

基于状态实时反馈的无人机航拍 姿态鲁棒控制方法

邢哲熙, 赵明月

(南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 211106)

摘要: 无人机在航拍过程中, 由于气流、风速等外部因素的影响, 其姿态容易发生变化, 从而影响航拍画面的稳定性; 为了提升无人机的航拍质量, 实现对目标区域的稳定拍摄, 提出基于状态实时反馈的无人机航拍姿态鲁棒控制方法; 考虑航拍任务和航拍环境, 通过无人机航拍路线规划和姿态解算, 设定无人机航拍姿态控制目标; 利用状态实时反馈技术测定无人机姿态, 便于更快地响应无人机姿态的变化; 从偏航角和俯仰角两个方面设置控制约束条件, 实现无人机在航拍过程中的全方位姿态控制; 选择无人机中的机翼和动力系统作为航拍姿态鲁棒控制对象, 综合考虑无人机飞行环境和控制量计算结果, 动态生成无人机航拍姿态鲁棒控制指令, 实现无人机航拍姿态的鲁棒控制; 通过实验得出结论: 状态实时反馈偏差低于 0.2° , 满足无人机航拍姿态鲁棒控制运行要求, 姿态角执行偏差系数降低 0.685° , 同时姿态角执行偏差系数明显降低。

关键词: 状态实时反馈; 无人机控制; 航拍姿态; 鲁棒控制; 无人机姿态

Robust Attitude Control Method for UAV Aerial Photography Based on Real-Time State Feedback

XING Zhexi, ZHAO Mingyue

(School of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 211106, China)

Abstract: During aerial photography, drones are prone to changes in posture due to external factors such as airflow and wind speed, which can affect the stability of aerial photography images. In order to improve the quality of drone aerial photography and achieve stable shooting of the target area, a robust attitude control method for drone aerial photography based on real-time state feedback is proposed. Consider aerial photography tasks and environments, and set the objectives of unmanned aerial vehicle (UAV) attitude control through UAV aerial photography route planning and attitude calculation. The real-time state feedback technology is used to determine the attitude of UAV to respond more quickly to changes in UAV attitude. Set control constraints from both yaw and pitch angles to achieve all-round attitude control of the drone during aerial photography. Select the wings and power system of the drone as robust attitude control for aerial photography, consider the drone flight environment and control calculation results comprehensively, generate robust control commands for the drone's aerial photography attitude dynamically, and achieve robust control of the drone's aerial photography attitude. Experimental results show that the real-time deviation of state feedback is less than 0.2° , which meets the requirements of robust attitude control operation for drone aerial photography. The attitude angle execution deviation coefficient is reduced by 0.685° , indicating a significant decrease.

Keywords: real time status feedback; drone control; aerial attitude; robust control; drone attitude

收稿日期:2024-06-19; 修回日期:2024-08-07。

作者简介:邢哲熙(2003-),男,大学本科。

引用格式:邢哲熙,赵明月. 基于状态实时反馈的无人机航拍姿态鲁棒控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(7): 154-162.

0 引言

无人机航拍是无人驾驶飞行器搭载相机或其他传感器, 从空中获取地面或目标区域的图像、视频等数据的过程, 能够提供传统摄影无法比拟的广视角和高度灵活性, 为各种应用提供丰富的数据支持^[1-2]。在无人机执行航拍任务过程中, 精确的姿态控制能够实现无人机的稳定、平滑飞行, 确保航拍画面的清晰度和稳定性, 而且还需要不断调整姿态以适应不同的拍摄需求, 如侧面飞过、高空平摇、垂直升降、轨道环绕等拍摄姿势, 都需要无人机具备良好的姿态控制能力, 因此提出无人机航拍姿态控制方法。

无人机航拍姿态控制方法以无人机以及内部组成元件作为控制对象, 通过精确调控无人机的姿态参数, 在保证无人机飞行稳定的同时, 提高航拍设备的移动稳定度, 对于确保航拍画面的清晰度和稳定性至关重要。当前有学者提出了一些研究成果。文献 [3] 提出方法针对垂直起降阶段的尾座式无人机, 构建了六自由度非线性模型, 设计基于 $L1$ 自适应的无人机姿态控制器, 它能够显著减少外部扰动对系统性能的不良影响。特别是在面对垂直起降阶段可能遭遇的风干扰和模型不确定性时, 该控制器能够实现对无人机姿态的精确控制, 引入了改进型的跟踪微分器, 这不仅能够实现信号的快速精确跟踪, 同时也有效抑制了量测噪声的干扰。上述控制方法以尾座式无人机作为控制对象, 将其应用到其他无人机的姿态控制工作中无法保证控制效果。文献 [4] 提出方法使用扰动观测器实现无人机鲁棒姿态稳定控制, 观测器中 Q 滤波器考虑对扰动和估计噪声的衰减性能, 以此作为控制对象, 实现无人机飞行扰动的抑制, 从而达到姿态飞行稳定的控制任务。上述控制方法主要针对存在飞行扰动的无人机, 若控制对象的飞行环境中不存在扰动, 则默认其处于稳定飞行状态, 无法执行控制任务。文献 [5] 提出方法利用状态观测器得出无人机轨迹的跟踪结果, 结合当前无人机的飞行情况, 生成并执行控制功能, 该方法能够实现对无人机位置的跟踪与控制, 无法保证无人机姿态角的控制效果。文献 [6] 提出方法将有限时间性能函数和自适应反推方法相结合, 设计控制器以补偿执行器故障的影响, 从而确保跟踪误差在有限时间内收敛到原点附近的预设邻域, 最大程度的保证跟踪控制精度。然而该方法要求控制对象为四旋翼无人机, 无法保证该方法在其他类型无人机上的控制效果。文献 [7] 提出方法设计一个 PID 位置控制器, 为了克服外部干扰的影响, 引入了干扰估计器来进行实时补偿, 通过精确的姿态解算, 确定了无人机的期望姿态, 在具备高度鲁棒性姿态控制器支持下, 实现控制任务。上述方法通过对无人机环境干扰的补偿, 最

