

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209155

无人机自主降落视觉标识设计及位姿测量方法*

陶孟卫¹, 姚宇威¹, 元海文², 肖长诗^{1,3}, 文元桥⁴

(1. 武汉理工大学航运学院 武汉 430063; 2. 武汉工程大学电气信息学院 武汉 430205; 3. 山东交通学院威海海洋信息科学与技术研究院 威海 264200; 4. 武汉理工大学智能交通系统研究中心 武汉 430063)

摘要:为实现无人机自主降落,设计了一种由多组不同半径比的同心圆组成的视觉标识。针对同心圆成像后的形变情况,结合圆心、消隐点、内外圆交点构成的调和比约束,设计了一种递归的圆心求解方法,以获取圆心亚像素投影点。相较于 Hough 圆检测算法以及传统方法,该方法可以更鲁棒、精准地提取圆心投影点亚像素坐标。完成圆心提取后,基于交比不变性建立图像坐标与平台坐标一致性匹配关系解算出初始位姿,并通过二次曲线重投影模型设计非线性优化函数求得优化位姿。针对降落过程中图像运动模糊的情况,提出一种基于运动连续性的测量关键帧选取模型来排除运动模糊图像对控制决策的影响。进一步设计一种多模式切换控制结构实现了对降落平台的运动预测、无人机样条轨迹生成与更新,从而完成无人机自主降落。在 1 500 次的测量实验中,该测量方法的平均重映射误差可达到 0.578 pixel,方差为 0.009 6。在现场降落实验中,无人机在 2.5 m 高度时对降落台的定位误差小于 3.5 cm,表明本文方法具有较高的视觉测量精度且更加稳定,能够实现对运动降落目标的稳定接近与跟踪并完成降落。

关键词: 无人机; 自主降落; 视觉标识; 调和比; 位姿测量; 测量关键帧

中图分类号: TH701 TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

Visual target design and pose measurement method for UAV autonomous landing

Tao Mengwei¹, Yao Yuwei¹, Yuan Haiwen², Xiao Changshi^{1,3}, Wen Yuanqiao⁴

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China; 3. Weihai Institute of Marine Information Science and Technology, Shandong Jiaotong University, Weihai 264200, China; 4. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: In order to realize the reliable autonomous landing of unmanned aerial vehicle (UAV), a visual target composed of multiple sets of concentric circles with different radius ratio is proposed. Considering the distortion of concentric circles after imaging, a recursive circle center detection method that combines with the harmonic ratio constraint composed of circle centers, vanishing points, and intersection points with concentric circles is firstly designed to get the sub-pixel projection point of the center of concentric circles. Compared with Hough circle detection algorithm and other traditional methods, this method can extract the sub-pixel coordinates of the projection point of the circle center more robustly and accurately. After this step, the initial pose is calculated from the correspondence between the image coordinate and platform coordinate, where the correspondence is constructed based on the cross-ratio invariance. The optimized pose is derived from the nonlinear optimization function that is designed based on the conic re-projection model. To eliminate the influence of motion blur images on the decision making during the landing process, a measurement keyframe selection model based on motion continuity is proposed. Furthermore, a multi-mode switching control structure is designed to realize the motion prediction of landing platform, as well as the generation and updating of the spline trajectory of UAV, thereby achieving the autonomous landing of UAV. In 1 500 measurement experiments, the average re-projection error of this measurement method can reach 0.578 pixel with a variance of 0.009 6. In the field landing experiments, the positioning error of UAV to the landing platform at the height of 2.5 m height

收稿日期: 2022-01-07 Received Date: 2022-01-07

* 基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51579204)、山东省自然科学基金重点项目(ZR2020KE029)资助

is less than 3.5 cm, which indicates that the proposed method has higher visual measurement accuracy and stability, and is able to achieve stable approach and tracking of the landing target and autonomous landing.

Keywords: UAV; autonomous landing; visual target; harmonic relation; position and orientation measurement; measurement key frame

0 引言

无人机自主降落技术是海空协同、商业配送等领域的重要技术之一,目前所采用的方法可分为视觉类与非视觉类。

非视觉类方法以 GPS 与其他传感器融合为主,例如文献[1]中采用多个船载超声波传感器实现了对空中无人机的相对定位与降落,文献[2]中采用红外信标实现了无人机对无人船降落平台的精准定位。上海交通大学姚天成等^[3]设计了一种自适应收放线缆来实现无人机在无人船上的被动降落。为适应无人机在复杂地面上的降落,文献[4]设计了一种仿生学机器人脚架从而使无人机在降落后保持平稳以适应不同环境下的降落需求。文献[5]通过在地面移动车上加装雷达并使用聚类算法来识别飞行器,同时获取相对位置从而完成飞行器在移动平台上的降落。非视觉类方法虽然可以在全局定位降落平面,但对无人机与降落目标相对姿态获取较为困难,且高度依赖平台与无人机的通信。在无人机自主降落任务中,无人机与降落台的相对姿态作为能否安全降落的一项依据也尤其重要。被动降落又限制了无人机的活动范围。

视觉类方法多以检测降落平面视觉特征为主,文献[6]通过提取地面“H”标志的平行线信息,计算视觉消隐点从而获取降落平面消隐线,来计算降落平面的相对位姿。文献[7]设计了一种嵌套式、多机位的组合二维码来进行降落全过程实时位姿估计。Yuan 等^[8]针对地面静态标志提出一种基于联邦滤波器的分层式视觉降落方法,实现了由远及近的鲁棒降落。孟学斌等^[9]通过设计三角形与同心圆嵌套结构来完成无人机的位姿估计,该方法并未考虑地标成像过程中的射影形变。邢伯阳等^[10]通过设计一种二维码与有缺口黑白圆环嵌套的地标,将视觉信息与动平台传感器信息融合完成状态估计实现了无人机在动平台上的降落。文献[11]设计了一种嵌套式的多色同心圆靶标同时搭载超声波传感器,将超声波传感器的测量值作为相机深度来完成定位,从而实现无人机在静态靶标上的降落,但基于霍夫变换的圆环检测在面对同心圆成像形变时极不稳定,难以实现倾斜情况下的定位,容易丢失目标。文献[12]设计一种多分辨率靶标并结合 YOLOv3 tiny 架构来实现降落过程的目标识别与视觉测量。并进行了仿真验证。此外一些基于光流的方法也被用于无人机的起降,Beyeler 等^[13]提出了一种基于光流的 OptiPilot 方法,使用机载视觉传感器

