

基于哈特曼传感器的激光波前高精度检测方法研究

杜志强, 朱军锋, 张桂鸣, 张 婷, 蒋金春, 刘 明, 周浩然, 韩顺利*

中国电子科技集团公司第四十一研究所, 电子测试技术全国重点实验室, 山东 青岛

收稿日期: 2026年8月3日; 录用日期: 2026年9月3日; 发布日期: 2026年9月11日

摘 要

针对哈特曼传感器在激光光束质量检测过程中动态范围小、精度低的问题, 本文提出一种基于边缘检测与灰度加权融合的激光光斑阵列质心检测方法, 首先通过Canny算子进行图像的边缘信息检测, 采用Hough变换方法判定有效激光光斑轮廓, 并结合灰度加权方法提升光斑质心检测精度。本文通过数值仿真分析哈特曼传感器的理想波前图像和包含噪声波前图像, 并从光斑质心检测准确度和波前重构精度两个方面进行分析。实验表明, 相比较传统的质心检测方法, 本文提出的方法可在复杂背景下实现激光波前光斑阵列质心的精确检出, 在波前重构方面有显著的性能优势, 为激光波前检测和应用领域提供了技术支撑。

关键词

激光检测, 哈特曼传感器, 质心检测, 波前重构, 数值仿真

Research on High-Precision Laser Wavefront Detection Method Based on Hartmann Sensor

Zhiqiang Du, Junfeng Zhu, Guiming Zhang, Ting Zhang, Jinchun Jiang, Ming Liu, Haoran Zhou, Shunli Han*

National Key Laboratory of Science and Technology on Electronic Test and Measurement, The 41st Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Qingdao Shandong

Received: August 3, 2026; accepted: September 3, 2026; published: September 11, 2026

Abstract

To address the limitations of Shack-Hartmann sensors including narrow dynamic range and low

*通讯作者。

文章引用: 杜志强, 朱军锋, 张桂鸣, 张婷, 蒋金春, 刘明, 周浩然, 韩顺利. 基于哈特曼传感器的激光波前高精度检测方法研究[J]. 计算机科学与应用, 2026, 16(9): 119-129. DOI: 10.12677/csa.2026.169294

measurement precision in laser beam quality testing, this paper proposes a centroid detection method for laser spot arrays based on edge detection and grayscale weighted fusion. First, the Canny operator is utilized to extract edge information from images. An improved Hough transform algorithm is proposed to identify contours of valid laser spots, and the grayscale weighting strategy is combined to boost the localization precision of spot centroids. Numerical simulations are carried out to analyze ideal wavefront images and noise-disturbed wavefront images captured by Shack-Hartmann sensors. Quantitative analyses are performed from two perspectives: the detection accuracy of spot centroids and the precision of wavefront reconstruction. Experimental results verify that compared with traditional centroid detection algorithms, the proposed method can accurately extract centroids of laser wavefront spot arrays under complex background conditions and exhibits prominent performance advantages in wavefront reconstruction. This research provides solid technical support for laser wavefront detection and its relevant application fields.

Keywords

Laser Detection, Hartmann Sensor, Centroid Detection, Wavefront Reconstruction, Numerical Simulations

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

激光光束质量测量和评价对激光测距、制导、武器、加工及医疗等许多应用领域有重要意义。哈特曼传感技术作为一种常用的波前探测手段,通过微透镜阵列对入射波前进行空间采样,将波前斜率信息转化为光斑阵列的位置变化,进而实现波前重构[1]。哈特曼传感器的探测精度高度依赖于光斑质心检测的准确性,这使得光斑质心检测处理技术成为提升整体系统性能的关键环节。目前,常用激光光斑质心提取方法包括灰度质心法、灰度重心法、高斯拟合法以及圆拟合法等[2][3]。其中,灰度质心法是通过计算子孔径能量分布的质心坐标来表征光斑中心位置,计算效率高但抗干扰能力差,对图像噪声最为敏感[4];高斯拟合法通过高斯拟合对呈高斯分布的光斑有较好的拟合并且对噪声也有一定的抑制,但对于光斑能量分布为非高斯分布时,提取精度显著降低[5];圆拟合法基于边缘的光斑中心提取算法通过边缘信息获取光斑中心因此对于图像中的噪声有较好的抑制,但对边缘的要求较高,当光斑破碎时无法识别光斑边缘,质心提取误差明显增大[6]。实际测量过程中,由于激光的近场强度分布一般存在较大的不均匀性[7],且经常会伴随着较强的杂散光等噪声干扰,导致现有激光波前检测研究存在三个方面的局限:1)传统方法基于光斑尺寸参数人工划定检测窗口[8],当入射波前因激光倾斜、机械平移或杂散光干扰时,哈特曼波前探测器的光斑阵列易发生跨孔径偏移现象;2)现有暗噪声抑制方法具有图像依赖性特征,现有方法基于单帧图像的统计特性(如直方图峰谷值、局部方差)手动设置阈值[9],但杂散光噪声具有时变性和空间非均匀性(如激光的随机散斑),导致固定阈值无法适应动态背景干扰;3)当入射波前畸变时光斑几何形态与能量分布呈现非同步变化[10],传统算法忽略噪声空间分布对局部强度梯度的影响,导致对边缘模糊或碎裂光斑的误判。