大程度地降低环境对无人机飞行稳定性产生的影响, 但无法实现对内部干扰以及姿态参数的精准控制。

为此, 引入状态实时反馈技术, 研究无人机航拍姿态鲁棒控制方法。通过实时反馈和动态控制指令, 能够及时调整无人机的姿态, 确保航拍画面的稳定性。该方法通过实时反馈技术及时感知无人机姿态变化, 并利用动态控制指令迅速调整, 确保航拍画面的稳定性与清晰度。同时, 该方法能够综合考虑不同飞行环境, 动态生成适应环境的控制策略, 提升无人机的环境适应性。此外, 该方法还通过设定控制约束条件和动态控制策略, 显著增强了无人机在不同情况下的鲁棒性, 为无人机航拍任务的顺利完成提供了有力保障。

1 无人机航拍姿态鲁棒控制方法设计

无人机航拍姿态控制方法的基本运行原理为: 综合考虑无人机的航拍任务以及航拍区域的环境特征, 规划无人机的航拍路线以及姿态, 以此作为无人机航拍姿态的控制目标。采集无人机的实时飞行数据, 计算当前飞行数据与控制目标之间的差距, 作为控制量, 从而生成无人机航拍姿态控制指令, 在无人机姿态自由度条件约束下, 通过控制指令的执行, 实现无人机航拍姿态的控制。优化设计的无人机航拍姿态鲁棒控制方法, 在上述执行流程的基础上, 利用状态实时反馈技术精准获取无人机的实际飞行数据, 最大程度的保证初始控制数据的采集质量, 在控制过程中, 需要对无人机的实际飞行环境进行检测, 充分考虑可能扰动无人机飞行稳定性和姿态控制效果的所有因素, 实现姿态的鲁棒控制任务。

1.1 设定无人机航拍姿态控制目标

无人机航拍姿态控制目标为无人机执行航拍任务时的姿态角, 在实际的控制目标设定过程中, 以航拍任务为驱动条件, 综合考虑航拍区域内的环境特征, 规划无人机的航拍路线, 在任意节点位置上确定航拍的最佳拍摄角度, 根据无人机航拍角度与姿态角之间的空间关系, 得出目标姿态角的求解结果, 也就是无人机航拍姿态的控制目标设定结果。

1.1.1 规划无人机航拍路线

考虑无人机上内置航拍设备的视角, 在确定无人机飞行高度的情况下, 确定无人机的飞行目标位置为:

$$\begin{cases} x_i = x_m \times \frac{l_x}{2} \times \kappa_{\text{proportion}} \\ y_i = y_m \times \frac{l_y}{2} \times \kappa_{\text{proportion}} \\ z_i = \kappa_{\text{proportion}} \times f \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\kappa_{\text{proportion}}$ 为无人机航拍比例系数, (x_m, y_m) 为待拍摄目标的实际位置坐标, l_x 和 l_y 分别为航拍设备在水平和竖直方向上的拍摄范围, f 为焦距。在确定无人机起

飞位置的情况下,生成无人机到达第一个航拍点的路线规划结果为:

$$L_{c1} = \frac{(x - x_{\text{take off}})(y_1 - y_{\text{take off}})}{x_1 - x_{\text{take off}}} + y_{\text{take off}} \quad (2)$$

式中, (x_1, y_1) 为第一个航拍点, 可通过公式 (1) 计算出该变量的具体取值, $(x_{\text{take off}}, y_{\text{take off}})$ 表示的是无人机的初始起飞位置。按照上述方式, 以前一航拍点为初始值, 以下一航拍点为目标位置, 生成对应的航点或路径段作为路线规划结果, 并通过算法将这些航点或路径段有效地连接起来, 形成完整的航拍路线。连接过程中需要考虑航点之间的可达性、飞行效率以及避障需求, 即可得出无人机航拍路线的初始规划结果^[8]。

为保证无人机在航拍过程中不会与环境中的任何物体发生碰撞, 对初始规划路线进行调整, 并考虑到动态障碍物的躲避问题。在实际调整过程中, 首先判断初始生成航拍路线上任意节点是否与环境中的物体坐标存在重合现象, 若存在, 假设障碍物的原始尺寸为 $O = (O_x, O_y, O_z)$, 膨胀比例为 α , 则膨胀后的障碍物尺寸为 $O' = (O_x + \alpha O_x, O_y + \alpha O_y, O_z + \alpha O_z)$ 。设无人机的当前位置为 $P_u(t)$, 目标位置为 P_d , 动态障碍物的预测位置为 $P_0(t + \Delta t)$, 则路径调整量为 $\Delta P_u = \arg \min_{\Delta P} (\|p_u(t) + \Delta P + p_d\|^2 + \delta \|\Delta P\|^2)$ 。其中, δ 为正则化参数, 用于平衡路径调整的平滑性和避障需求。将路径调整量划分为水平和竖直方向上的调整量, 利用公式 (3) 完成路线节点调整操作:

$$\begin{cases} x_{i'} = x_i + \Delta x \\ y_{i'} = y_i + \Delta y \end{cases}, i \in L_c \quad (3)$$

式中, Δx 和 Δy 为路线节点在水平和竖直方向上的调整量, L_c 为初始生成航拍路线^[9]。按照上述方式对满足环境碰撞冲突条件的所有路线节点进行调整, 并将调整后的节点重新融入到航拍路线中。

为保证无人机航拍过程的平滑度, 采用多项式平滑机制对调整后的航拍路线进行平滑处理, 将整个路线视为一系列离散的数据点, 通过选择适当的多项式阶数, 利用最小二乘法等优化算法, 找到能够最佳拟合这些数据点的多项式函数, 利用得到的多项式函数在航拍路线的各个部分上生成平滑的坐标点^[10]。这些新生成的坐标点将替换原有的离散点, 从而形成一个连续且平滑的航拍路线。在平滑处理过程中, 特别关注路线的转折点和重要特征点, 确保这些关键部分在平滑后仍然保持清晰和准确。平滑处理后, 通常情况下拟合后的飞行路径会与之前的路径存在一定偏差, 对于常规的无人机飞行控制问题不会有较大的影响, 但是对于无人机航拍这种对于无人机位置和姿态需要较为准确控制的应用场景, 平滑后的飞行路径上, 为确保还包括事先规划好的路径点位, 在进行多项式平滑时, 将事先规划好的关键路径

