



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

《天津科技大学学报》网络首发论文

题目：一种基于高斯拟合法的改进型光斑质心定位方法
作者：刘成硕，黄喆，张岚清，李春炎
DOI：10.13364/j.issn.1672-6510.20240060
收稿日期：2024-03-22
网络首发日期：2025-01-14
引用格式：刘成硕，黄喆，张岚清，李春炎. 一种基于高斯拟合法的改进型光斑质心定位方法[J/OL]. 天津科技大学学报.
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20240060>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



一种基于高斯拟合法的改进型光斑质心定位方法

刘成硕, 黄喆, 张岚清, 李春炎
(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

摘要: 为了提高对光斑质心定位的精度, 提出一种基于高斯拟合法的改进方法。首先在图像中截取感兴趣区域(ROI)并利用阈值分割方法增加对比度, 然后对灰度图进行均衡化处理, 提高激光光斑图像的分辨率, 最后利用高斯拟合法处理灰度图, 并利用 Blob 分析法分割图像的前景与背景, 进行降噪处理并提取激光光斑。通过对比传统的光斑质心定位方法, 分析不同算法的优缺点, 实验结果表明: 改进方法的标准差小于 0.35 像素, 峰-峰值小于 1.8 像素, 稳定性明显优于传统的光斑质心定位方法。

关键词: 光斑质心定位; 噪声处理; 高斯拟合法

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510 (2024)00-0000-00

An Improved Spot Centroid Positioning Method Based on Gaussian Fitting Method

LIU Chengshuo, HUANG Zhe, ZHANG Lanqing, LI Chunyan

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of positioning the centroid of the spot, an improved method based on Gaussian fitting method was proposed. Firstly, the region of interest(ROI) was obtained by threshold segmentation to increase the contrast, then the grayscale map was equalized to improve the resolution of the laser spot image, and finally the Gaussian fitting method was used to process the grayscale image, the Blob analysis method is used to segment the foreground and background of the image, which is conducive to noise reduction and laser spot extraction. By comparing the traditional spot centroid positioning methods and analyzing the advantages and disadvantages of different algorithms, the experimental results show that the standard deviation of the improved method is less than 0.35 pixels, and the peak-to-peak is less than 1.8 pixels, and the stability is significantly better than that of the traditional spot centroid positioning methods.

Key words: spot centroid positioning; noise handling; Gaussian fitting method

激光光斑在医学、测距、加工以及军事等多个领域都发挥着重要作用。随着技术的不断进步和应用需求的增加, 激光光斑的应用前景越来越广阔^[1-4]。光斑质心定位对提高系统的精度、可靠性以及测量准确性都具有关键的作用^[5-6]。然而, 实际应用中所拍摄的激光光斑图像经常存在各种噪声, 如电子噪声、环境噪声等, 这些噪声可能会影响到光斑质心定位的精度^[7-8]。此外, 周围环境的杂光也可能使光斑图像的背景亮度增加, 导致光斑与背景的对比如度降低, 从而增加光斑提取的难度^[9-10]。

传统的光斑质心提取方法包括灰度质心法、椭圆拟合法、高斯拟合法等^[11]。灰度质心法简易且计算效率高, 对大部分灰度图像能够达到较好的分割效果, 但对灰度分布不对称的目标其效果并不理

想, 当受到较强的噪声干扰时, 其定位结果会产生较大误差^[12-14]。与灰度质心法相比, 椭圆拟合法的计算效率可能较低, 但在处理较大的图像或复杂的椭圆形状时, 椭圆拟合法的稳定性要优于灰度质心法^[15-17]。相比上述两种方法, 高斯拟合法可以通过拟合灰度值的高斯分布更加准确地描述光斑的实际形状和位置, 从而提高定位精度^[18]。在处理噪声方面, 高斯拟合法能够平滑图像中的噪声, 减少其对定位结果的影响^[19]。本文针对激光光斑的检测方法, 在高斯拟合法的基础上设计了一种适用于复杂环境中的光斑图像处理算法。在传统的算法上融合了多个阈值处理环节和 Blob 分析^[20]环节, 降低图像中噪声及杂光对提取精度的影响。