获得稀疏的光流测量信息,通过获取机身惯导的角速度信息来消除光流的旋转偏差并将平移部分映射为倾斜和滚动指令,实现自动导航和降落。基于计算机视觉与强化学习相结合的降落方法^[14-15]在仿真实验、室内试验中也取得了一定的进展。视觉类降落方法,大多应用于静态目标或搭载惯性测量设备的动平台。

此外由运动造成的图像模糊会直接影响视觉测量精度从而影响决策,相关研究^[16-17]聚焦于使用点扩散模型或神经网络来对图像进行滤波增强,但容易受噪声影响,且影响测量实时性。

针对上述问题,本文从降落平台结构出发,设计了一种带有同心圆视觉标识,在运动情况下可供无人机降落的模块化降落平台,同时给出视觉位姿测量算法及运动模糊帧排除方法,通过开发一种多模式切换的降落方法,在不依赖降落平台惯性测量信息的情况下使无人机更加可靠、精准的完成降落。

1 降落平台设计

本文设计的降落平台结构如图 1 所示。视觉标志单元由多组同心圆环组成,针对不同降落环境,可以更换不同颜色同心圆环便于图像分割,在几何结构上,同心圆环成正六边形排列。不同的外圆半径使无人机在由远及近的过程中始终有足够的视觉特征来进行定位。

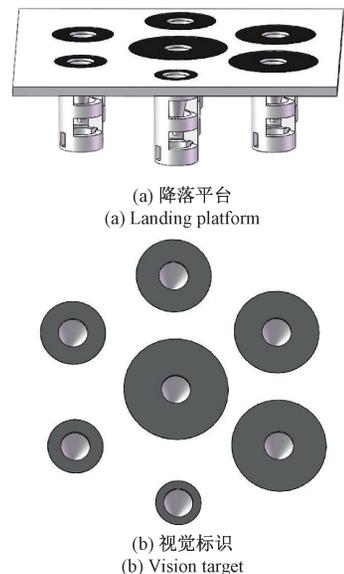


图 1 降落平台及视觉标识

Fig. 1 Schematic of landing platform with vision target

2 视觉测量

2.1 图像预处理

相机获取图像后, 首先将图像灰度化处理并进行高斯滤波, 采用最大类间方差自适应阈值算法(大津算法)得到二值化图像, 使用 Canny 算子进行边缘检测得到图像边缘信息并进行形态学闭操作, 填充中断边缘, 然后进行轮廓提取, 使用最小二乘法对轮廓进行椭圆拟合^[18]。设同心圆外圆投影拟合后方程为 C_1 , 椭圆中心为 p_1 , 内圆投影为 C_2 , 椭圆中心为 p_2 , 根据同心椭圆中心在椭圆内, 则有二次曲线同心判定规则如下:

$$\begin{cases} p_1^T C_2 p_1 < 0 \\ p_2^T C_1 p_2 < 0 \end{cases} \quad (1)$$

通过式(1)可以将同心椭圆进行提取进而排除干扰项。此外, 如有残留的噪声同心圆项可通过交比约束来排除, 如(9)式所示。

2.2 圆心投影点定位

常见的圆心检测算法有三点定位法、圆形拟合、Hough 圆检测算法等。如图 2 所示, 圆形标识在经过成像后会形变为椭圆, 圆心点不是投影不变量, 即圆经过投影变换后得到的椭圆中心并不是圆心的投影点, 因此精准定位圆心投影点是姿态测量的关键。

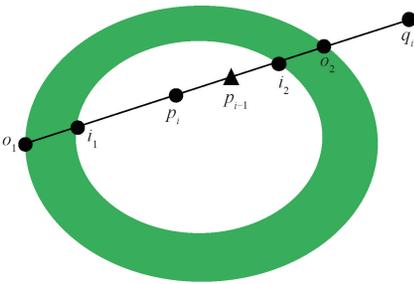


图 2 成像后的同心圆

Fig. 2 Concentric circle after imaging

本文采取一种递归的圆心求解方法, 如图 3 所示, 首先在圆环内选取任意一起始点 p_0 做任意直线, 交外圆于 o_1, o_2 , 交内圆于 i_1, i_2 , 以线段 $o_1 o_2$ 中点 p_1 作为起始点, 再次做任意直线交外圆于 o_1, o_2 , 交内圆于 i_1, i_2 , 重复该过程得到中点 p_2 , 递归执行该过程, 设第 n 次得到线段中点为 p_n , 则 p_n 会无限逼近圆心点 o 。

如图 2 所示, 成像后的圆形变为椭圆, 且线段中点不是射影不变量, 使用上述方法定位圆心时, 若将直线与圆环交点的均值作为中点则该方法将不会收敛。为此, 设

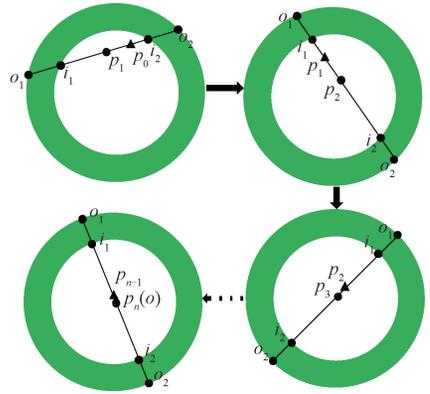


图 3 同心圆圆心定位过程

Fig. 3 Concentric circle center positioning process

o_1, o_2, p_i, q_i 是 O_1, O_2, P_i, Q_i 在图像中的成像点, 根据交比有:

$$Cr\{o_1, o_2; p_i, q_i\} = \frac{p_i - o_1}{p_i - o_2} \cdot \frac{q_i - o_1}{q_i - o_2}$$

$$Cr\{O_1, O_2; P_i, Q_i\} = \frac{P_i - O_1}{P_i - O_2} \cdot \frac{Q_i - O_1}{Q_i - O_2}$$

