

# 基于跟踪-学习-检测算法的四旋翼无人机 自主降落姿态控制方法

张彬桥<sup>1,2</sup>, 吴 健<sup>1,2</sup>

(1. 三峡大学 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**在复杂野外环境下,无人机降落过程中目标可能因暂时被遮挡或离开视野而导致跟踪失效。为增强无人机姿态控制精度和稳定性,本文提出了基于跟踪-学习-检测(Tracking-learning-detection, TLD)算法的四旋翼无人机自主降落姿态控制方法。通过结合扩展卡尔曼滤波和 TLD 算法检测特定目标,并利用多个中值流实现目标跟踪。通过精确捕捉目标位置信息,结合附加惯性项的人群搜索算法和自抗扰控制技术,优化搜索步长以及方向惯性系数的选取方式,从而改善四旋翼无人机的飞行姿态,提升降落过程的稳定性与安全性。实验结果表明,本文方法的平均中心偏移量在 1.98 像素以内,横滚角、俯仰角以及偏航角偏差均 $<0.02^\circ$ ,符合期望,运行平稳,性能更优,可以确保四旋翼无人机安全降落。

**关键词:**跟踪-学习-检测算法;四旋翼无人机;自主降落;姿态控制

**中图分类号:**TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)04-1419-07

**DOI:**10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240317

## Attitude control method for autonomous landing of quadcopter drone based on tracking-learning-detection algorithm

ZHANG Bin-qiao<sup>1,2</sup>, WU Jian<sup>1,2</sup>

(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** In complex outdoor environments, during the landing process of drones, the target may be temporarily obstructed or out of view, leading to tracking failure. To enhance the accuracy and stability of unmanned aerial vehicle attitude control, a quadcopter unmanned aerial vehicle autonomous landing attitude control method based on tracking-learning-detection (TLD) algorithm is proposed. Combining extended Coleman filtering and TLD algorithm to detect specific targets and achieve target tracking through multiple median streams. By accurately capturing target position information, combined with additional inertia term crowd search algorithm and active disturbance rejection control technology, the selection of search step size

收稿日期: 2024-03-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52077120).

作者简介: 张彬桥(1978-),男,副教授,博士.研究方向:电力系统运行与控制,人工智能与算法优化.

E-mail: wjzheda@163.com

and directional inertia coefficient was modified to optimize the flight attitude of quadcopter drones, improving the stability and safety of the landing process. The experimental results show that the average center offset of the proposed method is within 1.98 pixels, and the roll angle, pitch angle, and yaw angle the deviation is all within  $0.02^\circ$ , meet the expectations, the operation is smooth, the performance is better, ensuring the safe landing of the quadcopter drone.

**Key words:** Tracking learning detection algorithm; quadcopter drone; autonomous landing; attitude control

## 0 引言

在复杂多变的野外环境下,无人机降落过程中目标可能会遭遇各种复杂情况,如被树木、建筑物等障碍物暂时遮挡<sup>[1,2]</sup>,或无人机机动性导致目标暂时离开视野。这些情况均有可能导致跟踪系统失效,无法准确获取目标位置信息<sup>[3,4]</sup>,进而影响无人机的姿态控制。因此,深入研究四旋翼无人机的自主降落姿态控制技术,具有重大的现实意义和应用价值。

为了更好地实现对四旋翼无人机自主降落姿态的控制,研究者提出了大量的姿态控制方法。王博等<sup>[5]</sup>将飞机稳定转弯时的力矩方程和动力学方程有效结合,提出采用自适应反步法展开无人机姿态控制。但该方法的计算复杂度较高,会出现控制延迟或者系统不稳定的情况。刘子龙等<sup>[6]</sup>提出一种双闭环控制系统,其内环使用自抗扰控制,通过扩张状态观测器可以实时观测和补偿内部耦合等建模参数;外环则通过反步积分-迭代学习,实现无人机姿态控制。但该方法在应用过程中没有考虑到内外环的协调性问题,会影响整个姿态控制系统的综合性能。Qi等<sup>[7]</sup>提出一种集成控制方法,采用强化学习和自动调整的奖励函数确定机器人姿态和着陆控制方案。但该方法在实际应用过程中会浪费大量的训练时间和计算资源,需要进一步优化和完善。Sardigh等<sup>[8]</sup>通过角速度和姿态误差设计自适应参数系数的修正滑动变量,提取自适应参数的动力学方程,同时将自适应参数应用于控制器中,以提升控制精度。但该方法的参数调整过程比较复杂,若出现不合适的调整则会影响最终的控制效果。