点位作为约束条件纳入优化过程中, 从而实现高质量航拍。优化过程通过设置目标函数中的惩罚项来实现, 当平滑后的路径偏离这些关键点位时, 会增加一个与偏离距离成正比的惩罚值。具体计算公式如下:

$$J = \int_{t_0}^t \left| \frac{d^2 L_c(t)}{dt^2} \right|^2 dt + \sum_{i=1}^N \lambda_i \|L_c(t_i) - L_i\|^2 \quad (4)$$

式中, $L_c(t)$ 为多项式平滑路径, t 为时间参数, L_i 为关键路径点位在时间 t_i 上的位置, $L_c(t_i)$ 为 t_i 时间的路径位置。 $\int_{t_0}^t \left| \frac{d^2 L_c(t)}{dt^2} \right|^2 dt$ 为平滑项, 用于最小化路径的加速度。 $\sum_{i=1}^N \lambda_i \|L_c(t_i) - L_i\|^2$ 为惩罚项, 确保路径经过关键点位。 λ_i 为每个关键点位的权重。

由此, 实现了无人机航拍路线跟踪控制, 保障无人机航行过程中路径的平滑性和关键点位的精确通过, 从而提高了航拍图像的质量和稳定性。通过将关键路径点位作为约束条件纳入优化过程, 并设置目标函数中的惩罚项, 确保了无人机在执行航拍任务时, 能够沿着预定的路径飞行, 同时保持飞行轨迹的平滑, 减少了由于路径突变引起的姿态波动, 这对于获取清晰、稳定的航拍影像至关重要。此外, 通过合理设置每个关键点位的权重, 可以根据航拍任务的具体要求, 对不同位置的精度要求进行调整, 进一步优化航拍效果。

1.1.2 解算无人机航拍姿态目标值

考虑无人机航拍路线的规划结果, 可以得出航拍路线上任意位置的最佳拍摄角度为:

$$\theta_{\text{shot}} = \tan^{-1} \frac{y_{i'} - y_m}{x_{i'} - x_m}, (x_{i'}, y_{i'}) \in L_{\text{planning}} \quad (5)$$

其中: L_{planning} 为规划的无人机航拍路线。根据这个视角来设置和调整无人机的飞行姿态角, 飞行姿态角目标值为:

$$\begin{cases} \varphi_m = \cos(90 - \theta_{\text{shot}}) \\ \varphi_m = \cos \theta_{\text{shot}} \\ \vartheta_m = \sin(90 - \theta_{\text{shot}}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, φ_m 、 φ_m 和 ϑ_m 分别为无人机俯仰角、滚转角和偏航角的控制目标, 俯仰角指的是无人机机头相对于水平面的上下摆动角度, 俯仰角接近 0° 时, 无人机几乎与地面平行, 适合拍摄水平视角的画面, 增大俯仰角, 无人机机头向上, 可以拍摄到高角度的画面, 俯仰角减小至负值时, 无人机机头向下, 可以拍摄到低角度或地面的特写^[11]。滚转角为无人机机身相对于其纵轴的左右倾斜角度, 该姿态角的改变主要用来调整无人机的航拍画面方向和构图, 无法直接决定航拍角度。而偏航角为无人机机头在水平面上的朝向, 偏航角的调整用于改变无人机的面向方向, 从而影响拍摄画面的方向^[12]。按照

上述方式, 根据无人机航拍路线的规划结果, 得出任意路线节点位置上飞行姿态角目标值的求解结果, 也就是无人机航拍姿态控制目标的设定结果。

1.2 利用状态实时反馈技术测定无人机姿态

在无人机航拍线路上, 基于状态实时反馈技术, 对上述获得的高度、速度、飞行时间、姿态角(俯仰角、滚转角和偏航角)等无人机状态参数进行实时测定与更新, 得出无人机姿态的测定结果, 以此作为控制方法的初始控制数据^[13]。图 1 表示的是状态实时反馈技术的执行流程。

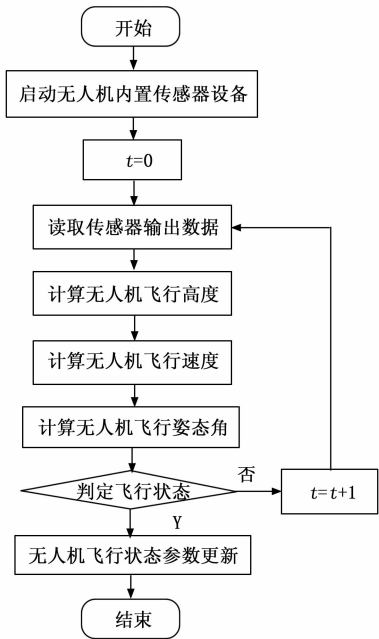


图 1 状态实时反馈技术流程图

按照图 1 表示流程, 可以得出任意时刻无人机的飞行高度与速度状态参数的反馈结果为:

$$\begin{cases} h_t = v_{com} \times \frac{t_{tran}}{2} \\ v_t = \frac{|x_t - x_{take\ off}| + |y_t - y_{take\ off}|}{t_{flight}} \end{cases} \quad (7)$$

其中: v_{com} 和 t_{tran} 分别为无人机通信信号的传输速度和传输时间, (x_t, y_t) 为 t 时刻无人机的实际飞行位置, t_{flight} 为无人机的飞行时间^[14]。另外姿态角状态参数的反馈结果为:

$$\begin{cases} \varphi_t = \arcsin[2(q_y \cdot q_z - q_x)] \\ \varphi_t = \arctan2[2(q_y + q_z \cdot q_x), 1 - 2(q_y^2 + q_z^2)] \\ \vartheta_t = \arctan\left(\frac{B_y}{B_x}\right) \end{cases} \quad (8)$$

式中, q_x 、 q_y 和 q_z 分别为四元数在 3 个维度上的分量, B_x 和 B_y 对应的是磁力计输出的 x 轴和 y 轴分量。任意时刻无人机状态的反馈结果为:

$$\beta_{t+1} = \beta_t + \Delta\beta, \beta = h, v, \varphi, \vartheta \quad (9)$$

