

引用格式:吴益超,李郴荣,王荣阳,等.无人直升机着舰视觉引导系统设计与试验[J].电光与控制,2019,26(8):33-36,77. WU Y C, LI C R, WANG R Y, et al. Design and experiment of vision-based autonomous landing for unmanned helicopter system[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(8):33-36, 77.

## 无人直升机着舰视觉引导系统设计与试验

吴益超<sup>1</sup>, 李郴荣<sup>1</sup>, 王荣阳<sup>2</sup>, 盛守照<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016; 2. 中国航空无线电电子研究所, 上海 200233)

**摘要:** 针对无人直升机自主着舰过程, 自主设计了一套基于视觉引导的无人直升机着舰方案, 根据实际应用场合设计了无人直升机着舰地标, 采用基于 Canny 边缘检测与 Harris 角点检测相结合的方法获得了着舰地标特征, 通过坐标变换获得了精确的目标点位置及参考航向信息, 基于扩展卡尔曼滤波将视觉处理信息与惯导信息进行融合处理, 开展了飞行试验。试验结果表明, 本系统方案满足无人直升机自主模拟着舰验证性要求。

**关键词:** 无人直升机着舰; 视觉引导; 扩展卡尔曼滤波; 飞行试验

**中图分类号:** V279 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.08.007

## Design and Experiment of Vision-Based Autonomous Landing for Unmanned Helicopter System

WU Yi-chao<sup>1</sup>, LI Chen-rong<sup>1</sup>, WANG Rong-yang<sup>2</sup>, SHENG Shou-zhao<sup>1</sup>

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. China National Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** Considering the autonomous landing process of the unmanned helicopter, a landing scheme of the unmanned helicopter based on visual guidance is designed independently. The landing landmark is designed according to the actual application situation. The landing landmark features are obtained by the method of combining Canny edge detection with Harris corner detection, and the precise target location and heading information are obtained by coordinate transformation. Based on the Extended Kalman Filter (EKF), the visual processing information and INS information are fused and processed, and then a flight test is carried out. The results show that the system meets the verification requirements of helicopter autonomous landing.

**Key words:** unmanned helicopter landing; visual guidance; EKF; flight test

### 0 引言

自主着舰是舰载无人直升机飞行中最关键的阶段。基于视觉引导的无人直升机自主着舰, 具有定位精度高、受环境影响小等优点<sup>[1-2]</sup>, 实用价值较大, 因而得到广泛而深入的研究。视觉导航方法就是利用机载摄像机采集着陆目标的图像序列, 并进行分析和处理, 从而估计无人机相对目标平台点的位姿信息, 再根据这些信息利用飞控计算机系统来引导无人机自主着陆/着舰<sup>[3]</sup>。

当前, 国外研究机构和国内高校都进行了不同程度的研究并取得了一定的成果。文献[4]设计了以矩形为主要特征图形的着陆目标, 采用角点检测提取地标特

征, 进而由位置估计获得无人飞行器的位姿信息, 实验结果较好; 文献[5-7]利用机载摄像机对机场跑道特征进行检测, 从而估计无人机在进近着陆阶段的位置和姿态, 实验效果较理想; 文献[8]利用微型红外热像仪探测地面上的斑点, 从而对无人机的相对位置进行解算; 文献[9]以 T 形红外辐射物体为辅助降落标志, 通过视觉导航信息和神经网络控制, 使无人直升机获得了良好的着陆精度; 文献[10]基于单目机载相机检测机场主跑道两侧边缘线和机场前沿, 获取了无人机着陆时的姿态和位置参数, 仿真结果表明位姿输出精度较好; 文献[11]采用在线特征选择结合粒子滤波算法, 选择区分度较好的特征获得似然图像并用于无人直升机的地标跟踪, 算法跟踪精度良好。本文提出了视觉引导着舰方案, 根据图像处理获得的位置及航向数据结合扩展卡尔曼滤波融合, 在陆基着舰地标平台上验证视觉引导控制方案的有效性。

收稿日期: 2018-06-11 修回日期: 2019-05-21

基金项目: 航空科学基金(2016ZC52018)