式中: $Cr\{\cdot\}$ 表示点列的交比, 其中 p_i, q_i 为递归第 i 次时的中点和消隐点。由于消隐点 Q_i 为无穷远点, 则有调和比约束^[19-20] 如下:

$$Cr\{O_1, O_2; P_i, Q_i\} = Cr\{o_1, o_2; p_i, q_i\} = -1$$

同理, $Cr\{i_1, i_2; p_i, q_i\}$ 存在同样约束, 以椭圆拟合得到的椭圆中心为起点, 则在第 i 次递归时有:

$$Cr\{o_1, o_2; p_i, q_i\} = Cr\{i_1, i_2; p_i, q_i\} = -1 \quad (2)$$

方程组(3)为式(2)的展开形式。

$$\begin{cases} \frac{p_i - o_1}{p_i - o_2} \cdot \frac{q_i - o_1}{q_i - o_2} = -1 \\ \frac{p_i - i_1}{p_i - i_2} \cdot \frac{q_i - i_1}{q_i - i_2} = -1 \end{cases} \quad (3)$$

任意直线与椭圆交点的亚像素坐标可通过将直线方程与椭圆方程联立计算得到。

为了计算方便, 可以将任意直线设置为竖直和水平。当直线为竖直时, 设 p_i 的坐标为 (x_{p_i}, y_{p_i}) , o_1 的坐标为 (x_{o_1}, y_{o_1}) , o_2 的坐标为 (x_{o_2}, y_{o_2}) , i_1 的坐标为 (x_{i_1}, y_{i_1}) , i_2 的坐标为 (x_{i_2}, y_{i_2}) , y_{p_i} 值继承于起始点, 化简方程(3), 求解 x_{p_i} 结果为:

$$x_{p_i} = - \frac{-2k \pm \sqrt{4k^2 + 8(2x_{o_1}x_{o_2} - k \sum_a)}}{4} \quad (4)$$

在式(4)中:

$$\sum_a = x_{o_1} + x_{o_2} \quad (5)$$

$$\sum_b = x_{i_1} + x_{i_2} \quad (6)$$

$$k = 2(x_{i_1}x_{i_2} - x_{o_1}x_{o_2}) / (\sum_a + \sum_b) \quad (7)$$

根据式(4)~(7),同时将解 x_{p_i} 严格限制在圆环内可解得唯一的 p_i, q_i , 设 q_i 坐标为 (x_{q_i}, y_{q_i}) , 其中 y_{q_i} 值继承于起始点, 根据二次方程解的约束有:

$$x_{q_i} = k - x_{p_i} \quad (8)$$

当直线为水平时, x_{p_i} 值继承于起始点, y_{p_i}, y_{q_i} 值的求解具有与式(4)、(8)相似的形式。

在递归执行该过程中, 当递归得到的中点变化小于设定阈值或达到最大递归限制次数时, 递归停止。

使用该方法求得的圆心点与提取到的椭圆中心、Hough 圆检测得到的圆心对比如图 4 所示。

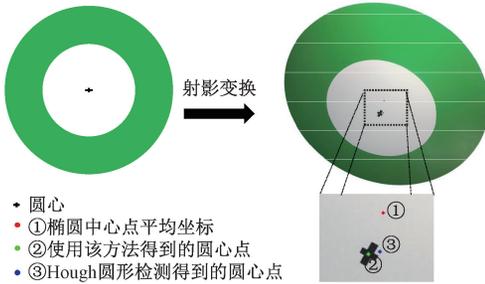


图4 同心圆圆心检测结果

Fig. 4 Detection results of concentric circle center

前文提到, 圆形在成像后会发生形变, Hough 圆检测算法适用于无形变的场景, 这在真实成像环境下很难做到。此外, Hough 圆检测算法受参数影响, 难以做到自适应提取圆形参数, 同时未能考虑圆形结构的先验几何参数, 因此对于圆心的提取有较大的误差。本文方法无需修改参数便可在发生射影形变的情况下提取圆心投影点的亚像素坐标。

2.3 位姿计算与优化

在计算位姿之前, 应建立圆心点图像坐标与平台坐标的一致性匹配关系。

定位圆心投影点 o 后, 从圆心 o 做任意直线交圆环于 o_1, i_1, i_2, o_2 , 其对应平台上三维点为 O_1, I_1, I_2, O_2 , 则有交比约束:

$$Cr\{o_1, i_1; i_2, o_2\} = Cr\{O_1, I_1; I_2, O_2\} = k \quad (9)$$

式(9)中 k 表示确定的已知常数, 可由平台视觉标识的参数得出。不同半径比的同心圆布局使得每组同心圆有唯一确定的交比常数约束作为其身份标识, 可根据 k 的不同来建立图像中圆心坐标与平台三维坐标的一致性匹配, 同时, 可根据 k 来将噪声曲线排除。

完成图像点与平台三维点的匹配后, 可使用 RPnP 算法^[21]来求解初始位姿, 得到相机坐标系与平台坐标系之间的旋转矩阵 \mathbf{R} , 以及平移向量 \mathbf{t} 完成相机与目标平面的初始定位。

考虑空间平面圆上一点 \mathbf{X} , 其在图像中投影点齐次坐标为 $\tilde{\mathbf{x}}$, 有投影关系如式(11)所示, 其中 s 为一常数, 单应性关系由式(10)所示。将该圆记为 \mathbf{C} , 其对应图像中的二次曲线为 \mathbf{C}' 。

$$\mathbf{H} = \mathbf{K}[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{t}] \quad (10)$$

$$\tilde{\mathbf{s}}\mathbf{x} = \mathbf{H}\mathbf{X} \quad (11)$$

其中, 图像与平台平面关系可由单应性矩阵 \mathbf{H} 表示, \mathbf{H} 为 8 自由度 3×3 可逆矩阵, \mathbf{K} 为相机内参, 如式(12)所示, 可通过标定相机^[22]求得, 其中 α_u, α_v 为在图像 u, v 方向以像素尺寸表示的焦距, u_0, v_0 为主点像素坐标。 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 为旋转矩阵 \mathbf{R} 的前两列, 根据点在圆上, 则有约束式(13)存在。

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{C}' \tilde{\mathbf{x}} = 0 \\ \mathbf{X}^T \mathbf{C} \mathbf{X} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

