

融合地面多传感器信息引导无人机着陆*

张代兵¹,王 勋²,钟志伟¹,闫成平³,向绍华¹,习业勋¹

(1. 国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410073;

2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; 3. 中国人民解放军 63961 部队, 北京 100012)

摘要:针对无人机自主着陆过程中卫星导航系统易被干扰的问题,提出了一种基于地基多传感器融合的无人机自主着陆引导方法。采用主动式激光照射的方式,获取机载反射棱镜的近红外成像,在红外图像中对无人机目标进行识别;通过坐标转换将识别结果映射到可见光图像中,在可见光图像中选择的感兴趣区域进行可见光目标识别,从而在降低计算量的基础上获得更加精确的无人机相对角度信息;利用距离测量信息和引导系统角度信息可以获得精确的无人机相对位置。无人机着陆引导试验结果表明,该方法能够提供精确的无人机位置信息,能有效适应于复杂背景下的无人机自主着陆引导。

关键词:多传感器融合;无人机着陆;卫星导航干扰环境;近红外相机

中图分类号:V19 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)01-151-06

Guidance of unmanned aerial vehicles landing by ground-based multisensory fusion

ZHANG Daibing¹, WANG Xun², ZHONG Zhiwei¹, YAN Chengping³, XIANG Shaohua¹, XI Yexun¹

(1. College of Artificial Intelligence, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China; 3. The PLA Unit 63961, Beijing 100012, China)

Abstract: A ground-based multisensory fusion approach was proposed for the guidance of UAVs (unmanned aerial vehicles) landing in GNSS (global navigation satellite system) denied environments. Firstly, an active laser transmitter was used to irradiate the UAV. The light spot in the obtained infrared images reflected by the airborne reflection prism was recognized as the UAV. Then, a region of interest was defined in the visible-light image by coordinate transformation according to the result of the infrared image. To reduce the computation complexity, the UAV was detected and located in the region of interest. Finally, the relative position of the UAV can be obtained by combining the distance measurement and the angle of the pan-tilt unit. Results of flight experiments demonstrate that the proposed approach can offer the precise positional information of UAV and can effectively adapt the complex background of UAV autonomous landing.

Key words: multisensory fusion; unmanned aerial vehicles landing; global navigation satellite system denied environments; near-infrared camera

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)正在逐步代替人类执行一些烦琐、脏乱和危险的任务^[1]。随着无人机的应用越来越广泛,无人机的安全回收也引起了越来越多的关注。目前,无人机的着陆引导主要依赖卫星导航系统,然而在复杂的战场环境下,卫星导航系统很容易被关闭或干扰。本文针对无卫星导航系统被干扰的情况,研究无人机着陆的精确引导方法。

在卫星导航系统不可靠的情况下,国外研究了多种引导方法和系统。如瑞士 RUAG 宇航公司的 OPATS (object position and tracking system), OPATS 同时利用了激光和雷达技术,可用于无人

机自动着陆引导^[2]。美国 Sierra Nevada 公司的 DT-ATLS (dual-thread automatic takeoff and landing system) 集成了全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 和毫米波雷达、红外成像仪等探测手段^[3]。法国的“Deck-Finder”系统利用多台无线电测距模块进行定位,可用于垂直起降无人机的舰载起飞和降落^[4]。

此外,随着计算机视觉与摄像测量的交叉发展,基于视觉的无人机着陆引导成为一个新的研究方向^[5]。目前,多数相关研究利用机载视觉,即通过机载传感器来识别机场跑道^[6]或者合作标识^[7]来引导无人机着陆。但是,受限于地面环

* 收稿日期:2016-11-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61403406)

作者简介:张代兵(1977—),男,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail:swimword@126.com

境的复杂性,针对某一特定场景的机载视觉着陆引导方法很难通用于其他环境;此外,考虑到无人机,特别是小型无人机的机载计算能力有限,很难满足着陆引导的实时性要求。为此,文献[8]提出了一种基于地面多传感器分区域接力测量的引导方案。文献[9]采用图像跟踪技术和二轴经纬仪控制技术,通过地面标定好的摄像机组同步拍摄无人机图像,提取无人机目标,通过多目交会的方式计算其位置和姿态。Yang^[10]采用地基近红外相机、双目视觉的方式对固定翼无人机引导降落,方便实现。