作者简介: 吴益超(1994—), 男, 江苏镇江人, 硕士生, 研究方向为先进飞行器控制。

# 1 系统组成

## 1.1 整体方案

根据实际任务系统的功能需求,提出了图 1 所示的无人直升机着舰视觉引导系统框架。

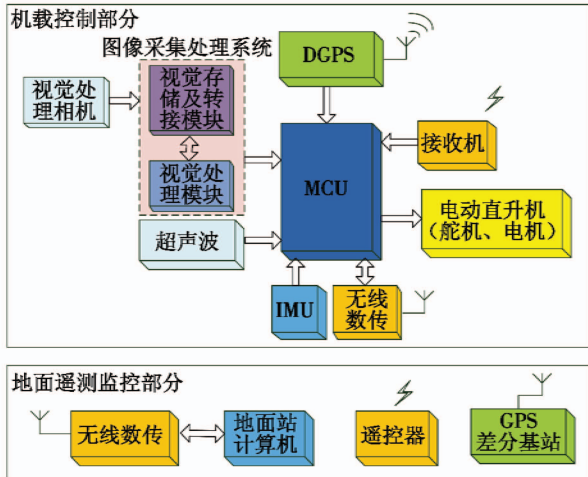


图 1 直升机着舰视觉引导系统框架

Fig.1 The framework of the visual guidance system

系统由机载控制和地面遥测监控两部分组成。机载控制部分负责图像的采集处理及飞行控制,包括图像采集处理系统、飞行控制模块、传感器等;地面遥测监控部分负责对无人直升机飞行状态进行实时监测及输出遥控指令,包括无线数传、地面站计算机等。

## 1.2 着舰区域地标图案的设计

根据项目任务需求,本文设计如图 2 所示的着舰地标特征图案。该着舰地标为正方形黑色背景,前景中分布在白色圆环上方的白色条状线为着舰牵引标志线,两侧白色 T 形符为校直辅助标志线,用来确定无人直升机着舰参考航向。地标图中白色同心圆环用来确定着舰区域以及估计直升机及平台的相对位置。内部浅灰色实心圆形的网格区域为缩比格栅,格栅内的孔洞点可作为辅助特征参与到平台的相对位置估计。

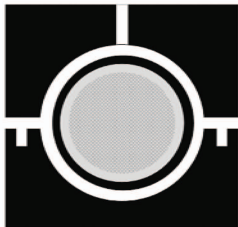


图 2 着舰地标图案

Fig.2 The landmark for landing

# 2 着陆地标检测与处理

本方案基于图像的位姿参数估计,主要包括相机标定、图像处理、位姿估计 3 大部分。其中,图像处理

模块是实现准确估计位姿参数的关键,包括图像预处理、轮廓提取、角点检测及角点排序。

## 2.1 相机标定及预处理

本文相机标定参考文献[12]的标定方法,采用发展较为成熟的棋盘标定法获得相机摄像头内参矩阵  $K$ 。当无人直升机飞行到着舰地标区域附近时,根据地面遥控指令进入自主降落模式,图像采集系统开始采集着陆地标信息,获取的实时图像信息需先进行预处理,主要包括以下 4 步:1)滤波去噪(中值滤波);2)图像灰度化(加权平均法);3)图像二值化(图像阈值分割);4)形态学运算(腐蚀、膨胀、开运算、闭运算)。

## 2.2 特征提取

本文特征提取分两部分:基于 Canny 边缘检测算法的着舰地标图外大同心圆轮廓提取以及基于 Harris 算子的 T 形符角点检测,同心圆环检测获得着陆地标圆心,角点检测则是协同地标同心圆圆心获得图像的参考航向。

同心圆环特征明显,易于检测,Canny 检测地标轮廓是通过计算图像中每个像素点的梯度强度和方向,如式(1),再利用非线性极大值抑制、双阈值及抑制弱边缘等处理完成圆形轮廓线的检测<sup>[13]</sup>,即

$$\begin{cases} G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \\ \theta = \arctan(G_x + G_y) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $G$  和  $\theta$  分别为梯度强度及方向;  $G_x$  和  $G_y$  分别为梯度强度的水平和垂直方向的一阶导数值。获取的轮廓通过最小二乘法拟合得到圆心位置。