结合式(10)~(13)有:

$$\mathbf{C}' = \lambda \mathbf{H}^{-T} \mathbf{C} \mathbf{H}^{-1} = f(\mathbf{R}, \mathbf{t}) \quad (14)$$

二次曲线投影模型可由式(14)表示, 其中 λ 为固定常数, 图像中的二次曲线 \mathbf{C}' 可看作 \mathbf{R}, \mathbf{t} 的函数。如图 5 所示, 视觉标识中, 同心圆环呈正六边形排列, 则外部 6 个同心圆圆心位于以中心圆环圆心为圆心, r 为半径的圆上。

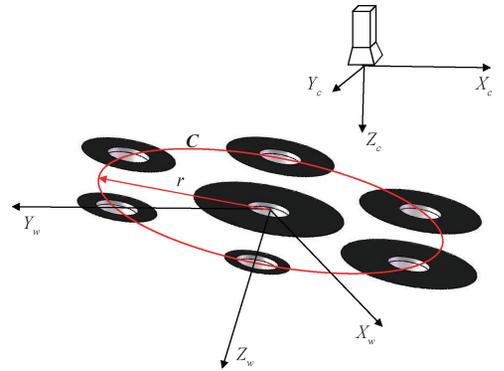


图5 平台坐标系与相机坐标系

Fig. 5 Platform coordinates and camera coordinates

令第 i 个外部圆心点图像齐次坐标 $\tilde{\mathbf{x}}_i = [u_i, v_i, 1]^T$, $\mathbf{R}^*, \mathbf{t}^*$ 为优化后的旋转矩阵与平移向量。设计非线性优化函数如下:

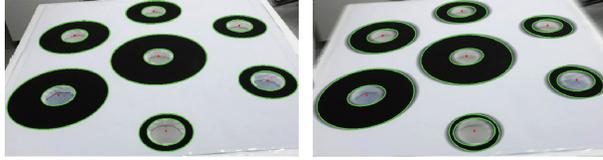
$$(\mathbf{R}^*, \mathbf{t}^*) = \frac{1}{2} \arg \min_{\mathbf{R}, \mathbf{t}} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{x}_i^T f(\mathbf{R}, \mathbf{t}) \mathbf{x}_i\|_2^2 \quad (15)$$

利用 Levenberg-Marquardt 算法进行优化, 得到优化后的旋转矩阵与平移向量。设圆心点在降落平台上的点坐标为 \mathbf{P}_w , 在相机坐标系下坐标为 \mathbf{P}_c , 则可通过式(11)定位降落平台目标位置。

$$\mathbf{P}_c = \mathbf{R}^* \mathbf{P}_w + \mathbf{t}^* \quad (16)$$

2.4 测量关键帧选取

如图6(b)所示,降落过程中无人机与降落平台之间的相对运动可能会导致图像产生运动模糊,进而改变图像原有特征,即改变同心圆内外半径差的显著性,导致一致性匹配出现错误,使位姿计算出现错误,如果不加以排除,将会对控制决策产生影响。



(a) 无运动模糊成像 (b) 运动模糊成像
(a) Imaging without motion blur (b) Imaging with motion blur

图6 同心圆及其成像

Fig. 6 Concentric circles and its projective transformation

设位姿向量 $\mathbf{P} = [\alpha, \beta, \lambda, \Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$, 其中 α, β, λ 为旋转矩阵对应的旋转向量, 可通过罗德里格斯变换得到, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为平移向量的3个元素。其单位向量 \mathbf{I} 如下:

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{P}}{\|\mathbf{P}\|} \quad (17)$$

基于运动过程的连续性, 设计图像可靠性度量 ρ 如下:

$$\rho = 1 - |\mathbf{I}_{old}^T \cdot \mathbf{I}_{new}| \quad (18)$$

其中, $\mathbf{I}_{old}, \mathbf{I}_{new}$ 分别表示上一测量关键帧与当前测量帧所对应的位姿向量的单位向量。观察式(18)可知, 当图像未产生运动模糊, 则 ρ 趋近于0, 反之, ρ 趋近于1, 因此可通过对 ρ 设定阈值来将模糊导致的不可靠测量帧排除。

3 模式切换降落控制

针对无人机在运动平台上的降落, 开发了一种多模式切换的降落控制方法, 来适配降落过程中不同阶段的需求。首先, 当运动平台进入无人机相机视场后, 观测模式被激活, 此时通过视觉测量算法完成对降落平台的位姿估计, 当一定数量的位姿信息被积累时, 接近模式被激活, 此时通过历史位姿数据完成降落平台的运动估计与预测并生成接近轨迹, 无人机执行轨迹跟踪操作, 当接近模式完成后, 无人机进入回收模式, 此时无人机直接利用视觉测量结果进行位置控制, 实现对降落平台的精准跟踪, 当平台姿态满足降落要求时, 完成降落。

3.1 观测模式

以地球固连坐标系 $\{N\}$ 为绝对坐标系, 设无人机机体坐标系为 $\{B\}$, 相机坐标系为 $\{C\}$, \mathbf{R}_b^n 表示机体坐标系

到地球固连坐标系的旋转矩阵, 无人机动力学模型可由式(19)~(22)描述:

$$\frac{d\mathbf{P}_n}{dt} = \mathbf{R}_b^n \mathbf{V}_b \quad (19)$$

$$\frac{d\mathbf{V}_b}{dt} = -\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V}_b + \frac{\mathbf{G} + \mathbf{T}}{m} \quad (20)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\Theta}}{dt} = \mathbf{W}\boldsymbol{\Omega} \quad (21)$$

$$\mathbf{J} \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} = -\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{J}\boldsymbol{\Omega} + \mathbf{G}_a + \boldsymbol{\tau} \quad (22)$$

其中, $\mathbf{V}_b, \boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Theta}$ 表示机体坐标系下飞行器速度、机体旋转角速度、机体姿态, 其中 $\boldsymbol{\Theta} = [\theta, \phi, \psi]^T$ 包含机体俯仰角、滚转角、偏航角。 \mathbf{G}, \mathbf{T} 表示机体所受重力与螺旋桨总拉力, \mathbf{J} 表示飞行器的转动惯量, \mathbf{G}_a 表示陀螺力矩, $\boldsymbol{\tau} \triangleq [\tau_x, \tau_y, \tau_z]^T$ 表示螺旋桨在在机体三轴上产生的力矩, \mathbf{W} 表示姿态变化率与机体旋转角速度之间的转换关系, 其形式由式(23)所示。

