

基于光斑轮廓特征的目标快速识别算法研究

谢忠旭^{1,2}, 王志乾¹, 沈铖武¹, 刘旭^{1,2}, 孙浩洋^{1,2}, 郑博文^{1,2}, 成顺^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:大视场的视觉着陆引导系统在引导无人机自主着陆过程中,需要快速检测出安装在无人机上的合作目标。该合作目标在图像上是以光斑形式存在,因此为了满足系统的实时性要求,本文提出了基于轮廓特征的快速检测光斑算法。该算法是根据光斑在图像中的特征,采用了目标裁剪方法,将原始图像中的光斑部分裁剪出来,从而降低算法运算量;再通过图像预处理,消除背景的无关信息与噪声干扰,增强光斑的清晰度;最后利用最小二乘算法进行椭圆拟合定位出光斑的中心位置。将本实验算法与其他光斑检测算法进行实验对比,从而验证系统的实时性。结果表明:利用本文算法可以在保证精度的同时将运行时间缩减到36 ms。

关键词:视觉引导系统;大视场;目标快速识别;轮廓特征;中心定位

中图分类号:TP391.41;TN247 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.02.019

Research on fast target recognition algorithm based on spot contour feature

XIE Zhong-xu^{1,2}, WANG Zhi-qian¹, SHEN Cheng-wu¹, LIU Xu^{1,2}, SUN Hao-yang^{1,2},
ZHENG Bo-wen^{1,2}, CHENG Shun^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The large-field visual landing guidance system needs to quickly detect the cooperative targets mounted on the UAV during the autonomous landing of the UAV. The cooperative target exists in the form of light spots on the image, so in order to meet the real-time requirements of the system, a fast spot detection algorithm based on contour features is proposed in this paper. Firstly, according to the characteristics of light spots in the image, the target clipping method is used to extract the light spots in the original image, so as to reduce the amount of computation. Then, through the image preprocessing, the irrelevant information and noise interference in the background are eliminated to enhance the clarity of the spot. Finally, the least square algorithm is used to locate the center of the light spot by ellipse fitting. The experimental algorithm is compared with other spot detection algorithms so as to verify the real-time performance of the system. The results show that the proposed algorithm can reduce the running time to 36ms while ensuring the accuracy.

Keywords: visual guidance system; large field of view; fast target recognition; contour feature; center positioning

基金项目:吉林省科技发展计划项目(No. 20230201039GX)资助。

作者简介:谢忠旭(1999-),男,硕士研究生,主要从事光电测量的研究工作。E-mail:1579259194@qq.com

通讯作者:王志乾(1969-),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光电测量、数字信号处理方面的研究。

E-mail:zhiqian_wang@sina.com

收稿日期:2023-03-31

1 引言

地面视觉引导无人机着陆系统,依靠检测安装在无人机上的合作目标来完成系统对无人机的捕获与追踪,并实时解算出无人机相对跑道的位置,最终完成着陆引导^[1-3]。不同的合作目标所设计的识别算法各不相同,但都需要满足定位精度和引导系统的实时性要求^[4]。

在光斑检测方面,李天宇^[5]提出了一种基于高斯拟合的信号弹光斑中心定位方法,该方法能够在保证速度的同时达到亚像素精度。沈天浩^[6]针对传统灰度重心算法提出了优化方案,利用该算法可有效提高系统的抗干扰性和实时性,完成对激光光斑的快速捕获。针对远场不规则光斑的能量中心校准问题,何佳凯^[7]提出了一种基于自适应 disk 掩膜的激光光斑中心检测算法,该方法在近场光斑与远场不规则光斑的中心检测均具有优异鲁棒性和准确性。为了提高图像中光斑中心位置的定位精度,Zhu J^[8]在椭圆拟合算法的基础上进行了改进,改进后的算法可以有效地降低图像中高斯白噪声的影响,提高了抗干扰能力和定位精度。Zhao H^[9]基于基线法的迭代双面积收缩方法,提出了一种提高定位精度的激光光斑定心方法。该方法具有较强的抗背景噪声干扰能力,最大定位精度可达 0.05 像素。