基于地面引导的思路,针对卫星导航系统失效条件下的无人机自动着陆问题,文献[11-14]进行了一定研究。文献[11]利用双目红外视觉和一个二自由度转台设计第一代地面视觉引导系统,可提供大视场角的无人机定位,然而,受限于基线长度,定位精度不高。为此,文献[12]设计了第二代改进的地面视觉引导系统,利用双转台增加基线长度,从而提高定位精度,然而该系统对数据的同步性要求高。进一步,文献[13]采用测距模块测量无人机到地基引导系统的距离,代替双目视觉的深度信息,从而提高系统的定位精度。为了提高目标的识别率,文献[14]引入主动激光发射器,以主动照射目标的方式构建合作目标,从而设计新的无人机自主着陆引导系统。本文基于该系统,设计了无人机自主着陆的引导过程和多传感器融合方法。

本文采用主动式激光发射器,获取机载反射棱镜的红外成像,考虑到近红外相机接收激光主动发射器的光强信号随无人机的距离而变化,使得红外成像存在较大的偏差。为此,将近红外获得目标信息与可见光传感器获得的图像进行融合,根据红外信息确定可见光图像中的感兴趣区域,并在感兴趣区域中进行可见光目标识别,进一步结合距离测量信息获得更加精确的无人机相对位置信息。飞行实验结果表明,该方法能精确地引导无人机自主着陆。

1 硬件系统描述

无人机自主着陆引导系统包括地面引导系统部分和无人机机体加装功能组件,如图 1 所示。其中,地面引导系统包括一个二自由度转台、一个可见光相机、一个近红外相机、距离传感器接收端、激光发射器和引导计算机。无人机机体加装的功能组件包括反射棱镜和距离传感器发射端。图 2 给出地面引导系统中集成了各种传感器的二

自由度转台。图 1 还给出引导系统坐标系的定义, X 为垂直于跑道的水平方向, Y 为深度方向平行于跑道, Z 为高度方向,坐标原点为转台。

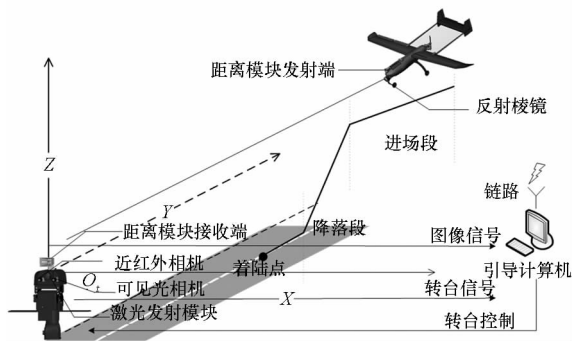


图 1 自主着陆引导系统硬件组成示意图
Fig. 1 Diagram of the auto-landing guidance system

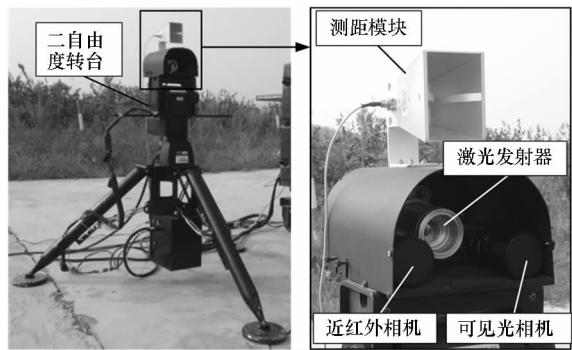


图 2 集成各种传感器的二自由度转台
Fig. 2 Integrated two degree of freedom pan-tilt unit

利用上述地面引导系统,首先采用激光发射器对无人机进行照射,获取反射棱镜反射激光的红外成像。通过对红外成像进行初步的目标识别定位,确定可见光图像的感兴趣区域。进一步在感兴趣区域内进行目标识别,减少识别区域以提高计算效率及识别精度。采用这种近红外和可见光信息融合的方式获取目标的精确角度信息。最终根据获得的角度信息、由测距模块得到的距离信息以及转台的角度计算目标的位置^[13]。

2 基于多传感器融合的引导方法

无人机自主着陆过程中,采用基于近红外和可见光的多传感器融合定位方法对无人机进行定位引导,其流程图如图 3 所示。首先在近红外图像中识别无人机目标。由于光源干扰、光路散射和局部遮挡导致不同环境和不同距离时红外成像效果不同,为此,根据近红外和可见光图像标定获得的坐标转换矩阵进行坐标转换,将近红外图像中的目标点映射到可见光图像中,进一步在可见光图像中选择感兴趣区域,在感兴趣区域内对目