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & \tan \theta \sin \phi & \tan \theta \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \quad (23)$$

当降落平台进入相机视场后, 通过视觉计算得到降落平台在相机坐标系下的坐标 \mathbf{P}_c , 则其在 $\{N\}$ 中的坐标可由式(24)计算得到。

$$\mathbf{P}_n = \mathbf{R}_b^n \mathbf{R}_c^b \mathbf{P}_c + \mathbf{t}_b^n \quad (24)$$

其中, \mathbf{R}_c^b 表示相机坐标系到机体坐标系的旋转矩阵, 可由IMU-相机手眼标定^[23-24]得到, \mathbf{R}_b^n 可通过机体俯仰角、滚转角、偏航角计算得到, \mathbf{t}_b^n 通过GPS与机载惯导融合滤波得到, 可从飞控中读取。观测模式被激活后持续输出降落平台在绝对坐标系下的坐标, 直至降落完成。

3.2 接近模式

当运动平台足够的位置数据被观测到后(本文选取80帧), 进入接近模式。令 $\{N\}$ 下降落平台的运动轨迹 $\mathbf{P}_n(t) = [x_n(t), y_n(t), z_n(t)]^T$, 其中三轴方向轨迹为:

$$x_n(t) = a_0^x + a_1^x t + a_2^x t^2 + a_3^x t^3 + a_4^x t^4 \quad (25)$$

$$y_n(t) = a_0^y + a_1^y t + a_2^y t^2 + a_3^y t^3 + a_4^y t^4 \quad (26)$$

$$z_n(t) = a_0^z + a_1^z t + a_2^z t^2 + a_3^z t^3 + a_4^z t^4 \quad (27)$$

通过带入观测到的位置数据集合, 使用最小二乘法对四阶多项式(25)~(27)来进行拟合, 完成降落目标的运动估计。

$$\mathbf{P}_d = [x_n(t_d), y_n(t_d), z_n(t_d) + \boldsymbol{\varepsilon}]^T \quad (28)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为期望的无人机与降落平台相对高度, 可根据相机视场与高度关系设置, 本文选取1.5m。完成运动平台的运动预测后, 规划的无人机三次样条轨迹 $\mathbf{P}(t)$ 如式(29)所示。

$$\begin{cases} Diff = (\mathbf{P}_d - \mathbf{P}_0) \\ \mathbf{P}(t) = \mathbf{P}_0 + 3Diff \frac{t^2}{t_d^2} - 2Diff \frac{t^3}{t_d^3} \end{cases} \quad (29)$$

式中: \mathbf{P}_0 是无人机在绝对坐标系下的当前位置。Diff 表示无人机当前位置与期望位置的水平误差,随后,无人机执行路径跟踪操作,在该过程中,观测模式持续被激活,当运动平台足够的位置数据被观测到后重新进行期望位置 \mathbf{P}_d 的预测和轨迹的重规划,当 $\|Diff\| < 5 \text{ cm}$ 且 $t = t_d$ 时,切换到回收模式。

3.3 回收模式

系统切换到回收模式后,不再规划无人机路径,无人机处于视觉伺服位置控制状态,实现对降落平台的运动跟踪,当视觉测量到的无人机与降落平台的水平距离小于 5 cm 且降落台相对无人机姿态较为平稳,即位姿信息满足降落要求时,无人机动力系统停止,完成无人机降落。

4 实验与分析

4.1 视觉测量实验

在不同背景和角度下对视觉标识的识别结果如图 7 所示,图 7(a)~(c) 分别表示相机光轴与视觉标识平面法线成 45° 、 70° 、 85° 时的成像识别结果,可以看出,在极端角度情况下,该方法依然能够鲁棒地定位圆心投影点,为验证识别算法在多背景下的鲁棒性,分别在多种背景下进行拍摄识别,结果如图 7(d)~(i) 所示,可以发现,在诸如草地、公路等常见背景及诸如储物间、车顶等复杂背景下,视觉合作标识依然能够被稳定识别。为了给出角度测量的评价,借助惯导,本文设计实验如下。