Harris 算法利用高斯窗口在图像中移动,通过窗口灰度变化程度来判断像素点是否为角点,即窗口在角点处灰度会有明显变化。窗口移动  $u, v$  产生的灰度变化为

$$E_{u,v}(x,y) = \sum_{u,v} \omega_{x,y} [I(x+u,y+u) - I(x,y)]^2 \quad (2)$$

式中,  $(x,y)$  为二维图像。

本文中提取完各主要角点后,按照顺时针法则依次标记各个角点,具体如图 3 所示。

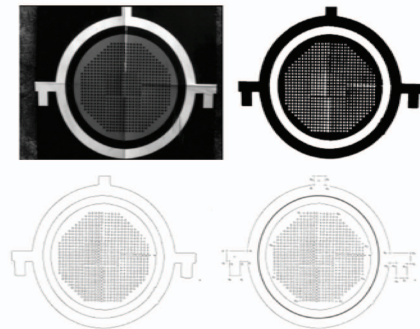


图 3 着舰地标图像处理

Fig.3 Image processing of the landmark



### 3 位姿估计与跟踪

本文位姿估计是根据地标特征点和图像的透视投影关系进行定位,方案中的摄像机是固定安装在直升机上的。考虑到本文直升机在自主降落中,俯仰角与滚转角近似为零,故位姿估计方法只针对相对位置和偏航角。

#### 3.1 相对位置及偏航角估计

定义  $O_w X_w Y_w Z_w$  为世界坐标系,  $O_c X_c Y_c Z_c$  为相机坐标系。图4所示为特征点在不同坐标系下的投影关系。

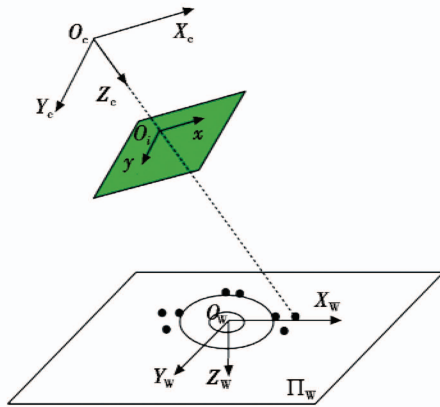


图4 特征点投影关系

Fig.4 Projection relations of feature points

假设着陆地标图像中的一特征角点  $P$ , 在世界坐标系中的坐标为  $(x_w, y_w, z_w)$ , 在相机坐标系中的坐标为  $(x_c, y_c, z_c)$ 。则转换关系为

$$(x_c, y_c, z_c)^T = \mathbf{R}(x_w, y_w, z_w)^T + \mathbf{T} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ h \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{R}, \mathbf{T}$  分别为

世界坐标系到相机坐标系的旋转和平移变换矩阵<sup>[14]</sup>。根据投影模型及坐标转换关系,可以得到世界坐标系中的坐标点到图像像素坐标的对应关系为

$$(z_w + h)(u, v, 1)^T = \mathbf{K}(\mathbf{R}, \mathbf{T})(x_w, y_w, z_w, 1)^T \quad (4)$$

式中:  $(u, v)$  为像素坐标;  $\mathbf{K}$  为内参矩阵。

由于相机固连在飞行器上,假设相机光心与飞行器质心一致,因此,相对位置可通过计算着陆地标中心在相机坐标系的位置坐标获得,即求取平移矩阵  $\mathbf{T}$  即可。

设  $P_1, P_2$  为世界坐标系下两个特征角点,  $I_1, I_2$  为其图像坐标系下的映射点。根据三角形相似性可求得飞行器高度为

$$h = \frac{f/d * |\vec{P_1 P_2}|}{|I_1 I_2|} \quad (5)$$

式中,  $f/d$  为焦距。

考虑到着陆标志中心点的世界坐标为  $(0, 0, 0)^T$ , 将标志中心点的像素坐标代入式(3)可得中心点在  $O_c X_c Y_c Z_c$  下的坐标。简化后求得相对位置信息为

$$\begin{cases} T_x = \frac{h(u - u_0)}{a_x} \\ T_y = \frac{h(v - v_0)}{a_y} \end{cases} \quad (6)$$

