

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.005

农用无人机移动补给平台自主降落算法与试验

祖林禄^{1,2} 侯加林^{1,3} 陈民¹ 王红¹ 苏斐^{1,3}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东农业大学山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018;
3. 山东农业大学山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018)

摘要:为实现根据无人机作业位置改变中途补充能源或喷洒物的起降地点,增加无人机有效作业时间,提高无人机作业效率,设计了无人机移动补给平台。通过研究农用无人机自主降落过程,提出一种基于模糊逻辑和比例积分微分(Proportional-integral and derivative, PID)分段控制的农用无人机跟踪降落算法,该算法既拥有PID算法的高精度,又兼顾模糊控制算法响应速度快、超调量小、鲁棒性强的优点。目标轨迹跟踪预测由粒子滤波器跟踪算法和轨迹拟合算法相结合进行求解。仿真和现场试验表明,与单一的PID算法和模糊逻辑算法相比,分段控制算法能够把农用无人机对移动补给平台的跟踪误差缩小到6.7 cm以内,在移动补给平台上的降落精度控制在7.2 cm以内。

关键词: 农用无人机; 移动补给平台; 自主降落; 运动目标跟踪; 模糊逻辑控制; PID分段控制

中图分类号: S25; TP273⁺.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)03-0043-08 OSID: 

Investigation and Experiment on Autonomous Landing Algorithm of Agricultural Unmanned Aerial Vehicle Movable Supply Platform

ZU Linlu^{1,2} HOU Jialin^{1,3} CHEN Min¹ WANG Hong¹ SU Fei^{1,3}

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China 3. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: The movable supply platform of agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) can change the landing site of midway supplying according to the variation of the UAVs location. It was mainly focused on the autonomous landing of agricultural UAVs on movable supply platform. The main novelty was that a piecewise control algorithm which combined the fuzzy logic control and PID control was proposed to control the landing process. When the distance error between the agricultural UAV and the movable supply platform was larger than the preset threshold, the fuzzy logic control was used to control the landing process due to its quick response character. When the distance error was smaller than the preset threshold, the PID control was used due to its high precision character. The detailed control process was as follows, firstly, in order to increase the recognition accuracy of UAV on movable platform, the upper part of the movable platform was designed to be a structure symmetry "H" pattern and the lower part was designed to be a contrasting QR code pattern. The UAV could use the optical flow algorithm to detect the black and white points, such that the relative speed between UAV and the platform could be calculated. Secondly, the dynamic model of UAV was constructed and then transformed its coordinates to the global coordinates to calculate the position error between agricultural UAV and the platform. Thirdly, the particle filter tracking algorithm and fitting function was used to fit the movement path of the UAV. At last, the proposed control method was used to control the UAV move along the fitted path. Using correlation coefficient index the Matlab simulation results proved the superiority of the proposed control method in tracking step signal and sinusoidal signal compared with individual fuzzy control method and PID control method. Furthermore, field test proved the control method could reduce the tracking error between UAV and movable supply platform to no more than 6.7 cm and the landing accuracy on movable supply to no more than 7.2 cm.

收稿日期: 2019-07-18 修回日期: 2019-08-26

基金项目: 国家现代农业产业技术体系特色蔬菜创新团队项目(CARS24D01)

作者简介: 祖林禄(1988—),男,讲师,博士生,主要从事智能农机装备与农业信息化研究, E-mail: zulinlu@sdau.edu.cn

Key words: agricultural UAV; movable supply platform; autonomous landing; moving target tracking; fuzzy logic control; PID sectional control

0 引言

近年来,农业航空技术快速发展,电动多旋翼农用无人机(简称农用无人机)由于具有可垂直起降、空中悬停、操作维护简便等优点,在农业作业中受到广泛关注^[1]。但续航能力和喷洒物补给方法是制约农用无人机工作时间和工作效率的重要因素^[2]。

农用无人机移动补给平台的关键技术之一是无无人机能够自主降落到运动的补给平台上。农用无人机降落过程涉及运动目标识别、运动轨迹预估、跟踪控制器设计等多项技术^[3],对降落算法要求极高,包括目标识别算法快速、准确,轨迹预估算法实时、稳定,以及跟踪控制器响应速度快、跟踪误差小等。在应对运动速度较快的目标时,若采用单一PID控制,则系统响应速度较慢^[3]。为此,本文提出一种基于模糊逻辑和PID分段控制的算法,并进行仿真试验和现场试验,以实现农用无人机对运动目标的稳定跟踪和在移动补给平台上的降落。

1 目标跟踪轨迹拟合

1.1 问题描述

农用无人机空基平台的目标检测跟踪不仅要求算法能适应运动背景、实时性高,还要求算法对环境变化、目标尺度变化、目标速度变化等方面具有很好的鲁棒性。背景减除法、帧差法、光流法^[3]是静态背景下的运动目标检测算法,无法满足本文要求。MeanShift算法^[4]因算法简单、收敛条件宽松而具有较好的实时性,但是无法适应目标尺度变化、运动速度较快等情况。Camshift算法^[5]虽然实时性较好,但难以适应复杂背景下的目标跟踪。