在上述几种研究方法的基础上,本文提出一种基于跟踪-学习-检测(Tracking-learning-detection, TLD)算法的四旋翼无人机自主降落姿态控

制方法,并进行了实验验证,结果表明:本文控制方法有效增强了无人机姿态控制精度和稳定性。

## 1 方法设计

### 1.1 基于TLD算法的目标跟踪

TLD算法中的跟踪模块通过引入跟踪误差检测机制,能够及时发现并处理目标丢失;结合扩展卡尔曼滤波器的预测功能,可以在目标暂时丢失的情况下对目标运动轨迹进行预测,确保在目标重新出现时能够迅速并准确地重新捕获。

TLD算法是一种新型的跟踪算法,具体结构如图1所示。

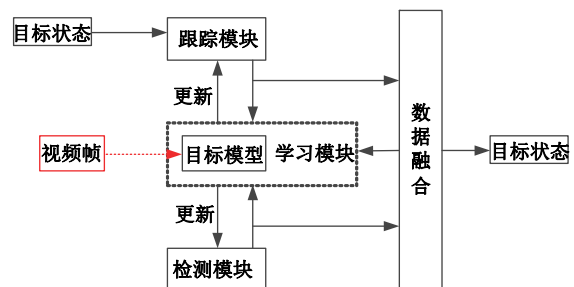


图1 TLD算法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TLD algorithm

TLD算法中的跟踪模块采用经过优化的Lucas-Kanade光流法,其内核在于中值流跟踪技术。跟踪模块首先根据目标选定一个边界框,并在其内部构建一个精细的 $10 \times 10$ 网格。每个网格的中心点被挑选为特征点,并配备专用局部跟踪器。这些跟踪器运用Lucas-Kanade光流法,精准地捕捉特征点的运动轨迹。考虑到各种潜在的风险因素(如目标被完全遮挡或离开视野,跟踪可能会出现偏移),跟踪模块引入跟踪误差检测机制,主要通过计算当前图像与被跟踪区域的相似度以及前向后向误差,对每一个跟踪点的质量展开严格的评估,剔除误差排名在前50%的特征点,然后利用剩余的优质点来评估边界框的状态变化,进而

生成一个全新的跟踪窗口,实现一次高效的短期跟踪。

TLD算法中,检测模块使用不同尺度的滑动窗口全面扫描图像,生成候选区域后由级联分类器(包括方差分类器、集合分类器和最近邻分类器)筛选。学习模块在算法起始阶段用P-N专家生成的正负模板深度训练检测器,其中P专家擅长发现目标新特征,N专家擅长识别背景。检测与跟踪模块需同步运行,实时更新目标状态,减少跟踪误差<sup>[9,10]</sup>。在线学习模块通过学习新样本标签,更新检测器,优化算法性能。当目标重现时,各模块需高效协作,确保持续稳定追踪,支持长时间跟踪任务。

卡尔曼滤波器是线性离散时间有限维系统的关键工具<sup>[11]</sup>,在给定输入和测量输出的条件下负责观测和输出,其工作流程可划分为两大关键环节,即时间更新(预测部分)和测量更新(修正部分)。其中,扩展卡尔曼滤波器以其独特的递推方式,实现了状态的最优滤波处理,并进一步提升了状态的预测精度<sup>[12]</sup>,即:

$$\hat{X}_{k|k-1} = E_{k|k-1} \hat{X}_{k-1|k-1} \quad (1)$$

式中: $k$ 为现有时刻的离散点; $\hat{X}_{k|k-1}$ 为预测状态估计值; $E_{k|k-1}$ 为状态转移矩阵。通过以上两个部分组建扩展卡尔曼滤波的预测部分。接下来,通过式(2)对方差阵展开预测:

$$P_{k|k-1} = E_{k|k-1} P_{k-1|k-1} E_{k|k-1}^T + Q_{k-1} \quad (2)$$

式中: $P_{k|k-1}$ 为预测估计协方差; $Q_{k-1}$ 为预测方差。

通过式(3)对状态估计量和估计误差方差阵展开更新:

$$\begin{cases} K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k) \\ \hat{X}_{k|k} = [I - K_k H_k] P_{k|k-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $K_k$ 为最优卡尔曼增益; $H_k$ 为测量系统参数; $I$ 为单模测量矩阵; $T$ 为运行时间。

