

文章编号 1004-924X(2023)23-3517-13

视觉辅助的交叉双旋翼无人直升机 自主降落控制系统

席鹏航¹, 李京阳^{1,2*}, 印明威², 宝音贺西^{3,4}

(1. 天津工业大学 机械工程学院, 天津 300387;

2. 北京清航紫荆装备科技有限公司, 北京 102101;

3. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084;

4. 内蒙古工业大学 航空学院, 呼和浩特 010051)

摘要: 为了使交叉双旋翼无人直升机在全球定位系统(Global Positioning System, GPS)信号干扰的情况下实现平稳的自主降落, 采用AprilTags视觉基准系统中的TAG36H11图像作为降落地标, 并基于该降落地标设计了一种视觉辅助的交叉双旋翼无人直升机自主降落控制系统。对降落地标进行图像预处理, 基于Canny边缘检测、Hough变换直线检测和矩形检测, 提取降落地标的特征信息, 然后通过相机成像原理和坐标系转换解算出无人直升机的相对位姿信息, 针对GPS信号干扰的情况下提出了一种利用Hough变换直线检测解算偏航角的算法, 最后设计了一种串级PID控制结构的位姿控制算法, 位置控制中设计了一种开方控制器, 用于限制无人直升机的极限期望位置和最大加速度。同时, 在姿态控制中设计了一种交叉双旋翼无人直升机姿态控制机构, 通过6个数字舵机控制倾斜盘的倾角实现交叉双旋翼的周期变距, 改变无人直升机的飞行姿态。通过Mission Planner飞控地面站进行仿真验证, 将视觉处理系统与飞行控制系统组合, 仿真结果表明, 视觉辅助的飞行控制系统可以很好地跟踪无人直升机的期望位置。经过实验验证, 姿态角度偏移量控制在4°以内, 位置偏移量控制在0.05 m以内, 可以实现交叉双旋翼无人直升机视觉辅助的自主降落。

关键词: 视觉辅助; 无人直升机; 交叉双旋翼; 自主降落; 位置控制; 姿态控制

中图分类号: V249 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233123.3517

Intermeshing-rotor unmanned helicopter autonomous landing control system based on vision aid

XI Penghang¹, LI Jingyang^{1,2*}, YIN Mingwei², BAOYIN Hexi^{3,4}

(1. School of Mechanical Engineering, TianGong University, Tianjin 300387, China;

2. Beijing TsingAero Armament Technology Co. Ltd, Beijing 102101, China;

3. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. School of Aviation, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

* Corresponding author, E-mail: 18911638156@163.com

Abstract: To achieve a smooth autonomous landing of the intermeshing-rotor unmanned helicopter in the presence of GPS signal interference, the TAG36H11 image from the AprilTags visual fiducial system was

收稿日期: 2023-03-22; 修订日期: 2023-04-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 11602123); 内蒙古自治区杰出青年培育基金资助项目(No. 2019JQ002)

used as the landing landmark. A vision assisted autonomous landing control system for the intermeshing-rotor unmanned helicopter was designed based on this landmark. The process involved image pre-processing of the landing landmark, followed by the extraction of feature information using Canny edge detection, Hough transform straight line detection, and rectangle detection. The system then solved for the relative position and attitude of the unmanned helicopter using camera imaging principles and coordinate system conversion. An algorithm to determine the yaw angle using Hough transform linear detection was proposed, specifically for scenarios with GPS signal interference. The control system incorporated a cascade PID control structure, including a square root controller in position control to limit the desired position and maximum acceleration of the helicopter. In addition, an intermeshing-rotor unmanned helicopter attitude control mechanism was designed, which adjusted the cyclic pitch of the intermeshing-rotor by controlling the swashplate angle with six digital servos. This mechanism was pivotal in altering the flight attitude of unmanned helicopters. The system's effectiveness was verified through simulations with the Mission Planner flight control ground station, which combined the vision processing system with the flight control system. These simulations show that the vision-assisted flight control system can accurately track the desired position of the unmanned helicopter. After experimental verification, it is found that the attitude angle offset is controlled within 4° and the position offset within 0.05 m, demonstrating the system's capability to realize the intermeshing-rotor unmanned helicopter's vision-assisted autonomous landing.

Key words: visual aid; intermeshing-rotor unmanned helicopter; autonomous landing; position control; attitude control

1 引 言

交叉双旋翼无人直升机具有载重大、侧向稳定性好等优点^[1],非常适合进行运输、起重和吊运等工作。自主降落是完成这些工作的关键一环^[2]。自主降落是指无人直升机利用机载导航设备、环境感知设备、飞行控制设备等进行飞行导引、目标定位及姿态控制,平稳着陆在指定区域的过程^[3]。交叉双旋翼无人直升机主要工作在城市中,高楼遮挡、天气因素和噪声干扰等会影响全球定位系统(Global Positioning System, GPS)导航的信号稳定性^[4]。相比于GPS导航^[5],视觉导航具有更好的抗干扰能力和独立性;相比于惯性导航^[6],视觉导航能够避免误差累积,通过外部环境获取位姿信息,因此,视觉导航非常适用于GPS信号不稳定时无人直升机的自主降落。

在位姿估计方面,2009年,任沁源和李平^[7]采用基于尺度不变特征变换(SIFT)和基于随机抽样一致性算法(RANSAC)的匹配策略获取无人直升机的位姿信息;2010年,蒋鸿翔和徐锦法^[8]采用相邻两帧图像对应特征点像点位置为位

姿估计算法提供数据,一帧图像特征点像点位置及其对应像点平移速度为线速度与角速度估计算法提供数据;2016年,黄楠楠等^[9]设计了“T”形降落地标,通过轮廓提取和角点检测实现无人机的位姿估计。在图像跟踪方面,2012年,Daewon Lee和Tyler Ryan^[10]采用基于图像的视觉伺服(IBVS)生成速度参考指令,并作为自适应滑模控制器的输入,在二维图像空间中跟踪平台。针对自主降落图像的匹配,2012年,Yunji Zhao和Hailong Pei^[11]采用改进的加速鲁棒特征算法解决了自主降落系统中SURF算法效率低下的问题;2016年,Saravanan和Prakash^[12]采用SURF算法获取“H”形状降落地标的特征信息,和降落地标的原始模板进行匹配;2019年,Zhou Li和Yang Chen^[13]采用基于单目摄像机的AprilTags视觉定位算法定位和估计无人机的状态。针对自主降落的位置计算,2015年Youeyun Jung和Dongjin Lee^[14]提出由“H”型和同心圆组成的标记,采用直接最小二乘法拟合椭圆,通过计算二次曲线方程系数获取圆心像素坐标,计算相对位置。2016年,高九州和贾宏光^[15]对自主降落位置的控制,采用自适应内模控制