为此,本文提出一种哈特曼波前传感器的激光质心高精度检测方法,融合边缘检测的轮廓定位优势与灰度质心法的分布加权优势,首先通过自适应中值滤波与高斯-双边联合滤波实现多类型噪声的分级抑制,在保留光斑边缘细节的同时提升信噪比,其次采用霍夫变换定位光斑中心并确定其动态窗口尺寸,

将依赖固定子孔径的传统模式转向基于光斑形态自适应的模式；最后，在检测区域内运用加权一阶矩算法实现质心定位，解决传统方法对不规则光斑适应性差的问题。本文创新性通过粗-精两级定位策略实现哈特曼波前质心的高精度检测，消除人工窗口划分引入的背景噪声，对于复杂波前形状和强噪声场景下的激光光束质量检测具有重要应用价值。

2. 方法

哈特曼波前传感器(SHWS)由一定规律排列的微透镜阵列和面阵探测器组成，波前入射到微透镜阵列后，会在探测靶面上形成阵列光斑。工作原理如图 1 所示。当参考波前为理想状态时，通过微透镜阵列后，每个微透镜汇聚的光斑将会恰好打在其焦点上。当参考波前是带有畸变的波前，则汇聚的光斑便会产生中心焦点位置偏移差，实际光斑质心分布如图中红点所示。哈特曼波前传感器正是利用光斑中心坐标差来再现波前形状的。

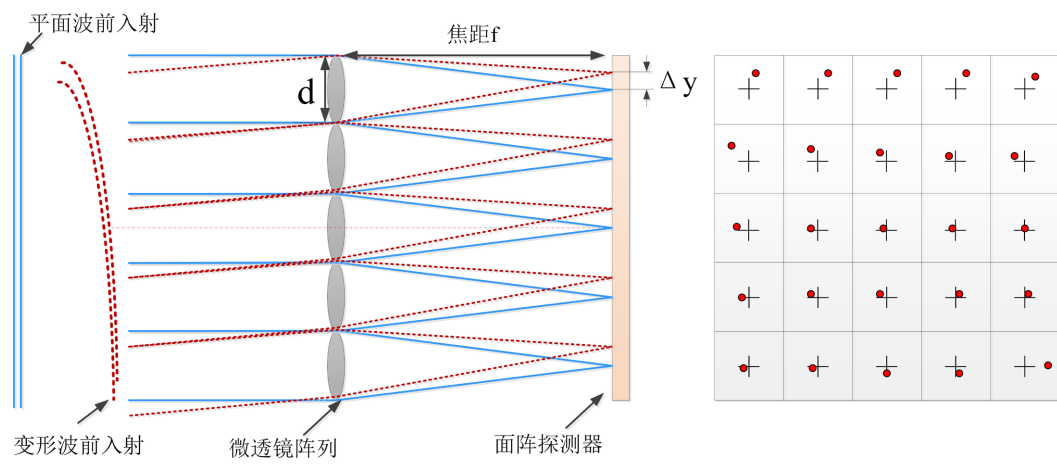


Figure 1. Principle of Hartmann wavefront sensing
图 1. 哈特曼波前检测原理

在实际测试中，哈特曼传感器检测的光斑阵列图像往往比较复杂，存在如背景光照不均匀、目标光斑分布不规则和物体边界模糊等问题。因此，本文提出基于哈特曼波前的激光波前高精度检测算法如图 2 所示。首先，通过图像预处理技术对于全局背景均值扣除，消除均匀杂散光基底，降低边缘提取虚假轮廓；其次，用边缘检测算子提取光斑边缘像素，剔除背景与噪声像素；然后，以 Hough 变换检测得到的光斑圆心，通过预设光斑半径范围有效过滤噪声引起的伪光斑，获得有效光斑区域掩膜；最后，对于有效光斑区域掩膜内光强像素进行加权质心修正计算，准确获取光斑的质心坐标，大幅度降低彗差、像散畸变光斑的定位误差。

1) 图像预处理

本文使用中值滤波对光斑原始图像预处理，通过将目标像素的周围像素按灰度值排序后取中值来替代目标像素灰度值，该方法可以有效地消除像素中灰度值跳变的噪点，保证图像灰度的连续性，并通过基于全局的自适应阈值的二值化方法减少图像中的噪声点。

