 类扰动由振动平台绕 XY 轴的锥面运动产生,其运动构成形式如式(32)所示。

$$\begin{cases} F_z(t) = F_{X-axis}(t) + F_{Y-axis}(t) \\ F_{X-axis}(t) = 0.5\sin(0.4\pi t) \\ F_{Y-axis}(t) = 0.5\sin(0.4\pi t + 0.5\pi) \end{cases} \quad (32)$$

第 2 类扰动为非严格意义的“阶跃型扰动”,由振动平台瞬时发生的位置突变产生。本节分别在上述 3 类扰动条件下,基于本文方法和对比方法进行了目标跟踪实验,结果如表 1 所示。需要说明的是,在阶跃型扰动实验中,CT 与 RMSE 的计算区间定义为从扰动施加时刻至系统误差重新收敛的时刻。

由表 1 可知,在收敛时间方面,本文方法在不同扰动条件下均表现为 4 种方法中最短,相较对比方法平均缩短 4.92 s,体现其在动态响应速度上的优势。在控制精度方面,本文方法在所有扰动类型下的均方根误差均为最低,相较对比方法平均减小 11.03 pixels,最大绝对值偏差平均减小 43.72 pixels,表明其具有较好的稳态跟踪精度。此外,与 NTISM 方法相比,本文方法在引入的 ISMDO 能够对外部扰动实现快速且准确的估计,从而提升了系统的抗扰性能,其绕 XY 轴锥面运动扰动下的扰动估计结果如图 7 所示。

滑模面  $s$  的动态品质在一定程度上反映了系统的收敛性能。由式(7)可知,滑模面的维度与误差维度一致。为了对整体动态品质进行评估,定义每个特征点的滑模面值范数  $\|s_i\|$ ,并计算所有特征点  $\|s_i\|$  的平均值  $\bar{s}$ ,其计算公式如式(33)所示。

$$\bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{s_{xi}^2 + s_{yi}^2} \quad (33)$$

表 1 不同扰动下的各控制器性能比较

Table 1 Performance comparison of controllers under various disturbances

扰动类型	控制方法	CT/s	RMSE /pixel	MAD /pixel
自定义扰动	ISM	12.53	56.65	42.48
	NTSM	14.48	59.26	34.19
	NTISM	11.01	52.59	31.65
	ISMDO-NTISM	7.81	43.57	12.32
绕 XY 轴锥面运动	ISM	9.55	58.29	38.41
	NTSM	11.18	59.13	39.60
	NTISM	8.48	54.13	27.20
	ISMDO-NTISM	7.10	45.73	15.14
阶跃扰动	ISM	21.33	46.53	84.35
	NTSM	13.52	29.21	64.40
	NTISM	16.63	32.04	69.53
	ISMDO-NTISM	9.90	26.90	65.41

