

索引圆环灰度差值最小的光斑中心逼近法

王亚祺 李晓 张瑞 王志斌 杨帅 武振涛 赵泽伟

Spot center approximation method with minimum gray-scale difference of indexed ring

WANG Yaqi, LI Xiao, ZHANG Rui, WANG Zhibin, YANG Shuai, WU Zhentao, ZHAO Zewei

引用本文:

王亚祺, 李晓, 张瑞, 等. 索引圆环灰度差值最小的光斑中心逼近法[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 622–631. DOI: 10.5768/JAO202546.0302002

WANG Yaqi, LI Xiao, ZHANG Rui, et al. Spot center approximation method with minimum gray-scale difference of indexed ring[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 622–631. DOI: 10.5768/JAO202546.0302002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0302002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于投影分割的激光告警光斑中心快速提取算法

Rapid extraction algorithm of laser alarm spot center based on projection segmentation

应用光学. 2024, 45(6): 1170–1178 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0602001>

高精度激光告警参数提取算法

High-precision parameter extraction algorithm of laser alarm

应用光学. 2023, 44(6): 1258–1264 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610013>

高精度二维宽波段激光告警参数计算算法

Calculation algorithm of high-precision two-dimensional broadband laser warning parameters

应用光学. 2022, 43(1): 111–118 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0107001>

基于双目CMOS图像传感的激光告警技术

Laser warning technology based on binocular CMOS image sensor

应用光学. 2024, 45(6): 1291–1297 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0607002>

飞秒激光光斑灰度与几何特征的相关性分析

Correlation analysis of gray scale and geometric features of femtosecond laser spot

应用光学. 2020, 41(5): 1108–1116 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0507002>

基于稀疏表示的激光光斑复原方法

Laser spot restoration method based on sparse representation

应用光学. 2024, 45(3): 543–548 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310008>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0622-10

引用格式: 王亚祺, 李晓, 张瑞, 等. 索引圆环灰度差值最小的光斑中心逼近法 [J]. 应用光学, 2025, 46(3): 622-631.

WANG Yaqi, LI Xiao, ZHANG Rui, et al. Spot center approximation method with minimum gray-scale difference of indexed ring[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 622-631.



在线阅读

索引圆环灰度差值最小的光斑中心逼近法

王亚祺¹, 李晓^{1,2}, 张瑞², 王志斌^{2,3}, 杨帅¹, 武振涛³, 赵泽伟¹

(1. 中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051; 2. 山西省智能微波光电技术创新中心, 山西 太原 030051;
3. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为了提高光栅衍射型激光告警系统参考位置的定位精度, 提出了一种基于索引圆环灰度差值最小的光斑中心逼近法。根据给定光斑中心的初始坐标生成 3×3 中心坐标矩阵, 使用 Lagrange 插值法求出以中心坐标矩阵为中心的索引圆环上各点的灰度值, 通过二分法逐步逼近索引圆环灰度差值最小的中心坐标, 即光斑中心真实坐标。在准确性对比实验中, 所提出的算法在 3 组理想光斑模型样本中 x 方向、 y 方向平均误差分别为 0.0013 像素、0.0011 像素。在稳定性对比实验中, 该算法在 3 组实际光斑图片样本中 x 方向、 y 方向平均标准差分别为 0.1653 像素、0.1860 像素。基于索引圆环灰度差值最小的光斑中心逼近法在两个对比实验中均得到了最低的平均误差或标准差, 具有更高的精度和更好的稳定性, 提高了激光告警系统参考位置的定位精度, 为光斑中心定位算法提供了新的解决思路。

关键词: 光斑建模; Lagrange 插值; 中心定位; 逼近法; 激光告警

中图分类号: TN247; TJ8

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0302002

Spot center approximation method with minimum gray-scale difference of indexed ring

WANG Yaqi¹, LI Xiao^{1,2}, ZHANG Rui², WANG Zhibin^{2,3}, YANG Shuai¹,
WU Zhentao³, ZHAO Zewei¹

(1. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Technology Innovation Center of Shanxi Provincial for Intelligent Microwave Photoelectric, Taiyuan 030051, China;
3. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to improve the positioning accuracy of the reference position in the grating diffraction laser warning system, a spot center approximation method based on the minimum grayscale difference of indexed ring was proposed. According to the given initial coordinates of the spot center, a 3×3 center coordinate matrix was generated. The Lagrange interpolation was used to calculate the grayscale values of points on the indexed ring centered at the center coordinate matrix. The center coordinate with the minimum grayscale difference on the indexed ring, which represented the true coordinates of the spot center, was approximated using a binary search method. In the accuracy comparative experiment, the proposed algorithm showed average errors of

收稿日期: 2024-05-29; 修回日期: 2024-08-07

基金项目: 国家自然科学基金 (62105302); 山西省回国留学人员科研教研资助项目 (HGKY2019067); 航空科学基金资助项目 (2023Z019U0001); 实验室开放基金项目 (LabSOMP-2023-02)

作者简介: 王亚祺 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电检测研究。E-mail: wangyaqi_wyq@163.com

通信作者: 李晓 (1972—), 女, 博士, 教授, 主要从事电力电子变换器与控制、光热发电控制、电气控制技术、光电检测技术研究。E-mail: lixiaoydx@nuc.edu.cn

0.001 3 pixels in the x -direction and 0.001 1 pixels in the y -direction across three sets of ideal spot model samples. In the stability comparative experiment, the proposed algorithm exhibited average standard deviations of 0.165 3 pixels in the x -direction and 0.186 0 pixels in the y -direction across three sets of actual spot image samples. The spot center approximation method based on the minimum grayscale difference of indexed ring has obtained the lowest average error or standard deviation in two comparative experiments, respectively, which demonstrates higher accuracy and better stability, thereby improving the positioning accuracy of the reference position in the laser warning system, and provides a new solution for spot center positioning algorithms.