农用无人机对补给平台的跟踪属于复杂运动背景下的快速跟踪,而且两者都处于非线性、非高斯类型的机动状态,此时对目标进行位置跟踪属于非线性系统状态估计问题^[6],所以上述5种算法均不能满足此类要求。本文提出一种解决策略:采用粒子滤波跟踪算法并配合轨迹拟合算法完成对运动目标的位置跟踪,将拟合出的预估轨迹作为期望路径输入农用无人机飞行控制器。

1.2 粒子滤波算法

粒子滤波是一种基于蒙特卡洛方法和递推贝叶斯估计的统计滤波方法。通过因子采样法对状态量进行更新,根据 $t-1$ 时刻的所有粒子(即样本)的概率重新进行采样,高概率粒子被采样次数多,低概率

粒子则可能被舍弃,得到 t 时刻的粒子。 t 时刻的所有粒子对应的测量值为 t 时刻的粒子赋予新的概率,用于 $t+1$ 时刻粒子的生成^[7]。粒子滤波算法归纳如下:

(1) 粒子初始化:由先验概率 $p(x_0)$ 构成粒子群 $\{x_0^i\}_{i=1}^{N_s}$,所有粒子权值为 $\frac{1}{N_s}$ 。

(2) 状态更新:在 t 时刻,由观测方程 $p(z_t|x_t^i)$ 更新所有粒子权值

$$\omega_t^i = \omega_{t-1}^i p(z_t|x_t^i) = \omega_{t-1}^i p_{e_t}(z_t - h(x_t^i)) \quad (i=1,2,\dots,N_s) \quad (1)$$

并归一化

$$y_t^i = \frac{\omega_t^i}{\sum_{i=1}^{N_s} \omega_t^i} \quad (2)$$

则可获得时刻 t 位置参数 x 的最小均方估计为

$$\hat{x}_t \approx \sum_{i=1}^{N_s} y_t^i x_t^i \quad (3)$$

(3) 重采样:得到更新的粒子集合 $\{x_{0:t}^{i*}\}_{i=1}^{N_s}$ 。

(4) 状态预测:通过状态方程 f 预测未知参数 x_{t+1}^i 。

(5) 时刻 $t=t+1$,转到步骤(2)。

粒子滤波适用于非高斯背景的非线性随机系统,对本文所研究的对非线性、非高斯类型的运动目标跟踪,能够使跟踪精度逼近最优估计,有助于提升识别跟踪算法的准确率。

1.3 轨迹预测

1.3.1 轨迹拟合函数的选择

所选的拟合函数应能准确描述一段时间内的运动特性,因此选取可表征大部分目标运动轨迹的二次函数作为拟合函数^[8]。

1.3.2 拟合函数参数求解

(1) 设二次函数表达式为

$$\hat{y} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \quad (4)$$

此拟合函数共有3个未知参数,选用最小二乘法,通过最小化试验数据误差的平方和估计拟合函数的未知参数。

(2) 误差平方和为

$$E^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2)]^2 \quad (5)$$

(3) 由多元函数求极值条件得(式(5)中 $E \rightarrow 0$)

$$\sum_{i=1}^n (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2) x_j^i = y_i x_j^i \quad (j=0,1,2) \quad (6)$$

(4) 将式(6)转换成矩阵形式,并简化得

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ 1 & x_3 & x_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

可得 $EA = Y$ (8)

$$A = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (9)$$

$X^T X$ 为奇异矩阵,所以 $A = [a_0 \ a_1 \ a_2]^T$ 存在唯一最优解。为保证跟踪效果,采用 15 组最新数据实时更新拟合函数的参数。

1.4 目标跟踪流程

为保证农用无人机准确快速地跟踪运动目标,需要把粒子滤波跟踪算法输出的目标位置坐标利用拟合函数进行运动轨迹拟合,以实现当目标因遮挡而暂时性消失时保证农用无人机按照拟合轨迹飞行,大大提升了农用无人机在非线性和随机环境中的跟踪能力^[9]。跟踪算法具体实现流程如图 1 所示。