本文首先将实验采集到的光斑图像进行特征分析,其次根据光斑在图像上的轮廓特征,利用图像处理技术完成光斑的检测。最后将多种光斑检测算法的运行时间与定位结果进行对比,证明本实验算法的可靠性与实时性。

2 光斑特征分析

本文的视觉着陆引导系统是多传感器融合系

统,主要由二维转台、激光发射器、CCD 相机、合作目标组成,如图 1 所示。

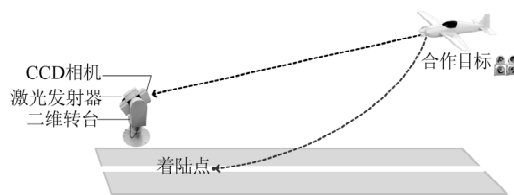


图 1 着陆引导示意图

Fig. 1 Landing guidance diagram

合作目标为角锥棱镜,能够将着陆引导系统发射的激光原路返回。当无人机进入视场后,合作目标反射回的激光光束,在 CCD 相机成像为光斑图像。依靠图像处理算法对光斑进行实时检测,得出光斑中心与视轴中心的偏差,利用该数值完成对无人机的捕获与追踪。

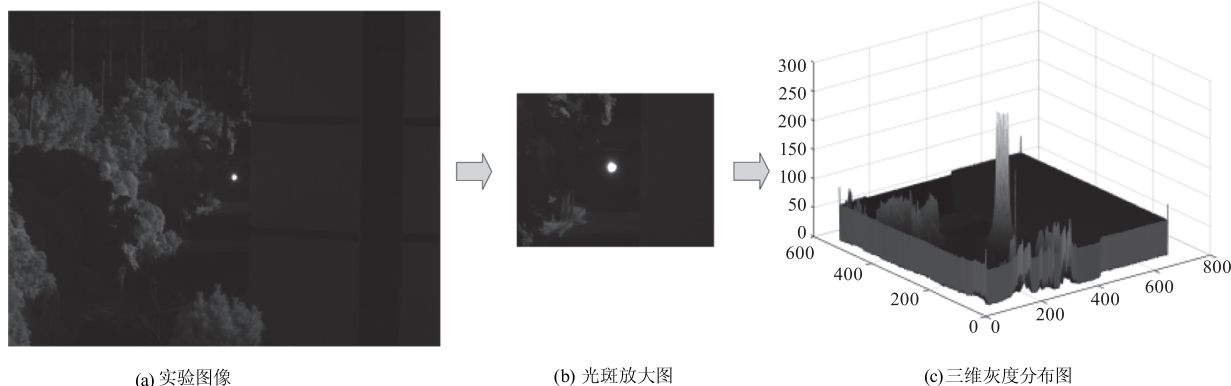
CCD 相机的光斑图像如图 2 所示,图(a)为光斑实验图像,图 2(b)为该图的光斑放大图,图 2(c)为光斑放大图像的三维灰度分布图。根据图像中光斑的特征^[10-11]进行如下分析:

(1) 光斑中心区域的灰度值,明显高于周围背景的灰度值,且中心区域的灰度分布均匀,在光斑边缘处灰度值下降迅速;

(2) 图像中光斑的大小随着 CCD 相机与合作目标的距离而变化;

(3) 图像中光斑成像的效果与激光光束照射到靶面的角度有关,当光束与靶面呈垂直关系时,成像效果最好;平行关系时,成像效果最差;