Key words: spot modeling; Lagrange interpolation; center localization; approximation method; laser warning

引言

随着激光技术的发展,激光告警系统在现代战场冲突中的广泛应用推动着各国激光对抗技术的研究进程^[1],其中能够同时探测激光波长和角度的激光告警系统主要有光谱识别型和相干识别型两种激光告警技术^[2]。作为相干识别型激光告警系统的一种,光栅衍射型激光告警系统通过探测器采集的光斑图像中0级衍射光斑中心位置计算来测激光方位角和俯仰角,用0级和1级衍射光斑中心的距离计算来测激光波长,具有较高的角度和波长分辨率,且该类型激光告警系统工艺简单、成本较低^[3-4]。而作为系统计算的参考位置,即入射激光方位角及俯仰角均为0°时的0级衍射光斑中心坐标,其精度直接影响了系统整体的精度^[5]。因此,更高精度地对光斑中心进行定位就成为了激光告警系统的关键因素。

目前,光斑中心定位是计算机视觉和图像处理领域的一个重要研究方向。传统的激光光斑中心定位算法有灰度质心法、圆拟合法、霍夫变换法、高斯拟合法以及相应的改进算法^[6-15]。其中,灰度质心法计算较为简单,但其对光斑形状及背景灰度值敏感;圆拟合法原理简单,但其依赖边缘检测的效果,抗干扰性差;霍夫变换法的精度与稳定性相对较高,但其计算复杂,计算结果也依赖边缘检测的效果;高斯拟合法则对光斑能量分布要求高,在能量符合高斯分布时能获得较高的定位精度与稳定性。近年来,随着人工智能领域的发展,一些基于神经网络^[16-20]的激光光斑中心定位算法也逐渐出现。这些算法的效果依赖于训练模型本身,而训练模型的中心坐标通常是未知的,因此这些算法的精度往往不能带来较大的提高,且容易出现局部最优解使结果误差增大。

与其他优化算法相结合,这些光斑中心定位算法的精度和鲁棒性在某些特定条件下都能够得到

有效提升,但对于一些要求更高的情况,还需要进一步的研究和改进。本文提出的方法从灰度图像形成底层原理出发,将像素内任意一点的灰度值与相应像元区域内对应位置接收的光子数建立近似关系,大大提高了像素的灰度信息,并根据索引圆环灰度差值最小的原理,使用二分法逼近光斑真实中心,具有更高的精度和鲁棒性。

1 光斑图像建模

一个像素灰度值的形成可以由这样一个过程来简单表述,即:当光束照射到探测器后,像元区域内一定数量的光子与该区域的光敏元件作用产生相应电荷,电荷累积并以电压信号输出,再由模数转换电路将电压模拟信号转换为数字信号,最后将数字信号线性转化为灰度值。因此,某像素的灰度值 $G(X,Y)$ 可由式(1)描述。可以看出,在累积的电荷小于像元满阱容量的情况下,不考虑读出噪声、模数转换精度等其他因素时,可近似认为某像素灰度值与积分时间内对应像元区域接收的光子数量成正比。

$$G(X,Y) = \begin{cases} \frac{N \cdot \eta \cdot G}{V_{\text{ref}}} \cdot 256, & N \cdot \eta < N_{\text{fwc}} \\ \frac{N_{\text{fwc}} G}{V_{\text{ref}}} \cdot 256, & N \cdot \eta \geq N_{\text{fwc}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $G(X,Y)$ 表示第 X 行、第 Y 列像素的灰度值; N 为像元区域内接收的光子数量; η 为量子效率; N_{fwc} 为探测器满阱容量(full well capacity, FWC); G 为电荷转换增益; V_{ref} 为模数转换电路参考电压。

激光的能量分布有基模和高阶模两种模式,其中基模为高斯光束,可以用高斯函数进行描述^[21]。而对于同一波长的激光,光束中每个光子的能量均相等。因此,对于同一波长的激光,光子数量的分布亦可由高斯函数进行描述。探测器积分时间

内某像元区域接收的光子数量 N 可由式(2)表示:

$$N = \int_Y^{Y+b} \int_X^{X+a} tf(X,Y)dXdY \quad (2)$$

式中: N 为像元区域内接收的光子数量; t 为积分时间; a 、 b 分别为像元 X 方向、 Y 方向的长度; X 、 Y 为像元坐标; $f(X, Y)$ 为二维高斯分布函数。

将式(2)代入式(1), 即可得到基于激光能量的理想光斑灰度图像建模公式:

$$G(X, Y) = \begin{cases} \frac{\int_Y^{Y+b} \int_X^{X+a} tf(X, Y)dXdY \cdot \eta \cdot G}{V_{ref}} \cdot 256, & N \cdot \eta < N_{fwc} \\ \frac{N_{fwc} G}{V_{ref}} \cdot 256, & N \cdot \eta \geq N_{fwc} \end{cases} \quad (3)$$

2 索引圆环灰度差值最小的激光光斑中心逼近法

对于激光直射产生圆形光斑都满足的一个分布规律为: 以光斑中心为圆心的同心圆上的点都具有相同的能量, 且随着半径的增大, 同心圆上各点的能量逐渐减小。从微分的角度看, 一个光斑可以看作是由无穷多个具有不同半径的同心圆组成。考虑如下情况, 以光斑真实中心附近的任意一点为圆心, 经过光斑的圆, 即索引圆上各点能量不再相等, 且对于同一半径的圆, 圆心越接近光斑中心, 圆上各点的最大能量越小, 最小能量越大, 最大能量与最小能量差值越接近零。相反, 圆心越远离光斑中心, 其圆上各点的最大能量越大, 最小能量越小。因此, 满足圆上最大能量与最小能量差值为零的圆心即为光斑中心。

由式(3)可知, 在处理实际的光斑图片时, 像元区域内接收的能量之和表现为对应像素的灰度值。此时, 单个像素内任意一点的灰度值不再表现为像元区域内对应点的能量。由于光斑能量分布无法确定, 则单个像素内任意一点的灰度值也无法确定。为解决这一问题, 可以作如下近似: 由于像元面积相对光斑面积很小, 因此可认为在 X 、