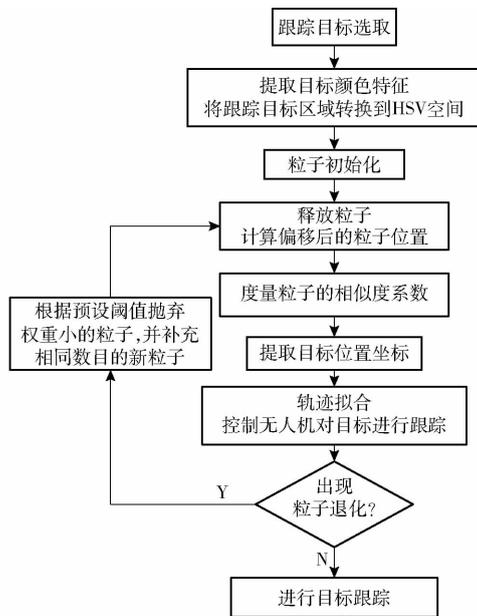


图 1 跟踪算法具体实现流程

Fig. 1 Specific implementation process of tracking algorithm

2 模糊逻辑 PID 分段控制算法设计

2.1 PID 控制器

PID 控制器因原理简单、理论完善、功能强大得到广泛应用,包括比例控制器、积分控制器、微分控制器^[10]。比例控制器中输出与误差成比例关系;积分控制器可加速系统趋近设定值,并消除稳态误差;微分控制器可提升整定时间及系统稳定性^[11]。本文采用串级 PID 控制算法,以农用无人机与运动目标的位置偏差为外环输入,以农用无人机接近运动目标的速度偏差为内环输入,确保农用无人机能快速、准确、稳定跟踪运动目标。若定义 e_{vk} 为速度偏差, u_{vk} 为串级 PID 内环输出,则串级 PID 控制器内

环可表达为

$$u_{vk} = k_{pv} e_{vk} + k_{iv} \sum_{i=0}^k e_{vi} + k_{dv} (e_{vk} - e_{vk-1}) \quad (10)$$

式中 k_{pv} 、 k_{iv} 、 k_{dv} ——比例、积分、微分系数

2.2 模糊逻辑控制器

2.2.1 结构设计

本文中模糊逻辑控制器为双输入单输出系统,输入变量为距离误差 e 和距离误差变化率 \dot{e} ,输出变量为控制信号 U 。距离误差 e 和距离误差变化率 \dot{e} 值域为 $[-150, 150]$,控制信号 U 值域为 $[-100, 100]$ ^[12]。

2.2.2 模糊逻辑控制规则设计

模糊控制器设计中选择输入语言变量的词集为 {正大 (PB)、正中 (PM)、正小 (PS)、零 (Z)、负小 (NS)、负中 (NM)、负大 (NB)},选择输出语言变量的词集为 {正大 (PB)、正中 (PM)、正小 (PS)、零 (Z)、负小 (NS)、负中 (NM)、负大 (NB)}。本文选用三角形和梯形混合型隶属度函数、7 级输入变量、7 级输出变量。图 2a、2b 为模糊逻辑控制器的输入变量隶属度函数及其分布,图 2c 为输出变量隶属度函数及其分布。

2.2.3 去模糊化

去模糊化的目的是将模糊输出结果清晰化,最常用的算法有重心法、加权平均法和最大隶属度法^[13]。本文采用加权平均法,首先计算输出量模糊集 U_1 中的元素 y_i ($i = 0, 1, \dots, n$) 与其隶属度 $\mu_{U_1}(y_i)$ 的乘积 $y_i \mu_{U_1}(y_i)$ ($i = 0, 1, \dots, n$),然后计算所得乘积和 $\sum_{i=1}^n y_i \mu_{U_1}(y_i)$,对于隶属度和 $\sum_{i=1}^n \mu_{U_1}(y_i)$ 的平均值 y_0 ,其表达式为

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu_{U_1}(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{U_1}(y_i)} \quad (11)$$

2.3 模糊逻辑 PID 分段控制系统结构

经典 PID 控制器虽然控制精度较高,但其响应速度慢、超调量大。模糊控制具有响应速度快、超调量小的优点,却存在导致控制精度降低的问题。为满足农用无人机追踪降落过程中响应速度快、超调量小的控制目标,本文提出一种改进策略:以误差输入量 e 与设定阈值的比较结果为转换依据,进行 PID 控制器和模糊逻辑控制器的分段控制,且此分段控制系统不影响 PID 控制器与模糊逻辑控制器的独立性。

本文设计的分段控制系统结构如图 3 所示。在农用无人机与运动目标相距较远时,距离误差 e 大

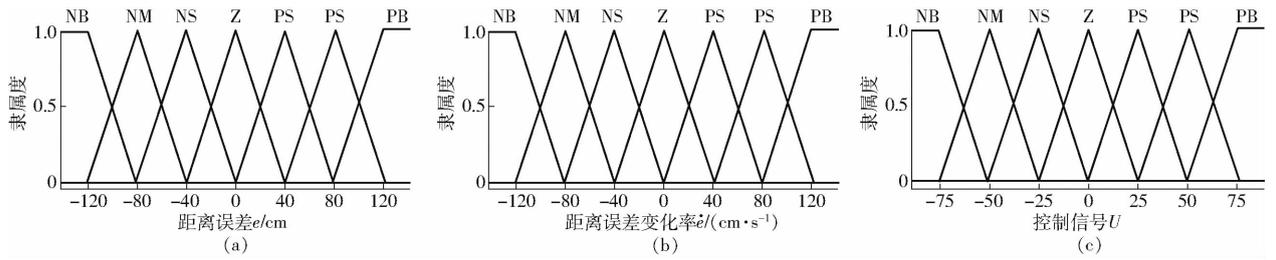


图2 隶属度函数及其分布

Fig. 2 Membership function and their distribution

于设定阈值,此阶段由模糊逻辑控制器对农用无人机实施控制。因其响应速度快的优点可以使农用无人机快速接近移动目标,避免出现因跟踪速度慢而丢失跟踪目标的问题。当距离误差 e 小于设定阈值时,由 PID 控制器对农用无人机实施控制。其控制精度高的优点可满足农用无人机在降落过程中实现对移动平台的精确锁定,防止因农用无人机与移动平台间存在位置偏差而导致农用无人机难以成功降落到移动平台上。