为深入验证改进方法在光斑质心定位领域的精

度与稳定性优势, 本文选取了灰度质心法、椭圆拟合法及高斯拟合法这 3 种经典的传统定位方法作为对比基准, 并对实验过程中所收集到的数据进行对比分析。

1 光斑质心定位原理

1.1 灰度质心法

灰度质心法的原理是基于物体在图像中的灰度分布, 通过计算灰度图像中元素的坐标与对应灰度值的乘积之和以及灰度值的总和, 从而确定物体的质心坐标。在光斑质心定位中, 灰度质心法通过计算光斑图像中每个像素点的灰度值, 并将其作为权重, 再根据以下算法计算出光斑的中心坐标。

在一个小的图像块中, 定义图像块的矩为

$$m_{pq} = \sum_{x,y} x^p y^q f(x,y) \quad (1)$$

式中: m_{pq} 表示图像的矩; p 和 q 的值分别为 0 或 1, 当 p 和 q 均为零时, m_{00} 表示零阶矩, 当 p 取 1、 q 取 0 时, m_{10} 为 x 方向的一阶矩, 当 p 取 0、 q 取 1 时, m_{01} 为 y 方向的一阶矩; $f(x,y)$ 表示在像素坐标 (x,y) 处图像的灰度值。

在半径为 R 的圆形图像区域, 沿坐标轴方向的图像矩分别为

$$m_{10} = \sum_{x=-R}^R \sum_{y=-R}^R xf(x,y) \quad (2)$$

$$m_{01} = \sum_{x=-R}^R \sum_{y=-R}^R yf(x,y) \quad (3)$$

圆形区域内所有像素的灰度值总和 m_{00} 为

$$m_{00} = \sum_{x=-R}^R \sum_{y=-R}^R f(x,y) \quad (4)$$

通过矩可以找到图像块的质心。

$$C = (c_x, c_y) = \left(\frac{m_{10}}{m_{00}}, \frac{m_{01}}{m_{00}} \right) \quad (5)$$

式中: C 表示图像块的质心, c_x 和 c_y 分别是图像块的质心在 x 和 y 方向上的坐标。

在应用灰度质心法时, 需要注意选择合适的二值化阈值, 以分割出光斑区域。同时, 该方法对光斑灰度图像特征区域的划分比较敏感, 因此需要保证光斑图像的质量和清晰度。当图像中光斑或噪声较多时, 光斑质心定位的结果可能并不理想。

1.2 椭圆拟合法

在椭圆拟合中, 需要先假设一个椭圆参数, 计算每个待拟合点到假设椭圆的误差。通过调整椭圆参数, 使这个和最小化, 从而得到最佳拟合的椭圆

参数。在提取光斑质心时需要将对光斑图像进行二值化处理, 并提取边缘点。利用最小二乘法对边缘点进行椭圆拟合, 得到拟合椭圆的参数。根据椭圆的质心坐标, 计算出光斑的质心坐标。椭圆的一般数学表达式为

$$ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f = 0 \quad (6)$$

利用最小二乘法可以得到式(6)的最优解, a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 分别为椭圆拟合取得最优解时的参数。

进而可以计算出光斑质心的坐标

$$\begin{cases} x_0 = \frac{ce - 2bd}{4ab - c^2} \\ y_0 = \frac{cd - 2ae}{4ab - c^2} \end{cases} \quad (7)$$

该方法的局限性在于噪声和异常值对拟合结果的影响较大。

1.3 高斯拟合法

高斯拟合法是基于高斯函数对光斑的灰度分布进行拟合, 通过求解高斯函数的参数, 得到光斑的质心坐标。高斯拟合法在提取光斑质心时需要将光斑图像转换为灰度图像, 并将灰度图像二值化处理, 以突出光斑区域。将二值化图像中的连通区域进行标记, 并计算每个连通区域的质心坐标, 取所有连通区域的质心坐标的平均值, 得到光斑的总质心坐标。高斯拟合法的数学原理如式(8)所示。

$$f(x,y) = A \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (8)$$

式中: (x_0, y_0) 为光斑质心坐标, 参数 A 为激光光斑的总能量, σ_x^2 和 σ_y^2 分别是 x 、 y 方向上的标准差,

$f(x,y)$ 是像元坐标在 (x,y) 时的强度值。

对式(8)两边取自然对数, 可得

$$\ln f(x,y) = \ln A - \frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2} \quad (9)$$

$$\text{令 } a = -\frac{1}{2\sigma_x^2}, b = -\frac{1}{2\sigma_y^2}, c = \frac{x_0}{\sigma_x^2}, d = \frac{y_0}{\sigma_y^2},$$

$$e = \ln A - \frac{x_0^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y_0^2}{2\sigma_y^2}$$