(AIMC)原理设计了自主降落纵向飞行控制律,通过对 AIMC 滤波参数进行自调整改善了系统的动态特性。

本文提出了一种交叉双旋翼无人直升机自主降落控制系统,它主要由导航处理单元、飞行控制器和姿态控制机构组成。其中,导航处理单元采用扩展卡尔曼滤波融合视觉导航和惯性导航,解算相对位姿信息并输出给飞行控制器。飞行控制器采用串级 PID 控制结构对相对位姿进行反馈控制,并将控制信号输出给姿态控制机构。姿态控制机构采用 6 个数字舵机实现交叉双旋翼的周期变距,控制无人直升机位姿稳定。最终,通过视觉辅助的交叉双旋翼无人直升机自主降落控制系统解决了 GPS 信号不稳定时的自主降落问题。

2 降落地标设计

无人直升机的自主降落过程中需要实时获取降落地标图像,通过视觉导航解算出相对位姿信息^[16]。因此,降落地标的设计是完成自主降落的关键环节。

无人直升机降落地标的设计要求^[17]主要包括:(1)能够区别于地面轮廓信息,避免错误识别,保证视觉导航的正确性;(2)能够迅速识别,保证视觉导航的实时性;(3)能够有效识别出图像特征点,为相对位姿解算提供数据。

本文使用 AprilTags 视觉基准系统, AprilTags 可以用来完成相机校准、机器人视觉和增强现实(Augmented Reality, AR)等工作。常用的有 TAG16H5 家族和 TAG36H11 家族,如图 1 所示。TAG16H5 的有效区域是 4×4 的方块, TAG36H11 的有效区域是 6×6 的方块,所以

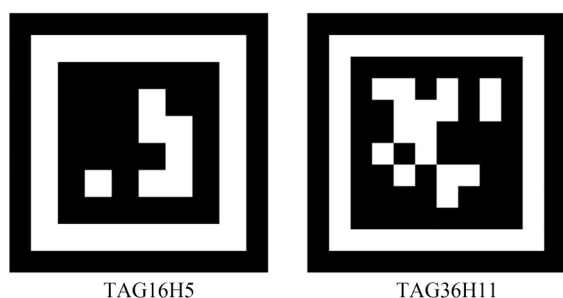


图 1 降落地标

Fig. 1 Landing landmarks

TAG16H5 能检测更远的距离,但由于 TAG16H5 的校验信息少, TAG16H5 的错误率比 TAG36H11 高很多。因此,本文选取 TAG36H11 家族作为降落地标。

目标图像经过线段聚类、图像分割、深度优先搜索确定矩形和关键点阈值筛选识别特征信息是否为降落地标。识别后,检测出图像中心点的像素坐标,经过坐标系转换和相机成像原理可以得出中心点的实际位置偏差,通过无人直升机位姿控制实现降落地标的对齐。

交叉双旋翼无人直升机的旋翼具有倾斜角度,着陆时旋翼距离地面较近,为避免旋翼与地面发生碰撞,同时考虑地效区的影响,将无人直升机自主降落分为两个阶段。第一阶段是无人直升机快速下降,获取降落地标的信息进行视觉导航;第二阶段是无人直升机缓慢下降,此时相机不能完整拍摄降落地标,通过姿态控制保持无人直升机稳定,使它平稳着陆。

3 图像处理与检测

图像处理与检测是视觉导航中的核心环节。图像处理就是将拍摄图像中的降落地标提取出来,并减弱环境噪声的影响^[18]。图像检测就是获取图像中的特征点信息,利用相机模型和坐标系转换解算出实际位置信息^[19],为无人直升机位姿控制提供数据。

3.1 图像处理

由于色差、噪声等影响,图像检测会出现误检,进而影响相对位姿解算的正确性。因此,图像处理是图像检测的前提,其流程如图 2 所示。

图像灰度化是为了将图像画质变得更清晰,同时占用更少的储存空间,将摄像机捕捉到的 RGB 彩色图像转化为灰度图像,即:

$$I(x, y) = \alpha R(x, y) + \beta G(x, y) + \gamma B(x, y), \quad (1)$$

式中: $I(x, y)$ 为该像素点灰度值; $R(x, y)$, $G(x, y)$, $B(x, y)$ 分别为该点的红、绿、蓝分量; α , β , γ 分别为红、绿、蓝分量系数。常用的灰度化方法有均值法、最值法等,但由于人眼对绿色敏感度最高,蓝色敏感度最低,因此采用加权平均法更为合理,取 $\alpha = 0.3$, $\beta = 0.59$, $\gamma = 0.11$ 。

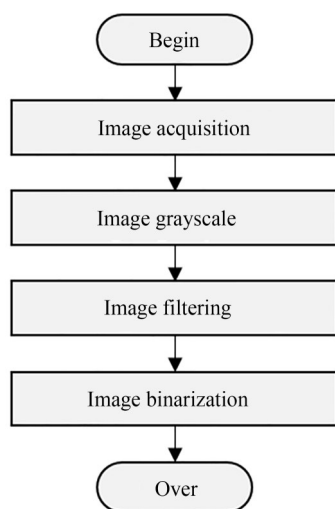


图2 图像处理流程

Fig. 2 Image processing process

图像滤波是为了削弱噪声干扰,对图像进行滤波处理。这里采用中值滤波处理,相较于均值滤波和高斯滤波,中值滤波具有去噪效果好和计算量小等优点。设计一个 3×3 的滤波模板,遍历模板中心像素点及其 8 个邻域内的像素点灰度值,取中值作为中心像素点的灰度值。

图像分割是为了将降落地标从图像中提取出来,对图像进行 Otsu 阈值处理^[20],即灰度值大于阈值的像素点变为 255(最黑),灰度值小于阈值的像素点变为 0(最白)。

3.2 图像检测

本文采用 Canny 边缘检测、Hough 变换直线检测和矩形检测相结合的方法,共同完成图像特征信息的检测。

Canny 边缘检测就是寻找灰度值变化最强的像素位置,用梯度来表示灰度值变化的强度和方向。采用 Sobel 算子进行边缘检测,即:

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: S_x 和 S_y 为水平 x 和垂直 y 方向的检测算子,取 3×3 的卷积模板 A ,即:

$$A = \begin{bmatrix} f(x-1, y+1) & f(x, y+1) & f(x+1, y+1) \\ f(x-1, y) & f(x, y) & f(x+1, y) \\ f(x-1, y-1) & f(x, y-1) & f(x+1, y-1) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: A 为以 $f(x, y)$ 为中心像素点组成的 8 邻域卷积模板。利用 Sobel 算子进行卷积运算,有:

$$\begin{cases} G_x = S_x * A \\ G_y = S_y * A \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \\ \theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: G_x 和 G_y 分别为水平 x 和垂直 y 方向的梯度幅值; G 为梯度幅值; θ 为梯度方向。

