

doi: 10.7690/bgzdh.2018.04.006

无人机自主着陆过程中的视觉导航技术分析

柳向阳¹, 唐大全², 邓伟栋¹, 汤芳芳³

(1. 海军航空大学研究生管理大队, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空大学控制工程系, 山东 烟台 264001;
3. 海军 91286 通信站, 山东 青岛 266000)

摘要: 为解决目前国内外无人机难以实现自动着陆的问题, 对无人机着陆过程中的视觉导航技术进行研究。介绍了飞行器的降落等级和着陆阶段, 分别对无人机着陆过程中的图像处理技术和位姿估计问题进行分析, 重点研究着陆过程中的图像特征提取技术和位姿估计的迭代算法。研究结果表明: 将视觉导航与其他导航方式相结合, 发展鲁棒性好、精度高、实时性好的组合导航位姿估计融合算法将是未来视觉导航的发展重点。

关键词: 无人机; 视觉导航; 特征提取; 位姿估计

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A

Analysis of Vision-based Navigation for Autonomous Landing of Unmanned Aerial Vehicle

Liu Xiangyang¹, Tang Daquan², Deng Weidong¹, Tang Fangfang³

(1. Graduate Students Brigade of Naval University of Aeronautics, Yantai 264001, China;
2. Control Engineering Department of Naval University of Aeronautics, Yantai 264001, China;
3. No. 91286 Communication Station of Navy, Qingdao 266000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the unmanned aerial vehicle (UAV) is difficult to realize automatic landing at home and abroad, the vision-based navigation technology in the UAV landing process was studied. The landing and landing phases of aircraft was introduced. The image processing technology and pose estimation problem of UAV landing process was analyzed respectively, especially the image feature extraction technology and iterative algorithm of position and attitude estimation during landing. The research results showed that: combining the vision-based navigation with other navigation modes, developing the integrated navigation pose estimation and fusion algorithm with good robustness, high accuracy and good real-time would be the development focus of future vision navigation.

Keywords: unmanned aerial vehicle; vision-based navigation; feature extraction; pose estimation

0 引言

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)是一种由动力驱动、机上无人驾驶和可重复使用的航空器^[1-3]。无人机在军事和民用领域的应用范围很广, 越来越受到重视。无人机自主着陆是无人机全包线自主飞行的重要组成部分, 研究无人机自主着陆过程中的导航技术(称为着陆引导技术), 提高导航的精确性和准确性, 对于无人机自主着陆具有重要意义。目前, 国内外研究的无人机自主着陆导航技术主要包括惯性导航系统(inertial navigation system, INS)、卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)、仪表着陆系统(instrument landing system, ILS)和微波着陆系统(microwave landing system, MLS)^[4]。其中: 惯性导航系统对于初始值过于敏感, 导航误差随着时间的积累会逐渐变大; 卫星导航系统需要传播无线电信号, 又因干扰或卫星信号丢失而丧失定位能力的风险, 在军事上的应用受到限

制; ILS 和 MLS 对于地面设备依赖性大, 不属于自主导航方式。此外, 上述导航、引导系统的精度也难以满足无人机自动着陆的要求。

近 20 多年来, 随着图像处理技术的蓬勃发展, 计算机视觉技术得到快速发展, 基于视觉的导航技术即视觉导航技术在算法上日趋成熟, 应用也日益广泛。与传统的导航方式相比, 视觉导航因无源完全自主的特点受到广泛深入的研究^[5-7]。

笔者针对基于视觉导航的着陆引导, 对无人机回收阶段的图像处理、图像特征提取和位姿估计等关键技术问题进行分析, 对不同位姿估计算法对比分析, 在此基础上提出发展基于视觉导航的着陆引导技术的建议。