Y 方向上像元内光斑的能量分布为线性的, 那么像素中心的灰度值可由式(4)表示:

$$P'(X, Y) \approx G(X, Y) \quad (4)$$

式中: $P'(X, Y)$ 表示第 X 行、第 Y 列像素中心点的灰度值。

进一步地, 某像素内任意一点的灰度值 $P(x, y)$ 由该像素中心的灰度值 $P'(X_0, Y_0)$ 及邻近 8 个方向的像素中心的灰度值通过 Lagrange 插值曲面公式求出, 即:

$$P(x, y) \approx \sum_{n=-1}^1 \sum_{m=-1}^1 l_n(x) \tilde{l}_m(y) P'(X_0 + n, Y_0 + m) \quad (5)$$

其中:

$$l_n(x) = \prod_{\substack{t=-1 \\ t \neq n}}^1 \frac{x-t}{n-t}, \tilde{l}_m(y) = \prod_{\substack{t=-1 \\ t \neq m}}^1 \frac{y-t}{m-t} \quad (6)$$

式中: (X_0, Y_0) 表示所求灰度值的点所在像素的坐标; $P(x, y)$ 表示像素 (X_0, Y_0) 内任意一点的灰度值; n 表示邻近 8 个方向像素横坐标与该像素横坐标 X_0 的相对距离, n 的取值范围为 $n = -1, 0, 1$; m 表示邻近 8 个方向像素纵坐标与该像素纵坐标 Y_0 的相对距离, m 的取值范围为 $m = -1, 0, 1$ 。

于是, 任意索引圆上最大灰度值与最小灰度值的差值可由式(7)得出。当差值达到最小时, 即可认为该索引圆的圆心即为光斑中心。

$$D_i = \max\{P(x_i + r \cos \theta_k, y_i + r \sin \theta_k)\} - \min\{P(x_i + r \cos \theta_k, y_i + r \sin \theta_k)\} \quad (7)$$

式中: D_i 表示任意索引圆上最大灰度值与最小灰度值的差值; x_i 、 y_i 为索引圆圆心坐标; r 为索引圆半径, 该半径的最大值出现在索引圆恰好作为光斑的外切圆时; θ_k 为索引圆上某一点与圆心连线与 x 轴正方向的夹角, 范围为 $[0, 2\pi]$ 。

为提高算法的精度, 索引圆上最大灰度值与最小灰度值的差值由以索引圆圆心为圆心、半径 r 为 r_{min} 到 r_{max} 的所有同心圆上最大灰度值与最小灰度值的差值之和代替, 这些同心圆即组成索引圆环。此时, 式(7)变为式(8):

$$D_i = \sum_{r=r_{min}}^{r_{max}} \{\max\{P(x_i + r \cos \theta_k, y_i + r \sin \theta_k)\} - \min\{P(x_i + r \cos \theta_k, y_i + r \sin \theta_k)\}\} \quad (8)$$

在 Matlab 中生成一张分辨率为 400×300 像素的光斑灰度图片, 光斑中心坐标为 $(200, 150)$, 每个像素的灰度值根据式(3)计算得出。生成的激光光斑模型如图 1 所示, 图 2 为其能量分布的 3D 视图。

在 x 方向对包含光斑中心的区间进行等步长的索引圆环灰度差值计算, 其中选取的 x 坐标区间为 $[199, 201]$, y 坐标为 150, 索引圆环中心 x 坐标移动步长为 0.000 1, 索引圆环半径区间为 $[8, 16]$, 半

径步长为 0.1, θ_k 的步长为 0.1。将每个索引圆环中心坐标 (x, y) 通过式(5)、式(8)计算出该坐标下的索引圆环灰度差值。遍历完区间内所有的点后, 结果显示, 在索引圆环中心为 $(200.0002, 150)$ 时, D_i 值达到最小, x 方向误差为 0.0002 像素。同样的, 选取 x 坐标为 200, 在 y 方向 $[149, 151]$ 区间内进行等步长的索引圆环灰度差值计算, 其他参数与 x 方向等步长计算中一致。结果表明, 在索引圆环中心为 $(200, 150.0000)$ 时, 灰度差值 D_i 最小, 在该移动步长下 y 方向误差为 0。 x 方向、 y 方向区间内各索引圆环灰度差值分布如图 3 所示。

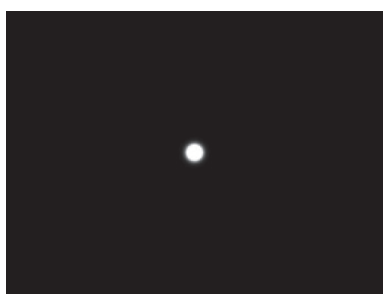


图 1 激光光斑模型
Fig. 1 Laser spot model

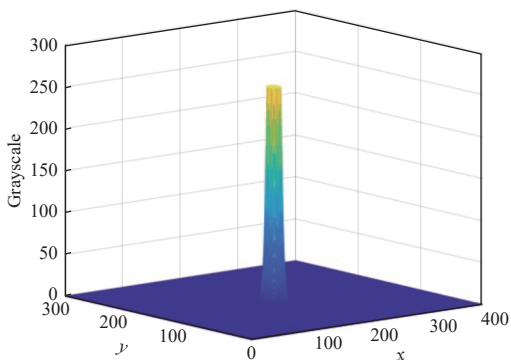


图 2 能量分布的 3D 视图
Fig. 2 3D view of energy distribution

进一步地, 为提高算法的速度, 本文提出了一种基于二分法的圆心逼近法, 算法流程如图 4 所示。首先可以通过其他光斑中心定位算法如灰度质心法快速确定光斑中心概略位置, 并以该位置坐标 (x_0, y_0) 作为初始索引圆环中心, 该中心越接近光斑真实中心, 迭代次数越少。根据初始索引圆环中心生成索引圆环中心坐标矩阵, 根据式(5)、式(8)计算该中心坐标以及基于该步长 s 的邻近 8 个坐标的索引圆环灰度差值, 若该坐标下的灰度差值不为 9 个差值的最小值, 则步长不变, 将 (x_0, y_0) 替换为最小灰度差值的索引圆环坐标并重复前述步骤; 若该坐标下的灰度差值为 9 个差值的最小