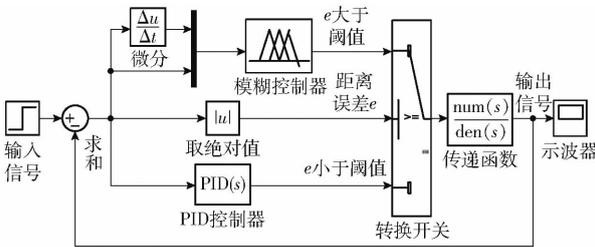


图3 分段控制系统结构图

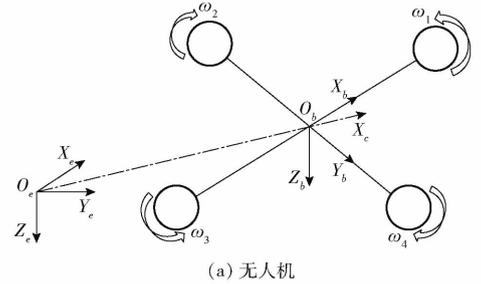
Fig. 3 Sectional control system structure diagram

3 系统整体功能实现

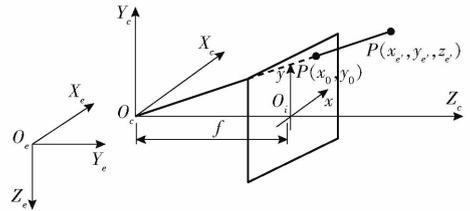
3.1 农用无人机动力学模型构建

四旋翼农用无人机的运动包括3个轴向线运动和绕3个轴向角运动^[14]。为准确描述农用无人机在三维空间内的姿态、位置、速度等信息,需要定义2个三维笛卡尔直角坐标系。如图4所示,全局坐标系为 O_e ,采用 NED(North(北)-East(东)-Down(下))坐标表示方法^[15]。机体坐标系为 O_b ,坐标原点取机体的质心。机体坐标系的 $X_b - Y_b - Z_b$ 方向定义为机身的前-右-下。在机体坐标系下,农用无人机绕 Z_b 轴运动为偏航(yaw)运动,绕 Y_b 轴运动为俯仰(pitch)运动,绕 X_b 轴运动为横滚(roll)运动。

假设农用无人机在全局坐标系 O_e 中的速度为 V ,则 $V = [V_x \ V_y \ V_z]^T$ 、重力加速度为 g 、农用无人机质量为 m ;理想状况下所有电机产生的总升力为 f_A ;农用无人机的转动惯量为 J ;基向量 $e = [0 \ 0 \ 1]^T$; R 为机体坐标系相对于全局坐标系的旋转矩阵^[16];农用无人机相对于全局坐标系的角速



(a) 无人机



(b) 摄像机

图4 坐标图

Fig. 4 Coordinate diagrams

度为 $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$,可以用矩阵表达为

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

农用无人机在全局坐标系中位置可用 $P = [p_x \ p_y \ p_z]^T$ 表示。农用无人机动力学方程可表示为^[16]

$$\begin{cases} \dot{V} = ge + \frac{1}{m} R f_A e \\ \dot{R} = R \Omega \\ \dot{\omega} = J^{-1} \Omega J \omega \\ \dot{P} = V \end{cases} \quad (13)$$

3.2 图像坐标系的变换

为方便求出农用无人机与所追踪运动目标的位置偏差,需要将该运动目标在摄像头中的三维坐标变换到全局坐标系中。如图4所示,全局坐标系为 O_e ,摄像机坐标系为 O_c ,成像平面坐标系为 O_i , f 为摄像机焦距, T 为空间变换的平移矢量,表示全局坐标系原点在摄像机坐标系中的坐标。假设 $(x_c, y_c, z_c, 1)$ 、 $(x_e, y_e, z_e, 1)$ 分别为空间内任一点在摄像机坐标系和全局坐标系下的齐次坐标,则两坐标系间的变换关系为

$$s \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_r & \mathbf{T} \\ \mathbf{O} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_e \\ z_e \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, s 为任意非零参数, 三维坐标系旋转参数存储在 3×3 正交单位矩阵 \mathbf{R}_r 中, $\mathbf{O} = (0, 0, 0)$ 为零矢量, \mathbf{M} 为摄像机外部参数矩阵, 决定了摄像机光轴在全局坐标系中的坐标, 可将全局坐标系下的坐标映射到摄像机坐标系中。