同理,姿态估计中针对航向角的估计可以通过像素点坐标来判断。由于本文中着陆地标图案设置了航向参考标志,故可由图像坐标系下的特征角点获得航向线,进而根据参考航向求解出偏航角。

#### 3.2 基于扩展卡尔曼滤波的跟踪器

由于无人直升机在着陆过程中状态不断变化,针对着陆地标点的跟踪属于动态目标跟踪。因此,为防止视觉处理系统丢失目标,采用扩展卡尔曼滤波器对视觉和IMU数据进行融合,以提高系统稳定性和实时性。该跟踪器以视觉处理系统输出的位置、速度等为输入。惯性测量数据作为递推位置估计,视觉处理信息用于修正位置的累计误差。由扩展卡尔曼滤波(EKF)递推估计形式可得系统在  $k+1$  时刻的系统方程与量测方程分别为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \boldsymbol{\omega}_k \\ \mathbf{z}_{k+1} = h(\mathbf{x}_{k+1}) + \mathbf{v}_{k+1} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $k+1$  时刻系统的状态向量  $\mathbf{x}_{k+1}$ , 包括惯性坐标系下无人直升机的三维位置向量  $[P_x \ P_y \ P_z]^T$  和三维速度向量  $[v_x \ v_y \ v_z]^T$ ;  $\mathbf{u}_{k+1} = [a_x \ a_y \ a_z]^T$  是系统  $k+1$  时刻的输入向量;  $\mathbf{z}_{k+1} = [P_x \ P_y \ P_z]^T$  是  $k+1$  时刻的观测量;  $\boldsymbol{\omega}_k$  和  $\mathbf{v}_{k+1}$  分别为  $k$  时刻过程噪声和  $k+1$  时刻的量测噪声。

假设过程噪声和量测噪声均为相互独立且均值为零的高斯白噪声,即  $\boldsymbol{\omega}_k \sim N(0, \mathbf{Q}), \mathbf{v}_k \sim N(0, \mathbf{R})$ 。针对式(7)做泰勒级数展开,忽略二阶以上的高阶项,在滤波值附近,原系统可以近似为一个线性系统

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k + \boldsymbol{\omega}_k \\ \mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{v}_{k+1} \end{cases} \quad (8)$$

式中:

$$\mathbf{H}_{k+1} = \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}, \mathbf{u}_k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$\mathbf{F}_k = \frac{\partial f(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\hat{\mathbf{x}}_{k|k}, \mathbf{u}_k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \delta_t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \delta_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$B_k = \frac{\partial f(\mathbf{x}, u)}{\partial u} \Big|_{\hat{\mathbf{x}}_{k|k}, u_k} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\delta_t^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\delta_t^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}\delta_t^2 \\ \delta_t & 0 & 0 \\ 0 & \delta_t & 0 \\ 0 & 0 & \delta_t \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中,  $\delta_t$  是系统的采样时间。

最终得到卡尔曼预测方程为

$$\begin{cases} K_k = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R)^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k+1} = F_k \hat{\mathbf{x}}_k + K_k (Z_k - h(\hat{\mathbf{x}}_k)) \\ P_{k+1} = (I - K_k H_k) P_k + Q \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $P$  为预测的协方差;  $K$  为增益矩阵。

### 4 飞行试验结果分析

图 5a、图 5b 所示分别为无人直升机自动降落时, GPS 当前信息和基于视觉处理获得的平面 X 轴及 Y 轴位移与误差曲线, 整个降落过程中位移跟踪性能良好, X 轴和 Y 轴动态位移误差均在 0.1 m 左右。图 5c 给出了降落过程中 Z 轴位移曲线与误差曲线, 曲线跟踪结果显示, 无人直升机按阶梯级高度降落时, 在落差较大时高度跟踪误差提高, 波动约为 0.1 m。图 6 为航向跟踪结果, 动态跟踪误差在 1° 以内, 跟踪性能良好。