(4) 合作目标反射回的光束在 CCD 相机表面会产生散射现象,导致光斑边缘产生毛刺。



(a) 实验图像

(b) 光斑放大图

(c) 三维灰度分布图

图 2 光斑图像及三维灰度分布图

Fig. 2 Spot image and 3D gray distribution map

3 光斑检测算法

3.1 基于最大熵值法的光斑检测算法

原始图像的背景环境复杂,要在图像中准确地提取出光斑,需要将原始图像进行图像预处理操作,由于图像尺寸大,整体图像的灰度值分布不均匀,因此需要选择 7×7 模板的均值滤波才能有效的抑制噪声。将滤波后的图像进行阈值分割,经典的阈值分割方法有 OTSU(大津法)、最大熵值法^[12]、自适应阈值法、直方图技术。其中最大熵值法的熵值定义为:

$$H(D) = - \sum_p p(x) \ln p(x) \quad (1)$$

其原理是设定一个阈值 $q(0 \leq q < K-1)$ 将图像分为前景和背景两个区域, $P_0(q), P_1(q)$ 分别表示的是阈值 q 分割的背景和前景像素的累计概率,两者之和为 1。计算所有分割阈值下的图像总熵值,将最大总熵值对应的分割阈值作为最终的阈值,进行阈值分割。

$$H_0(q) = - \sum_{i=1}^q \frac{p(i)}{p_0(q)} \ln \frac{p(i)}{p_0(q)} \quad (2)$$

$$H_1(q) = - \sum_{i=q+1}^{K-1} \frac{p(i)}{p_1(q)} \ln \frac{p(i)}{p_1(q)} \quad (3)$$

总熵为:

$$H(q) = H_0(q) + H_1(q) \quad (4)$$

该方法在目标明显、环境复杂的条件下,目标提取效果较好。阈值分割后,图像中只保留了光斑信息。为了降低图像的运算量,将光斑从大尺寸的二值图像中裁剪出来,而后进行形态学处理、Canny 算子边缘检测、最终利用椭圆拟合法得到中心坐标,整体流程如图 3 所示。

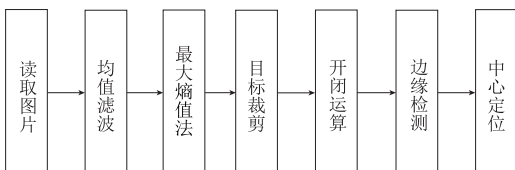


图 3 基于最大熵值法的光斑检测算法流程图

Fig. 3 Flow chart of spot detection algorithm based on maximum entropy method

3.2 基于亮度调节的光斑检测算法

由于最大熵值法的数学模型简单,在背景复杂、总熵值高的情况下,能够有效地将光斑与背景分离,当背景单一时,分割效果相对其他传统阈值分割算法差。而合作目标最终需要安装在无人机上,背景环境无法预测,因此采用最大熵值法进行图像分割

有很强的不确定性。

针对原始图像分辨率高、尺寸大的问题,基于亮度调节的光斑检测算法是采用了 2×2 模板对原始图像进行处理,通过只保留模板左上角灰度值的方式,将原始图像的分辨率与尺寸都由 2592×2048 降为 1296×1024 。根据光斑特征可知,光斑与背景的灰度值相差大、对比度强。利用 gamma 变换对图像进行亮度调节,将整体图像变暗,从而降低背景对光斑的干扰,再通过大津法进行阈值分割^[13],而后进行目标裁剪、形态学处理、Canny 算子边缘检测,最终利用椭圆拟合算法完成中心定位,整体流程如图 4 所示。由于该方法将整体图像尺寸的横纵坐标各缩小 2 倍,得到的光斑中心位置并不是原始图像中光斑的真实位置,因此需要将中心坐标横纵坐标扩大 2 倍。