1 自动着陆导系统的现状分析

1.1 固定翼无人机进场着陆过程

固定翼飞行器进场着陆可以分为 5 个阶段, 全

收稿日期: 2017-12-11; 修回日期: 2017-12-26

作者简介: 柳向阳(1989—), 男, 陕西人, 硕士, 从事飞行器导航与控制研究。

过程包括进场、下滑、拉平、飘落和滑行^[8]，如图 1 所示。固定翼飞机在某巡航高度上开始下降，当下降到预定高度(250~500 m)时，截获初始进场指令开始进场。在下滑阶段，飞行器保持一定的角度(2.5°~6°)下滑飞行，并使机身对准跑道。当到达拉平决策高度后，飞行器自动增大飞行迎角使飞行轨迹向上弯曲，开始拉平。较为成熟的拉平轨迹是指数轨迹拉平。拉平阶段结束后，飞行器距离地面的理想高度为 0.5~0.8 m，开始飘落阶段，直至飞行器主轮接触地面。此后打开阻力装置，使飞行器完全停止，滑行阶段结束，飞行器完成着陆。

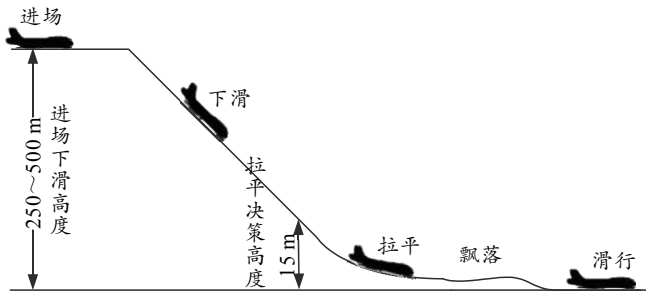


图 1 固定翼飞行器着陆过程

1.2 无人机自主着陆对引导系统的要求

无人机的回收方式多种多样。传统的回收方式大致可分为降落伞回收、气囊着陆回收、撞网回收、空中回收、旋翼垂直着陆回收和起落架滑轮着陆回收等^[9]。无人机回收的种类千差万别，各种回收方式对于引导系统的要求也各不相同。目前，无人机自主着陆没有统一的要求，但是可以参照民航系统对于客机降落的等级划分。

目前，国际上按照能见度将自动着陆分为 3 个等级：等级 I、等级 II 和等级 III，等级 III 细分为 IIIa、IIIb、IIIc。能见度是指能看见的距离，在垂直方向指最低的云雾高度要求，称为决断高度 (decision height, DH)，飞行器下滑至决断高度时，如发生使其不能降落的错误，应立即展开复飞程序；在水平方向上指在飞机上能看到的跑道距离 (runway visual range, RVR)。每级都规定了 DH 与 RVR 的不同组合^[10]，如表 1 所示。

表 1 降落等级对应的能见度和决断高度 m

能见度	I	II	IIIa	IIIb	IIIc
DH	60	30	15	MABH~15	没有限制
RVR	≥800	≥400	200	75~125	

其中，I、II 级只允许自动控制飞机到决断高度，之后由驾驶员手动控制飞机着陆或者再次复飞。IIIa 决断高度为 15 m，跑道视程为 200 m，仪

表着陆进场，可以人工操纵飞机滑跑或退出跑道。IIIb 决策高度介于 15 m 与进场终止高度 (MABH) 之间，跑道视程介于 75~125 m，仪表着陆进场，允许人工操纵飞机滑跑和推出跑道。IIIc 实现降落过程全自动化，没有决断高度和跑道视程的限制。

联合精密进近与着陆系统 (joint precision approach and landing system, JPALS) 是美国国防部提出需求，由诸军兵种共同推进的军用高精度进近与着陆引导系统。JPALS 是一种载波相位差分 GPS 系统，分为 LB-JPALS (陆基型) 和 SB-JPALS (舰基型) 2 种，可支持 CAT I / II / III 精密进近和复飞。对于 LB-JPALS (陆基型) 的导航能力，支持 200 inch 的最小决定高度和 0.5 n mile 的可视距离^[11]。

无人机的自主着陆导航精度可参考 JPALS 的导航精度要求，实施自主着陆。

1.3 着陆引导系统现状分析

20 世纪 50 年代，仪表着陆系统是民航客机着陆的主要引导手段。它主要依靠地面设备向飞机着陆方向发送 2 个不同频率的高频无线电信号，机载仪器接受飞机进场偏离预定航迹的误差信号，引导飞行员降落。ILS 造价低廉、维护方便、简单可靠，缺点是下滑道单一，不能提供正常的进场曲线和分段进场。