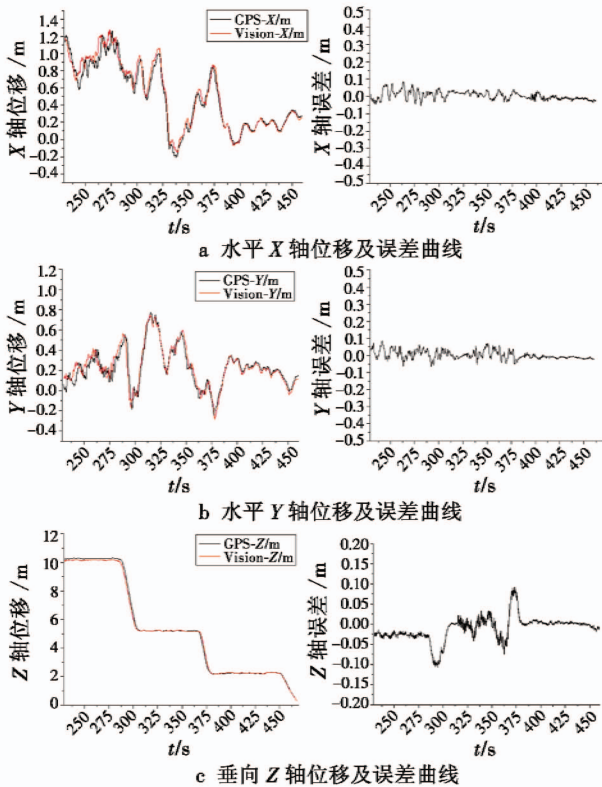


图 5 位置跟踪曲线

Fig. 5 Position tracking curves

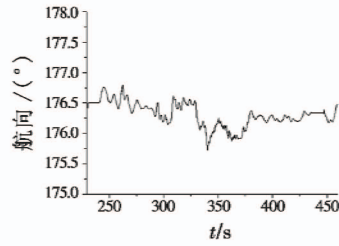


图 6 航向跟踪曲线

Fig. 6 Heading tracking curve

### 5 结束语

本文以无人直升机为对象, 设计了一套完整的无人直升机视觉着舰系统方案, 采用 Canny 检测与 Harris 角点检测相结合的方法获得地标特征信息并进行融合。由陆基模拟着舰试验数据分析可知, 无人直升机视觉引导模拟着舰中, X 轴、Y 轴位置误差均在 0.1 m 以内, 航向跟踪精度在 1° 以内, 均在外界干扰允许的范围, 本文设计的着舰地标特征提取及位置估算、位姿跟踪方法能够引导无人直升机准确降落在着陆地标上, 为后期无人直升机实际视觉引导着舰提供一定的理论和实践参考。在实际应用中, 实际参数还需根据具体系统而定。

### 参考文献

- [1] 唐大全, 毕波, 王旭尚, 等. 自主着陆/着舰技术综述 [J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(5): 550-555.
- [2] NILSSON C C A, HEINZEN S N, HALL C E, et al. GPS auto-navigation design for unmanned air vehicles [R]. Raleigh: North Carolina State University, 2003.
- [3] 张小正, 周鑫, 陈丽娟, 等. 无人机视觉着陆位姿参数估计方法 [J]. 电光与控制, 2017, 24(5): 26-29.
- [4] SHARP C S, SHAKERNIA O, SASTRY S S. A vision system for landing an unmanned aerial vehicle [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001: 1720-1727.
- [5] LAJACKER M, KONDAK K, SCHWARZBACH M, et al. Vision aided automatic landing system for fixed wing UAV [C] // Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2013: 2971-2976.
- [6] RAJA V M. Vision based landing for unmanned aerial vehicle [C] // Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2011: 1-8.
- [7] ABU-JBARA K, ALHEADARY W, SUNDARAMORTHI G, et al. A robust vision-based runway detection and tracking algorithm for automatic UAV landing [C] // IEEE International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2015: 1148-1157.