再利用非极大抑制技术(Nonmaximum Suppression, NMS)来消除边缘误检,设计一个 3×3 的模板,将像素点的梯度方向近似为邻域 8 个像素点中的 1 个,并计算梯度方向正负方向像素点的梯度值,如果该像素点梯度值最大,则保留,否则删除。

最后采用双阈值技术,即设置一个阈值上界 $T_{\max}$ 和阈值下界 $T_{\min}$,本文取 $T_{\max}/T_{\min} = 3$ 。如果 $G > T_{\max}$,则认定是强边缘点;如果 $G < T_{\min}$,则认定不是边缘点;如果 $T_{\min} < G < T_{\max}$,则认定是弱边缘点,需要运用滞后跟踪技术来跟踪弱边缘点。

滞后跟踪技术通过 3×3 模板检测弱边缘点邻域内是否存在强边缘点,如果存在,则认为是边缘点;如果不存在,则认为不是边缘点。

Hough 变换就是利用点和直线的对偶性检测图像空间中的直线,包括:图像空间中的点和参数空间中的直线一一对应;图像空间中的直线和参数空间中的点一一对应。为了防止直角坐标系中直线垂直于 x 轴,导致参数空间中的直线没有交点,参数空间选择极坐标系。

已知图像空间中的一条黑白分界直线,通过图像坐标系原点作直线的垂线,如图 3 所示。图

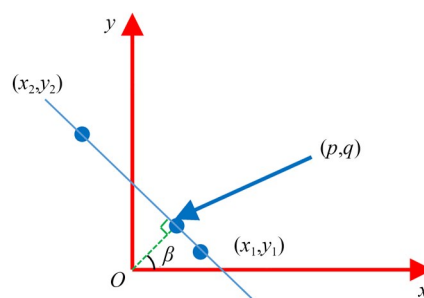


图3 图像坐标系直线

Fig. 3 Image coordinate system straight line

中, (p, q) 点用极坐标表示, 即:

$$(p, q) = (r \cos \beta, r \sin \beta). \quad (6)$$

垂线的斜率为:

$$\tan \beta = \frac{\sin \beta}{\cos \beta}. \quad (7)$$

那么, 参考航向线的斜率为:

$$\tan(90^\circ + \beta) = -\frac{1}{\tan \beta} = -\frac{\cos \beta}{\sin \beta}. \quad (8)$$

设参考航向线上任意点 (x, y) , 则直线斜率可表示为:

$$\frac{y - q}{x - p} = \frac{y - r \sin \beta}{x - r \cos \beta}. \quad (9)$$

参考航向线上两个角点分别为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , 根据式(8)和式(9)可得:

$$\begin{cases} r = x_1 \cos \beta + y_1 \sin \beta \\ r = x_2 \cos \beta + y_2 \sin \beta \end{cases} \quad (10)$$

联立求解, 可得出 β 的值。

矩形检测就是利用聚类算法^[21]处理 Canny 边缘检测出的边缘, 利用 Hough 变换直线检测图中直线, 得到具有两个端点 L_1, L_2 的有向线段, 方向为线段左侧亮度比右侧亮度低。

对所有检测到的线段进行分组, 分组规则为前一条线段的末端点和下一条边的始端点之间的距离小于阈值 T_r , 同时两条线段组成的方向为逆时针方向。分组完成后, 将所有的线段构成一个树, 第一层为所有线段, 第二层到最后一点的节点为同一组线段, 利用深度优先搜索遍历整个树, 如果在深度为 4 的时候, 让第四条线段和第一条线段构成了闭环, 则组成一个矩形。

图像检测完成后, 识别二维码中内部每个小矩形范围内的平均像素值是否大于设定阈值, 如果大于设定阈值, 则此小矩形编码为 1; 如果小于设定阈值, 则此小矩形编码为 0。通过图像编码进行匹配, 识别 AprilTag 目标。

识别降落地标后, 对目标利用矩形框进行框选, 返回一个 AprilTag 类对象, 通过索引对象中的矩形框中心点函数返回 AprilTag 目标的中心点像素坐标, 为位置解算提供数据。

4 位置与姿态解算

4.1 位置解算

无人直升机自主降落过程中, 相对位置包括相对高度 Δh 和相对水平位置 $\Delta x, \Delta y$ 。其中, Δh 利用激光测距进行计算; $\Delta x, \Delta y$ 利用相机成像原理检测图像中的特征点信息, 再通过坐标系转换得出。

相机成像原理和特征点投影关系如图 4 所示。图中, 定义 $O_w X_w Y_w Z_w$ 为地面坐标系, $O_b X_b Y_b Z_b$ 为机体坐标系, $O_c X_c Y_c Z_c$ 为相机坐标系, $O_p X_p Y_p Z_p$ 为图像坐标系, ouv 为像素坐标系。由于相机位置靠近无人直升机质心, 因此假设机体坐标系和相机坐标系近于重合。

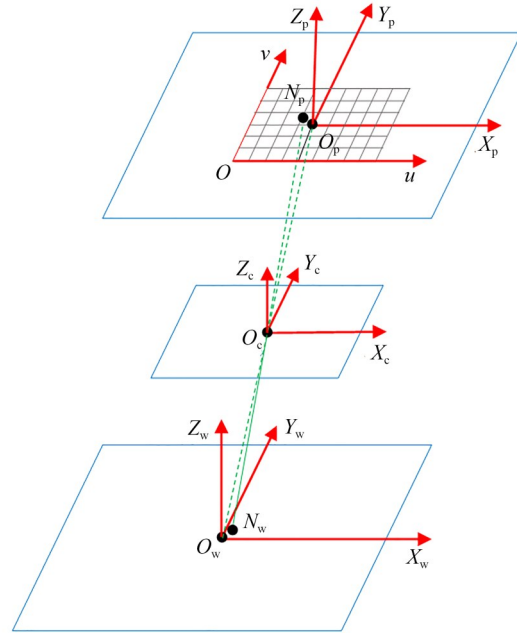


图 4 相机成像投影坐标系

Fig. 4 Coordinate system of camera imaging projection

已知降落地标中有一点 $N_w(x_w, y_w, z_w)$, 在相机坐标系中为 $N_c(x_c, y_c, z_c)$, 经过相机成像投影后, 落在图像坐标系上变成点 $N_p(x_p, y_p, z_p)$, N_p 在图像坐标系中, 因此 $z_p = 0$ 。通过相机成像原理的几何关系转换, 可以得出点 N_c 和 N_p 的关系如下:

$$\frac{z_c}{f} = \frac{x_c}{x_p} = \frac{y_c}{y_p}, \quad (11)$$

式中 f 为相机的焦距。即:

$$\begin{cases} x_p = f \frac{x_c}{z_c} \\ y_p = f \frac{y_c}{z_c} \end{cases} \quad (12)$$