式中, β_t 和 β_{t+1} 分别为 t 时刻和 $t+1$ 时刻的无人机状态参数, $\Delta\beta$ 为状态变化量^[15]。按照上述方式得出无人机姿态的测定结果, 以此作为控制方法的初始控制数据。

1.3 确定无人机航拍姿态约束条件

无人机在飞行过程中, 环境等因素经常促使它进行转向操作。这种转向操作所能达到的最大角度被称为最大偏航角, 也称为最大转弯能力。值得注意的是, 偏航角的大小直接关系到无人机的转弯程度和飞行稳定性。具体而言, 当偏航角较小时, 无人机的转弯幅度相对减小, 飞行状态更为平稳; 反之, 当偏航角增大时, 无人机的转弯幅度增大, 飞行稳定性则相应降低^[16]。无人机的最大偏航角与其自身的物理特性紧密相关, 这一特性通常在无人机制造完成后就被确定下来。设最大偏航角为 ϑ_{max} , 则无人机偏航角的约束条件为:

$$\vartheta_t \leq \vartheta_{max} \quad (10)$$

另外, 无人机在执行航拍任务过程中需要进行爬升与下降, 但若是俯仰角过大, 会给无人机带来坠机的风险, 因此为了飞行的稳定性, 需要对无人机的俯仰角进行限制, 即无人机的俯仰角控制结果低于允许爬升与下降的最大角度。

1.4 选择无人机航拍姿态鲁棒控制对象

无人机的组成结构涵盖了机身、机翼、尾翼、起落装置、动力系统、任务载荷等多个关键部分, 无人机的机身负责装载发动机、电源、控制操纵系统等关键组件, 机翼是无人机产生升力的主要部件, 尾翼通常分为垂直尾翼和水平尾翼两部分, 垂直尾翼主要用于控制无人机的方向, 而水平尾翼则用于控制无人机的俯仰动作。尾翼的设计有助于增强无人机的稳定性和操纵性^[17]。起落装置包括起落架和着陆设备, 用于无人机在地面或水面进行起飞、着陆、滑行和停放。无人机的动力系统通常由电机、电池和螺旋桨等组成, 负责为无人机提供飞行动力。在执行航拍任务时, 航拍设备即为任务载荷部分。在实际的航拍姿态鲁棒控制过程中, 考虑无人机的飞行与航拍执行原理, 选择无人机组成部件作为具体的姿态控制对象^[18]。根据无人机的飞行原理以及各元件之间的空间关系, 可以得出无人机姿态角与机翼迎角、机翼副翼有关, 当需要上升时, 通常会增加机翼的迎角, 以增加升力; 当需要下降时, 则会减小迎角。当副翼向上偏转时, 机翼一侧的升力减小, 另一侧增大, 导致无人机绕其纵轴旋转, 实现滚转。由此可以将机翼与无人机姿态角之间的关系量化表示为:

$$\begin{cases} \varphi = 0.5 * \rho * v^2 * \kappa_{lift} * \psi_{wing} \\ \varphi = 0.5 * \rho * v^2 * \kappa_{resistance} * S_{wing} \end{cases} \quad (11)$$

其中: ρ 为空气密度, κ_{lift} 和 $\kappa_{resistance}$ 分别为升力系数和阻力系数, ψ_{wing} 和 S_{wing} 对应的是机翼的迎角和面积

值^[19]。另外无人机中的动力系统也会对航拍姿态角产生影响,具体的影响机理如下:

$$\omega = \sqrt{\frac{F_{\text{lift}}}{\kappa_{\text{power}} \cdot R^2}} \quad (12)$$

其中: F_{lift} 为升力值,该变量的具体取值由动力系统的输出功率决定, κ_{power} 和 R 分别为动力系统的工作系数以及动力系统中螺旋桨的半径值。由此可以看出,无人机中机翼会影响无人机航拍姿态角具体取值,动力系统则影响航拍姿态角的变化速度,因此在无人机航拍姿态鲁棒控制过程中,选择机翼和动力系统作为控制对象。

1.5 自适应生成无人机航拍姿态鲁棒控制指令

通过状态实时反馈结果,将测定的无人机实时姿态与设定的控制目标进行比对,得出控制量的计算结果,以此作为主要内容生成初始控制指令^[20]。综合考虑无人机在执行航拍过程中所处飞行环境,对初始生成的控制指令进行动态调整,提高无人机航拍姿态控制的鲁棒性。

1.5.1 生成初始无人机航拍姿态控制指令

姿态控制量主要指用于调整无人机姿态的参数,这些参数通常包括俯仰角、滚转角和偏航角的控制量。这些控制量由飞行控制系统根据无人机的当前姿态、目标姿态以及外部干扰等因素进行计算和输出^[21]。无人机航拍姿态的误差信号表达式如下:

$$\begin{cases} K_{\varphi} = \varphi_m - \varphi_t \\ K_{\psi} = \psi_m - \psi_t \\ K_{\delta} = \delta_m - \delta_t \end{cases} \quad (13)$$

将设定的无人机航拍姿态控制目标和测定的实时航拍姿态数据代入到公式(13)中,即可得出俯仰角、滚转角和偏航角控制量的计算结果,根据姿态角与机翼、动力系统之间的关系,将其转换为机翼迎角控制量和动力系统输出功率控制量 $[K_{\text{wing}}, K_{\text{power}}]$,进而得出初始无人机航拍姿态控制指令的生成结果为:

$$C = \{[K_{\text{wing}}, K_{\text{power}}], [u_{\text{wing}}, u_{\text{power}}]\} \quad (14)$$

式中, K_{wing} 和 K_{power} 分别为机翼和动力系统控制量计算结果, u_{wing} 和 u_{power} 对应的是机翼和动力系统控制对象^[17]。通过控制量与控制对象的一一对应,得出对应的控制指令初始生成结果。