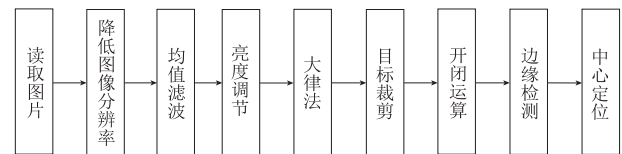


图 4 基于亮度调节的光斑检测算法流程图

Fig. 4 Flow chart of spot detection algorithm based on brightness adjustment

3.3 基于轮廓特征的快速检测光斑算法

在大尺寸、高分辨率的图像中,光斑仅占原始图像中的一小部分,进行任何图像处理操作时,都会因图像尺寸大导致运行时间长,无法满足系统的实时性要求。本算法采用目标裁剪方法,将光斑从原始图像中裁剪出来,以此达到降低整体图像运算量的目的。该方法利用图像中光斑中心处灰度值最大这一特征信息,通过寻找图像中的最大灰度值,来确定光斑中心处的大致位置;而后设定光斑边缘处的灰度阈值,以最大灰度值到该阈值对应的位置范围,为光斑在原始图像的大致范围,再增加一定的预留量后,将原始图像进行目标裁剪;该方法能够有效地将光斑从背景中裁剪出来。图像中可能会存在干扰光源,导致目标裁剪后的图像尺寸仍然很大,因此需要设定一个裁剪面积阈值,当裁剪下的图像面积小于阈值时,则进行后续的图像处理,否则将重新读取下一帧图像。

图像的清晰度和光斑边缘的平滑程度直接影响了后续中心定位的精度,而在目标图像中背景的灰度分布不均匀,图像中还可能存在着背景噪声和 CCD 读出噪声^[14]。因此采用 3×3 模板的均值滤波将目

标图像模糊化,而后将分割阈值设为最大灰度值减去实验值,进行阈值分割。阈值分割后光斑边缘仍有少量毛刺存在,通过对目标图像进行先开运算,后闭运算的形态学处理,可以去除掉黑色背景中可能存在的白色干扰点,又能将光斑边缘平滑,以此操作保证边缘检测后的图像是闭合的。

传统的边缘检测算子有很多,其中 Canny 算子、Sobel 算子、Laplacian 算子,由于图像中目标单一,且经过阈值分割后图像清晰,因此采用上述三种算子都能有效地提取出的光斑边缘。其中 Laplacian 边缘检测算法的运行时间短、检测出的边缘清晰,所以本算法采用 Laplacian 算子对光斑图像进行边缘检测。再对得到的光斑边缘图像进行中心定位,传统的定位方法有质心法、霍夫圆法、椭圆拟合法^[15-17]。其中椭圆拟合法是基于边缘信息的中心定位方法,与本文算法中光斑特征筛选契合度高,因此采用椭圆拟合法进行中心定位,本算法的整体流程图如 5 所示。

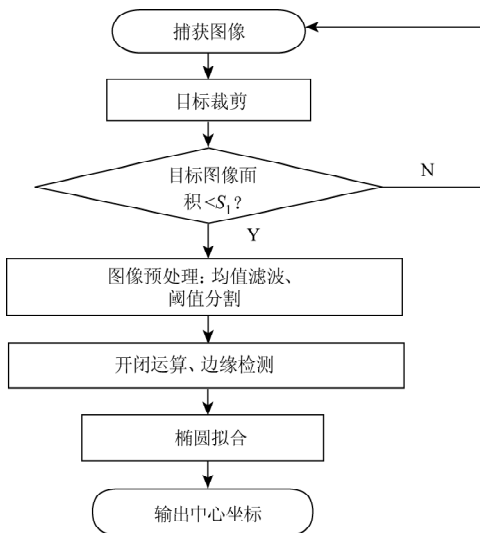


图 5 基于轮廓特征的快速检测光斑算法流程图
Fig. 5 Flow chart of fast spot detection algorithm based on contour feature

4 实验验证与分析

4.1 实验平台

本文实验设备主要由二维转台、CCD 相机、激光发射器、以及安装在无人机的合作目标组成。其中合作目标是由 4 个角锥棱镜构成,本实验设备如图 6 所示。本实验算法运行在一台工控机上,软件使用 Visual Studio 2015 将系统设计成 MFC 界面的形式,使用开源计算机视觉库 (OpenCV) 对图像进行处理,采用 C++ 进行软件编程,本实验设备整体参数如表 1 所示。