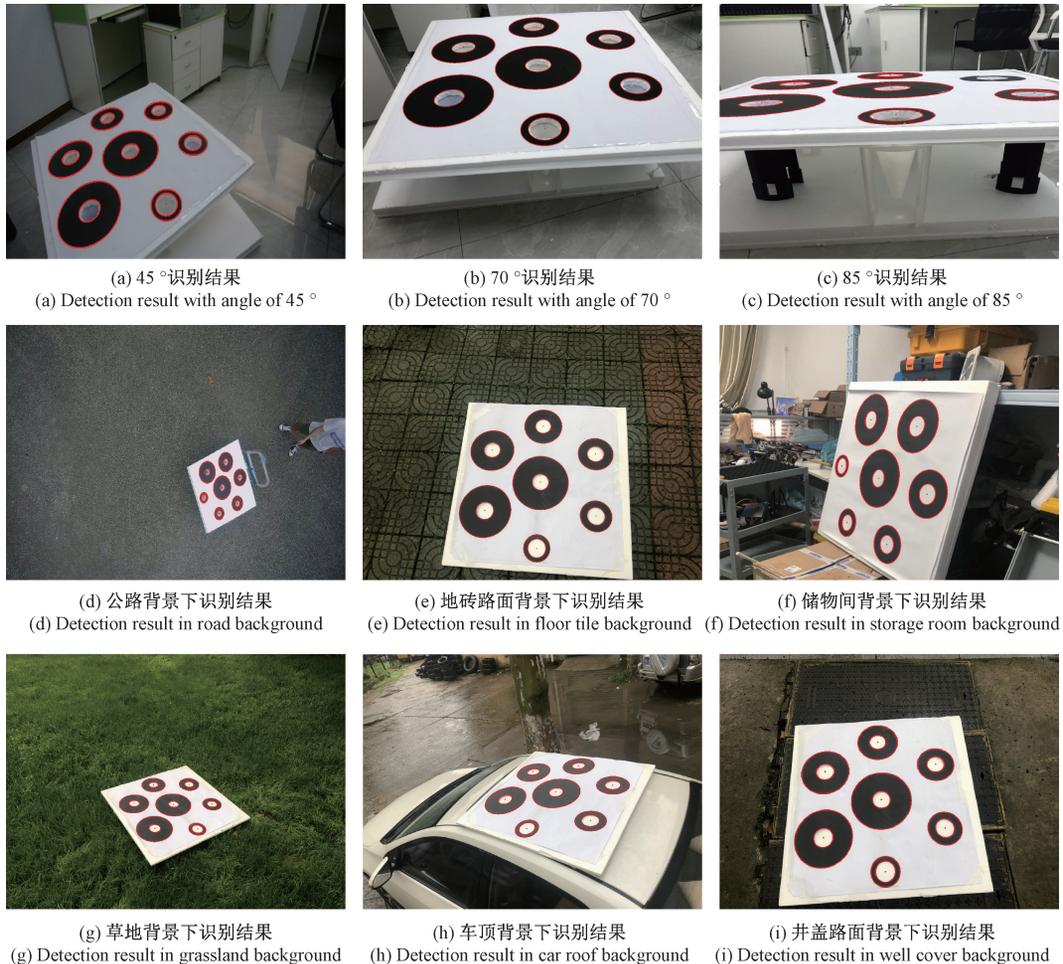


图 7 不同背景和角度下标识识别结果

Fig. 7 Visual target detection results in different backgrounds and angles

1) 将惯导坐标系与平台坐标系对齐,调整平台方向,直到惯导朝向角度读数为 0,此时平台与地球固连坐

标系朝向一致。

2) 将惯导与相机绑定,并对齐相机、惯导坐标系。

3) 移动相机采集图像, 计算相对横滚角与俯仰角, 同时与惯导测量读数进行对比。

通过对采集的 200 帧有效图像 (包含模糊图像) 进行处理、计算, 得到横滚角测量结果如图 8 所示, 俯仰角测量结果如图 9 所示, 其中分别包含未进行关键帧选取与进行关键帧选取的实验结果。

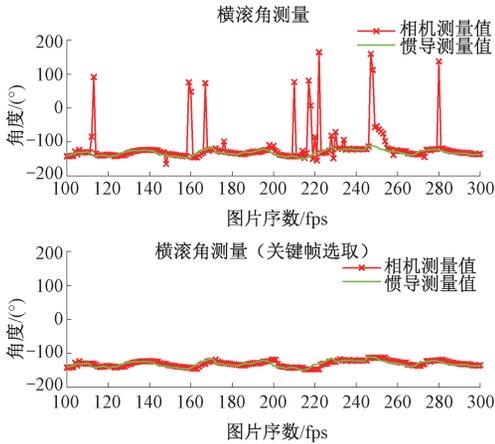


图 8 横滚角测量结果

Fig. 8 Roll angle measurement result

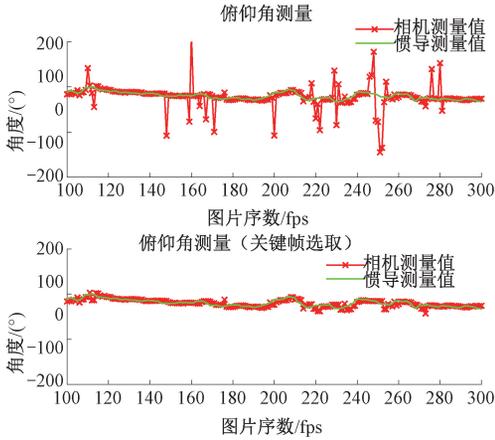


图 9 俯仰角测量结果

Fig. 9 Pitch angle measurement result

从上述结果可以看出, 通过关键帧选取可以有效降低视觉测量误差。为了得出视觉测量综合评价, 引入重映射误差 $error$ 来衡量测量精度, 每帧的重映射误差定义如式 (30) 所示。

$$error = \sum_i^N \|\tilde{\mathbf{x}}_i - \mathbf{H}\mathbf{X}_i\|_2^2 \quad (30)$$

式中: N 表示检测到的圆心点个数, $\tilde{\mathbf{x}}_i$ 表示检测到的图像圆心点的齐次坐标, \mathbf{H} 为单应性矩阵, \mathbf{X}_i 为 $\tilde{\mathbf{x}}_i$ 对应三维点的平台坐标, 将三维点带入投影方程得到图像点, 并求解与检测出的图像点之间的欧氏距离来衡量投影参数 (主

要旋转矩阵与平移向量) 的求解精度。

表 1 展示了本文所提视觉标识及识别算法在树莓派 4B 上的识别定位时间、平均重映射误差及方差与常用的编码定位标识例如: ArUco^[25], AprilTag^[26] 的对比结果, 实验中分别采集 1 500 张图像, 从中可以看出, 本文设计的视觉标识及其识别方法计算出的位姿参数误差小, 且更加稳定。同时满足在树莓派上做位姿测量的实时性要求。

表 1 多种标识识别运行结果对比

Table 1 Multiple targets detection results comparison

标识	最大耗时/ms	最小耗时/ms	平均耗时/ms	平均重映射误差/pixel	方差
本文标识	42.2	21.4	31.3	0.578	0.009 6
ArUco	43.4	33.6	54.8	0.732	0.017 7
AprilTag	41.3	32.7	43.4	0.693	0.013 9

4.2 无人机现场降落实验

本文选用一台六旋翼无人机来开展室外现场实验, 使用安装 Ubuntu18.04 操作系统的树莓派 4B 作为机载计算机通过 USB 连接飞控与相机结合 Mavlink 通讯协议来实现与飞控的通信以及控制, 详细参数见表 2。

表 2 实验设备参数

Table 2 Parameters of experimental devices

无人机参数		相机参数	
机架	ZD850 六轴	分辨率	1 280×720
最大起飞载荷/kg	6	帧率/fps	30
电池容量/mAh	10 000	照片格式	JPG
飞控类型	Pixhawk4	焦距/mm	2.8
续航时间/min	20	类型	CMOS