标再次进行识别,从而获取无人机在可见光图像中的准确位置。最后,根据测距模块得到的目标距离和由转台给出的角度信息计算目标位置。下面给出通过近红外和可见光传感器融合进行目标识别定位的方法。

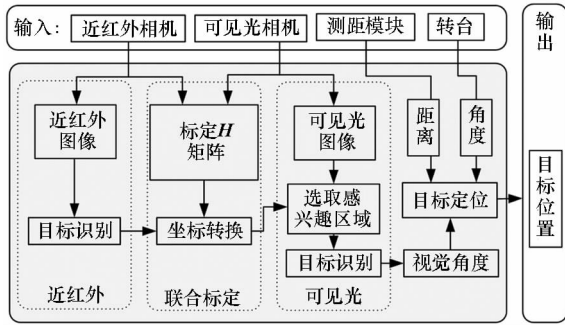


图 3 基于多传感器融合目标定位流程图

Fig.3 Flow chart of the multi-sensor fusion-based approach

2.1 近红外图像目标检测

通过反射激光获得的近红外图像中,目标具有明显的特征,通常是一个圆形光斑。但光路散射或偶尔的局部遮挡导致噪声光斑的干扰。为此,设计基于近红外的无人机目标识别方法,其流程如图 4 所示。首先采用图像二值化和形态学腐蚀处理滤掉小的噪声点,得到多个边缘的轮廓,进一步提取最大轮廓,当目标轮廓面积大于一定阈值时进行椭圆拟合,最后得到目标的中心点坐标位置作为无人机的位置。

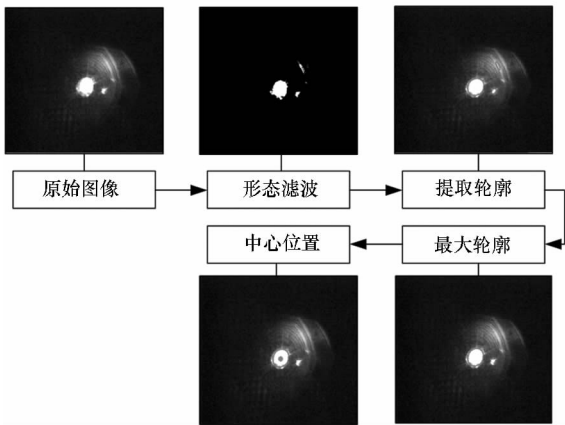


图 4 近红外图像目标检测流程

Fig.4 Flow chart of target detection in the near-infrared image

为精确提取目标光斑,对提取的目标边界进行椭圆最小二乘拟合。进一步可以求得图像坐标系中椭圆中心点的坐标作为无人机的位置。

实际引导过程中,光源干扰、光路散射和局部遮挡导致不同环境和不同距离时红外成像效果不

同。尤其是强太阳光、近距离下近红外图像变化较大。因此,上述目标检测方法势必会产生误差。下一步将利用可见光图像对无人机目标进行识别定位,从而提高目标定位的精度。

2.2 近红外和可见光相机联合标定

由于可见光相机和近红外相机安装在转台的不同位置,首先要对两组相机进行联合标定。利用 H 单应矩阵(homography)的方法进行坐标转换。 H 矩阵常用于各种匹配算法以及图像之间的平移、旋转、缩放等操作^[15]。首先利用像素坐标和世界坐标的关系,则:

$$z \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 & 1 \\ 0 & f_y & v_0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot (R \ T) \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$z \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 & 1 \\ 0 & f_y & v_0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot (R' \ T') \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{x}_u = (u, v, 1)^T$ 为近红外图像无人机目标中心点的位置, $(X, Y, Z, 1)^T$ 为世界坐标上的无人机位置, $\mathbf{x}'_u = (u', v', 1)^T$ 为可见光图像无人机目标中心点的位置。 H 矩阵是一个 3×3 的矩阵,根据式(1)、式(2), H 矩阵可以表示为:

$$\mathbf{x}'_u = H\mathbf{x}_u \quad (3)$$

由于不容易获得远距离的无人机数据,可以采用基于差分 GPS 信息控制引导系统跟踪无人机或者手动控制转台跟踪无人机的方式获得图像序列,从而获取一系列的 \mathbf{x}_u 和 \mathbf{x}'_u 值,以计算出 H 值。