2) 基于 Canny 算子的光斑边缘检测

本文采用以 Canny 边缘检测算法进行光斑边缘轮廓提取方法，通过使用高斯滤波器函数对图像进行噪声去除来实现平滑化处理，对平滑化处理后的图像进行梯度的振幅计算，然后对梯度的振幅值进行非极大抑制，最后使用人工设定的高低阈值进行图像的重点检测和图像边缘的连接。

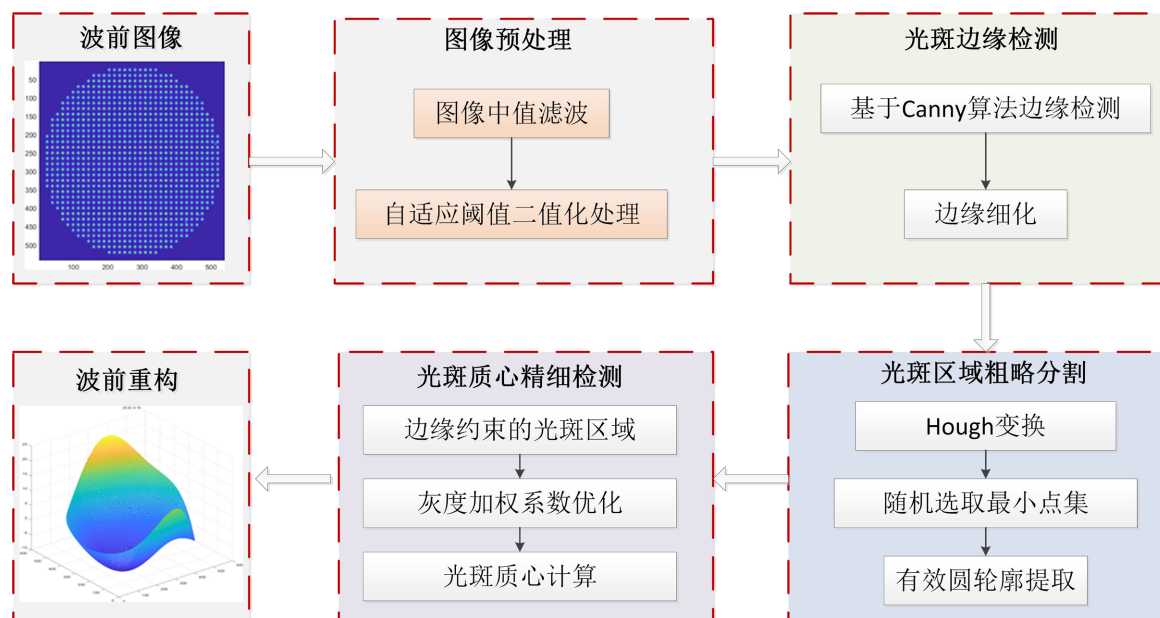


Figure 2. Flowchart of the Hartmann wavefront sensing and reconstruction method

图 2. 哈特曼波前检测与重构方法流程图

首先, 使用高斯滤波器来抑制噪声, 有效地定位图像边缘点, 高斯函数 $R(x, y)$ 可表示为:

$$R(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

其中, (x, y) 为图像的坐标, σ 为标准差。

其次, 针对梯度变化相对缓慢的边缘, 本文计算了图像水平方向、垂直方向、 45° 、和 135° 四个方向的 Sobel 算子, 分别得到梯度幅值和梯度方向:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_{45^\circ}^2 + G_{135^\circ}^2} \quad (2)$$

$$\text{梯度方向为: } \theta = \arctan \frac{G_y}{G_x}。$$

式中, G_x 、 G_y 、 G_{45° 、 G_{135° 分别为四个方向模板卷积结果。

非最大值抑制作为边缘检测的重要一步, 可以实现保留局部最大梯度值并控制其他类型梯度值, 保留图像中最尖锐的部分, 从而切除掉很多非边界点, 在该步骤中, 应注意梯度方向的计算与梯度运算符的选择一致。

最后, 采用双阈值算法检测并连接边缘, 尽可能地减少虚假边缘数量。设置高阈值和低阈值两个参数, 若某一像素的梯度值大于高阈值, 直接当作强边缘点; 若某一像素的梯度值小于低阈值, 直接置 0; 若某一像素的梯度值介于高、低阈值之间, 则通过寻找该像素点八邻域内有没有强边缘点, 有, 则保留该像素, 否则, 被排除, 直到边缘轮廓连接完整, 通过将边缘细化到最低限度且相连没有断点的线。