降落过程如图 10 所示, 将降落平台固定在小车上, 通过人工拉动小车移动, 机载相机检测到降落平台后执行降落程序完成降落。降落过程中通过视觉测量得到的降落平台位置与搭载差分 GPS 无人机、降落台的位置如图 11 所示, 可以看出, 当无人机在约 2.5 m 高度时, 回收模式激活, 无人机进入位置伺服控制状态, 此时视觉定位与差分 GPS 定位如图 12 所示, 其中降落台关于 X, Y 方向的定位误差如图 13 所示, 综合定位误差如图 14 所示, 可以看出, 无人机在 2.5 m 高度时对平台的综合跟踪定位误差小于 3.5 cm。

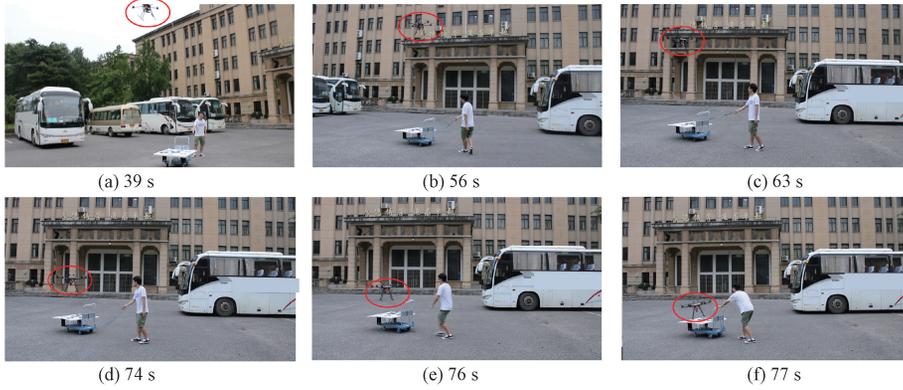


图10 降落过程

Fig. 10 Landing process

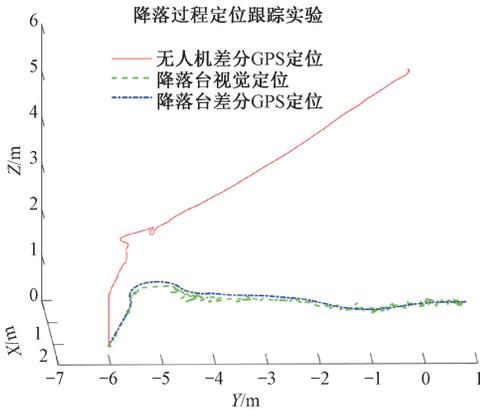


图11 降落轨迹与测量轨迹

Fig. 11 Landing trajectory and measurement trajectory

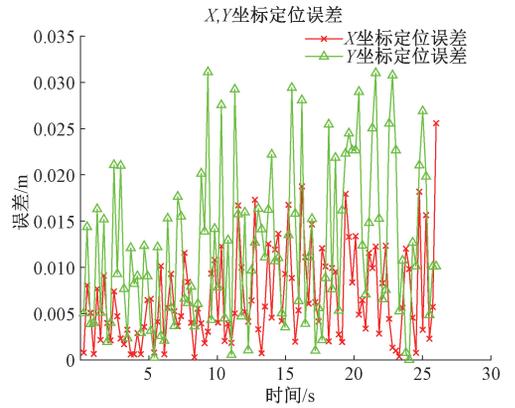


图13 位置伺服控制时 X, Y 方向定位误差

Fig. 13 Visual positioning error in X, Y direction under position servo mode

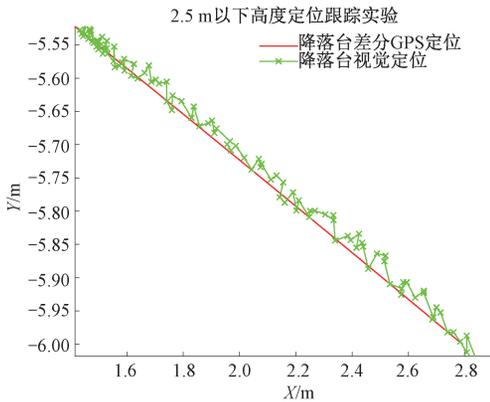


图12 位置伺服控制时视觉定位结果

Fig. 12 Visual positioning result under position servo mode

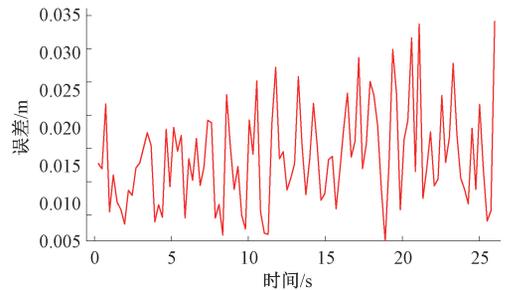


图14 位置伺服控制时综合定位误差

Fig. 14 Visual positioning error under position servo mode

5 结论

设计了一种基于多组不同半径比同心圆视觉标识的降落平台,结合调和比、交比完成了圆心投影点的亚像素精准定位。实验表明,该方法在多种复杂背景及极端角

度下仍然能够鲁棒定位圆心的投影点。根据运动过程的连续性,设计了测量关键帧选取算法,排除了因运动模糊造成的一致性匹配错误对测量结果造成的影响。基于视觉标识的几何约束,设计了非线性优化函数来完成位姿优化,实验表明,该测量方法的平均重映射误差可达到0.578 pixel,方差为0.009 6,优于 ArUco 与 AprilTag 的识别结果。现场试验表明,无人机在2.5 m高度时对降落台的定位误差小于3.5 cm,能够指导无人机完成位置控制。开发了一种基于视觉观测的多模式切换降落方法,完成了无人机在运动平台上的降落。现场实验时由人工拖曳小车运动,运动较为平稳,后续会开发适用于复杂动态环境下自主降落的无人机视觉伺服控制方法来实现无人机在高度动态的平台例如无人船上的降落。