3.3 不同坐标系下误差的计算

把农用无人机通过 GPS 和气压计等传感器得到的在大地坐标系下的空间位置坐标变换到全局坐标系 O_e 下得到机体坐标 $P_N = (x_N, y_N, z_N)$, 若摄像机获取并转换得到的运动目标在全局坐标系 O_e 中的坐标为 $x(t) = (x'_i, y'_i, z'_i)$, 可知在全局坐标系 O_e 下农用无人机与运动目标的距离误差为 $e_p = (x_N - x'_i, y_N - y'_i, z_N - z'_i)$ 。把滤波后的陀螺仪传感器、加速度传感器和地磁罗盘传感器数据进行实时解算求出横滚角 φ 、俯仰角 θ 及偏航角 ϕ 。全局坐标系 O_e 变换到机体坐标系 O_b 变换矩阵^[17]为

$$\mathbf{R}_e^b =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\theta & \sin\varphi\cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\phi\sin\theta\cos\varphi - \cos\phi\sin\varphi & \sin\phi\sin\theta\sin\varphi + \cos\phi\cos\varphi & \cos\theta\sin\phi \\ \cos\phi\sin\theta\cos\varphi - \sin\phi\sin\varphi & \cos\phi\sin\theta\sin\varphi - \sin\phi\cos\varphi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}$$

再通过 $e_e = \mathbf{R}_e^b e_p$ (15) 可得在机体坐标系 O_b 下用于输入模糊逻辑 PID 混合控制器的误差 $e_e = (x_e, y_e, z_e)$ 。其中 x_e, y_e 经过模糊逻辑 PID 混合控制算法处理后的结果可分别用于控制农用无人机的横滚、俯仰运动, 以完成对运动目标的跟踪, z_e 为机体与运动目标高度误差, 在机体下降到移动补给平台的过程中消除^[18]。

3.4 自主降落流程

以字母 H 为主要标志的降落平台结构垂直对称、清晰且便于识别, H 的开口方向可用于校正农用无人机降落方向。但是此降落平台图像特征过于简单, 农用无人机在运动过程中难以把此图像精确锁定在正下方并实施降落^[3]。本文设计一种带有辅助识别区的降落平台, 如图 5 所示, 平台图案分为上下两部分: 上部为降落区, 以 H 图案为主要标志; 下部为辅助识别区, 以二维码图案为主要标志。下部辅助识别区的黑白色块图案颜色对比鲜明, 能够增加运动平台的颜色可识别特征, 有助于农用无人机对降落平台的精确锁定^[19]。此外, 农用无人机可利用光流算法检测黑白色块图像中光点与暗点的移动来计算运动平台相对于农用无人机的移动速度,

并把此相对速度作为农用无人机降落过程中的参考变量, 进一步提升降落阶段的稳定性。

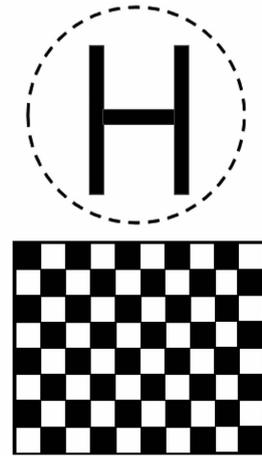


图5 以字母 H 为主要标志的降落平台

Fig. 5 Landing platform with letter H as main symbol

农用无人机在移动补给平台上自主降落可分解为 2 个阶段: 第 1 阶段, 模糊逻辑算法主导控制下的追踪阶段; 第 2 阶段, PID 算法主导控制下的降落阶段。跟踪降落过程的流程如图 6 所示。其中 x_e 为 x 轴方向误差, y_e 为 y 轴方向误差^[20]。