对式(9)进行化简得

$$\ln f(x, y) = ax^2 + by^2 + cx + dy + e \quad (10)$$

光斑质心横纵坐标为

$$x_0 = -\frac{b}{2a}, y_0 = -\frac{c}{2a} \quad (11)$$

高斯拟合法在处理具有高斯分布特性的光斑时具有较好的效果,但在图像质量较差或存在多个光斑的情况下,可能会受到干扰。

1.4 本文改进方法

在本文改进方法中,为了减少计算量并聚焦于关键区域,对图像进行预处理,提取出包含光斑的感兴趣区域(ROI)。通过图像裁剪、边缘检测或基于颜色、形状等特征的分割技术实现。ROI的准确提取能够显著提升后续处理的效率和准确性。将彩色图像转换为灰度图像,它简化了数据,减少了处理复杂度。灰度图像仅包含亮度信息,便于后续的阈值分割操作。在灰度图像上进行初次阈值分割,通过设置固定阈值初步分离出光斑与背景。尽管初次分割可能无法完美区分所有光斑与背景,但为后续处理提供了一个良好的起点。为改善图像的对比度,尤其是当图像中存在亮度不均或光斑亮度差异较大时,采用直方图均衡化技术。该技术通过拉伸图像的直方图,使其分布更加均匀,从而增强图像的对比度,使光斑更加突出。在直方图均衡化后的图像上再次进行阈值分割,这次分割能更准确地分离出光斑。为了进一步细化光斑的边界和形状,对分割出的光斑区域进行高斯拟合。通过拟合可以得到光斑的中心位置、大小和形状等参数。

针对可能出现的某个光斑亮度较暗、难以通过前述步骤完全识别的情况,采用大津法(OTSU)进行阈值处理。在光斑检测中,OTSU能够确保即使在

亮度不均或光斑亮度差异较大的情况下,也能较好地提取出光斑信息。OTSU阈值处理会用阈值 T 将灰度图分为前景和背景两部分,大于 T 的像素为前景,数量占总图像比例为 ω_0 ,平均灰度值为 μ_0 ,小于 T 的像素为背景,数量占总图像比例为 ω_1 ,平均灰度值为 μ_1 。

设 μ 是整个图像的灰度平均值,可得

$$\mu = \omega_0 \mu_0 + \omega_1 \mu_1 \quad (12)$$

设 δ 为最大类间方差,则

$$\begin{aligned} \delta^2 &= \omega_0 (\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu)^2 \\ &= \omega_0 \omega_1 (\mu_0 - \mu_1)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

前景部分和平均灰度值的方差,加上背景部分和平均灰度值的方差,这个值最大的时候,表示当前阈值为最佳阈值。

在处理图像的过程中,为了将图像中的光斑和背景分离,同时减弱噪声对光斑检测的干扰,改进方法中还加入了Blob分析部分,有利于计算光斑的二维形状特征。Blob分析是对图像中相同像素的连通域进行分析。其过程是将图像进行二值化,分割得到前景和背景,然后进行连通区域检测,从而得到Blob块。在处理光斑图像的过程中Blob分析就是在“光滑”区域内,将出现“灰度突变”的小区域寻找出来。

2 实验分析

本实验利用相机对红外激光的光斑图像进行采集,实验设备以及实验场景如图1所示。



图1 实验场景

Fig. 1 Experimental scenes

基于以上设备及实验环境,在200 m测量距离下采集光斑图像,图像灰度范围0~255。从激光光

斑图像(图2)中可以直观看出,图像含有多个激光光斑,且激光光斑的亮度差异较大,形状大小略有不

同，图像空间分辨率较低，并存在一定的噪声影响。实验选取左上方的光斑作为研究对象。

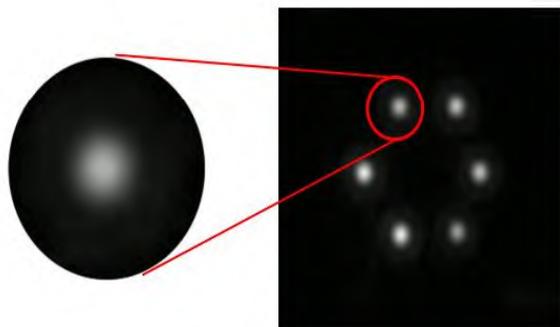
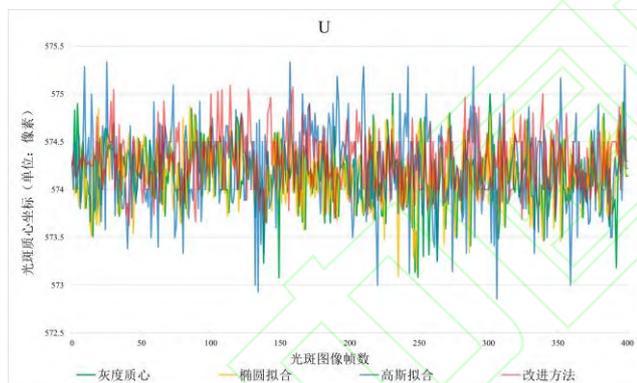