根据以上分析可以确定,扩展卡尔曼滤波操作的核心为将前一次获取的状态估计量作为依据展开当前预测。首先,将前一次得到的状态估计量直接输入状态方程中,得到状态预测 $\hat{X}_{k|k-1}$ ;其次,将 $\hat{X}_{k|k-1}$ 直接代入对应的方程中,计算不同测量偏差,通过偏差完成 $\hat{X}_{k|k-1}$ 修正,得到 $\hat{X}_{k|k}$ ,即最优估计值。

综合上述分析,将TLD算法和扩展卡尔曼滤

波有效结合,对四旋翼无人机自主降落过程中目标展开实时跟踪,详细的操作步骤如下:

(1)对四旋翼无人机自主降落过程中的目标位置展开初始化处理。

(2)对检测器、跟踪器和扩展卡尔曼滤波器展开初始化处理,同时采集下一帧图像。

(3)对四旋翼无人机自主降落过程中的目标位置展开检测和跟踪。

(4)运用方差分类器、集合分类器和最近邻分类器等多种手段,对目标和跟踪器的中值流跟踪算法进行高效检测与追踪,通过有效融合上述方法的结果,能够精确确定目标的位置 $D(p)$ ,将其表示为:

$$D(p) = \frac{h(\hat{X}_{k|k-1}) \text{distance}(T_f^n, T_b^n)}{FB(T_f^n|C)} \quad (4)$$

式中: $FB(T_f^n|C)$ 为前向后向误差; $\text{distance}(T_f^n, T_b^n)$ 为跟踪器在 $t$ 时刻的跟踪误差。

(5)确定目标位置后,需要对跟踪情况展开判定和学习,若目标被遮挡或运动幅度过大导致跟踪失效,则运用扩展卡尔曼滤波器对目标位置展开精准预测与追踪,确保跟踪结果的连续性与准确性,并实时输出跟踪显示结果。

(6)重复步骤(2)~(5),直至结束目标跟踪。

由此,通过TLD算法和扩展卡尔曼滤波的结合,四旋翼无人机能够准确、连续地锁定目标位置,为姿态控制提供了必要的输入信息,实现了目标跟踪。

## 1.2 四旋翼无人机自主降落姿态控制

基于上节跟踪的目标位置信息,结合附加惯性项的人群搜索算法和自抗扰控制,对四旋翼无人机的自主降落姿态进行控制,确保无人机能够稳定、准确地降落在目标位置,实现四旋翼无人机自主降落的功能。

人群搜索算法结合隶属函数与模糊逼近优势评估解适应度,通过建模分析指导搜索发现:优越位置时精细搜索,不理想时扩大范围寻找更优解。针对该算法存在的收敛速度慢或不收敛问题,引入修改步长和方向的惯性项加以优化。优化后的人群搜索算法被应用于自抗扰控制关键参数的整定,能够精确地辨识出自抗扰控制器所需的控制参数 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_{01}$ 、 $\theta_{02}$ 和 $\theta_{03}$ ,从而有效提升四旋翼无人机自主降落姿态的控制精度<sup>[13]</sup>。

四旋翼无人机控制系统的核心是附加惯性项的人群搜索算法,可以加快控制参数的辨识速率。结合非线性自抗扰控制策略,系统实现了更优的稳定性和动态性能。系统中的跟踪-微分器负责精确跟踪期望信号并引导过渡过程,其二阶离散形式如下:

$$\begin{cases} u_1(t+h) = u_1(t) + hu_2(t) \\ u_2(t+h) = u_2(t) + h \cdot \text{fhan}u_2(u_1(t) - u_0(t), u_2(t), r, h_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $u_0(t)$ 为期望信号; $u_1(t)$ 为 $u_0(t)$ 的近似跟踪信号; $u_2(t)$ 为 $u_0(t)$ 的广义微分信号; $r$ 为目标跟踪因子; $h$ 为误差抑制参数; $h_0$ 为滤波因子; $\text{fhan}(\ )$ 为非线性函数。