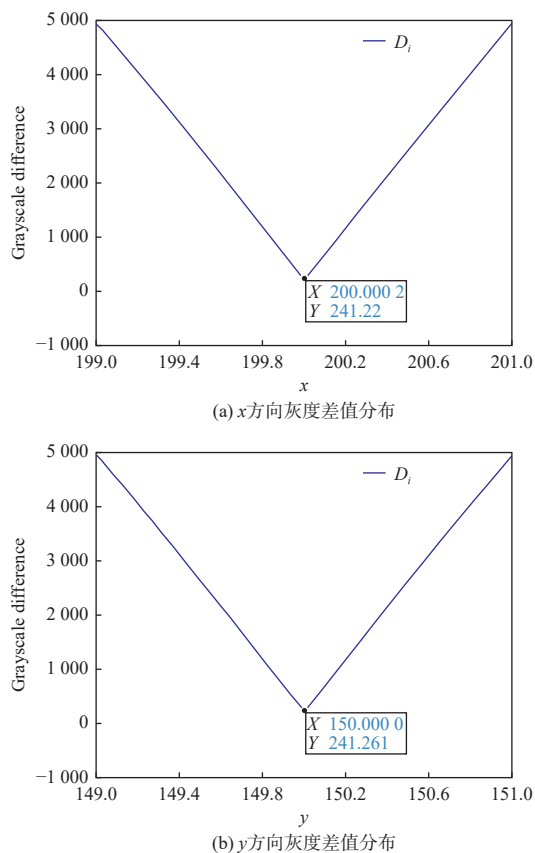


图 3 索引圆环灰度差值分布

Fig. 3 Distribution of grayscale difference in indexed ring

值, 且步长未达到目标步长 s_{target} , 则将步长修改为原步长的 1/2, 以当前点为索引圆环中心并重复前述步骤; 若该点为 9 个差值的最小值, 且步长达到目标步长, 则输出当前坐标。在这里, 目标步长一定程度上反映了算法的迭代次数以及计算结果的预期精度, 但由于噪声、插值计算误差等因素的存在, 过小的目标步长可能会使算法陷入局部最优。因此, 目标步长越小并不意味着计算结果误差越小。

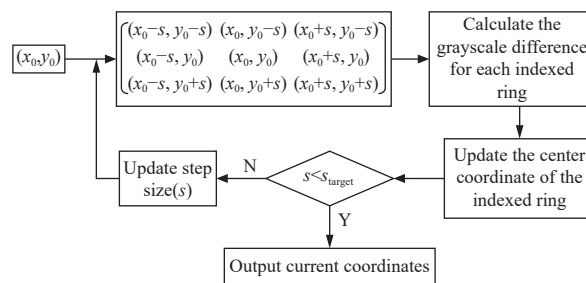


图 4 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of algorithm

目标步长的选取一般通过实验获得, 选取过大会使计算结果精度不够, 而选取过小时又会使计算结果产生无效位且计算时间变长。一般来

讲,将目标步长设为0.0001适合大部分应用场景,而在本文的其他实验中也将目标步长设为此值。

以图1光斑图片为例,以变步长的圆心逼近法求解,将初始圆心设为(195,155),半径 r 及参数 θ_k 与前述等步长计算中一致,初始步长 s 为3,目标步长 s_{target} 为0.0001。结果显示,在经过30次迭代逼近后,算法达到了目标步长,此时索引圆环的中心坐标为 $\text{index}_x = 199.99988, \text{index}_y = 149.99994$ 。 x 方向误差小于0.00013像素, y 方向误差小于0.00007像素,逼近过程中索引圆环中心变化趋势如图5所示。进一步分析得知,该误差主要是由于光斑模型灰度值的精度造成的,即对于同一能量分布的激光光斑,当光斑中心移动距离足够小时,位移前后产生的光斑灰度值分布是完全一样的,此时无法通过任何算法求出光斑真实中心。

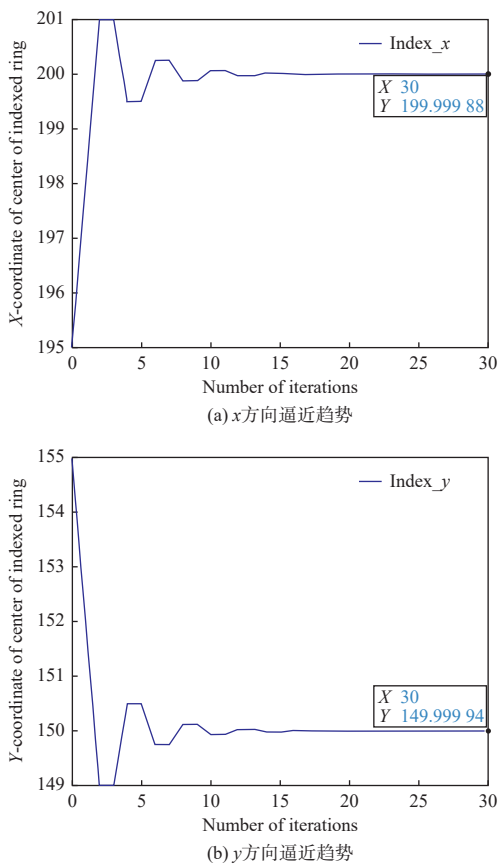


图5 索引圆环中心逼近趋势

Fig. 5 Approximation trend of indexed ring

3 对比实验

在光斑中心定位算法中,最重要的指标为算法的准确性,它是指该算法对光斑中心坐标计算结果与真实位置的偏差,这直接反映了算法的精度。

然而,在实际条件下,光斑中心的实际位置往往是无法确定的。为解决这一问题,可以通过算法的稳定性与位移分辨精度来间接反映算法的精度^[22],这两种指标都用来表征某算法对光斑中心坐标计算结果的离散程度,区别是:稳定性所要求的图像为光斑在图像中位置不变的情况下,多次获取的此光斑灰度图像;位移分辨精度所要求的图像为光斑在图像中产生确定位移后获取的光斑灰度图像。本文将通过理想光斑模型和实际光斑两方面来对灰度质心法 (grayscale centroid method)、圆拟合法 (circular fitting method)、霍夫变换法 (Hough transform method)、高斯拟合法 (Gaussian fitting method) 以及本文提出的基于索引圆环灰度差值最小的激光光斑中心逼近法 (center approximation method based on minimizing the grayscale difference of indexed ring, MGDIR) 进行对比。