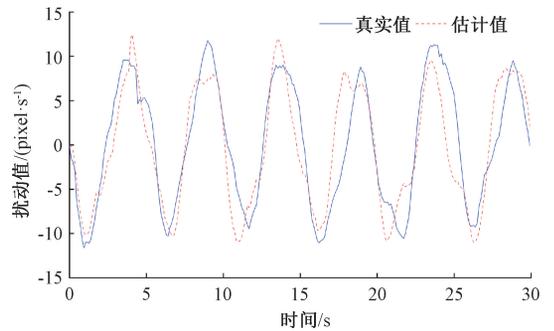


图 7 扰动估计结果

Fig. 7 Disturbance estimation result

阶跃型扰动下的滑模面  $\bar{s}$  变化曲线如图 8 所示。

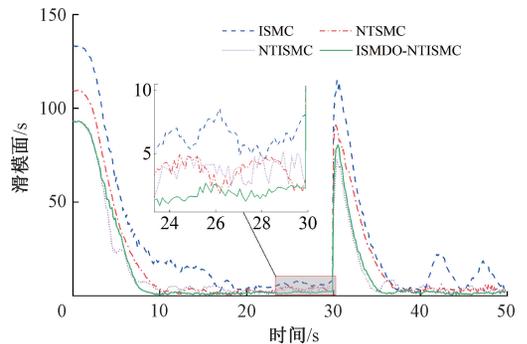


图 8 阶跃扰动下的滑模面  $\bar{s}$

Fig. 8 Sliding surface  $\bar{s}$  under step disturbance

从图 8 可以看出,无论是在初始状态收敛还是受到阶跃扰动后的二次收敛过程中,引入非奇异终端积分滑

模控制方法缩短了系统到达滑模面的时间。从放大图中可以看出,本文方法的滑模面值在稳态跟踪阶段更加稳定,始终维持在  $\bar{s} = 0$  的小邻域内,总体抖振幅值相较于方法更小,验证了该方法在动态性能与稳态精度上的优势。

## 4 结 论

本研究针对图像视觉伺服系统中存在的跟踪误差收敛慢及外部扰动未知的问题,提出了一种基于积分滑模扰动观测器的非奇异终端积分滑模控制方法,以实现变电站拆接引流线过程中机械臂对螺栓目标的动态跟踪控制。首先结合机械臂高空作业时的外部扰动特性,推导出等效扰动表征的图像视觉伺服运动学模型;接着设计融合积分幂次项和非奇异终端项的滑模面,保证跟踪误差有限时间收敛并避免奇异性;同时通过积分滑模扰动观测器估计外部扰动,将其估计值前馈至滑模控制律以提升抗扰性能,然后基于 Lyapunov 理论证明了系统的稳定性和有限时间收敛特性。仿真与高空作业模拟平台实验验证表明,本研究方法相较于对比方法(ISM、NTSMC 和 NTISM 方法)在多种未知扰动工况下均具有更快的收敛速度和更高的跟踪精度,为变电站高空机械臂作业提供可靠控制方案,具备良好的工程应用前景。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] TANG M D, GU Y L, ZHANG Y J, et al. Dual manipulator system of the field hot-line working robot in 110 kV substations[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2017, 44(4): 479-490.
- [ 2 ] CHAUMETTE F, HUTCHINSON S. Visual servo control. I. Basic approaches [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, 13(4): 82-90.
- [ 3 ] QIU ZH J Z, HU SH Q, LIANG X W. Disturbance observer based adaptive model predictive control for uncalibrated visual servoing in constrained environments[J]. *ISA Transactions*, 2020, 106: 40-50.
- [ 4 ] QI R L, TANG Y G, ZHANG K. An optimal visual servo trajectory planning method for manipulators based on system nondeterministic model[J]. *Robotica*, 2022, 40(6): 1665-1681.
- [ 5 ] ZHANG B, LI SH, CHEN X L, et al. A novel zeroing neural model for solving dynamic matrix moore-penrose inverse and its application to visual servoing control of manipulator[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1-13.
- [ 6 ] ZHONG H, MIAO ZH Q, WANG Y N, et al. A practical visual servo control for aerial manipulation using a spherical projection model[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(12): 10564-10574.
- [ 7 ] ZHU T Q, MAO J L, HAN L Y, et al. Fuzzy adaptive model predictive control for image-based visual servoing of robot manipulators with kinematic constraints [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2024, 22(1): 311-322.
- [ 8 ] JIANG J, WANG Y N, JIANG Y M, et al. A robust visual servoing controller for anthropomorphic manipulators with field-of-view constraints and swivel-angle motion: Overcoming system uncertainty and improving control performance[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2022, 29(4): 104-114.
- [ 9 ] WANG CH X, YANG L, CHEN Y, et al. Adaptive fault-tolerant control for uncalibrated camera-robot system with multiple uncertainties [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2024, 361(14): 107048.
- [ 10 ] ASAD M, BHATTI A I, IQBAL S, et al. A smooth integral sliding mode controller and disturbance estimator design[J]. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2015, 13(6): 1326-1336.
- [ 11 ] LIU H, ZHU W D, DONG H Y, et al. Hybrid visual servoing for rivet-in-hole insertion based on super-twisting sliding mode control[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2020, 18(8): 2145-2156.
- [ 12 ] ZHANG P X, YU H SH, MENG X X, et al. Dual sliding mode coordinated control of manipulator grasping system with visual assistance [J]. *Control Theory and Technology*, 2024, 22(1): 106-121.
- [ 13 ] 周向阳, 李玲玲, 赵立波. 基于扩张状态观测器的稳定平台非奇异终端滑模控制 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(5): 161-169.
- [ 13 ] ZHOU X Y, LI L L, ZHAO L B. Nonsingular terminal sliding mode control for the ESO-based stabilized platform[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(5): 161-169.
- [ 14 ] ZHAI J Y, XU G. A novel non-singular terminal sliding mode trajectory tracking control for robotic manipulators[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2021, 68(1): 391-395.
- [ 15 ] 凌颢, 王国慧, 易波, 等. 基于 FNTFSMC 的国产腹腔镜手术机器人轨迹控制 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(5): 179-186.
- [ 15 ] LING H, WANG G H, YI B, et al. Trajectory control of domestic laparoscopic surgery robot based on FNTFSMC[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(5): 179-186.
- [ 16 ] LIU Y J, ZHU T Y, LI Q D, et al. Integral terminal