图像坐标系和像素坐标系在同一平面内,只存在原点和尺度上的区别,因此,图像坐标系可以通过平移和缩放变为像素坐标系,即:

$$\begin{cases} u = \epsilon_x x_p + \mu_x \\ v = \epsilon_y y_p + \mu_y \end{cases} \quad (13)$$

式中: ϵ_x 和 ϵ_y 分别为 x 和 y 方向上的缩放系数; μ_x 和 μ_y 分别为 x 和 y 方向上的平移系数。根据式(12)和式(13)得出:

$$\begin{cases} u = f_x \frac{x_c}{z_c} + \mu_x \\ v = f_y \frac{y_c}{z_c} + \mu_y \end{cases} \quad (14)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \varphi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi & \sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & \sin \varphi \cos \theta \\ \cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi & \cos \varphi \sin \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$T = [T_x \quad T_y \quad T_z]^T, \quad (18)$$

式中: φ, θ, ψ 分别为无人直升机的滚转角、俯仰角和偏航角; T_x, T_y, T_z 分别为坐标系的 x 轴、 y 轴和 z 轴的偏移量。

综上所述,世界坐标系上的特征点对应到像素坐标系上的转换关系的齐次矩阵形式如下:

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = K [R \quad T] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

式中: $\lambda = z_c = T_z = \Delta h$, Δh 为无人直升机高度,由机载激光测距仪测量得出。因此,通过对降落地标中心点像素坐标与其在世界坐标系中的实际位置,即可求解出 T_x 和 T_y ,进而得出无人直升机的位置偏差 Δx 和 Δy 。

4.2 姿态解算

无人直升机的姿态包括滚转角 φ 、俯仰角 θ 和偏航角 ψ 。其中,滚转角 φ 和俯仰角 θ 由机载惯性导航中的惯性测量单元(IMU)得出。由于城市间对于GPS信号的干扰,偏航角 ψ 通过视觉定位中的Hough直线变换检测得出。

根据式(10)可求解出图像坐标系原点到参

式中: $f_x = \epsilon_x f, f_y = \epsilon_y f$ 。将式(14)转化为齐次矩阵形式,有:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & \mu_x \\ 0 & f_y & \mu_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = K N_c, \quad (15)$$

式中: K 为相机内参,可以根据张正友标定法^[22]获得; N_c 为降落地标特征点 N_w 在相机坐标系中的点。已知 N_w 是世界坐标,世界坐标系可以经过旋转和平移得到相机坐标系,因此 N_c 可以用 N_w 来表示,即:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T, \quad (16)$$

式中: R 和 T 分别为旋转矩阵和平移矩阵;有:

考航向线的垂线的角度 β ,取无人直升机右偏为正。根据垂线所在图像坐标系象限不同分为三种情况:当垂线在第一、四象限时,偏航角 $\varphi = \beta$;当垂线在第二象限时,偏航角 $\varphi = \beta - \pi$;当垂线在第三象限时,偏航角 $\varphi = \beta + \pi$,如图5所示。

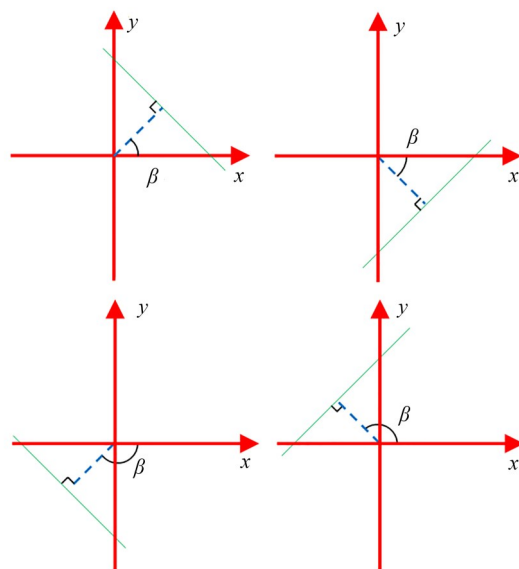


图5 参考航向线与坐标系象限

Fig.5 Reference direction line and coordinate system quadrant

5 自主降落控制设计

自主降落包括位置控制和姿态控制,位置控制分为水平位置控制和高度控制。为使加速度在可控范围内,设计开方控制器作为位置控制的最外环。姿态控制中设计了一种交叉双旋翼无人直升机的姿态控制机构。视觉辅助飞行控制系统如图 6 所示。

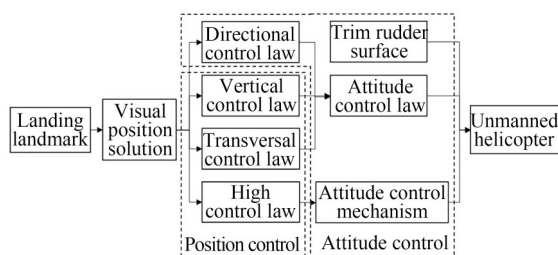


图 6 视觉辅助飞行控制系统

Fig. 6 Visual assisted flight control system

图 6 中,视觉模块对降落地标进行图像处理,得出无人直升机的航向偏差和位置偏差。航向偏差输入姿态控制中的航向控制律,保持航向稳定;位置偏差输入位置控制中的水平位置控制律和高度控制律,水平位置控制律解算出期望姿态角后,输入姿态控制律,高度控制律解算出期望总距后,输入姿态控制机构,保持无人直升机自主降落过程中的位姿稳定。

5.1 位置控制设计

5.1.1 水平位置控制律设计

为了实现水平位置控制,设计一种串级 PID 控制结构,将期望原点位置与视觉解算出的实际位置作差,通过开方控制器执行反馈控制输出期望速度;将期望速度与 IMU 解算出的实际速度作差,通过 PID 控制器执行反馈控制,得到期望加速度;经过旋转矩阵转化为期望姿态角,将期望姿态角输入姿态控制,通过姿态控制实现无人直升机的水平位置控制,如图 7 所示。