3.1 基于理想光斑模型的仿真对比实验

在对理想光斑模型建模时,其光斑中心坐标是已知的,因此可采用计算坐标与实际坐标的平均误差 η 来对各算法的准确性进行对比。计算公式为

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (9)$$

式中: n 为样本数量; x_i 为根据样本所计算的光斑中心坐标; \bar{x} 为样本实际坐标。

根据式(3)对同一中心坐标、不同大小的光斑进行建模,通过不同算法求解出每种能量分布下的光斑坐标,最后通过式(9)得到每种算法计算结果的平均误差。为确保结果的可信性,实验使用3组光斑中心坐标随机产生的、包含完整光斑的样本,同组内样本由99张中心坐标相同、能量强度不同的光斑模型组成。其中,能量强度由二维高斯分布函数 $f(x,y)$ 的尺度参数 σ 表征,其值由1逐步等间隔增大到15。此时,生成的灰度图片中光斑半径由4像素逐步增大到58像素,如图6所示。在对3组样本的光斑进行计算后,每组计算结果如图7所示,表1为各组样本在不同算法下计算结果的平均误差。



图6 同组的光斑模型样本

Fig. 6 Spot model samples from the same group

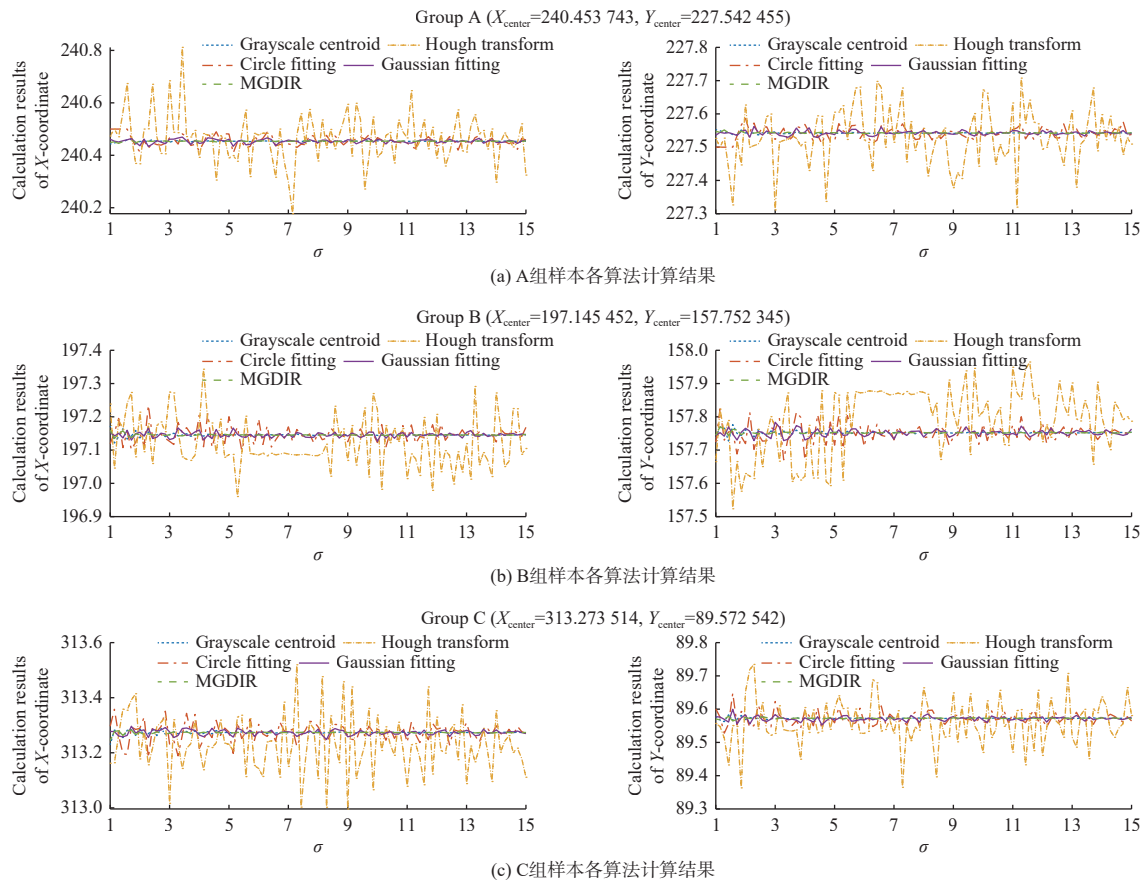


图7 光斑模型中心计算结果

Fig. 7 Results of center calculation in spot models

表1 不同算法下各组样本计算结果的平均误差

Sample		Grayscale centroid	Circle fitting	Hough transform	Gaussian fitting	MGDIR
A	η_x	0.0013	0.0157	0.0683	0.0058	0.0010
	η_y	0.0011	0.0145	0.0650	0.0048	0.0009
B	η_x	0.0023	0.0179	0.0702	0.0063	0.0013
	η_y	0.0028	0.0210	0.0944	0.0081	0.0015
C	η_x	0.0030	0.0249	0.0922	0.0078	0.0016
	η_y	0.0013	0.0142	0.0560	0.0054	0.0010
Mean	$\bar{\eta}_x$	0.0022	0.0195	0.0769	0.0066	0.0013
	$\bar{\eta}_y$	0.0017	0.0166	0.0718	0.0061	0.0011