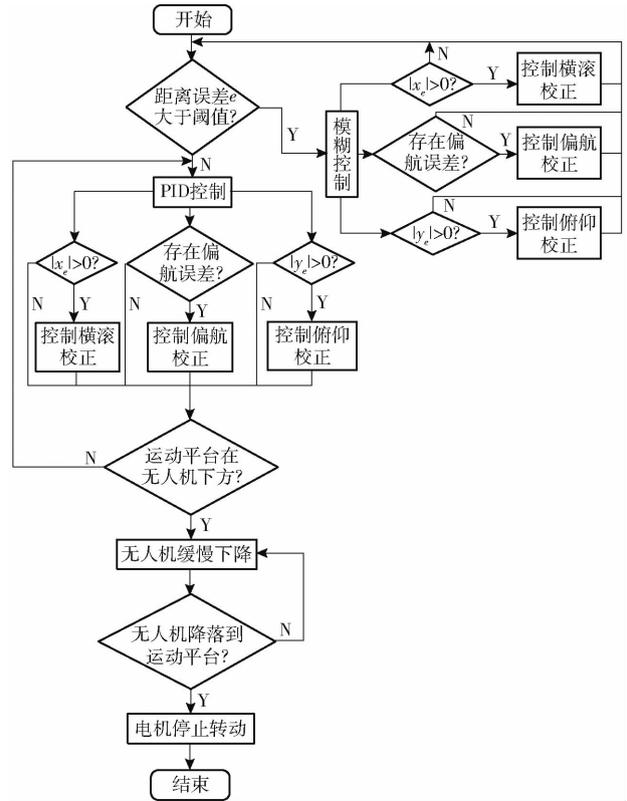


图6 跟踪降落过程流程图

Fig. 6 Flow chart of tracking landing process

4 试验结果

为更好地验证模糊逻辑 PID 分段控制算法的优越性, 设置模糊逻辑控制、PID 控制为对照试验, 并

分别进行软件仿真试验及现场试验。

4.1 Matlab 仿真试验

在 Simulink 中搭建仿真试验平台,包括期望位置模块(用于输入拟合函数拟合预测的期望路径)、当前位置模块(表示农用无人机当前运动状态和空间位置)、模糊逻辑 PID 分段控制器模块(处理输入的距离偏差并按照相应的控制规则转换为控制量输出)、电机模块(在输出控制量的控制下改变转速以完成农用无人机的横滚、俯仰、偏航运动)和机体模型模块(农用无人机动力学模型)。

3种算法对阶跃信号和正弦信号的跟踪仿真结果如图7所示。为衡量3种算法的控制效果,对阶跃信号跟踪时控制过程上升时间、超调量、调节时间和稳态误差指标进行求解,结果如表1所示。可得模糊逻辑 PID 分段控制算法比 PID 算法超调量低 12%、调节时间缩短 2 s;相比于模糊逻辑算法稳态误差低 0.12 cm。对正弦信号跟踪时,应用皮尔逊相关系数衡量农用无人机实际运动轨迹和期望的正弦轨迹的拟合程度,模糊逻辑算法作用时相关系数为 0.970, PID 算法作用时相关系数为 0.981,模糊逻辑 PID 分段控制算法作用时的相关系数最高,为 0.998^[21]。

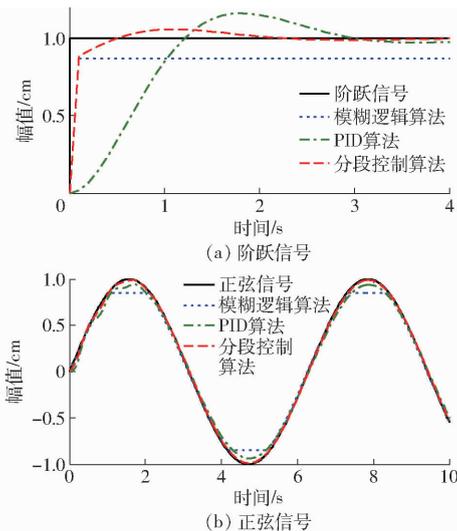


图7 农用无人机对阶跃信号和正弦信号的跟踪结果

Fig.7 UAV tracking results of step and sine signals

表1 3种控制算法控制效果对比

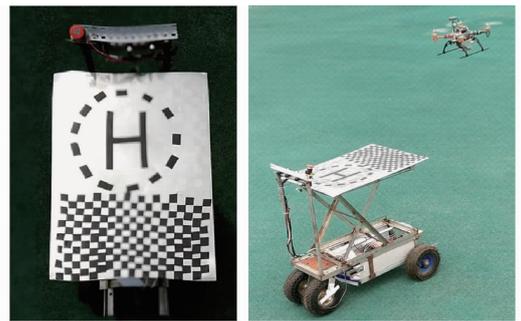
Tab.1 Control performance comparison of three control algorithms

控制算法	上升时间/s	超调量/%	调节时间/s	稳态误差/cm
PID 算法	2.4	17	6.0	0
模糊逻辑算法	0.3		0.3	0.12
分段控制算法	1.0	5	4.0	0

4.2 现场试验

现场试验采用的平台技术参数为:农用无人机

轴距 330 mm、1 400 kV 直流无刷电机、8 寸碳纤维浆、好盈 40 A 无刷电调、领航者飞控、格式 11.1 (3S) 锂电池、Ublox - NEO - M8N GPS 模块、LenaCV 视觉摄像头、NVIDIA Jetson TX2 图像处理器。试验在山东农业大学体育场完成,如图8所示。将控制算法分别设置为模糊逻辑算法、PID 算法、模糊逻辑 PID 分段算法各进行了 10 次测试,试验结果如表2所示。由表2可知,模糊逻辑 PID 分段控制算法与 PID 算法相比,平均响应时间由 1.1 s 减少到 0.6 s 左右,响应速度提升约 45.8%,且降落时振荡情况较轻;与模糊逻辑算法相比,跟踪误差小 10 cm 左右,降低约 72%;在降落成功率方面,分段控制算法比 PID 算法高 40%,比模糊逻辑算法高 70%;10 次测试降落误差最大为 7.2 cm。