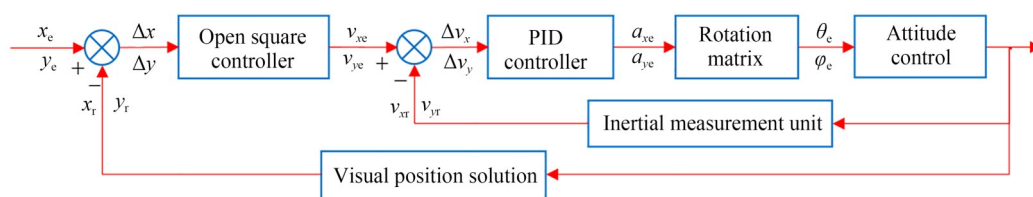


图 7 水平位置控制律

Fig. 7 Horizontal position control law

图 7 中, x_e 和 y_e 为期望水平位置; x_r 和 y_r 为实际水平位置; Δx 和 Δy 为水平位置的偏差; v_{xe} 和 v_{ye} 为期望速度; v_{xr} 和 v_{yr} 为实际速度; a_{xe} 和 a_{ye} 为期望加速度; θ_e 为期望俯仰角; ϕ_e 为期望滚转角。

5.1.2 高度控制律设计

为了实现交叉双旋翼无人直升机的高度控制,需要对其特有的结构进行升力计算。旋翼截面积为 S ,弦长为 c ,来流速度为 V_∞ ,旋翼迎角为 α ,空气密度为 ρ_∞ ,则交叉双旋翼的升力 F 为:

$$F = 2 \times \left(\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 \right) c a \alpha S, \quad (20)$$

式中 a 为升力线斜率。通过实验可知交叉双旋翼的倾斜角度 $\gamma = 12.5^\circ$ 时,升力效果最好,则升力计算公式为:

$$F = \rho_\infty V_\infty^2 c a \alpha S \cos \gamma. \quad (21)$$

本文采用串级 PID 控制结构进行高度控制,将期望地面高度与激光测距得出的实际高度作差,通过开方控制器执行反馈控制,输出期望速度;将期望速度与 IMU 得出的实际速度作差,通过 PID 控制器执行反馈控制,输出期望加速度,将期望加速度与 IMU 得出的实际加速度作差;通过 PID 控制执行反馈控制,输出期望总距,将期望总距输入姿态控制机构,通过姿态控制机构实现高度控制,如图 8 所示。

图 8 中, h_e 为期望高度; h_r 为实际高度; Δh 为高度偏差,由激光测距仪测得; v_{he} 为期望速度; v_{hr} 为实际速度; Δv_h 为速度偏差; a_{he} 为期望加速度; a_{hr} 为实际加速度; Δa_h 为加速度偏差; L_e 为期望总距。

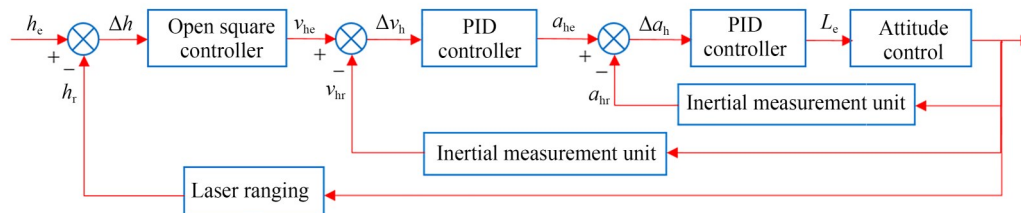


图 8 高度控制律

Fig. 8 Altitude control law

5.1.3 开方控制器设计

开方控制器是一个优化改进的 P 控制器。飞行过程中,若期望位置在控制系统合理的范围内,则不需要对期望位置做任何限制;若期望位置不在控制系统的能力范围内,不符合无人直升机的物理极限规则,则期望位置无法实现,甚至出现炸机。为了避免上述情况的发生,设计一个开方控制器来限制跟随的期望位置,以此达到更好的飞行效果。

普通的 P 控制器设计为:

$$v_{\text{tar}} = k_p e_{\text{pos}}, \quad (22)$$

其中: v_{tar} 为期望速度; k_p 为比例系数; e_{pos} 为位置偏差。假设 t 时间内的速率恒定,则:

$$v_{\text{tar}} = \frac{e_{\text{pos}}}{t}. \quad (23)$$

对式(22)求导,有:

$$a = -k_p^2 e_{\text{pos}}. \quad (24)$$

可以看出,当误差收敛为恒定值时,加速度 a 与 k_p^2 成正比。

在实际飞行过程中,加速度是有上限的。假设无人直升机能提供的最大加速度为 a_{max} ,则在整个飞行过程中 a 不应超过 a_{max} 。根据式(24)可知,当位置偏差 $|e_{\text{pos}}| < a_{\text{max}}/k_p^2$ 时,加速度为变化量;当位置偏差 $|e_{\text{pos}}| > a_{\text{max}}/k_p^2$ 时,加速度为恒定值,有:

$$v_{\text{tar}}^2 - v_0^2 = 2a_{\text{max}}x, \quad (25)$$

式中: v_0 为初始速度, x 为距离,有:

$$x = e_{\text{pos}} - \frac{a_{\text{max}}}{k_p^2}. \quad (26)$$

根据式(25)和式(26)可得:

$$v_{\text{tar}} = \sqrt{2a_{\text{max}}e_{\text{pos}} - \left(\frac{a_{\text{max}}}{k_p}\right)^2}. \quad (27)$$

结合普通 P 控制器得到完整的开方控制器如下:

$$v_{\text{tar}} = \begin{cases} k_p e_{\text{pos}}, & |e_{\text{pos}}| \leq \frac{a_{\text{max}}}{k_p^2} \\ \sqrt{2a_{\text{max}}e_{\text{pos}} - \left(\frac{a_{\text{max}}}{k_p}\right)^2}, & |e_{\text{pos}}| > \frac{a_{\text{max}}}{k_p^2} \end{cases}. \quad (28)$$

开方控制器效果如图 9 所示。

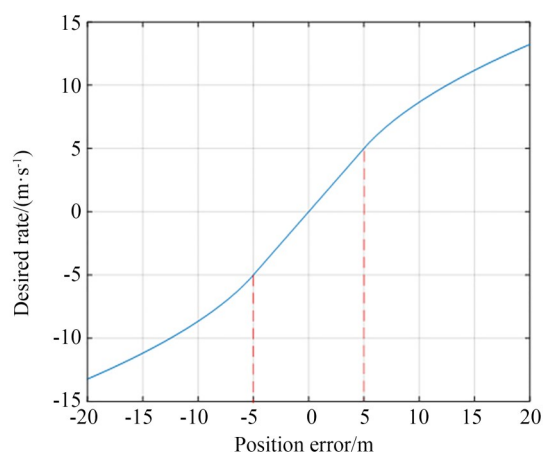


图 9 开方控制器效果

Fig. 9 Effect of square root controller

本文的开方控制器设置参数 $k_p = 1$, $a_{\text{max}} = 5$, 则 $a_{\text{max}}/k_p^2 = 5$ 。从图 9 可以看出,当 $|e_{\text{pos}}| \leq 5$ 时,是一条斜率为 1 的直线,开方控制器相当于 P 控制器;当 $|e_{\text{pos}}| > 5$ 时,是一条单调的曲线,类似于开方函数。