20 世纪 70 年代兴起的微波着陆系统 MLS，比 ILS 波束扫描范围广，使用的频带范围宽，可同时联系多个空中目标，为飞行员提供航向、下滑角等诸多信息，缺点是成本高，维护代价大。

卫星导航系统特别是 GPS 因为信号稳定、精度高、对地面设备要求不高，工作覆盖范围大，可同时兼容 MLS 和 ILS 的特点，在着陆导航方面得到了广泛的应用。但因存在卫星信号丢失、易受干扰等风险，卫星导航在战时的应用受到限制。

惯性导航系统 INS 是一种利用惯性元件测量物体运动状态信息的系统，其突出优点是自主性强、短期精度较高、输出的导航信息全，缺点为工作过程中存在累计误差，所以不能单一地使用 INS 进行导航^[12]，一般需要与其他导航设备进行组合。

视觉传感器属于被动传感器，通过物体反射光线成像，因此视觉导航不受电磁干扰的影响^[13]。视觉传感器能够捕获大量的信息，并对运动信息敏感，为姿态、位置的准确估算奠定了基础；此外，视觉系统体积小、质量轻、适应性强，往往只需要摄像机及其相应平台就可完成导航工作。随着计算

机技术的快速发展,视觉导航越来越受到研究者的推崇。

2 基于视觉着陆引导系统

2.1 基于视觉着陆引导系统的算法原理

飞行器视觉导航的基本任务是利用视觉传感器获得的图像信息确定载体坐标系与导航坐标系之间的相对位姿关系。视觉导航的基本过程由图像特征提取和位姿参数解算 2 部分组成^[14]。图 2 为视觉导航的算法框架图。

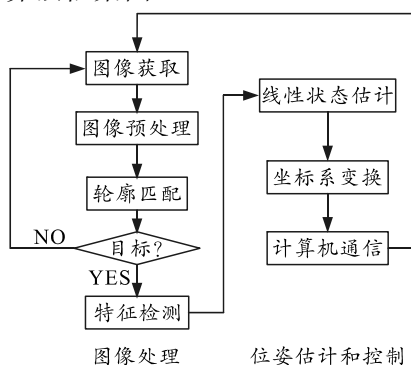


图 2 视觉导航算法框架

其中,图像预处理包括灰度化、平均滤波和二值化处理等^[15]。图像处理包括特征点线的提取等,位姿估计主要包括坐标变换、位姿估计迭代算法等。

2.2 基于视觉导航系统的组成模块

视觉导航处理的基本模块构成部分如图 3。

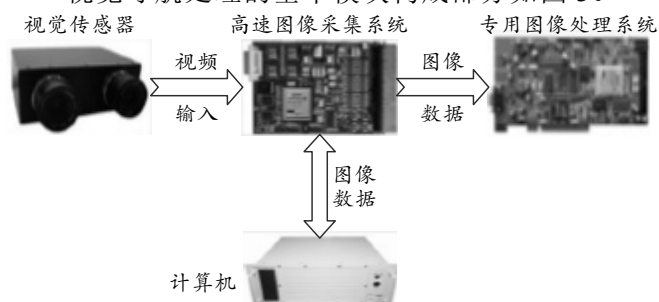


图 3 视觉导航系统组成模块

视觉传感器进行图像的采集,采集的图像经高速图像采集系统转换为数字信号,专用图像采集系统还完成数字图像的特征提取,最后由计算机实现被测物体空间位置的坐标转换和位姿估计等。

3 基于视觉导航着陆引导的关键技术分析

3.1 图像特征提取

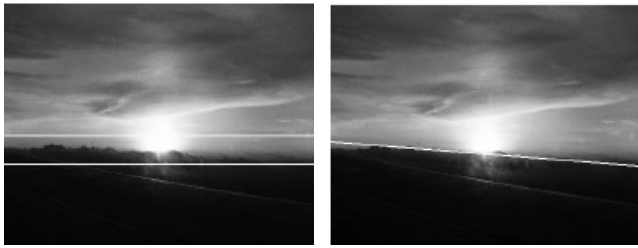
图像经过预处理后,需要进一步对图像进行处理,以提取有意义的区域和有价值的参数,为下一步进行位姿估计做好准备。常用的图像特征提取方