1.5.2 识别无人机航拍飞行环境

无人机航拍飞行环境中影响姿态控制效果的因素主要为风场和通信干扰,因此从风场和通信两个方面对飞行环境进行识别。无人机航拍飞行环境中风场的识别主要基于多普勒效应,通过测量激光束与大气中粒子相互作用后的频率变化来推算风速。识别结果为:

$$v_{\text{wind}} = \frac{\Delta\gamma}{2P_{\text{launch}}} \cdot v_c \quad (15)$$

式中, $\Delta\gamma$ 和 P_{launch} 对应的是多普勒频移和检测信号发射频率, v_c 表示的是发射信号在无人机航拍飞行环境中的传输速度值^[22]。另外,通信干扰通过分析无人机信号的功率谱特征来识别干扰信号,将通信干扰强度的识别结果标记为 Q_{com} 。

1.5.3 动态更新无人机航拍姿态鲁棒控制指令

结合无人机航拍飞行环境的识别结果 v_{wind} 、 Q_{com} ,在初始无人机航拍姿态控制指令 C 的基础上,对控制指令进行动态调整,旨在提升控制方法的鲁棒性。控制指令的动态更新结果如下:

$$C(t+1) = \{[K_{\text{wing}}, K_{\text{power}}]^{-v_{\text{wind}}}, [u_{\text{wing}}, u_{\text{power}}]^{-Q_{\text{com}}}\} \quad (16)$$

按照上述方式得出任意时刻无人机航拍姿态的鲁棒控制指令,将其传输至控制指令执行终端。

1.6 实现无人机航拍姿态鲁棒控制

通过状态实时反馈技术,无人机能够持续、准确地监测并获取当前的姿态信息,基于实时反馈的数据,综合考虑无人机的飞行环境、实时姿态信息以及预设的控制目标,通过计算生成相应的控制指令,在面对外部干扰或不确定性因素时,无人机能够维持稳定的飞行姿态。按照图2表示的鲁棒控制原理执行无人机航拍姿态控制任务。

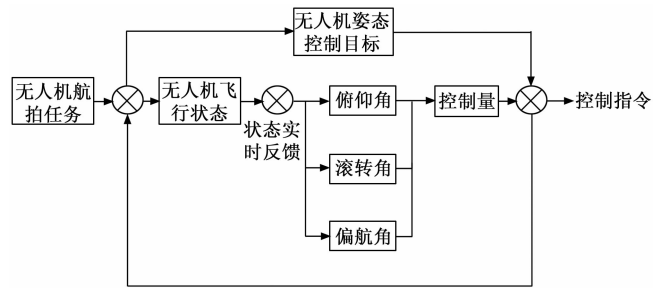


图2 无人机航拍姿态鲁棒控制原理图

综合考虑无人机航拍姿态鲁棒控制执行元件的工作原理,将姿态控制律表示为:

$$\zeta = -k_{\text{control}} \zeta C \quad (17)$$

其中: k_{control} 和 ζ 分别为控制元件工作参数以及控制元件运行过程中始终为大于0的常数。通过公式(16)的执行,完成无人机航拍姿态控制任务。在实现对角运动的精确控制时,飞机的俯仰角参数因其固有的长周期动态特性,导致其变化及稳定所需的时间相对较长。飞机内外干扰,尤其操纵机构扰动,显著影响力矩^[23]。无人机飞行中,纵向角加速振荡,损坏俯仰角稳定。为优化控制,引入角速度作变量。这一内回路主要关注俯仰角速率的变化,而俯仰角本身则作为外回路的主要控制目标。在执行航拍任务时,无人机的飞行高度调整是基于俯仰角的实时控制。若当前俯仰角超过预定值,无

人机将执行下滑操作以降低高度;反之,若当前俯仰角小于预定值,无人机将进行爬升以增加高度;若两者相等,无人机则保持当前高度稳定飞行,确保航拍任务的顺利进行^[24]。同理,实现所有无人机航拍姿态角的控制,并根据无人机飞行状态的反馈情况,对控制指令以及执行结果进行实时调整,当无人机处于静止状态时,证明姿态鲁棒控制结束,退出无人机航拍姿态鲁棒控制程序。

2 性能测试实验分析

为了测试优化设计基于状态实时反馈的无人机航拍姿态鲁棒控制方法的运行性能,设计性能测试实验。此次实验共包含 3 个部分,分别为无人机状态实时反馈性能、姿态控制精度性能、姿态控制鲁棒性能和姿态鲁棒控制应用性能,其中无人机状态实时反馈性能的测试能够反映出优化设计方法引入无人机状态实时反馈技术在姿态控制工作中的应用价值,姿态控制精度就是判断优化设计方法是否能够实现航拍任务执行状态下无人机设备姿态角的精准控制,姿态控制鲁棒性能测试则是判定优化设计方法是否能够在不同的实验环境下达到预期的控制精度,综合上述 3 个方面得出优化设计方法性能的测试结果。

2.1 准备无人机控制样机

此次实验选择 Trimble·UX5 型号无人机作为控制对象,该无人机质量为 1.0 kg,最大荷载质量为 2 kg,升力和阻力系数分别为 3×10^{-5} 和 5.5×10^{-5} , x 、 y 和 z 轴方向上的转动惯量分别为 1.6×10^{-3} kg/m、 1.6×10^{-3} kg/m 和 3.0×10^{-3} kg/m。选择的无人机样机中内置一个专业航摄相机,在航摄区域飞行作业时,相机会按照指定的重叠度和高度进行曝光拍摄,与此同时自动记录实时位置和姿态等数据。在实验开始之前,对准备的无人机控制样机进行参数初始化,初始化参数包括:数据记录模式、飞行模式等,并对初始化完成的无人机进行试飞处理,试飞的目的是判定准备的无人机控制样机是否能够正常执行飞行操作。在启动无人机之前,首先确保机上电源已开启,并让其在地面上静置片刻。这一阶段主要用于验证无线网络连接的稳定性,检查地监与飞控通信,确认传感器数据正常显示,无误后准备空测。软硬件全部检查后,启动发动机。空飞前手动悬停调姿,确定基准 PWM 值。参数上传后,切换至自动控制。可直接在地面进行起降模式。