5.2 姿态控制设计

5.2.1 姿态控制律设计

为了使无人直升机具有优秀的飞行控制能力,本文姿态控制瞬时响应是通过提高控制频率来解决的,采用 400 Hz 的控制频率,串级 PID 控制加前馈控制的控制结构,外环采用 P 控制器,

内环采用PID控制器。将位置控制输出的期望姿态角和IMU或视觉解算出的实际姿态角作差,得出姿态角偏差,通过P控制器执行反馈控制,输出期望角速度;将期望角速度和IMU解算

出的实际角速度作差,通过PID控制器执行反馈控制,输出舵机控制量;将舵机控制量输入姿态控制机构,通过姿态控制机构实现无人直升机的姿态控制,如图10所示。

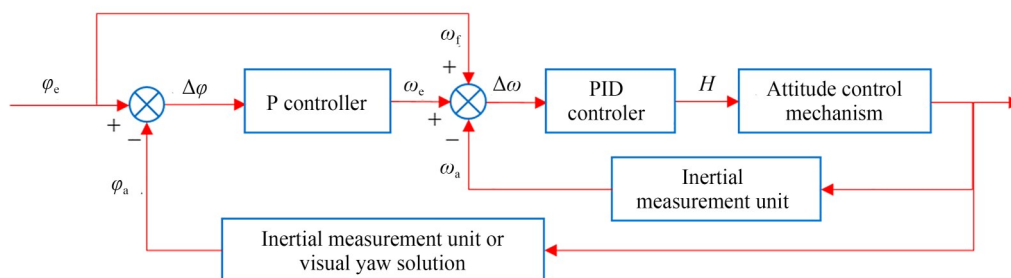


图 10 姿态控制律

Fig. 10 Attitude control law

图10中, φ_e 为期望姿态角; φ_a 为实际姿态角; $\Delta\varphi$ 为姿态角偏差; ω_e 为期望角速度; ω_a 为实际角速度; $\Delta\omega$ 为角速度偏差; H 为舵机控制量; ω_f 为角速度前馈量, $\omega_f = \omega_e$ 。

5.2.2 姿态控制机构设计

交叉双旋翼无人直升机的姿态控制主要通过机体6个数字舵机来实现。它们3个为一组控制倾斜盘的角度,实现对无人直升机的滚转、俯仰和偏航的姿态控制,如图11所示。

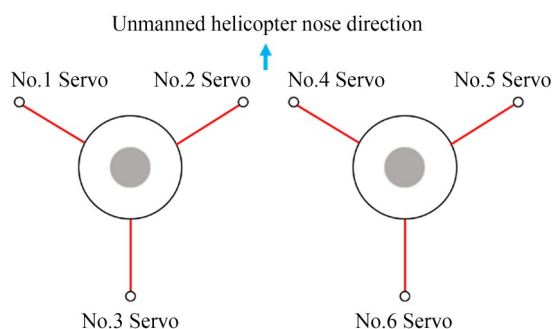


图 11 姿态控制机构

Fig. 11 Attitude control mechanism

(1) 滚转控制:当无人直升机做滚转运动向右飞行时,舵机1,4向上推倾斜盘,舵机2,5向下拉倾斜盘,舵机3,6保持不变,通过改变倾斜盘的左右倾角实现交叉双旋翼的周期变距,从而实现无人直升机的向右飞行。向左飞行时,各舵机的控制方向与向右飞行相反。

(2) 俯仰控制:当无人直升机做俯仰运动向前飞行时,舵机1,2和舵机4,5向下拉倾斜盘,舵机3,6向上推倾斜盘,通过改变倾斜盘的前后倾角实现交叉双旋翼的周期变距,从而实现无人直升机的向前飞行。向后飞行时,各舵机的控制方向与向前飞行相反。

(3) 偏航控制:当无人直升机做偏航运动向右旋转时,舵机1,2和舵机6向下拉倾斜盘,舵机4,5和舵机3向上推倾斜盘,通过改变倾斜盘的倾角实现交叉双旋翼的周期变距,从而实现无人直升机的向右旋转。向左旋转时,各舵机的控制方向与向右旋转相反。

6 实 验

通过Mission Planner飞控地面站搭建仿真环境,根据图6所示的系统搭建仿真控制律,进行仿真验证。仿真过程中,首先解锁使无人直升机起飞,切换导引模式,在15 s内模拟OpenMV检测的标志在左上方像素(120,80)处,15 s到30 s内模拟OpenMV检测的标志在右下方像素(200,160)处。仿真结果如图12和图13所示,可以看出,视觉辅助飞控系统的跟踪性能良好,可以很好地跟踪无人直升机的期望位置。