- sliding mode augmented finite-time visual servo control of omni-directional mobile manipulators[J]. *Control Theory and Technology*, 2025, 23(2): 193-206.
- [17] SHI D N, ZHANG J H, SUN ZH Q, et al. Adaptive sliding mode disturbance observer-based composite trajectory tracking control for robot manipulator with prescribed performance[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2022, 109(4): 2693-2704.
- [18] MOOSAPOUR S S. Sliding mode disturbance observer based control with arbitrary convergence time [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2024, 31(9/10): 1656-1666.
- [19] 孙敬陶, 钟杭, 王耀南, 等. 旋翼飞行机械臂的混合视觉伺服和分层控制方法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(7): 56-65.
- SUN J T, ZHONG H, WANG Y N, et al. Hybrid visual servoing with hierarchical task control for unmanned aerial manipulation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(7): 56-65.
- [20] CORKE P, JACHIMCZYK W, PILLAT R. *Robotics, vision and control: Fundamental algorithms in MATLAB* [M]. Berlin: Springer, 2017.
- [21] KESHMIRI M, XIE W F, MOHEBBI A. Augmented image-based visual servoing of a manipulator using acceleration command[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(10): 5444-5452.
- [22] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(3): 407-418.
- LIU J K, SUN F CH. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 407-418.
- [23] 吴晓敏, 刘瞰东, 贺苗, 等. 机器人关节摩擦建模与补偿研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(10): 44-50.
- WU X M, LIU T D, HE M, et al. Research on friction modeling and compensation of robot manipulator [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(10): 44-50.
- [24] ALI I, HASSAN M, BANO Z, et al. Robust tracking control of a three-degree-of-freedom robot manipulator with disturbances using an integral sliding mode controller[J]. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 2024, 8(2): 370-379.
- [25] JIANG N, LI SH T, LIU T, et al. Nonlinear large disturbance attenuation controller design for the power systems with STATCOM[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2013, 219(20): 10378-10386.

### 作者简介



杜冰焕, 2023 年于南京邮电大学获得学士学位, 现为厦门大学硕士研究生, 主要研究方向为工业机器人与机器视觉技术。

E-mail: 23220231151761@stu.xmu.edu.cn

**Du Binghuan** received his B.Sc. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2023. He is currently a master's student at Xiamen University. His main research interests include industrial robots control and machine vision.



刘瞰东(通信作者), 2003 年于中国科学技术大学获得博士学位, 现为厦门大学教授、博士生导师, 主要研究方向为工业机器人与机器视觉技术。

E-mail: ltd@xmu.edu.cn

**Liu Tundong** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from University of Science and Technology of China in 2003. He is currently a professor and Ph. D. supervisor at Xiamen University. His main research interests include industrial robots control, and machine vision.