2.2 布设无人机飞行环境

为验证优化设计控制方法的鲁棒性,从风场和通信干扰两个方面布设无人机的飞行环境,具体的布设情况如图 3 所示。

在环境风场设定过程中,要求最大风速不能超过无

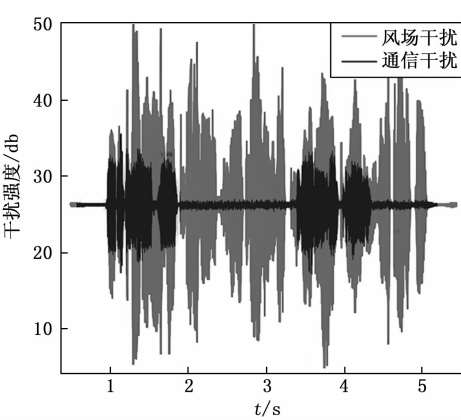


图 3 无人机飞行环境干扰布设示意图

人机的最大抗风能力,保证无人机能够在实验环境中正常飞行。由于在室外环境中风场无法完全采用人为控制的方式进行设定,因此在选择的航拍区域内安装风速传感器,当传感器输出数据满足预设风场干扰条件时,记录对应数据作为风场环境下的飞行结果数据。另外,通信干扰环境的设置主要是在实验环境中安装多个通信装置,选择合适的通信频率和通道,避免与其他无线电通信系统产生干扰。根据图 3 表示的环境干扰情况,将无人机的飞行环境划分成多种类型,形成多个不同类型的飞行环境场景。

2.3 生成无人机航拍与姿态控制任务

选择布设的无人机飞行区域作为无人机的航拍内容,同时设定无人机的初始坐标为 (0, 0, 0),上升到预期高度后,维持固定高度的进场平飞阶段,随后进入逐步降低的直线下滑阶段,紧接着是确保平稳的拉平阶段,最终无人机安全地接触地面,完成着陆。在无人机执行航拍任务过程中,根据设定的航拍任务设定姿态控制目标,部分控制任务的生成情况如表 1 所示。

表 1 无人机姿态控制任务生成表

时间节点	俯仰角/(°)	滚转角/(°)	偏航角/(°)
t_1	0.4	0.6	1.3
t_2	0.6	1.2	1.5
t_3	0.2	1.5	1.2
t_4	0.1	1.1	0.8
t_5	0.4	0.7	0.4
t_6	0.3	0.9	0.6
t_7	0.5	1.4	1.1
t_8	0.2	0.8	0.3

按照上述方式可以得出无人机飞行与航拍过程中所有姿态控制任务的生成结果,并以生成的控制任务数据作为验证控制精度性能的比对标准。

2.4 安装姿态鲁棒控制元件

为了给优化设计姿态鲁棒控制方法提供硬件支持,

在选择无人机控制样机中安装鲁棒控制元件，该控制元件的核心芯片选用的是 STM32f405，它基于一个 72 MHz 频率的 32 位 Cortex-M4 内核。这款芯片配备了多达 8 个定时器，每个定时器具备四路输出功能，使得通过调节其重装载值和分频值，能精准控制 PWM 的输出。这种丰富的定时器资源以及部分引脚的复用特性，极大地增强了输出的灵活性。控制元件的工作电压设定为 3.3 V，其工作电压范围在 2.8 V 至 3.5 V 之间，确保了在各种条件下的稳定运行。为了应对外部电路可能出现的过电压情况，专门设计了过电压保护措施，使得控制板上运行的程序更为稳定可靠。准备姿态鲁棒控制元件在无人机上的安装情况如图 4 所示。



图 4 姿态鲁棒控制元件的安装实景

姿态鲁棒控制元件安装完成后，为保证控制元件与无人机之间的适配度，对控制元件进行调试。采用数据导入的方式得出一个控制指令，判断控制元件执行下无人机是否能够得出对应的控制结果。

2.5 描述控制性能测试实验过程

借助 Arduino 工具对优化设计的基于状态实时反馈的无人机航拍姿态鲁棒控制方法进行开发，该工具以 AVR-GCC 等开源软件为基础，采用 Java 编写工具，将优化设计方法转换为计算机能够直接运行的程序代码。将准备的无人机控制样机切换至启动状态，同时运动优化设计的姿态鲁棒控制程序。首先利用状态实时反馈技术得出任意时刻无人机飞行状态的反馈结果，如图 5 所示。

在图 5 表示状态实时反馈结果的支持下，生成姿态鲁棒控制指令，并得出无人机航拍姿态鲁棒控制结果以及输出的航拍图像结果。图 6 表示的是姿态控制与航拍输出结果。

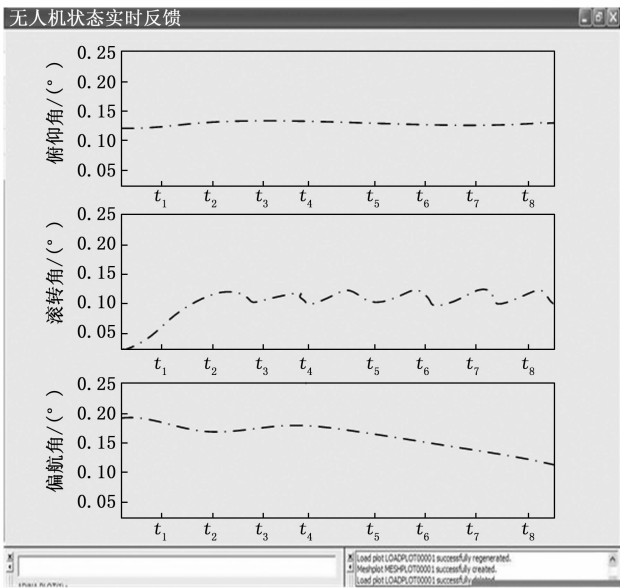


图 5 无人机飞行状态实时反馈结果



(a) 无人机航拍姿态鲁棒控制结果



(b) 无人机输出航拍画面

图 6 无人机航拍姿态鲁棒控制方法运行界面

按照上述方式可以得出无人机执行航拍任务过程中任意时刻的姿态控制结果数据与航拍结果数据。实验中

设置传统的基于 L₁-ITD 的无人机姿态控制方法和基于扰动观测器的无人机姿态控制方法作为实验的对比方法, 利用相同的开发工具完成对比方法的开发, 并得出对应的姿态控制与航拍结果数据。