扩张观测器作为核心组件,承担着观测和精确估计系统内部状态以及外部扰动的工作任务。三阶扩张观测器的具体计算式如下:

$$\begin{cases} c(t) = z_1(t) - u_1(t) \\ z_1(t+h) = z_1(t) + h[z_2(t) - \theta_{01}c(t)] \\ z_2(t+h) = z_2(t) + h[z_3(t) - \theta_{02}\text{fal}(c(t), 0.5, \delta + bu_2(t))] \\ z_3(t+h) = z_3(t) + h\theta_{02}\text{fal}(c(t), 0.25, \delta) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $z_1(t)$ 和 $z_2(t)$ 分别为输入信号的跟踪和变化率跟踪; $z_3(t)$ 为被控制单元所受到的干扰估计; $\delta$ 为线性区间长度; $b$ 为常数; $c(t)$ 为被控制目标的信号输出误差; $\text{fal}(\ )$ 为非线性函数。

非线性误差反馈作为一种高效且计算负担较轻的非线性控制策略,能够有效应对系统扰动<sup>[14]</sup>。具体而言,它利用式(7)定义了二阶非线性误差反馈的离散形式:

$$\begin{cases} c_1 = u_1(t) - z_1(t), c_2 = u_2(t) - z_2(t) \\ w_0 = \theta_1 \cdot \text{fal}(c_1, \alpha_1, \delta) + \theta_2 \cdot \text{fal}(c_2, \alpha_2, \delta) \\ w = w_0 - \frac{z_3(t)}{b} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 为非线性参数; $c_1$ 和 $c_2$ 为不同类型信号之间的误差; $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 分别为自抗扰控制器的控制参数; $w_0$ 和 $w$ 分别为控制通道的初始控制量和标准控制量。

自整定结构的核心组件包括两大要素:一是

适应度函数评价,它负责对控制系统的性能展开准确评估;二是控制参数,其是系统调整和优化的关键所在。在附加惯性项的人群搜索方法中,在设定维数空间内随机生成 $M$ 个满足约束条件的个体,通过式(8)对其展开初始化处理:

$$x_{ij}(0) = \text{rand}_{ij}(S, E)(c_1x_{ij}^U - w_0x_{ij}^L) + wx_{ij}^L \quad (8)$$

式中: $x_{ij}^U$ 和 $x_{ij}^L$ 分别为第 $j$ 个搜索者的搜索范围上限值和下限值; $\text{rand}_{ij}(S, E)$ 为随机获取第 $j$ 个搜索者的初始搜索位置。通过参数 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_{01}$ 、 $\theta_{02}$ 和 $\theta_{03}$ 组建搜索矩阵 $P(S, E)$ ,在控制系统参数优化过程中,选取以误差绝对值的时间积分为基准的性能指标,并构建最小化目标函数,精确选取控制参数。同时,引入超调量作为优化指标的重要组成部分,以进一步确保系统的稳定性<sup>[15]</sup>;利用模糊逻辑对不确定性行为的有效模拟能力,建立目标函数 $\phi_{ij}$ 与搜索步长 $d_{ij}(t)$ 的定量关系模型。引入人群搜索算法和梯度下降法展开惯性项修正,促使其可以以最短的时间完成收敛。经过优化的人群搜索算法被用来搜寻非线性自抗扰控制所需的最优控制参数 $x_{ij}(t)$ ,从而实现控制系统参数的自我调整与优化,确保系统能够自适应地应对各种变化,提升控制的准确性和稳定性,最终达到四旋翼无人机自主降落姿态控制的目的,即:

$$x_{ij}(t) = \frac{d_{ij}(t)\phi_{ij}p_{ij}}{\sqrt{-\ln(\phi_{ij})}} N(0, 1)x_{ij}(0) \quad (9)$$

式中: $p_{ij}$ 为线性隶属函数; $N(0, 1)$ 为标准正态分布随机数。

通过结合TLD算法和扩展卡尔曼滤波,实现对降落目标的实时跟踪与精确定位,确保无人机在降落过程中能够准确锁定并跟踪目标位置。利用附加惯性项人群搜索算法和自抗扰控制技术进行姿态控制,确保无人机在跟踪目标的同时,能够稳定地调整自身姿态,以实现安全、准确的自主降落。