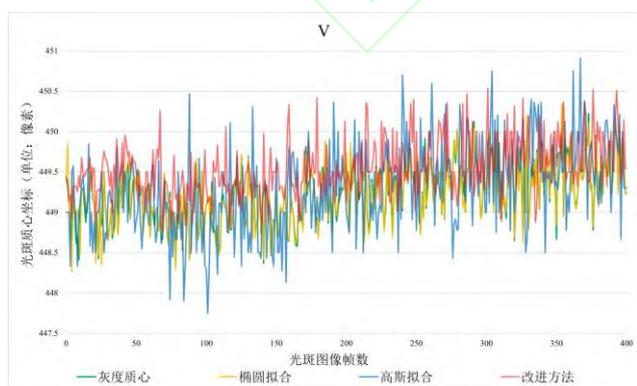
图 2 激光光斑图像

Fig. 2 Laser spot image

实验过程中将灰度质心法、椭圆拟合法、高斯拟合法和基于高斯拟合的改进方法应用于激光光斑数据的质心提取。对采集到的 400 帧光斑图像的质心进行连续解算，并根据得到的数据进行对比分析，评估上述 4 种方法提取光斑质心的性能。实验结果如图 3 所示，图像中横轴表示第 n 帧的光斑图像，纵轴表示灰度质心法、椭圆拟合法、高斯拟合法以及基于高斯拟合的改进方法的光斑质心定位的坐标。



(a)U 方向



(b)V 方向

图 3 光斑质心提取结果

Fig. 3 Centroid extraction results

通过图 3 中的数据可以明显观察到，只利用高斯拟合法提取光斑质心时局部数据变化较大，无法持续地得到稳定的质心坐标。相较于高斯拟合法，椭圆拟合法、灰度质心法和改进方法明显更加稳定。不同算法下光斑质心坐标的统计结果见表 1，光斑质心坐标的平均解算时间见表 2。

表 1 不同算法下光斑质心坐标的统计结果

Tab. 1 Statistical results of spot centroid coordinates under different algorithms

方法	U/像素			
	最大值	最小值	峰-峰值	标准差
灰度质心法	575.005	573.079	1.926	0.322
椭圆拟合法	574.905	573.094	1.811	0.318
高斯拟合法	575.333	572.857	2.476	0.438
本文改进方法	575.087	573.623	1.463	0.301
方法	V/像素			
	最大值	最小值	峰-峰值	标准差
灰度质心法	450.325	448.344	1.982	0.375
椭圆拟合法	450.349	448.266	2.084	0.379
高斯拟合法	450.909	447.75	3.159	0.531
本文改进方法	450.3	448.765	1.764	0.346

表 2 不同算法下光斑质心坐标的平均解算时间

Tab. 2 Average solution time of spot centroid coordinates under different algorithms

方法	平均解算时间/ms
灰度质心法	0.206
椭圆拟合法	0.786
高斯拟合法	0.771
本文改进方法	1.681

表 1 可知：在光斑质心坐标的提取过程中，灰度质心法与椭圆拟合法相较于高斯拟合法，展现出了更高的提取精度与稳定性，然而，这两种方法的表现仍不及本文的改进方法，本文方法的标准差小于 0.35 像素，峰-峰值小于 1.8 像素。此外，一个显著的特点是，在 U 方向上提取的坐标显示出比 V 方向更高的稳定性，这可能与光斑在图像中的亮度分布特性有关。对图 1 和图 2 进行分析后可知：在 U 方向右上侧的光斑亮度较暗，在 V 方向左侧及左下侧的光斑亮度较亮，因此在提取 V 方向的光斑质心坐标时受到的干扰较大。结合表 1 中的数据和上述分析的结论，本文改进方法在提取光斑质心的坐标时的精度、稳定性和抗干扰能力均优于另 3 种传统方法。