实验中,无人直升机采用JZ120交叉双旋翼无人直升机,如图14所示。摄像头采用OpenMV4 H7 Plus,如图15所示。

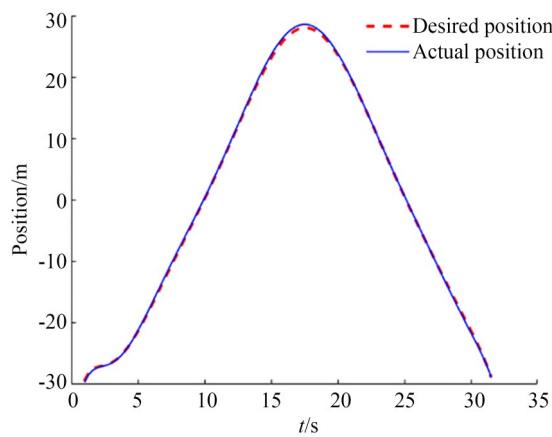


图 12 北向位置与期望位置的仿真曲线

Fig. 12 Simulation curves of north position and desired position

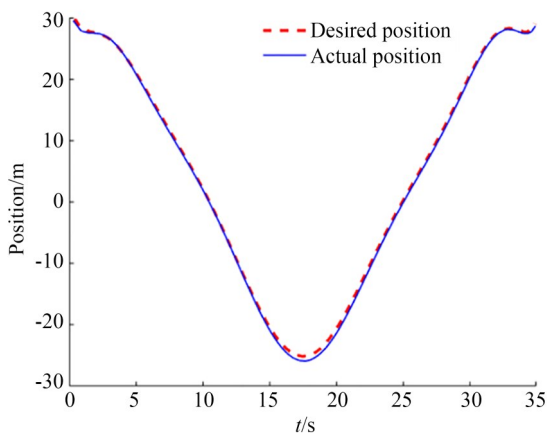


图 13 东向位置与期望位置的仿真曲线

Fig. 13 Simulation curves of east position and desired position



图 14 交叉双旋翼无人直升机

Fig. 14 Intermeshing-rotor unmanned helicopter

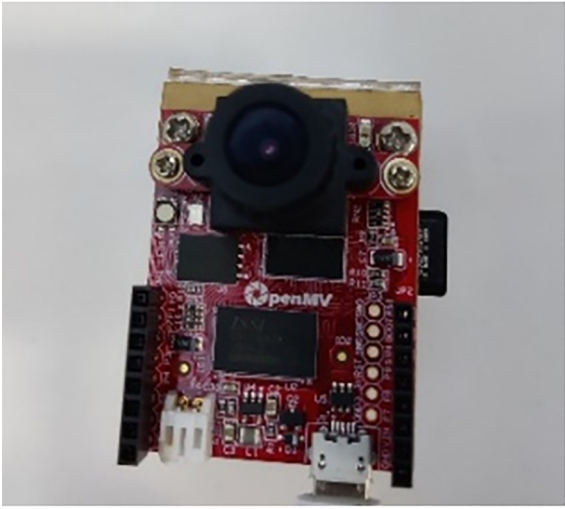


图 15 OpenMV4 H7 Plus 摄像头

Fig. 15 OpenMV4 H7 Plus camera

图 16~图 18 为无人直升机自主降落过程中的姿态曲线,其中滚转角偏移量在 5° 左右,修正时最大偏移量在 4° 左右;俯仰角偏移量在 3° 左右,修正时最大偏移量在 7° 左右;偏航角偏移量在 7° 左右,修正时最大偏移量在 7° 左右。图 19 和图 20 为无人直升机自主降落过程中的位置曲线,其中北向(x 方向)位置期望的修正偏移量在 0.1 m 左右,实际修正偏移量约为 0.05 m;东向(y 方向)位置期望的修正偏移量约为 0.2 m,实际修正偏移量约为 0.2 m。修正后无人直升机自主降落位置的北向(x 方向)误差在 0.05 m 左右,东向(y 方向)误差在 0.02 m 左右,跟踪性能良好,可以实现无人直升机的自主降落。

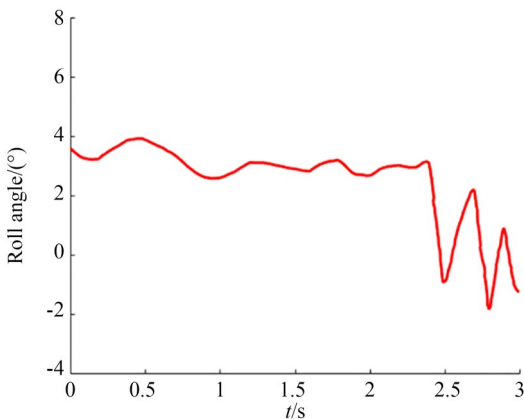


图 16 滚转角曲线

Fig. 16 Roll angle curve

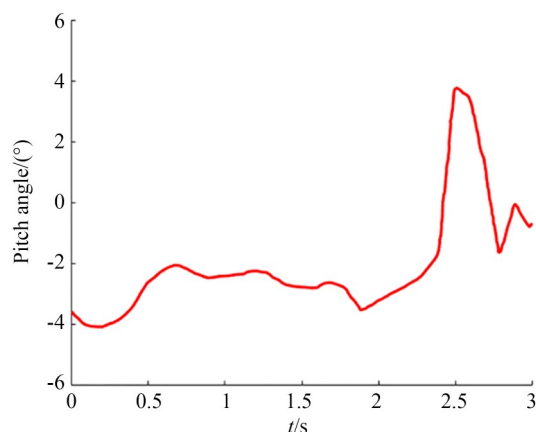


图 17 俯仰角曲线

Fig. 17 Pitch angle curve

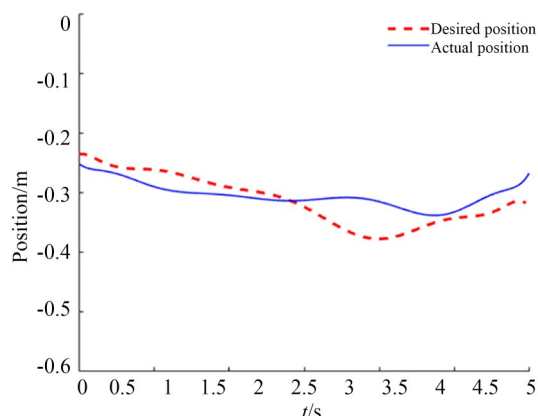


图 19 北向位置与期望位置曲线

Fig. 19 North position and desired position curves

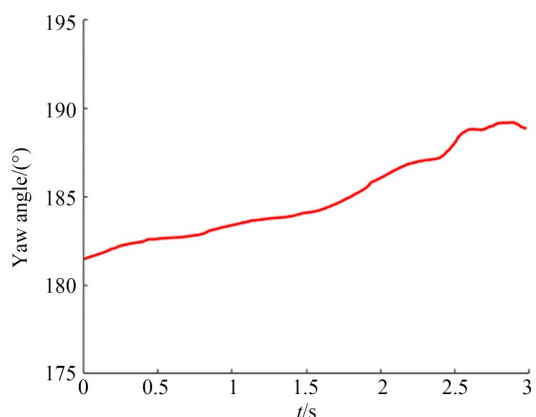


图 18 偏航角曲线

Fig. 18 Yaw angle curve

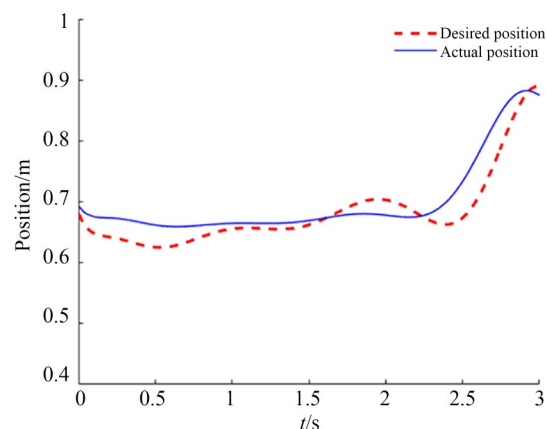


图 20 东向位置与期望位置曲线

Fig. 20 East position and desired position curves

7 结 论

本文提出了使用视觉辅助的交叉双旋翼无人直升机自主降落控制系统,采用相机成像原理对AprilTag视觉标志进行位姿信息的获取,传递给控制系统执行位置控制和姿态控制。设计了