## 2 实验验证

通过Matlab平台组建四旋翼无人机自主降落姿态控制系统模型,表1给出四旋翼无人机的相关实验参数。

无人机起飞高度为5 m,无人机降落速度为0.2 m/s,图像采集帧率为30 FPS,TLD算法学习率

表 1 四旋翼无人机相关实验参数

Table 1 Experimental parameters related to quadcopter drones

参数名称/单位	数值
四旋翼无人机的反扭矩系数/(N·m·s·rad <sup>-2</sup> )	1.0×10 <sup>-6</sup>
四旋翼无人机质量/kg	0.70
四旋翼升力系数/(N·s <sup>-2</sup> ·rad <sup>-2</sup> )	1.0×10 <sup>-5</sup>
飞行器在 x 轴的惯性/(kg·m <sup>-2</sup> )	7.6×10 <sup>-3</sup>
飞行器在 y 轴的惯性/(kg·m <sup>-2</sup> )	7.6×10 <sup>-3</sup>
飞行器在 z 轴的惯性/(kg·m <sup>-2</sup> )	1.5×10 <sup>-3</sup>
旋翼中心和机体中心之间的距离/m	0.25
重力加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	9.8

为 0.01, 扩展卡尔曼滤波噪声协方差为 0.05, 姿态控制周期为 0.01 s, 附加惯性项权重为 0.3, 自抗扰控制观测器带宽为 5 Hz。

利用本文方法对四旋翼无人机自主降落进行目标跟踪, 跟踪过程如图 2 所示。



图 2 自主降落跟踪过程

Fig. 2 Autonomous landing tracking process

从图 2 可以看出, 经过本文方法中的 TLD 算法和扩展卡尔曼滤波处理后, 在被遮挡的区域中仍可以实现无人机自主降落过程的目标跟踪, 具有较好的有效性。

为量化四旋翼无人机自主降落过程中的目标跟踪性能, 选取中心偏移量作为测试指标, 验证 TLD 算法和扩展卡尔曼滤波跟踪纠偏的效果。通过式 (10) 计算目标跟踪结果的平均中心偏移量:

$$\text{Meanerror} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i - x_{gi})^2 + (y_i - y_{gi})^2} \quad (10)$$

式中:  $N$  为总帧数;  $(x_i, y_i)$  和  $(x_{gi}, y_{gi})$  分别为在第  $i$  帧中提出方法的跟踪结果和目标的真实位置。

本文方法在不同数据集上的平均中心偏移量测试结果如图 3 所示。

通过图 3 中的实验数据可以看出, 本文方法在测试数据集 01 中的平均中心偏移量最大, 仅为 1.98 像素, 最低为 0.99 像素。因此, 本文方法能

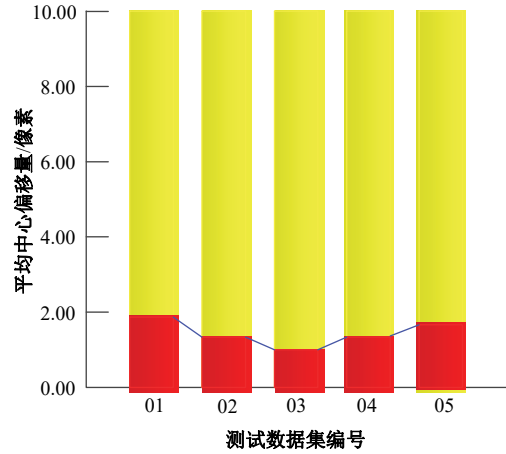


图 3 不同数据集下本文方法的平均中心偏移量测试结果

Fig. 3 Test results of average center offset of proposed method on different datasets

够确保无人机在降落时紧密跟随目标, 不会出现显著的目标偏移现象。此外, 从数据集的整体表现来看, 跟踪精度具有一定的稳定性, 最大偏移量和最小偏移量之间的差值较小, 体现了较高的跟