表 1 实验设备参数

Tab. 1 Experimental equipment parameters

名称	参数	
相机	相机型号	LBAS-GE50-22M/C
	分辨率	2592 × 2048
	像元尺寸/ μm	4.8
	帧频/ $(\text{f} \cdot \text{s}^{-1})$	22
	镜头焦距/mm	90
工控机	工控机处理器型号	Intel Xeon D-1539
	核心数量	8
	线程数量	16
	CPU	1.60 GHz
	内存	32.0 GB
	运行系统	64 位 Windows10 企业版 LTSC 操作系统
激光发射器	激光波长/nm	905
	整机功耗/W	1
合作目标	角锥棱镜口径/mm	80

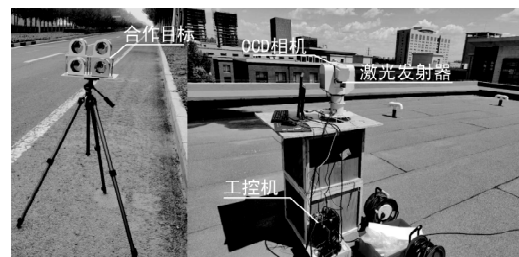


图 6 实验设备图

Fig. 6 Experimental equipment drawing

4.2 图像处理过程分析

为了更详细地分析不同光斑检测算法的图像处理过程,分别采用上述三种光斑检测算法处理相同的 4 幅实验图像,基于最大熵值法的光斑检测算法图像处理过程如图 7 所示,基于亮度调节的光斑检测算法图像处理过如图 8 所示,基于轮廓特征的快速检测光斑算法图像处理过如图 9 所示。

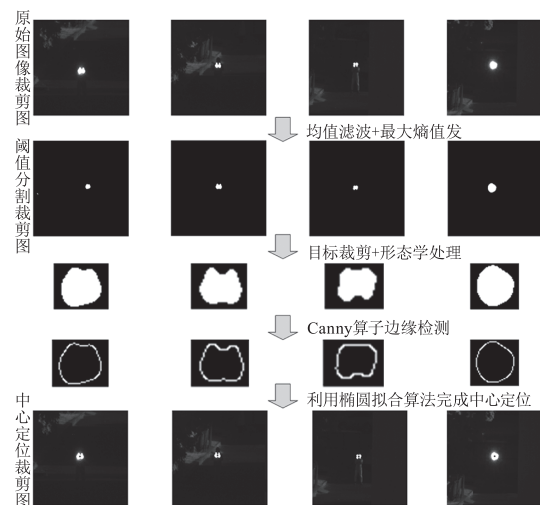


图 7 基于最大熵值法的光斑检测算法图像处理过程图
Fig. 7 Image processing process of spot detection algorithm based on maximum entropy method

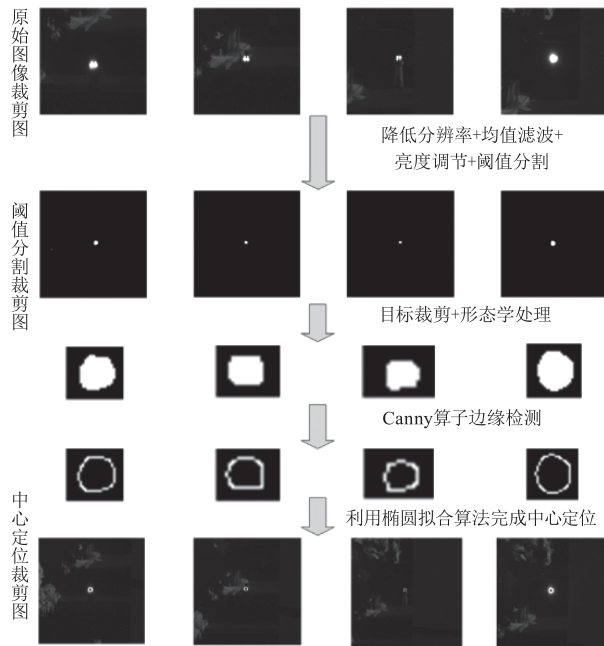


图8 基于亮度调节的光斑检测算法
图像处理过程图

Fig. 8 Image processing process of spot detection
algorithm based on brightness adjustment