参考文献

- [1] SHAO G, MA Y, R MALEKIAN, et al. A novel cooperative platform design for coupled USV-UAV systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(9): 4913-4922.
- [2] NIU H, JI Z, LIGUORI P, et al. Design, integration and sea trials of 3D printed unmanned aerial vehicle and unmanned surface vehicle for cooperative missions[C]. 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 2021: 590-591.
- [3] 姚天成, 赵永生, 王红雨. 等. 风光混合驱动长航程无人海空立体探测船研发[J]. *上海交通大学学报*, 2021, 55(2): 215-220.
- YAO T CH, ZHAO Y SH, WANG H Y, et al. Development of a hybrid solar and wind-powered long-range unmanned ocean stereo exploration vessel [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2021, 55(2): 215-220.
- [4] LUO C, LI X, LI Y, et al. Biomimetic design for un-manned aerial vehicle safe landing in hazardous terrain[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(1): 531-541.
- [5] KIM J, WOO S. Lidar-guided autonomous landing of an aerial vehicle on a ground vehicle [C]. 2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). 2017: 228-231.
- [6] YANG Z F, TSAI W H. Using parallel line information for vision-based landmark location estimation and an application to automatic helicopter landing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 1998, 14(4): 297-306.
- [7] 张咪, 赵勇, 布树辉, 等. 基于阶层标识的无人机自主精准降落系统[J]. *航空学报*, 2018, 39(10): 322150-322150.
- ZHANG M, ZHAO Y, BU SH H, et al. Multilevel marker based autonomous landing system for UAVs[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(10): 322150.
- [8] YUAN H, XIAO C, XIU S, et al. A hierarchical vision-based UAV localization for an open landing [J]. *Electronics*, 2018, 7(5): 68-81.
- [9] 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.
- [10] 邢伯阳, 潘峰, 王位, 等. 基于复合地标导航的动平台四旋翼飞行器自主优化降落技术[J]. *航空学报*, 2019, 40(6): 322601-322601.
- XING B Y, PAN F, WANG W, et al. Moving platform self-optimization landing technology for quadrotor based on hybrid landmark [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(6): 322601-322601.
- [11] 洪富祥, 陈冲, 丘仲锋. 一种基于机器视觉的无人机同心圆靶精准降落方法[J]. *量子电子学报*, 2021, 38(3): 307-315.
- HONG F X, CHEN CH, QIU ZH F. A precision landing method for unmanned aerial vehicle concentric round targets based on machine vision[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2021, 38(3): 307-315.
- [12] 夏路, 王琳, 梁颖茜. 基于 PNP 的多尺度目标视觉智能辅助降落系统[J]. *航空科学技术*, 2020, 31(10): 21-29.
- XIA L, WANG L, LIANG Y X. PNP-based multi-scale target vision intelligent-assisted landing system [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2020, 31(10): 21-29.
- [13] BEYELER A, ZUFFEREY J C, FLOREANO D. OptiPilot: Control of take-off and landing using optic-flow[C]. *Proceedings of the European Micro Air Vehicle Conference and Competition, Delft*, 2009: 1-8.
- [14] BACKMAN K, KULI D, CHUNG H. Learning to assist drone landings [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 3192-3199.
- [15] XU Y, LIU Z, WANG X. Monocular vision based autonomous landing of quadrotor through deep reinforcement learning [C]. 2018 37th Chinese Control Conference (CCC), 2018: 10014-10019.
- [16] BORACCHI G, FOI A. Modeling the performance of image restoration from motion blur [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(8):

3502-3517.

- [17] TRUONG N Q, LEE Y W, OWAIS M, et al. Slim DeblurGAN-based motion deblurring and marker detection for autonomous drone landing [J]. *Sensors*, 2020, 20(14): 3918-3951.
- [18] BOOKSTEIN F L. Fitting conic sections to scattered data[J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1979, 9(1): 56-71.
- [19] KIM J S, GURDJOS P, KWEON I S. Geometric and algebraic constraints of projected concentric circles and their applications to camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(4): 637-642.
- [20] HARTLEY R, ZISSERMAN A. Multiple view geometry in computer vision [M]. New York: Cambridge University Press, 2003.
- [21] LI S, CHI X, MING X. A Robust $O(n)$ solution to the perspective-n-point problem [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(7): 1444-1450.
- [22] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [23] TONG Q, PEI L, SHEN S J. VINS-Mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34(4): 1004-1020.
- [24] YANG Z, SHEN S. Monocular visual-inertial state estimation with online initialization and camera-IMU extrinsic calibration [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017, 14(1): 1-13.
- [25] GARRIDO JURADO S, MUNOZ SALINAS R, MADRID CUEVAS F J, et al. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion [J]. *Pattern Recognition*, 2014, 47(6): 2280-2292.
- [26] OLSON E. AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system [C]. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2011: 3400-3407.

作者简介



陶孟卫, 2020 年于河南工业大学获得学士学位, 现为武汉理工大学在读研究生, 主要研究方向为计算机视觉、视觉导航。

E-mail: 171700790@qq.com

Tao Mengwei received his B.Sc. degree from Henan University of Technology in 2020.

He is currently a master student at Wuhan University of

Technology. His main research interest include computer vision and vision based navigation.



姚宇威, 2018 年于武汉理工大学获得学士学位, 2020 年于武汉理工大学获得硕士学位, 现为武汉理工大学博士研究生, 主要研究方向为旋翼无人机自主降落与非线性控制。

E-mail: 892479409@qq.com

Yao Yuwei received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Wuhan University of Technology in 2018 and 2020, respectively. He is currently a Ph. D. candidate at Wuhan University of Technology. His main research interest includes autonomous landing and nonlinear control of rotorcraft UAVs.

元海文, 2018 年于武汉理工大学获得博士学位, 现为武汉工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为视觉导航与场景感知。



E-mail: hw_yuan@whut.edu.cn

Yuan Haiwen received his Ph. D. degree from Wuhan University of Technology in 2018. He is currently an associate professor and a master advisor at Wuhan Institute of Technology. His main research interests include visual navigation and scene perception.

肖长诗 (通信作者), 2005 年于卡耐基梅隆大学获得博士学位, 现为武汉理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机视觉、机器人。



E-mail: changshi_xiao@qq.com

Xiao Changshi (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Carnegie Mellon University in 2005. He is a professor and a Ph. D. advisor at Wuhan University of Technology. His main research interests include computer vision and robotics.

文元桥, 2006 年于华中科技大学获得博士学位, 现为武汉理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为水上交通系统安全、船舶智能航行。



E-mail: wenyqwhut@foxmail.com

Wen Yuanqiao received his Ph. D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2006. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Wuhan University of Technology. His main research interest includes water traffic system safety, intelligent navigation of USV.