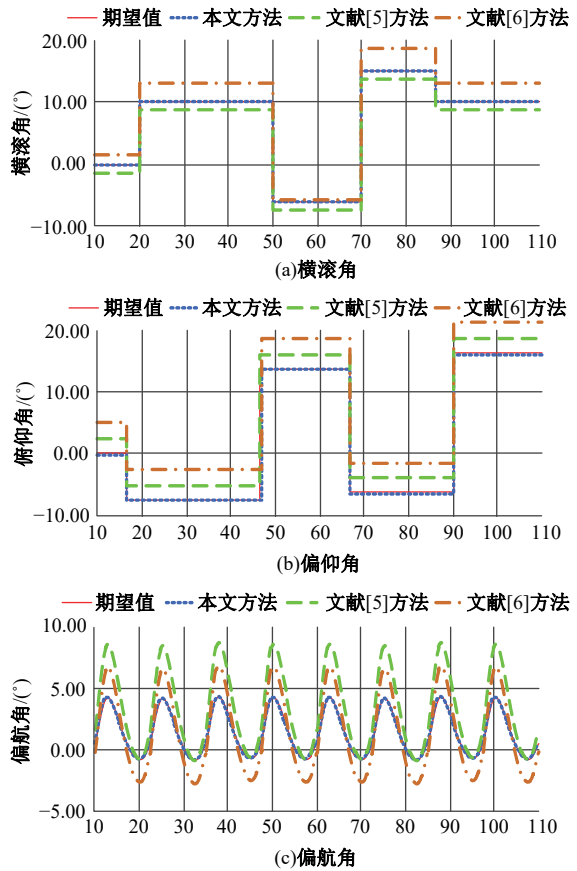


图 4 不同方法的四旋翼无人机自主降落姿态控制效果对比

Fig. 4 Comparison of attitude control effects for autonomous landing of quadcopter drones using different methods

踪精度,证明了其具有良好的可靠性。

为进一步验证本文方法的优越性,需要对各个方法的四旋翼无人机自主降落姿态控制性能展开对比分析,详细的实验测试结果如图 4 所示。

通过分析图 4 可以直观地看出,本文方法无论是在降落初始阶段,还是在接近目标的过程中,横滚角、俯仰角以及偏航角和期望值基本吻合,偏差均 $<0.02^\circ$ ,且整体运行过程尤为平稳。相比之下,另外 2 种方法控制处理后的无人机在姿态控制上的表现则明显逊色,在横滚角、俯仰角和偏航角的控制上均存在较大偏差,尤其是在降落过程中的关键时刻,这些偏差可能导致无人机姿态的急剧变化,进而影响降落的稳定性和安全性。由此可见,本文方法可以有效提升四旋翼无人机自主降落姿态控制结果的准确性,确保四旋翼无人机安全降落,同时也进一步验证了本文方法在四旋翼无人机自主降落姿态控制方面的优越性。

### 3 结束语

本文深入研究了基于 TLD 算法的四旋翼无人机自主降落姿态控制方法。通过 TLD 算法与扩展卡尔曼滤波技术的结合,实现了对特定目标的精准检测与跟踪,确保了目标位置信息的精确控制。同时,借助附加惯性项的人群搜索算法和自抗扰控制技术,进一步提升了无人机的姿态控制精度,提高了其降落过程的稳定性和安全性。实验结果表明,采用本文方法,无人机在自主降落过程中,平均中心偏移量控制在 1.98 像素以内,横滚角、俯仰角和偏航角的偏差均 $<0.02^\circ$ ,表现出色。上述结果充分证明了本文方法在目标跟踪和姿态控制方面的有效性,然而,该方法仍存在一定局限性,如极端天气或光照不佳等恶劣条件可能影响 TLD 算法的跟踪性能。因此,未来将致力于提高算法的鲁棒性和适应性,以适应更多复杂环境。