2.3 可见光图像目标识别

利用联合标定得到的 H 矩阵,通过坐标转换将近红外目标识别得到的目标中心坐标映射到可见光图像中。以此为中心定义像素大小为 $m \times n$ (试验中取 $m = 100, n = 50$) 的区域为感兴趣区域。在感兴趣区域中对可见光图像进行目标识别,从而降低计算量。为进一步提高系统的实时性,根据文献[16]中定义的图像区域复杂度、纹理分布特征,针对特征明显的无人机采用 Camshift^[17] 对目标进行检测跟踪,已减少光照对目标的影响。针对特征不明显的目标采用 Adaboost^[18] 对目标进行识别,明显的目标也可以采用 Adaboost,然而 Camshift 的速度快于 Adaboost。

3 无人机自主着陆引导试验

为验证基于地基多传感器融合的无人机自主着陆引导方法的有效性,利用多款无人机开展多种环境和光照下的自主着陆引导试验。

3.1 试验设定

为验证方法的通用性,试验中选择两款无人机平台。分别为“开拓者”无人机和“GKA”无人机,如图 5 所示。两款无人机的参数分别如表 1 所示。



(a) “开拓者”无人机 (a) “Pioneer” UAV (b) “GKA”无人机 (b) “GKA” UAV

图 5 试验中的无人机平台

Fig. 5 UAV Platforms in the experiment

从图 5 中可以看出,反射棱镜安装在机头下方,“开拓者”无人机的测距模块安装在机头上,“GKA”无人机的测距模块内置在机舱内机头的位置。无人机降落过程中飞行控制方法的详细过程可以参考文献[19]。

表 1 无人机参数

Tab. 1 UAV parameters

指标	“开拓者”	“GKA”
机长	2.2 m	3.0 m
翼展	2.9 m	5.0 m
飞行速度	80 ~ 140 km/h	80 ~ 155 km/h
升限	3000 m	3000 m
起降方式	滑跑起降	滑跑起降

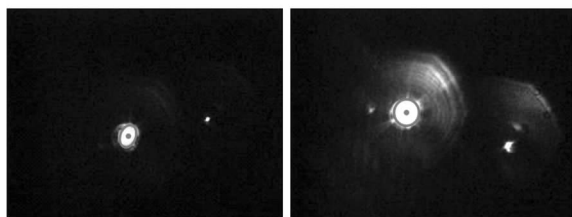
3.2 试验结果

3.2.1 近红外无人机目标检测结果

利用 2.1 节中给出的方法对近红外图像的光斑目标进行识别。识别结果如图 6 所示,图 6(a) 给出距离引导系统 Y 方向 600 m 处的目标识别结果,图 6(b)为距离引导系统 Y 方向 300 m 处的识别结果。图 6(c) 和图 6(d) 分别是图 6(a) 和图 6(b)的结果通过坐标转化后在可见光图像中映射得到的感兴趣区域(100 × 50)。可见,利用近红外图像可以粗略地获得无人机的位置。

3.2.2 可见光无人机目标检测结果

在红外目标识别的基础上,对可见光图像中



(a) Y 方向 600 m 处近红外图像 (a) Near-infrared image Y = 600 m (b) Y 方向 300 m 处近红外图像 (b) Near-infrared image Y = 300 m



(c) Y 方向 600 m 处可见光图像 (c) Visible-light image Y = 600 m (d) Y 方向 300 m 处可见光图像 (d) Visible-light image Y = 300 m

图 6 近红外图像中的目标检测结果及坐标转换结果

Fig. 6 Results of target detection in the near-infrared image and coordinate transformation

感兴趣区域进行目标识别,并对目标区域进行判断,针对特征明显的“开拓者”无人机采用 Camshift 方法,结果如图 7 所示。图 7(a)为 Y 方向 800 m 处无人机目标识别结果,图 7(b)为 Y 方向 400 m 处的无人机目标识别结果。图 7(a)中无人机的背景为树林,图 7(b)中无人机的背景为地面和杂草,两幅图的背景都比较复杂。但由于目标使用了涂装,因此 Camshift 算法具有较好的识别效果。



(a) Y = 800 m (b) Y = 400 m

图 7 Camshift 方法的识别结果

Fig. 7 Results of the Camshift approach

针对特征不明显的“GKA”无人机,机身涂装与背景十分相近,采用 Adaboost 方法进行识别。本文对无人机的目标识别采用离线训练的方式,训练样本的获得方式与联合标定中的方法类似,即采用基于差分 GPS 信息控制引导系统跟踪无