(a) 无人机视角降落平台

(b) 移动降落过程

图8 现场试验图

Fig.8 Real experiment pictures

表2 现场试验结果

Tab.2 Results of field experiments

参数	算法		
	PID	模糊逻辑	分段控制
响应时间/s	0.8 ~ 1.6	0.2 ~ 1.3	0.2 ~ 1.1
跟踪误差/cm	3.3 ~ 10.1	8.4 ~ 21.5	1.8 ~ 6.7
成功降落次数	5	2	9
降落时振荡情况	严重	中等	较轻
降落误差/cm	7.5 ~ 13.8	12.4 ~ 19.6	2.3 ~ 7.2

5 结论

(1)分段控制算法在补给平台突然加速、急转弯等运动状态突变情况下的响应速度比单一 PID 控制器提升 45.8%;在农用无人机跟踪车载降落平台过程中的超调量比单一 PID 控制器控制低 12%。

(2)分段控制算法在控制农用无人机对车载降落平台进行跟踪时的跟踪误差比单一模糊逻辑控制算法降低 72%。

(3)针对单一 H 图案降落平台图像特征过于简单的问题,提出一种带有辅助识别区的降落平台,配合模糊逻辑 PID 分段控制算法可使农用无人机在垂直降落过程中的误差缩小至 7.2 cm 内。

参 考 文 献

- [1] 周志艳,明锐,臧禹,等. 中国农业航空发展现状及对策建议[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 1-13.
ZHOU Zhiyan, MING Rui, ZANG Yu, et al. Development status and countermeasures of agricultural aviation in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 1-13. (in Chinese)
- [2] 张东彦,兰玉彬,陈立平,等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 53-59.
ZHANG Dongyan, LAN Yubin, CHEN Liping, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 53-59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141009&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.009. (in Chinese)
- [3] 贾配洋,彭晓东,周武根. 四旋翼无人机自主移动降落方法研究[J]. 计算机科学, 2017, 44(增刊2): 520-523.
JIA Peiyang, PENG Xiaodong, ZHOU Wugen. Research on autonomous landing of quad-rotor UAV [J]. Computer Science, 2017, 44(Supp.2): 520-523. (in Chinese)
- [4] HE K, ZHOU D, ZHANG X, et al. Multi-focus: focused region finding and multi-scale transform for image fusion[J]. Neurocomputing, 2018, 320: 157-170.
- [5] GUO L, LI L, ZHAO Y, et al. Pedestrian tracking based on camshift with Kalman prediction for autonomous vehicles[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, 13(120):1-9.
- [6] 瞿中, 安世全. 视频序列运动目标检测与跟踪[M]. 北京:科学出版社, 2018:46-49.
- [7] 朱志宇. 粒子滤波算法及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2010: 257.
- [8] 李新颖,刘凯,黄海燕. 多线函数法在曲线拟合中的应用研究[J]. 计量学报, 2018, 39(5): 716-719.
LI Xinying, LIU Kai, HUANG Haiyan. Application of multi-line function method in curve fitting[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(5): 716-719. (in Chinese)
- [9] 王东,范叶满,薛金儒,等. 基于GNSS与视觉融合的山地果园无人机航迹控制[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 20-28.
WANG Dong, FAN Yeman, XUE Jinru, et al. Flight path control of UAV in mountain orchards based on fusion of GNSS and machine vision[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 20-28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190402&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.002. (in Chinese)
- [10] 黄友锐,曲立国. PID控制器参数整定与实现[M]. 北京:科学出版社, 2010:21-24.
- [11] 吴成富,刘小齐,袁旭. 四旋翼无人机建模及其PID控制律设计[J]. 电子设计工程, 2012, 20(16): 68-70.
WU Chengfu, LIU Xiaoqi, YUAN Xu. Modeling and PID control for a quadrotor[J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(16): 68-70. (in Chinese)
- [12] 康升征,吴洪涛,杨小龙,等. 压电微定位系统自适应鲁棒有限时间跟踪控制[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 403-410.
KANG Shengzheng, WU Hongtao, YANG Xiaolong, et al. Adaptive robust finite-time tracking control for piezoelectric micropositioning systems[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 403-410. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180849&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.049. (in Chinese)
- [13] 曾光奇. 模糊控制理论与工程应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2006.
- [14] 王宇,陈海涛,李海川. 基于引力搜索算法的植保无人机三维路径规划方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 28-33, 21.
WANG Yu, CHEN Haitao, LI Haichuan. 3D path planning approach based on gravitational search algorithm for sprayer UAV[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 28-33, 21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180204&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.004. (in Chinese)
- [15] 廖懿华,张铁民,兰玉彬. 农田信息采集用多旋翼无人机姿态稳定控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 88-98.
LIAO Yihua, ZHANG Tiemin, LAN Yubin. Design and test of attitude stabilization control system of multi-rotor unmanned aerial vehicle applied in farmland information acquisition[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 88-98. (in Chinese)
- [16] 齐咏生,孟学斌,高学金,等. 基于视觉标志检测的旋翼无人机姿态估计方法[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 28-40, 139.
QI Yongsheng, MENG Xuebin, GAO Xuejin, et al. Pose estimation method of rotor UAV based on visual mark detection[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 28-40, 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190604&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.004. (in Chinese)
- [17] 陈黎卿,许泽镇,解彬彬,等. 无人驾驶喷雾机电控系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 122-128.
CHEN Liqing, XU Zezhen, XIE Binbin, et al. Design and test of electronic control system for unmanned drive sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 122-128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190113&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.