法有角点提取、直线提取、不变距和形态学算法等。

角点是一种特殊的特征点,反映了数字图像的局部不变特征,可利用特征点进行图像匹配、分类及识别等操作^[16]。通常情况下,人们认为角点是 2 维图像上各个方向上亮度变化都较大的像素点,或者是图像中多条边缘线的交叉点。在视觉导航方面,应用较为广泛的角点提取方法有 Harris 算法^[17]、最小核值相似区算法^[18](smallest univalue segment assimilating nucleus, SUSAN)、SIFT 算法和基于此类算法的一些改进算法。Harris 算法是通过改进 Moravec 算法发展而来,通过偏导运算和自相关矩阵来检测角点,其采用单一阈值,图像角点的识别精度不高。SUSAN 角点检测方法,利用核值相似区(univalue segment assimilating nucleus, USAN)计算图像相对于模板的响应值。与 Harris 算法相比,SUSAN 算法准确,检测精度高。SIFT 精度最高,但算法复杂,实时性较差。文献[19]采用双目立体视觉导航系统,利用 Harris 算法实现对预处理图像的特征角点提取,用 NCC 算法进行特征匹配,Harris 算法兼顾了 SUSAN 算法和 SIFT 算法在实时性和精度方面的优点^[20],能够满足无人飞行器导航的要求。文献[21]采用一种改进的 Harris 与 SUSAN 相结合的角点检测方法。实验结果表明:该算法能够克服 Harris 算法角点检测抗干扰能力差和速度慢的问题,提高角点检测的准确度和速度。

直线是数字图像的重要纹理特征,高精度的直线提取在 3 维重构和立体视觉等方面起着重要作用。Hough 变化^[22]是(hough transform, HT)直线提取的重要工具,是一种将直线上点的坐标变换到点的系数域的直线提取方法。现有的大多数算法都是基于 Hough 变换方法的改进算法。清华大学利用新图像进行匹配实现对着陆目标的识别,利用 Hough 变换、Helen 公式完成直线快速提取^[23],试验结果证明:该算法提高了跑道的识别率,使着舰成功率可达到 97%。文献[24]利用跑道线跟踪无人机,用先验知识将图像区域缩小范围,然后利用 Hough 变换获取跑道直线的信息,文献中通过视频验证了算法的实时性和精度。该方法可应用于无人机的自主着陆。文献[25]针对不同天气情况下的地平线,结合 Ostu 方法与霍夫变换,提出了一种地平线提取方法,在初始获取地平线的基础上,缩小区域获得子图像,在子图像中完成对地平线的提取,见图 4(a),将地平线缩小在 2 条白线之间;图 4(b)的白线表示地平线。该算法能够有效降低提取机场特征线的计

算量, 具有良好的鲁棒性, 且算法执行效率较高。



(a) 初始地平线区域

(b) 目标地平线

图 4 地平线提取结果

不变矩方法是获取目标图像特征的一种方法, 对平移、伸缩、旋转满足一定的不变特性。文献[26]采用不变矩构造遗传函数的适度函数, 遗传算法的搜索能力快速提取感兴趣区域, 利用最近邻的匹配算法搜索配对实现对目标的定位。该算法精确度与其相当, 但算法速度快、实时性好、鲁棒性好, 能够满足无人机侦查目标的要求。文献[27]采用基于仿射不变矩和 SVM 分类器的着陆地标标示方法, 仿射不变矩和支持向量机的算法能够提高无人机识别目标的进度和效率, 加强了无人机自主着陆的可靠性。

3.2 位姿估计问题

位姿估计 (pose estimation) 是指通过一组空间点在世界坐标系下的 2 维空间坐标, 以及这些空间点在某摄像机坐标系下的 2 维图像坐标, 求解世界坐标系和摄像机坐标系之间的转换关系^[28]。求解位姿估计问题的方法总体上可以分为 2 类: 线性算法和非线性算法。线性算法主要是引入必要的中间条件, 将位姿估计问题转换为绝对定向问题, 求得闭式解。线性算法主要有直接线性变换 (DLT)^[29]、EPnP^[30] 和稳健 PnP (RPnP)^[31] 等, 其中: DLT 在具有大量空间点的情况下使用, 精度较低; EPnP 和 RPnP 通过增加虚拟空间点, 将问题转换为绝对定向问题求解; RPnP 算法的核心思想是以三角约束为基础构造代价函数, 对代价函数求导确定相机位姿的最优解。非线性算法通过构建不同迭代策略最小化代价函数, 得到相机位姿的精确解, 主要有基于以像方残差二范数为目标函数的 L-M (levenberg-marquardt) 方法^[32]。该方法对初值要求高, 若初值不当, 容易出现迭代不收敛的情况; 以物方残差二范数为目标函数的正交迭代算法^[33]。该算法收敛速度快, 算法效率高, 不存在初值干扰问题。