2.6 设置控制性能测试指标

根据实验目的, 从状态实时反馈性能、姿态控制精度性能、姿态控制鲁棒性能 3 个方面设置测试指标, 状态实时反馈性能的测试指标为状态系数反馈偏差, 测试结果为:

$$\epsilon_{\text{feedback}} = |\varphi_t - \varphi_{\text{actual}}(t)| + |\vartheta_t - \vartheta_{\text{actual}}(t)| \quad (17)$$

其中: $\varphi_{\text{actual}}(t)$ 、 $\vartheta_{\text{actual}}(t)$ 和 $\vartheta_{\text{actual}}(t)$ 分别为 t 时刻无人机俯仰角、滚转角和偏航角的实际值, 为满足优化设计无人机航拍姿态鲁棒控制方法的运行要求, 要求 $\epsilon_{\text{feedback}}$ 不得高于 0.2° 。控制精度性能的测试指标设置为姿态角执行偏差系数, 该指标的测试结果如下:

$$\epsilon_{\text{control}} = |\varphi_m - \varphi_{\text{control}}| + |\vartheta_m - \vartheta_{\text{control}}| \quad (18)$$

式中, φ_{control} 、 $\vartheta_{\text{control}}$ 和 $\vartheta_{\text{control}}$ 对应的是控制方法作用下无人机姿态角的实际值。鲁棒性能的测试指标为偏差系数变化幅值, 测试结果为:

$$\Delta\epsilon = |\epsilon_{\text{control}}(i) - \epsilon_{\text{control}}(j)| \quad (19)$$

式中, $\epsilon_{\text{control}}(i)$ 和 $\epsilon_{\text{control}}(j)$ 对应的是 i 和 j 场景中的姿态角执行偏差系数。最终计算得出姿态角执行偏差系数和偏差系数变化幅值取值越小, 证明对应方法的控制精度和鲁棒性能越优。

2.7 控制性能测试实验结果与分析

2.7.1 无人机状态实时反馈性能测试结果

通过相关数据的统计, 得出无人机状态实时反馈性能的测试结果, 如图 7 所示。

从图 7 中可以看出, 优化设计方法中状态实时反馈的实际输出结果与无人机的实际姿态之间差距不大, 将图 7 中的表示数据代入到公式 (17) 中, 计算得出状态系数反馈偏差为 0.05° , 由此证明状态实时反馈结果满足无人机航拍姿态鲁棒控制的运行要求。

2.7.2 姿态控制精度性能测试结果

在 3 种不同控制方法作用下, 对执行航拍任务无人机的实时姿态角数据进行统计, 得出反映控制方法精度性能的测试结果, 如表 2 所示。

将表 2 中的数据代入到公式 (18) 中, 计算得出两种传统控制方法作用下姿态角执行偏差系数的平均值分别为 1.00° 和 0.55° , 而在优化设计方法下平均姿态角执行偏差系数为 0.09° 。

2.7.3 姿态控制鲁棒性能测试结果

在多个不同的布设环境下, 反复执行无人机航拍与

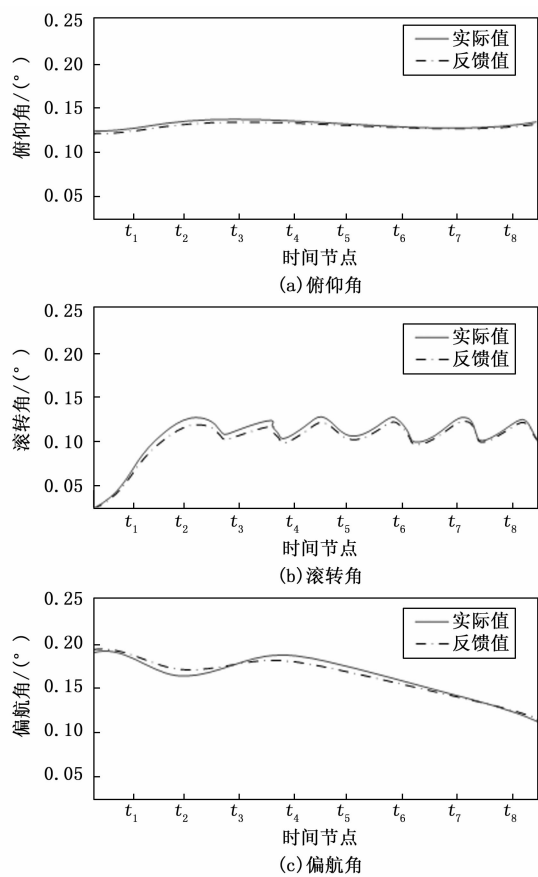


图 7 无人机状态实时反馈性能测试结果

表 2 无人机航拍姿态控制精度性能测试数据表

时间 节点	基于 L ₁ -ITD 的无人机姿 态控制方法			基于扰动观测 器的无人机姿 态控制方法			基于状态实时反 馈的无人机航拍 姿态鲁棒控制方法		
	俯仰 角/ (°)	滚转 角/ (°)	偏航 角/ (°)	俯仰 角/ (°)	滚转 角/ (°)	偏航 角/ (°)	俯仰 角/ (°)	滚转 角/ (°)	偏航 角/ (°)
t ₁	0.2	0.3	1.7	0.5	0.8	1.1	0.4	0.6	1.2
t ₂	0.4	1.6	1.9	0.8	1.5	1.7	0.5	1.2	1.5
t ₃	0.3	1.9	1.6	0.4	1.7	1.0	0.2	1.5	1.1
t ₄	0.8	1.7	0.5	0.3	1.4	0.6	0.1	1.0	0.8
t ₅	0.5	0.3	0.8	0.5	0.8	0.5	0.4	0.7	0.4
t ₆	0.9	0.6	0.4	0.6	0.8	0.5	0.4	0.9	0.5
t ₇	0.4	1.2	1.7	0.7	1.5	1.4	0.5	1.4	1.0
t ₈	0.5	0.6	0.5	0.4	0.6	0.4	0.2	0.8	0.3