人机或者手动控制转台跟踪无人机的方式获得图像序列,由于无人机机头在图像中占的像素值较大,因此采用机头作为无人机的目标识别,图 8 给出了样本集。

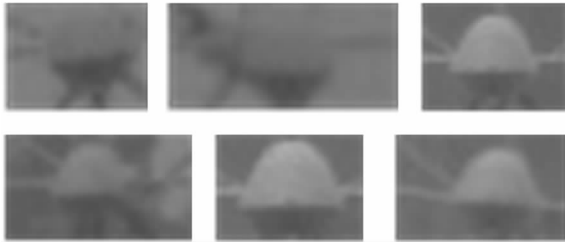


图 8 Adaboost 方法训练样本

Fig. 8 Training samples of the Adaboost approach

无人机目标识别结果如图 9 所示,以识别框的中心像素作为无人机的位置。图 9(a)为 Y 方向 600 m 处的无人机目标识别结果,图 9(b)为 Y 方向 300 m 处的无人机目标识别结果。图 9(a)中无人机的背景为树林,图 9(b)中无人机的背景为地面和杂草,两幅图的背景都比较复杂。利用 Adaboost 方法可以有效识别无人机目标。



(a) Y = 600 m

(b) Y = 300 m

图 9 Adaboost 方法的识别结果

Fig. 9 Results of the Adaboost approach

3.2.3 无人机着陆引导结果

利用文中给出的方法开展无人机着陆引导试验,试验中地面引导系统能够可靠引导无人机着陆。图 10 给出了一组试验结果,可见,基于多传感器融合的方法获得的无人机位置信息与差分 GPS 结果基本一致。

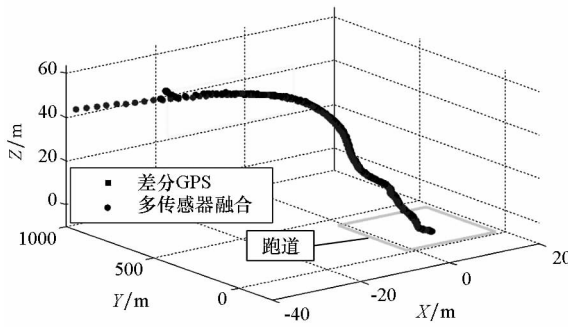


图 10 无人机着陆过程中定位结果

Fig. 10 UAV location during the landing process

以差分 GPS 为基准,图 11、图 12 和图 13 分别给出了 X、Y、Z 方向的定位误差。从图中可以看出三个方向的误差均越来越小,稳定跟踪过程中,X 轴方向上的平均误差为 ± 0.54 m,Y 轴方向上的平均误差为 ± 1.83 m,Z 轴方向上的平均误差为 ± 0.78 m。此外,本文采用各个传感器并行数据采集和处理的方式,最后位置的输出频率为 30 Hz。

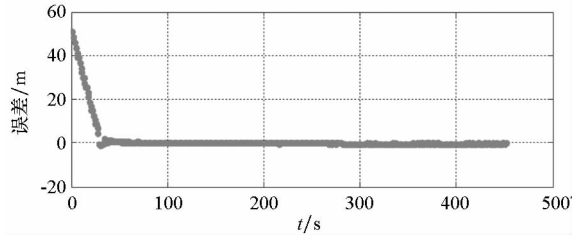


图 11 无人机着陆过程中 X 轴定位误差

Fig. 11 Error in X-axis during the landing process

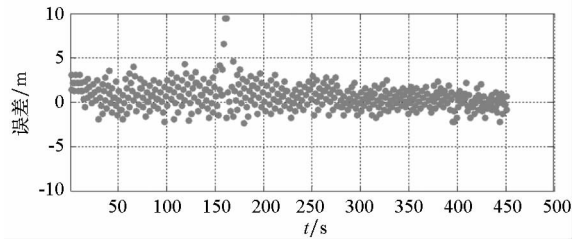


图 12 无人机着陆过程中 Y 轴定位误差

Fig. 12 Error in Y-axis during the landing process

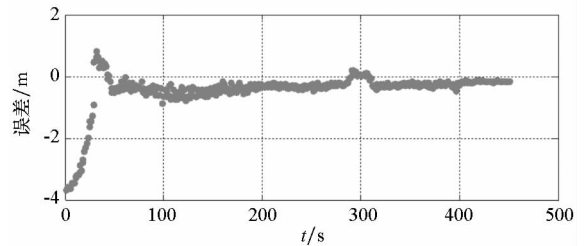


图 13 无人机着陆过程中 Z 轴定位误差

Fig. 13 Error in Z-axis during the landing process

上述试验结果表明,基于多传感器融合的无人机着陆引导方法能够有效引导无人机着陆。此外,由于系统使用了红外传感器,使得地面引导系统在夜间不依赖可见光仍能工作。

4 结论

本文针对无人机自主着陆过程中卫星导航系统易被干扰的问题,提出了一种基于地基多传感器融合的无人机自主着陆引导方法。采用主动式激光发射器,获取机载反射棱镜的红外成像,并基于红外目标识别的结果在可见光图像中选择感兴