一种适用于交叉双旋翼无人直升机的姿态控制机构,并给出了无人直升机位置和姿态控制律,实现目标的定位。无人直升机自主降落过程姿态角度的偏移量在 4° 以内,位置偏移量在0.05 m以内,跟踪定位状态良好,可以实现交叉双旋翼无人直升机的自主降落控制。

参考文献:

- [1] 乔尔特. 独具特色的K-MAX“空中卡车”[J]. 直升机技术, 1997(1): 44-50.
QIAO E T. Unique K-MAX“Air Truck”[J]. *Helicopter Technique*, 1997(1): 44-50. (in Chinese)
- [2] WU Z X, HAN P, YAO R W, *et al.* Autonomous UAV landing system based on visual navigation [C]. 2019 *IEEE International Conference on Imag-*

ing Systems and Techniques (IST). December 9-10, 2019. Abu Dhabi, United Arab Emirates. IEEE, 2019: 1-6.

- [3] 王晓剑, 潘顺良, 宋子善, 等. 无人直升机自主着舰的计算机视觉技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(6): 686-689.
WANG X J, PAN SH L, SONG Z SH, *et al.* Computer vision scheme for autonomous landing of unmanned helicopter on ship deck [J]. *Journal of*

- Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(6): 686-689. (in Chinese)
- [4] 钟映春, 张文祥, 王波, 等. 电力巡检无人机自主降落的引导系统与策略[J]. 光学精密工程, 2022, 30(11):1362-1373.
ZHONG Y CH, ZHANG W X, WANG B, *et al.* Navigation system and strategies for electric inspecting UAV autonomously landing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(11):1362-1373. (in Chinese)
- [5] 张舸, 伊国兴, 高翔. 基于视觉导航的旋翼无人机自主降落系统[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(9): 77-80, 83.
ZHANG G, YI G X, GAO X. Autonomous landing system of rotor UAV based on visual navigation [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2018, 37(9):77-80, 83. (in Chinese)
- [6] 李洪, 王大元, 明丽, 等. 基于线特征的无人机自主着陆惯性/视觉导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(4):437-442.
LI H, WANG D Y, MING L, *et al.* Inertial/visual navigation method of UAV autonomous landing based on line features[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2021, 29(4):437-442. (in Chinese)
- [7] 任沁源, 李平, 韩波. 基于视觉信息的微型无人直升机位姿估计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(1): 18-22.
REN Q Y, LI P, HAN B. Position and attitude estimation of micro unmanned helicopter based on visual information [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2009, 43(1): 18-22. (in Chinese)
- [8] 蒋鸿翔, 徐锦法, 高正. 无人直升机视觉着陆中的运动状态估计算法[J]. 航空学报, 2010, 31(4): 744-753.
JIANG H X, XU J F, GAO ZH. Vision-based movement state estimation algorithm for unmanned helicopter landing [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(4): 744-753. (in Chinese)
- [9] 黄楠楠, 刘贵喜, 张音哲, 等. 无人机视觉导航算法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0726005.
HUANG N N, LIU G X, ZHANG Y ZH, *et al.* Unmanned aerial vehicle vision navigation algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0726005. (in Chinese)
- [10] LEE D, RYAN T, KIM H J. Autonomous landing of a VTOL UAV on a moving platform using image-based visual servoing[C]. 2012 *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. May 14-18, 2012. St Paul, MN, USA. IEEE, 2012: 971-976.
- [11] ZHAO Y, PEI H. An improved vision-based algorithm for unmanned aerial vehicles autonomous landing[J]. *Physics Procedia*, 2012, 33: 935-941.
- [12] PRAKASH R O, SARAVANAN C. Autonomous robust helipad detection algorithm using computer vision[C]. 2016 *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*. March 3-5, 2016. Chennai, India. IEEE, 2016: 2599-2604.
- [13] LI Z, CHEN Y, LU H, *et al.* UAV autonomous landing technology based on AprilTags vision positioning algorithm[C]. 2019 *Chinese Control Conference (CCC)*. July 27-30, 2019. Guangzhou, China. IEEE, 2019: 8148-8153.
- [14] JUNG Y, LEE D J, BANG H. Close-range vision navigation and guidance for rotary UAV autonomous landing[C]. 2015 *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. August 24-28, 2015. Gothenburg, Sweden. IEEE, 2015: 342-347.
- [15] 高九州, 贾宏光. 无人机自主着陆纵向控制律设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(7):1799-1806.
GAO J ZH, JIA H G. Design of longitudinal control law for small fixed-wing UAV during auto landing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(7):1799-1806. (in Chinese)
- [16] LANGE S, SÜNDERHAUF N, PROTZEL P. Autonomous landing for a multirotor UAV using vision[C]. *International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots (SIMPAR 2008)*, 2008: 482-491.
- [17] 孟学斌, 齐咏生, 李永亭, 等. 基于视觉的四旋翼无人机自主降落算法研究[J]. 控制工程, 2020, 27(10): 1751-1759.
MENG X B, QI Y SH, LI Y T, *et al.* Study on autonomous landing system of quadrotor UAV based on vision[J]. *Control Engineering of China*, 2020, 27(10): 1751-1759. (in Chinese)
- [18] SARIPALLI S, MONTGOMERY J F, SUKHATME G S. Vision-based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle [C]. *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292)*. Washing-

- ton, DC, USA. IEEE, 2002, 3: 2799-2804.
- [19] ANITHA G, KUMAR R N G. Vision based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 38: 2250-2256.
- [20] 倪麟. 基于 Otsu 理论的图像分割算法的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
NI L. *Research on Image Segmentation Algorithm Based on Otsu Theory* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [21] KRINIDIS S, CHATZIS V. A robust fuzzy local information C-means clustering algorithm [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19 (5): 1328-1337.
- [22] 王利华, 李亮亮, 郭恒林. 基于目标的相机标定方法 [J]. 北京测绘, 2021, 35(3): 372-375.
WANG L H, LI L L, GUO H L. A target-based calibration method [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2021, 35(3): 372-375. (in Chinese)

作者简介:



席鹏航(1997—),男,河北唐山人,硕士研究生,主要从事飞行器控制、视觉导航等方面的研究。E-mail: 1224973880@qq.com

通讯作者:



李京阳(1987—),男,山西兴县人,博士,2010年于南京航空航天大学获得学士学位,2015年于清华大学获得博士学位,主要从事航天器动力学与控制等方面的研究。E-mail: 18911638156@163.com