#### 参考文献:

- [1] 李鸿一,王琰,姚得银,等. 基于事件触发机制的多四旋翼无人机鲁棒自适应滑模姿态控制[J]. 中国科学:信息科学, 2023, 53(1): 66-80.  
Li Hong-yi, Wang Yan, Yao De-yin, et al. Robust adaptive sliding mode attitude control of MQUAVs based on event-triggered mechanism[J]. Scientia Sinica(Informationis), 2023, 53(1): 66-80.
- [2] 高强,刘新鹏,刘春平,等. 四旋翼无人机串级自抗扰姿态控制及轨迹跟踪[J]. 电光与控制, 2023, 30(3): 90-95.  
Gao qiang, Liu Xin-peng, Liu Chun-ping, et al. Cascaded active disturbance rejection attitude control and trajectory tracking of quadrotor UAV[J]. Electronics Optics & Control, 2023, 30(3): 90-95.
- [3] 谭丹丹. 重载多旋翼植保无人机自抗扰鲁棒控制算法[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(1): 163-169.  
Tan Dan-dan. Active disturbance rejection robust control algorithm for heavy-load multi-rotor plant protection UAV[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(1): 163-169.
- [4] 杨文奇,卢建华,姜旭,等. 基于改进 ESO 的四旋翼姿态自抗扰控制器设计[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(12): 3792-3799.  
Yang Wen-qi, Lu Jian-hua, Jiang Xu, et al. Design of quadrotor attitude active disturbance rejection controller based on improved ESO[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(12): 3792-3799.
- [5] 王博,张贺,高正红. 大展弦比太阳能无人机横向姿态控制研究[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(6): 1223-1232.  
Wang Bo, Zhang He, Gao Zheng-hong. Lateral attitude control of solar-powered UAV with high aspect ratio[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(6): 1223-1232.
- [6] 刘子龙,窦鹏程. 四旋翼无人机的位置和姿态控制算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2022, 43(4): 754-758.  
Liu Zi-long, Dou Peng-cheng. Position and attitude control algorithm study of quadrotor UAV[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2022, 43(4): 754-758.
- [7] Qi J, Gao H, Yu H, et al. Integrated attitude and landing control for quadruped robots in asteroid landing mission scenarios using reinforcement learning[J]. Acta Astronautica, 2023, 204: 599-610.
- [8] Sadigh S M, Kashaninia A, Dehghan S M. Adaptive fault tolerant attitude control of a nano-satellite with three magnetorquers and one reaction wheel[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2022, 35(1): No. 0001321.
- [9] 徐攀,齐文宗. 一种改进的 TLD 跟踪算法研究[J]. 计算机仿真, 2022, 39(4): 312-315.  
Xu Pan, Qi Wen-zong. Research on an improved TLD tracking algorithm[J]. Computer Simulation, 2022, 39(4): 312-315.
- [10] 李祖检,占荣辉,庄钊文. 基于形态匹配聚类的近邻扩展目标跟踪算法[J]. 信号处理, 2023, 39(2):

- 298-309.
- Li Zu-jian, Zhan Rong-hui, Zhuang Zhao-wen. Extended target tracking algorithm based on morphological matching clustering in near spaced environment[J]. Journal of Signal Processing, 2023, 39(2): 298-309.
- [11] 赵祥丹, 王彪, 王志胜, 等. 预测-五阶容积卡尔曼滤波方法[J]. 航空学报, 2023, 44(6): 249-261.
- Zhao Xiang-dan, Wang Biao, Wang Zhi-sheng, et al. Predictive fifth-degree cubature Kalman filter method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(6): 249-261.
- [12] 王娜, 罗亮, 彭鲲, 等. 基于组稀疏卡尔曼滤波的多步轨迹预测方法[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(6): 70-77.
- Wang Na, Luo Liang, Peng Kun, et al. A multi-step trajectory prediction method based on group sparse Kalman filtering[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(6): 70-77.
- [13] 胡芸, 侯明勋. 人群搜索算法拟合 Kriging 参数的空间数据插值[J]. 湖北大学学报:自然科学版, 2023, 45(6): 865-871.
- Hu Yun, Hou Ming-xun. Spatial data interpolation of seeker optimization algorithm fitting Kriging model parameters[J]. Journal of Hubei University(Natural Science Edition), 2023, 45(6): 865-871.
- [14] 焦嵩鸣, 丁辉, 钟宇飞, 等. 一种基于 SiamRPN 的无人机目标跟踪及控制算法[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(6): 1372-1380.
- Jiao Song-ming, Ding Hui, Zhong Yu-fei, et al. A UAV target tracking and control algorithm based on SiamRPN[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(6): 1372-1380.
- [15] 张堃, 李珂, 邹杰, 等. 基于深度迁移强化学习的无人机投放自主引导机动控制算法[J]. 航空科学技术, 2023, 34(11): 103-110.
- Zhang Kun, Li Ke, Zou Jie, et al. Autonomous Guidance maneuvering control algorithm for UAV dropping based on deep transfer reinforcement learning[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(11): 103-110.