趣区域,进一步在可见光图像中进行目标识别,从而获得更加精确的无人机相对位置信息。实验结果表明,基于多传感器融合的引导方法能够用于精确引导不同无人机安全滑跑着陆。

参考文献 (References)

- [1] Department of Defense. Unmanned systems roadmap: 2007 – 2032[M]. USA: Department of Defense, 2007.
- [2] RUAG—Aviation products. OPATS laser based landing aid for unmanned aerial vehicles[EB/OL]. [2016 – 08 – 15]. <http://www.ruag.com/aviation>.
- [3] Kong W, Zhou D, Zhang D, et al. Vision-based autonomous landing system for unmanned aerial vehicle: a survey[C]//International Conference on Multisensor Fusion and Information Integration for Intelligent Systems, 2014; 1 – 8.
- [4] Gareth J. Camcopter trials DeckFinder system for GPS-denied operations[J]. Jane's Defense Weekly, 2013, 50(31).
- [5] Gui Y, Guo P Y, Zhang H L, et al. Airborne vision-based navigation method for UAV accuracy landing using infrared lamps[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2013, 72(2): 197 – 218.
- [6] Laiacker M, Kondak K, Schwarzbach M, et al. Vision aided automatic landing system for fixed wing UAV [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013; 2971 – 2976.
- [7] Cocchioni F, Pierfelice V, Benini A, et al. Unmanned ground and aerial vehicles in extended range indoor and outdoor missions [C]//Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2014; 374 – 382.
- [8] 于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
YU Qifeng, SHANG Yang. Principle of imaging measurement and application research[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [9] 耿明志. 无人机自动着陆过程中的视觉导航技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
GENG Mingzhi. The application of visual navigation in auto-landing of unmanned aerial vehicle [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [10] Yang T, Li G P, Li J, et al. A ground-based near infrared camera array system for UAV auto-landing in GPS-denied environment[J]. Sensors, 2016, 16(9): 1393 – 1413.
- [11] Kong W W, Zhou D L, Zhang Y, et al. A ground-based optical system for autonomous landing of a fixed wing UAV[C]// Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2014; 4797 – 4804.
- [12] Zhang Y, Shen L C, Cong Y R, et al. Ground-based visual guidance in autonomous UVA landing [C]//Proceedings of Seventh International Conference on Machine Vision (ICMV), 2013.
- [13] Zhou D, Zhong Z, Zhang D, et al. Autonomous landing of a helicopter UAV with a ground-based multisensory fusion system[C]//Proceedings of Seventh International Conference on Machine Vision (ICMV), 2015.
- [14] Kong W W, Zhang D L, Zhang J, et al. A ground-based multi-sensor system for autonomous landing of a fixed wing UAV[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robots and Systems (IROS 2014), 2014.
- [15] Wu Z Y, Radke R J. Keeping a pan-tilt-zoom camera calibrated [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2013, 35(8): 1994 – 2007.
- [16] 高振宇, 杨晓梅, 龚剑明, 等. 图像复杂度描述方法研究[J]. 中国图像图形学报, 2010, 15(1): 129 – 135.
GAO Zhenyu, YANG Xiaomei, GONG Jianming, et al. Research on image complexity description methods [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(1): 129 – 135. (in Chinese)
- [17] 张梁, 徐锦法, 夏青元, 等. 地面目标特征识别与无人飞行器位姿估计[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(1): 159 – 164.
ZHANG Liang, XU Jinfa, XIA Qingyuan, et al. Feature recognition of ground target and position and target and position and attitude estimation for unmanned aerial vehicle[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(1): 159 – 164. (in Chinese)
- [18] Niu Y F, Zhong Z W, Zhang D B, et al. An approach to ground target localization for UAVs based on multi-sensor fusion[C]//Proceedings of World Congress on Intelligent Control and Automation, 2016; 2771 – 2776.
- [19] Zhang D B, Wang X. Autonomous landing control of fixed-wing UAVs: from theory to field experiment[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017, 88 (2/3/4): 619 – 634.