(下转第 77 页)



油机。最后完成了空中加油的自动对接,可见该锥套定位算法能够满足空中加油的对接仿真要求。

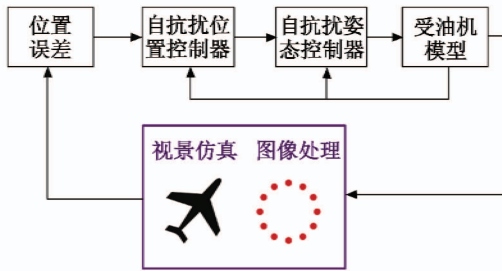


图13 控制系统闭环仿真结构图

Fig.13 Structural diagram of control system simulation

## 5 总结

本文首先建立加油软管以及大气紊流模型作为视觉仿真的基础,然后利用椭圆拟合和LHM算法对锥套进行三维定位,最后基于EKF对系统进行优化。从仿真结果可以看出,LHM定位算法在轻度、中度、重度紊流干扰下均具有很高的定位精度。在不同紊流下,引入EKF之后,视觉定位系统的鲁棒性均有提升,并且ROI区域跟踪在不降低加油锥套定位精度的基础上,使锥套定位系统输出频率得到很大提升。由于光照条件及其他环境因素的影响,基于LED灯的锥套检测效果并不十分稳定,因此有待进一步探索基于深度学习的图形处理算法。

## 参考文献

- [1] KHANAFSEH S M, PERVAN B. Autonomous airborne refueling of unmanned air vehicles using the global positioning system[J]. *Journal of Aircraft*, 2007, 44(5):1670-1682.
- [2] POLLINI L, CAMPA G, GIULIETTI F, et al. Virtual simulation set-up for UAVs aerial refuelling[C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, 2003:1-8.
- [3] POLLINI L, MATI R, INNOCENTI M. Experimental evaluation of vision algorithms for formation flight and aerial refueling[C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, 2004. doi:10.2514/6.2004-4918.

evaluation of vision algorithms for formation flight and aerial refueling[C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, 2004. doi:10.2514/6.2004-4918.

- [4] CAMPA G, FRAVOLINI M L, FICOLA A, et al. Autonomous aerial refueling for UAVs using a combined GPS-machine vision guidance[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2004. doi:10.2514/6.2004-5350.
- [5] FRAVOLINI M L, FICOLA A, NAPOLITANO M R, et al. Development of modelling and control tools for aerial refueling for UAVs [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2003. doi:10.2514/6.2003-5798.
- [6] VALASEK J, GUNNAM K, KIMMETT J, et al. Vision-based sensor and navigation system for autonomous air refueling[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2005, 28(5):979-989.
- [7] TANDALE M D, BOWERS R, VALASEK J. Trajectory tracking controller for vision-based probe and drogue autonomous aerial refueling[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, 29(4):846-857.
- [8] MARTINEZ C, RICHARDSON T, THOMAS P, et al. A vision-based strategy for autonomous aerial refueling tasks [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, 61(8):876-895.
- [9] BROWN A P, BASTIAN M. A feasibility study on the in-flight measurement of enroute wake vortex characteristics [C]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, 2004. doi:10.2514/6.2004-5366.
- [10] 赵震炎,肖业伦,施毅坚. Dryden 大气紊流模型的数字仿真技术[J]. *航空学报*, 1986, 7(5):433-443.
- [11] 秦勇,王宏伦,苏子康,等. 基于视觉的自主空中加油锥套检测与跟踪[J]. *战术导弹技术*, 2016(6):87-93.
- [12] LU C P, HAGER G D, MJOLSNESS E. Fast and globally convergent pose estimation from video images[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(6):610-622.

(上接第36页)

- [8] WENZEL K E, ROSSET P, ZELL A. Low-cost visual tracking of a landing place and hovering flight control with a microcontroller[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2010, 57(1/2/3/4):297-311.
- [9] 陈龙胜,陈谋,姜长生. 基于视觉信息的无人机自主着陆过程姿态和位置估计[J]. *电光与控制*, 2009, 16(5):47-51.
- [10] ZHUANG L K, HAN Y D, FAN Y M, et al. Method of pose estimation for UAV landing [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(s):S20401-1-S20401-4.

- [11] 周超,韩波,李平,等. 基于自适应特征的地标跟踪算法[J]. *计算机工程*, 2011, 37(24):155-157.
- [12] 尹文生,罗瑜林,李世其. 基于OpenCV的摄像机标定[J]. *计算机工程与设计*, 2007, 28(1):197-199.
- [13] 周城宇,甄子洋,黄一敏,等. 基于视觉引导的无人直升机着舰技术研究[J]. *导航定位与授时*, 2018, 5(4):43-48.
- [14] 周富强,张广军. 一种单摄像机视觉导引方法[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(9):1129-1132.