从对比结果可看出, 由于光斑较为理想, 5种算法均得到了较为精确的结果。在同一组光斑样本中, 随着 σ 的变化, 霍夫变换法计算结果波动最大, 圆拟合法次之, 基于索引圆环灰度差值最小的逼近法计算结果波动最小, 而在其他组样本也得到了同样的结论。进一步分析可知, 由于圆拟合法与霍夫变换法将灰度值进行二值化, 失去了部分光斑灰度信息, 而且两算法结果都较为依赖边缘检测的效果, 因此在光斑模型中心检测中较其

他算法有较大误差。而基于索引圆环灰度差值最小的逼近法则充分利用了光斑灰度信息, 使得其在每组结果中 x 方向和 y 方向的平均误差均最小, 分别仅为0.0013像素和0.0011像素, 具有更高的精度。

3.2 基于实际光斑的对比实验

在实际光斑的对比实验中, 畸变现象的存在会影响位移分辨精度, 从而影响对比结果, 因此本实验仅从稳定性角度对各算法进行对比。稳定性通

过标准差来衡量,计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}{n}} \quad (10)$$

式中: n 为样本数量; δ_i 为根据样本所计算的光斑中心坐标; $\bar{\delta}$ 为所计算的光斑中心坐标的平均值。

如图 8 所示,激光光斑图像采集系统由调制激光器、扩束镜、激光告警样机、高精度二维转台及上位机组成。通过该系统采集三组转台转动任意角度的、包含完整零级光斑的样本,同组内样本由 20 张同一角度、同一波长、不同光功率的光斑灰度图片组成。其中,调制激光器的输出光功率由 70 μW 等间隔增大到 1400 μW ,间隔为 70 μW 。此时,采集到的光斑图片中零级光斑半径由约 10 像素逐渐增大到约 73 像素。

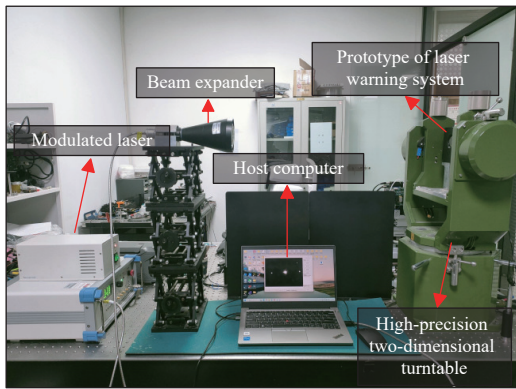
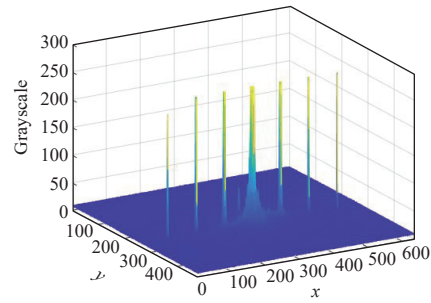


图 8 激光光斑图像采集系统

Fig. 8 Laser spot image acquisition system

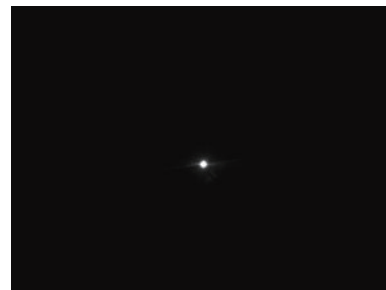
采集到的光斑图片及其能量分布如图 9 所示,所使用的激光波长为 532 nm。可以看到,图片中存在炫光、噪点等干扰因素。为提高各算法的精度以及方便对比,对采集到的光斑图片的背景进行了去噪和平滑的优化操作,并对 0 级光斑以外的其他衍射光斑进行了屏蔽处理,处理后的图片及其能量分布如图 10 所示。



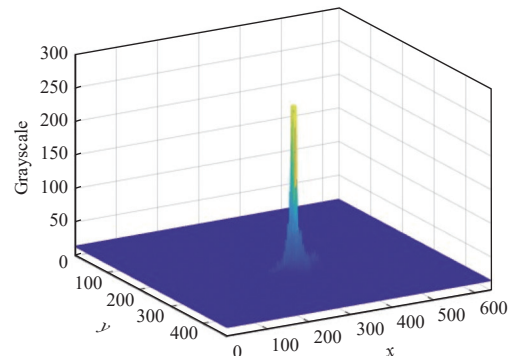
(b) 未处理的激光光斑能量分布

图 9 原始光斑图片及其能量分布

Fig. 9 Original spot image and its energy distribution



(a) 处理后的激光光斑图片



(b) 处理后的激光光斑能量分布

图 10 处理后的光斑图片及其能量分布

Fig. 10 Processed spot image and its energy distribution

经过对 3 组样本处理后的光斑图像进行计算,每组光斑中心位置的检测结果如图 11 所示。同时,表 2 详尽列出了各组样本在不同算法应用下的结果离散程度。结果显示,在同一组样本内,随着激光输出光功率的变化,采用高斯拟合法所得的计算结果展现出最大的波动性,相比之下,基于索引圆环灰度差值最小的光斑中心逼近法则表现出最小的波动,呈现出更高的稳定性。此外,在不同组样本的对比实验中,上述趋势亦得到了一致验证,同时也表明,在光斑完整的前提下,各算法稳定性与入射角度无关。进一步分析得知,饱和现象与炫光效应等不利因素干扰了光斑原有的能量分布形态,从而导致高斯分布算法在稳定性方面表现不佳,