文献[34]采用 N 点算法解算出特征点在摄像机坐标系中的坐标, 利用正交迭代算法求解摄像机坐

标系和世界坐标系的旋转矩阵和平移向量, 然后利用最小中值滤波进行降噪, 相比传统的最小二乘法算法, 姿态和位置估计精度大大提高。文献[28]利用基于放射不变距和 SVM 分类器的识别目标, 将像差的二范数作为目标函数的 L-M 算法, 作为迭代算法进行求解。文献[35]获取红外 LED 图片后, 利用共面约束构造虚拟点的 P4P 问题, 获取无人机相对于合作目标的位姿信息。文献[17]利用 Harris 算法提取的角点, 以像差的二范数为目标函数, 通过 RANSAC 算法和 L-M 迭代算法估计无人机的位姿信息。试验结果表明: 以双目立体视觉的位姿估计方法计算的结果比实际测量误差小, 能够满足无人飞行器的导航要求。文献[36]设计了一种基于合作目标的无人机视觉导引方法。笔者应用 Tsai 的基于径向一致性 (RAC) 的位姿估计方法, 对基于投影矩阵和基于几何特征的方法进行对比。基于投影矩阵的算法精度较高; 提高特征点的个数能够提高估计精度, 但特征点数提高到 9 个时, 精度趋势平滑, 精度达到极大; 当距离较远时, 改进求解距离和标定焦距, 精度提高 60%。文献[37]以“H”型合作目标为例, 利用光流法对运动目标实现跟踪, 列出投影矩阵并线性化奇异值分解, 利用最小二乘法获得位姿估计的最优解。

文献[30]提出利用箱线图比较数据误差的方法, 与 Ansar and Daniilidis^[29]算法、Clamped DLT 线性方法相比, EPnP 算法具有较小的误差中位数。在处理大量噪声信号方面, EPnP 算法和 LHM 算法具有相近的准确度, 但是 EPnP 算法更加准确和快速。

4 结论

无人机自主着陆过程的视觉导航技术主要包括图像处理技术、飞行器位姿估计技术、视觉导航与其他导航设备的融合技术等。图像处理的特征提取主要方法有角点提取、直线提取和不变距的方法等。无人机位姿估计算法是基于迭代算法的多元非线性优化问题。实现无人机的自主着陆, 需采用视觉导航与其他导航方式相结合的组合导航方式, 以充分发挥视觉导航的优点并利用其他导航设备克服视觉导航的不足。实时准确地输出飞行器的位置姿态信息是视觉导航的关键技术, 将视觉导航与其他导航方式相结合, 发展鲁棒性好、精度高、实时性好的组合导航位姿估计的融合算法将是未来视觉导航的发展重点。

参考文献:

- [1] 李光超. 小型无人机机体寿命分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2007: 1-4.
- [2] 罗东起. 落架四点布局无人机地而滑跑建模与控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008: 1-3.
- [3] 杨力. 无人机航路规划技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009: 1-3.
- [4] 谢也. 基于视觉的无人机自主着陆航迹与鲁棒控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015: 1-3.
- [5] MERINO L, WIKLUND J, CABALLERO F, et al. Vision-based multi-UAV position estimation[J]. *Robotics & Automation Magazine*, IEEE, 2006, 13(3): 53-62.
- [6] BROX T, BRUHN A, PAPENBERG N, et al. High accuracy optical flow estimation based on a theory for warping[M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004: 25-36.
- [7] DAVISON A J, REID I D, MOLTON N D, et al. MonoSLAM: real-time single camera SLAM[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(6): 1052-1067.
- [8] 宁东方. 无人机自动着陆控制系统的设计与实现研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006: 12-14.
- [9] 臧春喜, 褚鹏蛟, 胡琦, 等. 无人机回收技术专利现状及发展趋势[J]. *飞航导弹*, 2016(3): 39-42.
- [10] 常凡凡, 李爱军, 王长青. 大型客机 CAT III级自动着陆机载设备需求[J]. *航空工程进展*, 2011, 2(2): 210-215.
- [11] 刘菁. 基于联合精密进近着陆系统(JPALS)技术研究[J]. *现代导航*, 2014(1): 75-78.
- [12] 黄安琪, 黄佳琦. 无人飞行器自主着陆组合导航系统关键技术研究[J]. *电子科学技术(北京)*, 2015, 2(2): 186-189.
- [13] KONG W, ZHOU D, ZHANG Y, et al. A ground-based optical system for autonomous landing of a fixed wing UAV[C]// *Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2014: 4797-4804.
- [14] 伏思华, 于起峰, 王明志, 等. 基于摄像测量原理的轨道几何参数测量系统[J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3203-3208.
- [15] EFRAIM H, SHAPIRO A, WEISS G. Quadrotor with a Dihedral Angle: on the Effects of Tilting the Rotors Inwards[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2015, 80(2): 313-324.
- [16] 马金定. 特征提取在图像处理中的应用[J]. *科技视界*, 2015(27): 239-240.
- [17] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector[C]. *Proceedings of Fourth Alvey Vision Conference*. Manchester, UK: [s.n.], 1988: 147-151.
- [18] SMITH S M, BRADY J M. SUSAN-A New Approach to Low Level Image Processing[J]. *International Journal of Computing Vision*, 1997, 23(1): 45-78.
- [19] 张梁, 徐锦法, 夏青元. 双目立体视觉的无人机位姿估计算法及验证[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(5): 66-72.
- [20] GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital image processing*[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 185-186.
- [21] 龙忠杰, 吉芳, 左云波. 一种改进的 Harris 与 SUSAN 相结合的角度检测算法[J]. *计算机应用于软件*, 2013, 30(12): 133-136.
- [22] HOUGH P V. A Method and Means for Recognizing Complex Patterns[P]. U.S. Patent. 1962, Vol 3069654.
- [23] ZENG F C, SHI H Q, WANG H. The object recognition and adaptive threshold selection in the vision system for landing an Unmanned Aerial Vehicle[C]. Zhuhai/Macau, China: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009: 117-122.
- [24] YANG B, CHEN C. Automatic registration of UAV-borne sequent images and LiDAR data[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2015, 101: 262-274.
- [25] 檀建鹏, 庄丽葵, 王彪, 等. 一种用于无人机着陆的地平线提取算法[J]. *计算机工程*, 2011, 37(10): 182-186.
- [26] 贾伟, 张清, 席庆彪, 等. 基于 SURF 的 UAV 快速目标识别算法[J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49(23): 132-136.
- [27] 李宇. 无人机视觉着陆关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012: 16-46.
- [28] BHAT K K S, HEIKKILÄ J. Line Matching and Pose Estimation for Unconstrained Model-to-Image Alignment[C]// *International Conference on 3d Vision*. IEEE, 2015: 155-162.
- [29] ANSAR A, DANIILIDIS K. Linear pose estimation from points or lines[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(5): 578-589.
- [30] LEPETIT V, NOGUER F M, FUA P. EPnP: An accurate O(n) solution to the PnP problem[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 81(2): 155-166.
- [31] LI S Q, XU C, XIE M. 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.
- [32] LOWE D G. Fitting parameterized three-dimensional models to Images[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(5): 441-450.
- [33] LU C P, HAGER G, MJOLSNESS E. Fast and globally convergent pose estimation from Intelligence[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(5): 610-620.
- [34] 李飞, 唐大全, 沈宁. 无人机视觉辅助着陆中的姿态和位置估算[J]. *电光与控制*, 2012, 19(1): 69-73.
- [35] 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.
- [36] 祁晓鹏. 基于合作目标与视觉导引的无人机自主着陆技术研究[D]. 南京: 航空航天大学, 2014: 17-32.
- [37] 史琳婕. 无人机视觉辅助着陆算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015: 31-35.