然而，从表 2 的数据中也应认识到本文改进方法的局限性，即其解算速度相对较慢。这主要是由于需要对光斑图像进行更加复杂的处理过程，因此改进方法的解算速度相对较慢。本文改进方法的解算时间为 1.681 ms，为椭圆拟合法和高斯拟合法的 2 倍有余，近乎是灰度质心法的 8 倍，较灰度质心

法慢了近 1.5 ms。结合表 1 中的数据,本文改进方法较灰度质心法在 U 方向稳定性提升了 31.6%,提取精度提升了 7.0%,在 V 方向稳定性提升了 12.4%,提取精度提升了 8.4%。牺牲解算时间以提升精度和鲁棒性,意味着本文改进方法能够更好地应对各种复杂情况和不确定性,从而在实际应用中表现更加稳定。在工程应用中高精度的数据是做出准确决策的基础,通过适当牺牲解算时间,可以获得更精确的结果。

3 结语

本文通过对比试验发现,不同的质心定位方法均可通过对激光光斑图像的分析进行光斑质心定位,质心定位精度最高的为基于高斯拟合法的改进方法(标准差小于 0.35 像素),其次是灰度质心法、椭圆质心法以及高斯拟合法。本文改进方法质心定位的稳定性最好。

参考文献:

- [1] 徐晶,王轩潮,任正玮,等.高精度激光定位散斑机理分析及抑制[J].光学精密工程,2023,31(13):1900-1908.
- [2] PAN D ,ZHOU Q ,QU W Z, et al. Star spot centroid extraction method in high dynamic condition based on difference hash algorithm[J].Journal of physics: conference series, 2022, 2235 (1): 012020.
- [3] WANG F B, LIU M Z, WANG S Z. Kalman filter tracking of sequence spot centroid ablated by femtosecond laser[J]. Microwave and optical technology letters, 2021, 63 (2): 690-700.
- [4] 任守峰. 高分七号卫星激光足印光斑辅助激光定位研究 [D]. 兰州:兰州交通大学, 2021.
- [5] 尚卓.激光图像光斑质心位置高精度识别模型构建[J].激光杂志,2021,42(5):125-128.
- [6] 李道萍,杨波.高精度光斑中心定位算法[J].光学仪器,2018,40(4):20-25.
- [7] 陈春璐,赵旺,赵孟孟,等.基于噪声模型变换的子光斑质心提取方法[J].光学学报,2023,43(3):111-121.
- [8] 陈少杰,张亮,王建宇.探测器条状噪声对精跟踪系统光斑定位的影响[J].中国激光,2017,44(9):236-246.
- [9] 万科,黎荆梅,韩启金,等.“句芒号”激光光斑质心提取方法与稳定性分析[J].光学学报,2024,44(6):370-381.
- [10] 吴洪凯.基于液晶光闭环系统的光斑高精度提取定位技术研究[D]. 长春:长春理工大学,2023.
- [11] 袁小棋,李国元,唐新明,等.星载激光光斑影像质心自动提取方法[J].测绘学报,2018,47(2):135-141.
- [12] 刘梦竹.飞秒激光烧蚀光斑图像的质心提取及动态跟踪研究[D]. 唐山:华北理工大学,2021.
- [13] 袁靖肖,汪洋.基于统计学的小尺寸光点质心快速定位算法[J].计算机仿真,2022,39(3):407-412.
- [14] 姜超,狄世超,刘超,等.一种基于 OpenCV 的高精度光斑中心定位方法[J].光学与光电技术,2023,21(5):67-72.
- [15] 吴建霖,蒋理兴,李晨阳,等.基于单目红外的远距离多测点振动测量方法[J].仪器仪表学报,2018,39(9):255-263.
- [16] 任守峰,唐新明,祝小勇,等.一种高分七号卫星激光足印光斑质心的高精度提取算法[J].光学学报,2021,41(10):125-132.
- [17] 章天昊,李郝林.一种基于高斯拟合法的激光光束中心提取方法[J].电子科技,2020,33(5):72-76.
- [18] 单德强,胡超,刘飞飞.关于光斑图像阈值分析及其中心点的提取[J].计算机与数字工程,2020,48(7):1753-1756.
- [19] 张可人,李夕雯,冯祥.基于视觉特性的激光光斑图像分割方法研究[J].激光杂志,2023,44(9):114-119.
- [20] 陈鹏,陈彦秋,彭俊,等.基于改进 Blob 分析的机器人批量搬运纠偏研究[J].仪器仪表学报,2023,44(8):41-50.