(a) 未处理的激光光斑图片

相较于其他算法产生了更大的误差。而本文提出的检测算法则受到干扰因素的影响较小, 在每组

结果中 x 方向和 y 方向的标准差仍然最小, 分别仅为 0.1653 像素和 0.1860 像素, 具有更强的鲁棒性。

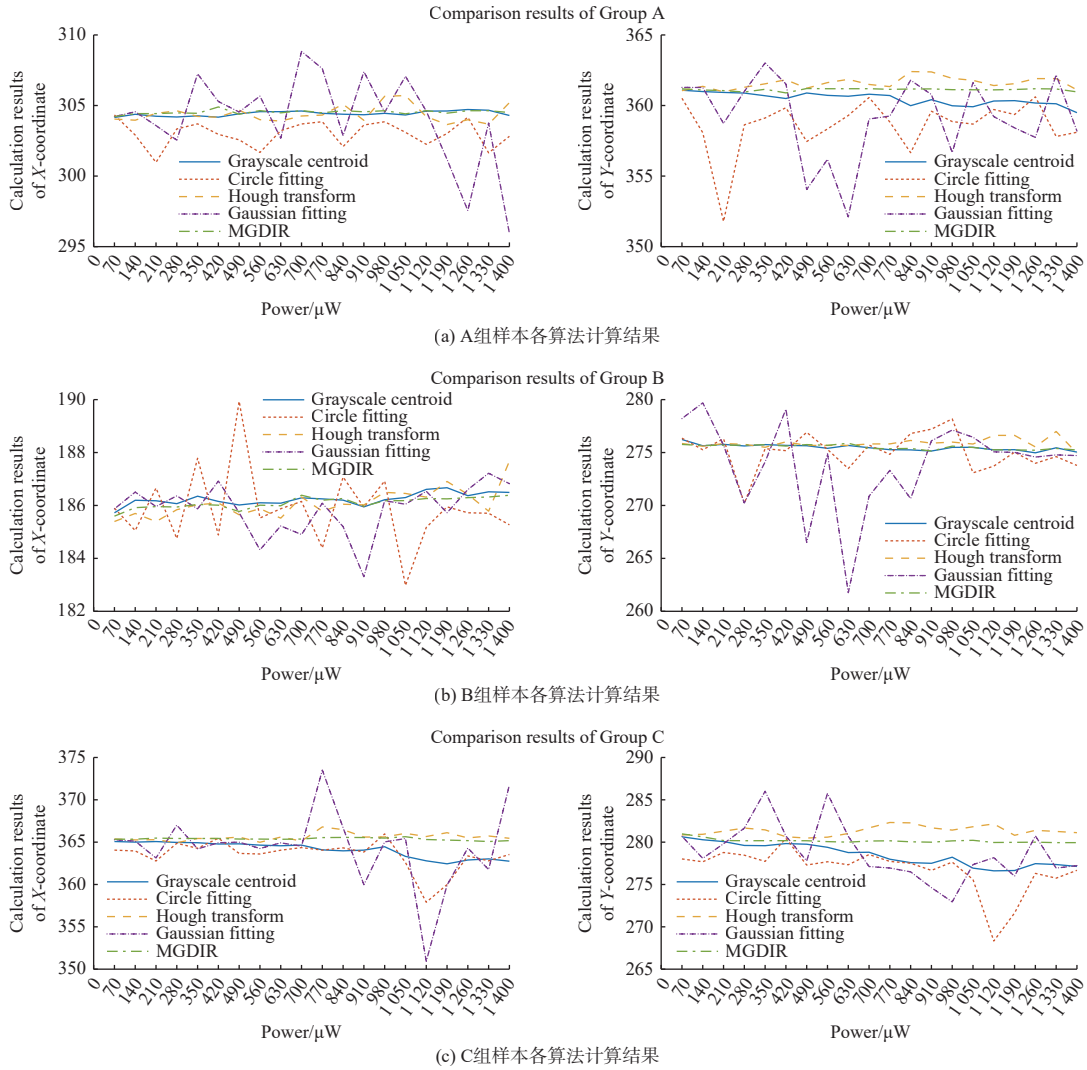


图 11 实际光斑中心计算结果

Fig. 11 Results of center calculation in actual spots

表 2 不同算法下各组样本计算结果的标准差

Table 2 Standard deviation of calculation results for each group of samples under different algorithms

Sample		Grayscale centroid	Circle fitting	Hough transform	Gaussian fitting	MGDIR
A	σ_x	0.1732	0.9012	0.6009	3.1902	0.1438
	σ_y	0.4284	1.9142	0.4007	2.8300	0.0883
B	σ_x	0.2280	1.4130	0.5451	0.9304	0.2099
	σ_y	0.2926	1.7706	0.4476	4.2623	0.2228
C	σ_x	0.9059	1.7877	0.4633	4.4890	0.1421
	σ_y	1.3137	2.6240	0.5496	3.2876	0.2468
Mean	$\bar{\sigma}_x$	0.4537	1.3673	0.5364	2.8699	0.1653
	$\bar{\sigma}_y$	0.6782	2.1029	0.4660	3.4600	0.1860

pixel

4 结论

为了提高激光告警系统初始参考位置的定位精度,提出了一种基于索引圆环灰度差值最小的光斑中心逼近法。根据光斑灰度图像形成原理推导了理想光斑模型理论公式,为本文所提出算法的原理说明与对比实验奠定了基础。为了比较所提出算法的准确性,分别采用灰度质心法、圆拟合法、霍夫变换法以及高斯拟合法对基于仿真模型和实际图片两个实验进行对比。在基于仿真模型的3组对比实验中,该算法在 x 方向和 y 方向的平均误差分别仅为0.0013像素和0.0011像素。在基于实际光斑图片的3组对比实验中, x 方向和 y 方向的平均标准差分别为0.1653像素和0.1860像素。相比于其他算法,本文提出的算法具有最低的平均误差和标准差,表现出更高的精度和更强的鲁棒性,有效地提高了激光告警系统参考位置的定位精度,减小了计算来袭激光俯仰角、方位角时因参考位置的不准确而导致的偏差,为光斑中心定位算法提供了新的解决思路,具有广阔的应用前景。需要指出的是,为降低算法每次迭代的时间,本文仅采用了 3×3 中心坐标矩阵。采用更多维的中心坐标矩阵将增加算法迭代一次所需时间,但这有助于降低算法陷入局部最优的可能,从而提高算法的精度。另一方面,由于索引圆环灰度值计算的复杂性,该算法需要较长的计算时间。通过采用其他更高效的算法设定初始索引圆环中心、采用其他更快速更准确的方法计算索引圆环灰度差值,或者其他更有效的逼近算法,将有助于提高算法的精度和实时性。