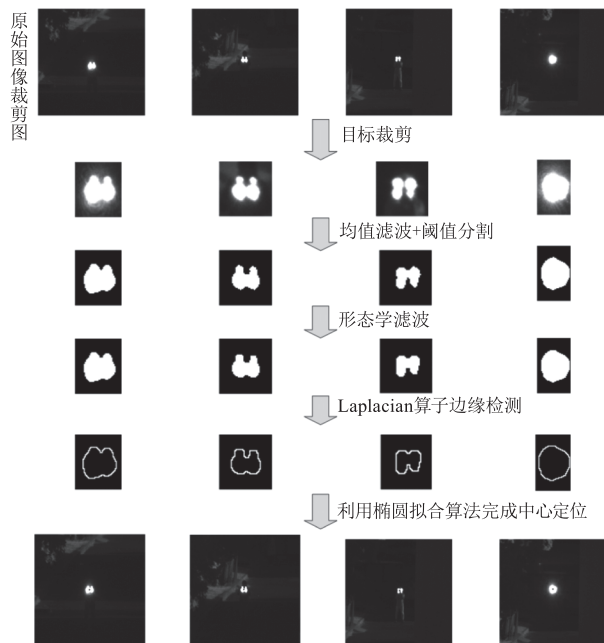


图9 基于轮廓特征的快速检测光斑算法
图像处理过程图

Fig. 9 Image processing process of fast spot detection
algorithm based on contour feature

4.3 检测结果分析

上述三种光斑检测算法处理相同的实验图像后,得到的光斑中心结果如表2所示。总体运行时间,如表3所示。

表2 光斑中心坐标

Tab.2 Spot center coordinates

实验数据	基于最大熵值法的光斑检测算法	基于亮度调节的光斑检测算法	基于轮廓特征的快速检测光斑算法
实验图1	(1315,1014)	(1314,1014)	(1314,1014)
实验图2	(1356,1016)	(1356,1016)	(1355,1015)
实验图3	(1331,1024)	(1330,1024)	(1329,1024)
实验图4	(1355,1016)	(1354,1016)	(1355,1016)

表3 总体运行时间(单位:ms)

Tab.3 Overall running time(Unit:ms)

实验数据	基于最大熵值法的光斑检测算法	基于亮度调节的光斑检测算法	基于轮廓特征的快速检测光斑算法
实验图1	192.9	180.4	35.5
实验图2	191.4	178.5	35.8
实验图3	192.5	181.0	35.5
实验图4	193.7	179.6	35.8

由表2、表3可知,三种光斑检测算法得出的光斑中心坐标大致相同,而本文提出的基于轮廓特征的快速检测光斑算法,在保证定位精度与准确性的同时,大大缩减了算法的检测时间,其中最长运行时间仅为35.8ms。

5 结论

针对快速检测大尺寸光斑图像的问题,本文提出了基于轮廓特征快速检测光斑算法。该算法通过目标裁剪的方法,将光斑从原始的灰度图像中裁剪出来,以达到降低整体图像运算量的目的。裁剪后的目标图像中存在着噪声和毛刺,本文采用图像预处理、形态学处理等操作,从而消除无关信息对目标图像的干扰,并让光斑边缘变得平滑。最后将基于轮廓特征的快速检测光斑算法与其他算法进行对比,实验结果表明该算法不仅可以保证定位的精度与准确性,还有效地降低了算法的运行时间,证明了该算法的实时性与可靠性。

参考文献:

[1] Kong W, Hu T, Zhang D, et al. Localization framework for real-time UAV autonomous landing: an on-ground deployed visual approach[J]. Sensors, 2017, 17(6):1437.
 [2] Yang T, Li G, 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.
 [3] Fang Bin, Feng Xiaofeng, Zhong Zhiwei, et al. Study on