013. (in Chinese)

- [18] 臧英,何新刚,周志艳,等. 电动多旋翼植保无人机升力特性综合测评方法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 69-77.
ZANG Ying, HE Xingang, ZHOU Zhiyan, et al. Comprehensive evaluation method for lifting characteristics of electric multi-rotor UAV for plant protection[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 69-77. (in Chinese)
- [19] 张宏鸣,王斌,韩文霆,等. 基于全卷积神经网络的灌区无人机正射影像渠系提取[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 241-248.
ZHANG Hongming, WANG Bin, HAN Wenting, et al. Extraction of irrigation networks in irrigation area of UAV orthophotos based on fully convolutional networks[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 241-248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190627&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.027. (in Chinese)
- [20] 李盛辉,田光兆,姬长英,等. 自主导航农业车辆的全景视觉多运动目标识别跟踪[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 1-7.
LI Shenghui, TIAN Guangzhao, JI Changying, et al. Multiple moving objects tracking based on panoramic vision for autonomous navigation of agricultural vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 1-7. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150101&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.001. (in Chinese)
- [21] 方旭,刘金琨. 四旋翼无人机动面控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(8): 1777-1784.
FANG Xu, LIU Jinkui. Dynamic surface control for quadrotor unmanned air vehicle [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(8): 1777-1784. (in Chinese)

(上接第 33 页)

- [8] 赵珍,王福利,贾明兴,等. 缓变故障的概率故障预测方法研究[J]. 控制与决策, 2010, 25(4): 572-576.
ZHAO Zhen, WANG Fuli, JIA Mingxing, et al. Research on probabilistic fault prediction of incipient fault[J]. Control and Decision, 2010, 25(4): 572-576. (in Chinese)
- [9] 谷善茂,张妮,刘云龙. 基于累积和等距映射的缓变故障检测方法[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(6): 251-254, 305.
GU Shanmao, ZHANG Ni, LIU Yunlong. Ramp fault detection method based on CASUM-ISOMAP[J]. Computer Applications and Software, 2016, 33(6): 251-254, 305. (in Chinese)
- [10] 高运广,王仕成,刘志国,等. 一种基于 LS-SVM 的联邦滤波故障检测方法[J]. 控制与决策, 2011, 26(9): 1433-1435, 1440.
GAO Yunguang, WANG Shicheng, LIU Zhiguo, et al. Fault detection method based on LS-SVM for federated Kalman filter [J]. Control and Decision, 2011, 26(9): 1433-1435, 1440. (in Chinese)
- [11] 熊智,邵慧,华冰,等. 改进故障隔离的容错联邦滤波[J]. 航空学报, 2015, 36(3): 929-938.
XIONG Zhi, SHAO Hui, HUA Bing, et al. An improved fault tolerant federated filter with fault isolation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(3): 929-938. (in Chinese)
- [12] 王融,刘建业,熊智,等. 基于序贯概率映射的组合导航自适应容错算法[J]. 控制与决策, 2014, 29(10): 1861-1865.
WANG Rong, LIU Jianye, XIONG Zhi, et al. Adaptive fault-tolerant algorithm based on sequential probability mapping for integrated navigation[J]. Control and Decision, 2014, 29(10): 1861-1865. (in Chinese)
- [13] 周俊,张鹏. 基于灰色预测的农业机器人 GPS 导航系统硬故障隔离[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 165-168, 177.
ZHOU Jun, ZHANG Peng. Hard fault isolation of GPS navigation system based on gray prediction for agricultural robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 165-168, 177. (in Chinese)
- [14] 秦永元,张洪钺,王叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2012: 259-260.
- [15] GROVES P D. Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems[M]. Norwood: Artech House Publishers, 2011: 641-642.
- [16] 徐力平,赵忠华,张炎华. 导航传感器故障检测策略[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(7): 966-969.
XU Liping, ZHAO Zhonghua, ZHANG Yanhua. Navigation sensor failure detecting tactic[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(7): 966-969. (in Chinese)
- [17] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 2005: 22-24.
- [18] 全伟,刘百奇,宫晓琳,等. 惯性/天文/卫星组合导航技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2011: 150-151.
- [19] 韩辅君,徐静,宋世忠. 基于低成本多传感器的自适应组合滤波[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 3007-3015.
HAN Fujun, XU Jing, SONG Shizhong. Adaptive attitude estimation filtering with low-cost multi-sensors for MAHRS[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 3007-3015. (in Chinese)
- [20] 马传焱,熊智,许建新,等. 一种联邦滤波信息共享分配算法[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(3): 347-353.
MA Chuanyan, XIONG Zhi, XU Jianxin, et al. Federated filter information sharing allocation algorithm[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013, 21(3): 347-353. (in Chinese)