参考文献:

- [1] 周冰洁,王永志,张大庆,等. 星载激光告警载荷应用需求与发展趋势[J]. 制导与引信, 2022, 43(4): 51-56.
ZHOU Bingjie, WANG Yongzhi, ZHANG Daqing, et al. Application requirement and development trend of spaceborne laser warning payloads[J]. *Guidance & Fuze*, 2022, 43(4): 51-56.
- [2] 张瑞,杨雪梅,石金,等. 宽光谱多参数激光告警探测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(8): 2581-2587.
ZHANG Rui, YANG Xuemei, SHI Jin, et al. Research on broadband spectrum multi-parameter laser warning detection technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(8): 2581-2587.
- [3] 吴琼. 高精度宽波段激光告警图像采集及数据处理研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.
WU Qiong. Research on high precision and wide band laser warning image acquisition and data processing [D]. Taiyuan: North University of China, 2022.
- [4] 李晓,张瑞,王志斌,等. 二维激光告警光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1806-1810.
LI Xiao, ZHANG Rui, WANG Zhibin, et al. Design of two-dimensional laser warning optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1806-1810.
- [5] 吴琼,张瑞,石金,等. 高精度二维宽波段激光告警参数计算算法[J]. 应用光学, 2022, 43(1): 111-118.
WU Qiong, ZHANG Rui, SHI Jin, et al. Calculation algorithm of high-precision two-dimensional broadband laser warning parameters[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(1): 111-118.
- [6] 黄凌锋,刘光东,张超,等. 基于灰度权重模型的激光条纹中心提取算法[J]. 激光技术, 2020, 44(2): 190-195.
HUANG Lingfeng, LIU Guangdong, ZHANG Chao, et al. Laser stripe center extraction algorithm based on gray weight model[J]. *Laser Technology*, 2020, 44(2): 190-195.
- [7] 吴笛. 大气湍流环境下FSO系统中光斑中心定位算法研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2023.
WU Di. Research on spot center location algorithm in FSO system under atmospheric turbulent environment [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2023.
- [8] 曹远佳,尉广军,郭希维,等. 激光光斑中心定位方法的研究与改进[J]. 电光与控制, 2017, 24(4): 58-61.
CAO Yuanjia, WEI Guangjun, GUO Xiwei, et al. On laser spot center localization methods and the improvement[J]. *Electronics Optics & Control*, 2017, 24(4): 58-61.
- [9] 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.
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.
- [10] LIANG X, ZENG J, GUO X, et al. Optimization of laser spot center detection based on laser triangulation[J]. *SPIE*, 2023, 12747: 192-198.
- [11] 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.
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.
- [12] KRSTINIĆ D , SKELIN K A , MILATIĆ I. Laser spot tracking based on modified circular Hough transform and motion pattern analysis[J]. *Sensors*, 2014, 14(11): 20112-20133.
- [13] 许海翔, 任立新, 吴峰崎, 等. 起重机轨道测量激光光斑中心识别与定位算法[J]. *起重运输机械*, 2023(24): 13-20.
- XU Haixiang, REN Lixin, WU Fengqi, et al. Laser spot center identification and positioning algorithm for crane track measurement[J]. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2023(24): 13-20.
- [14] 张子暄, 张瑞, 张卓奇, 等. 高精度激光告警参数提取算法[J]. *应用光学*, 2023, 44(6): 1258-1264.
- ZHANG Zixuan, ZHANG Rui, ZHANG Zhuoqi, et al. High-precision parameter extraction algorithm of laser alarm[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(6): 1258-1264.
- [15] 艾双哲, 段发阶, 李杰, 等. 形心匹配优化下的狭长空间近距离轨迹测量系统[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(3): 259-271.
- AI Shuangzhe, DUAN Fajie, LI Jie, et al. Long and narrow trajectory measurement system based on centroid matching optimization in close-up scenes[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 259-271.
- [16] 刘天赐, 董科研, 张博, 等. 空间光通信光斑中心网格化BP神经网络定位方法[J]. *中国激光*, 2024, 17: 198-205.
- LIU Tianci, DONG Keyan, ZHANG Bo, et al. A grid based BP neural network localization method for space optical communication spot center[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 17: 198-205.
- [17] 曹瑜彬. 基于深度学习的大气光场传输和光斑质心位置分析及预测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- CAO Yubin. Deep learning based prediction and analysis for light fields propagating through atmosphere and optical image centroid position [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [18] 张景源, 陈北北, 杨永兴, 等. 融合遗传算法和BP神经网络的光斑定位方法[J]. *中国光学*, 2023, 16(2): 407-414.
- ZHANG Jingyuan, CHEN Beibei, YANG Yongxing, et al. A positioning algorithm for laser spot center based on bp neural network and genetic algorithm[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 407-414.
- [19] LIN C S, HUANG Y C, CHEN S H, et al. The application of deep learning and image processing technology in laser positioning[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(9): 1542.
- [20] 蔡怀宇, 杨朝乾, 崔子扬, 等. 图像引导和点云空间约束的公路洒落物检测定位方法[J]. *光电工程*, 2024, 51(3): 130-143.
- CAI Huaiyu, YANG Chaoqian, CUI Ziyang. Image-guided and point cloud space-constrained method for detection and localization of abandoned objects on the road[J]. *OE Journal*, 2024, 51(3): 130-143.
- [21] 王家乐. 基于光斑图像的激光能量密度分布测量技术[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- WANG Jiale. Measurement technology of energy density distribution based on spot image [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.
- [22] 陈和, 杨志浩, 郭磐, 等. 激光光斑中心高精度定位算法研究[J]. *北京理工大学学报*, 2016, 36(2): 181-185.
- CHEN He, YANG Zhihao, GUO Pan, et al. Research of the high precision laser spot center location algorithm[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(2): 181-185.