- autonomous landing of a UAV with a ground based multi-sensor fusion system[J]. *Flight Dynamics*, 2020, 38(6): 82–86. (in Chinese)
- 方斌,冯晓锋,钟志伟,等. 基于地基多传感器融合的无人机自主着陆研究[J]. *飞行力学*, 2020, 38(6): 82–86.
- [4] Yuan B, Ma W, Wang F. High speed safe autonomous landing marker tracking of fixed wing drone based on deep learning[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 80415–80436.
- [5] Li Tianyu, Wang Mingquan, Hao Lihua, et al. Signal flare spot center location method based on Gaussian fitting[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(3): 422–426. (in Chinese)
- 李天宇,王明泉,郝利华,等. 基于高斯拟合的信号弹光斑中心定位方法[J]. *激光与红外*, 2022, 52(3): 422–426.
- [6] Shen Tianhao, Tian Kaikun, Liang Hexi, et al. Analysis of spot center detection algorithm for mobile space optical communication[J]. *Electronics Optics & Control*, 2021, 28(3): 63–66. (in Chinese)
- 沈天浩,田开坤,梁赫西,等. 移动空间光通信中光斑中心检测算法分析[J]. *光电与控制*, 2021, 28(3): 63–66.
- [7] He Jiakai, Huang Laiyu, Yang Dezhen, et al. Adaptive detection for near-far field laser spot energy center[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(4): 620–624. (in Chinese)
- 何佳凯,黄来玉,杨德振,等. 远近场自适应激光光斑能量中心检测[J]. *激光与红外*, 2022, 52(4): 620–624.
- [8] Zhu J, Xu Z, Fu D, et al. Laser spot center detection and comparison test[J]. *Photonic Sensors*, 2019, 9: 49–52.
- [9] Zhao H, Wang S, Shen W, et al. Laser spot centering algorithm of double-area shrinking iteration based on baseline method[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(21): 11302.
- [10] Chen Jihua, Yan Dongfang, Guo Wensong, et al. Research on recognizing and centroid algorithm for image blobs of reflector light echo[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015, 32(3): 261–265. (in Chinese)
- 陈继华,闫东方,郭文松,等. 自动全站仪的棱镜光斑图像识别算法研究[J]. *测绘科学技术学报*, 2015, 32(3): 261–265.
- [11] Yang Xiongdan, Wang Peixian, Li Guoyuan, et al. 2022. Extraction and analysis of space-borne laser spot image characteristic parameters[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(3): 555–567. (in Chinese)
- 杨雄丹,王佩贤,李国元,等. 星载激光光斑影像特征参数提取与分析[J]. *遥感学报*, 2022, 26(3): 555–567.
- [12] Wei Xiao, Li Heng, Huang Chenran. Application of uncertainty design optimization based on polynomial chaos expansions and maximum entropy method in ship design[J/OL]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2023, 18(3): 1–15. (in Chinese)
- 魏骁,李恒,黄晨冉. 基于PCE法和最大熵法的船舶不确定性优化设计[J/OL]. *中国舰船研究*, 2023, 18(3): 1–15.
- [13] Chen Maowu. Research on technology and system of vision-based UAV autonomous landing navigation[D]. Nanjing; Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017. (in Chinese)
- 陈茂武. 基于视觉的无人机自动着陆导航技术与系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.
- [14] Liu Tong. Research on position extraction of laser spot[D]. Xi'an; University of Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, 2018. (in Chinese)
- 刘童. 激光光斑位置提取技术研究[D]. 西安:中国科学院大学, 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2018.
- [15] Chen M, Zhang Z, Wu H, et al. Otsu-Kmeans gravity-based multi-spots center extraction method for microlens array imaging system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 152: 106968.
- [16] Zhang Pengcheng, Liu Jin, Yang Haima, et al. Research on center positioning of non-uniform laser spot based on PSD[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(8): 941–947. (in Chinese)
- 张鹏程,刘瑾,杨海马,等. 基于PSD的非均匀激光光斑中心定位研究[J]. *激光与红外*, 2020, 50(8): 941–947.
- [17] Jiang Jiawen, Kang Jiehu, Wu Bin. High precision positioning and compensation algorithm for laser spot center[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(14): 362–367. (in Chinese)
- 蒋佳雯,康杰虎,吴斌. 激光光斑中心高精度定位补偿算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(14): 362–367.