姿态鲁棒控制任务, 统计不同环境下的无人机执行姿态角数据, 通过公式 (19) 的计算, 得出姿态控制鲁棒性能的测试对比结果, 如图 8 所示。

从图 8 中可以直观看出, 与两种传统方法相比, 优化设计方法具有更高的鲁棒性能, 能够适应不同的飞行状态与环境。

3 结束语

无人机航拍姿态控制是实现无人机稳定飞行的关键

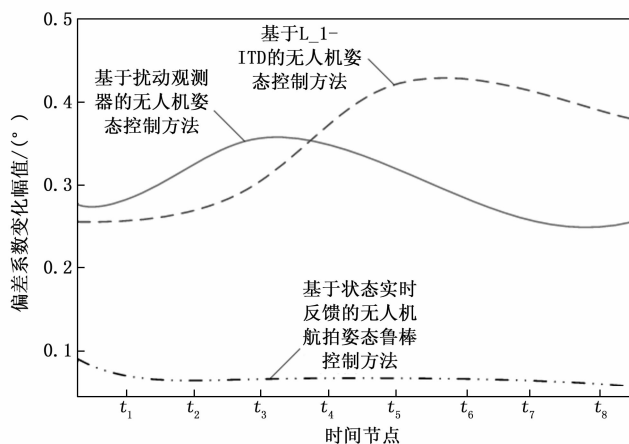


图 8 无人机航拍姿态控制鲁棒性能测试对比曲线

技术之一。通过精确的姿态控制，无人机能够执行各种复杂的拍摄姿势，为航拍提供高质量的图像和视频数据。随着技术的不断发展，无人机姿态控制技术将在航拍领域发挥更加重要的作用。在此次研究中，通过状态实时反馈技术的应用，实现对无人机实时运行状态的精准检测，间接的提升无人机姿态的控制效果，从而提升航拍质量，对于地质勘探、城市规划等方面具有积极意义。

参考文献:

- [1] 王伟, 吴昊, 刘鸿勋, 等. 基于深度强化学习的无人机姿态控制器设计 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (34): 14888-14895.
- [2] 杨尹, 邵伟平. 三翼式无人机姿态控制系统仿真与分析 [J]. 机械设计与制造, 2023 (9): 242-247.
- [3] 王姝旻, 张晶, 杨凌宇. 基于 L₁-ITD 的尾座式无人机姿态控制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (9): 2501-2509.
- [4] JONG NAM Y, YONG K, SU YONG P, et al. Robust attitude control of a quadrotor unmanned aerial vehicles using optimized disturbance observer [J]. Optimal Control Applications and Methods, 2022, 43 (4): 1241-1256.
- [5] 熊志豪, 邓涛, 郑宇惟, 等. 基于状态观测器的四旋翼无人机轨迹跟踪控制 [J]. 电光与控制, 2022, 29 (6): 50-56.
- [6] DI W, LI Z, LV D, et al. Adaptive finite time fault tolerant control for the quadrotor unmanned aerial vehicles based on time-triggered strategy [J]. Optimal Control Applications and Methods, 2023, 44 (1): 66-80.
- [7] 范文茹, 刘权威, 田栢苓. 基于干扰补偿的四旋翼无人机轨迹跟踪控制 [J]. 现代防御技术, 2024, 52 (2): 87-93.
- [8] 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.

- [9] 金强, 石永康, 吕玉龙, 等. 基于改进遗传算法的植保无人机姿态控制 [J]. 农机化研究, 2024, 46 (5): 1-6.
- [10] 冯江, 张慧, 张喜海, 等. 基于反步滑模算法的植保无人机姿态控制研究 [J]. 东北农业大学学报, 2022, 53 (1): 55-65.
- [11] 齐国元, 李阔, 王琨. 基于补偿函数观测器的四旋翼无人机姿态受限控制 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2023, 53 (3): 853-862.
- [12] 陈珑茏, 冯天宇, 吕宗阳, 等. 共轴倾转旋翼无人机有限时间滑模姿态控制 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2023, 53 (3): 883-890.
- [13] 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.
- [14] 赵振华, 李婷, 姜斌, 等. 四旋翼无人机姿态系统复合连续快速非奇异终端滑模控制 [J]. 控制理论与应用, 2023, 40 (3): 459-467.
- [15] 赵振华, 顾子箫, 薛鹏翔, 等. 飞翼无人机复合连续非奇异终端滑模姿态跟踪容错控制 [J]. 控制理论与应用, 2023, 40 (7): 1277-1286.
- [16] 周齐贤, 王寅, 孙学安. 基于增益自适应超螺旋滑模理论的无人机控制 [J]. 上海交通大学学报, 2022, 56 (11): 1453-1460.
- [17] 吴鸣宇, 姚雪莲, 杨艺, 等. 考虑瞬态特性的无人机自适应容错控制设计 [J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55 (1): 89-99.
- [18] 邵士凯, 王妹, 赵渊洁. 四旋翼无人机固定时间姿态输出反馈控制 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (4): 1502-1509.
- [19] 李永福, 文跃洲, 黄龙旺. 基于改进扩展状态观测器的四旋翼无人机轨迹鲁棒跟踪控制 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44 (4): 129-139.
- [20] 弋英民, 王柯颖, 苑易伟, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的固定翼无人机姿态解算方法 [J]. 小型微型计算机系统, 2023, 44 (11): 2384-2391.
- [21] 万春秋, 詹韬, 李擎, 等. 基于 PSO 的飞行器姿态智能控制技术研究 [J]. 计算机仿真, 2024, 41 (3): 64-70.
- [22] 张杰, 毛鹏飞, 杨晓宇, 等. 基于 DFT 算法的电力巡检无人机循迹检测系统设计 [J]. 湘潭大学学报 (自然科学学报), 2022, 44 (2): 107-115.
- [23] 史浩然, 卢发兴, 祁江鑫, 等. 基于辅助信标的无人机协同目标跟踪 [J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44 (7): 2302-2310.
- [24] 李永福, 文跃洲, 黄龙旺. 基于改进扩展状态观测器的四旋翼无人机轨迹鲁棒跟踪控制 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44 (4): 129-139.