3) 基于 Hough 变换的光斑区域分割

在哈特曼波前传感器中, 光斑边缘呈现类圆形特征。对于任意类圆形目标, 本文通过多项式方程构建数学模型:

$$x^2 + y^2 - 2ax - 2by + c = 0 \quad (3)$$

其中, (x, y) 是图像的空间坐标, (a, b, c) 是构成圆的系数。随机 Hough 变换采用随机采样代替大量数据空间, 通过随机采样不共线的三个点的计算出对应的圆参数, 并且采用多对一的映射方式, 判断候选圆存在的条件是积累次数大于阈值, 然后通过证据积累去验证候选圆的真实性。对于图像中任意三个边缘像素点 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) , 若三点不共线, 则可以推导出候选圆的参数 (a, b, r) 的线性方程组:

$$\begin{cases} x_1^2 + y_1^2 - 2ax_1 - 2by_1 + c = 0 \\ x_2^2 + y_2^2 - 2ax_2 - 2by_2 + c = 0 \\ x_3^2 + y_3^2 - 2ax_3 - 2by_3 + c = 0 \end{cases} \quad (4)$$

通过三点的坐标可以求得系数 a, b, c , 进而得到圆心 $(-a/2, -b/2)$ 和半径 $r = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{4} - c}$ 。

通过 Hough 变换计算出光斑的圆心和半径即可对光斑图像进行阈值分割。该方法能有效过滤背景噪声, 抗干扰性较强, 完全保留光斑内部灰度分布信息。

4) 边缘约束下的灰度质心计算

光斑阵列图像经过上述光斑阈值分割和连通域划分处理后, 不但有效消除子光斑阵列图像噪声, 而且保留了光斑区域的重要结构特征。根据边缘检测得到的光斑轮廓为约束边界, 仅在轮廓内部选取有效像素, 剔除边缘外所有背景像素与噪声像素。针对激光光斑中心灰度高、边缘灰度低的特性, 这里引入灰度加权质心算法, 弱化光斑边缘低灰度像素的权重, 强化中心高灰度像素的权重。灰度加权质心算法可表示为

$$\begin{cases} X_i = \frac{\sum_{(x,y) \in A_i} I^2(x,y)x}{\sum_{(x,y) \in A_i} I^2(x,y)} \\ Y_i = \frac{\sum_{(x,y) \in A_i} I^2(x,y)y}{\sum_{(x,y) \in A_i} I^2(x,y)} \end{cases} \quad (5)$$

式中: (X_i, Y_i) 为质心坐标, (x, y) 为第 i 个像素的坐标; $I(x, y)$ 为第 i 个像素的灰度值。

该方法通过边缘约束缩小计算范围, 排除噪声干扰, 同时保留光斑灰度分布信息, 灰度平方加权质心算法使得目标灰度分布的权重得以进一步突出, 提高了光斑中心强度较大点的影响力, 从而提高质心探测精度, 即使光斑形态不近似高斯分布, 也能够准确地探测出光斑质心, 大幅提升质心检测精度。

3. 实验

为了验证本文算法的有效性, 本文利用数值仿真分析方法模拟激光波前经过哈特曼波前传感器上的响应过程。其中, 模拟中设计的微透镜阵列中透镜个数为 20×20 , 其焦距约为 10 mm , 探测器放置在透镜阵列的焦平面处。图像分辨率为 1200×1200 , 像素尺寸为 $5.3 \mu\text{m} \times 5.3 \mu\text{m}$ 。激光波前的仿真中, 使用 Zernike 多项式描述光束波前的像差(如离焦、像散、彗差等)。

Zernike 多项式在直角坐标系下表示波前像差函数的表达式为

$$W(x, y) = \sum_{i=0}^{\infty} c_i Z_i(x, y) \quad (6)$$

上述表达式在实际应用中通常取其有限项, 当选取项数 k 后, 则 $i \rightarrow \infty$ 变为 $i \rightarrow k$ 。 $Z_i(x, y)$ 为 Zernike 多项式第 i 项的表达式, 当确定了项数 k 后就由一组系数 c (波前重建计算得到) 对应 k 项多项式的线性组合。

在仿真过程中, 选择 15 阶 Zernike 多项式的模拟输入一个具有大倾斜和大幅值像差的波前如图 3(a)

所示, 横纵坐标为出瞳尺寸, 明暗程度表示波像差大小。模拟光束经过微透镜阵列后获得的光斑阵列图像如图 3(b) 所示, 根据模拟微透镜阵列参数及图像像素大小可计算出子孔径在图像中的边长大约为 60 个像素, 按照此大小, 以计算的质心为中心画出方格即可标出子孔径范围。图 3(c) 中圆圈中心表示哈特曼传感器各透镜中心坐标真值, 十字中心表示实际波前分布提取的质心坐标。计算每一个质心到参考质心距离得到光斑质心位置偏移量如图 3(d) 所示, 用箭头从参考质心指向实际质心直观显示偏移方向和大小。通过波前斜率可以实现激光波前还原。

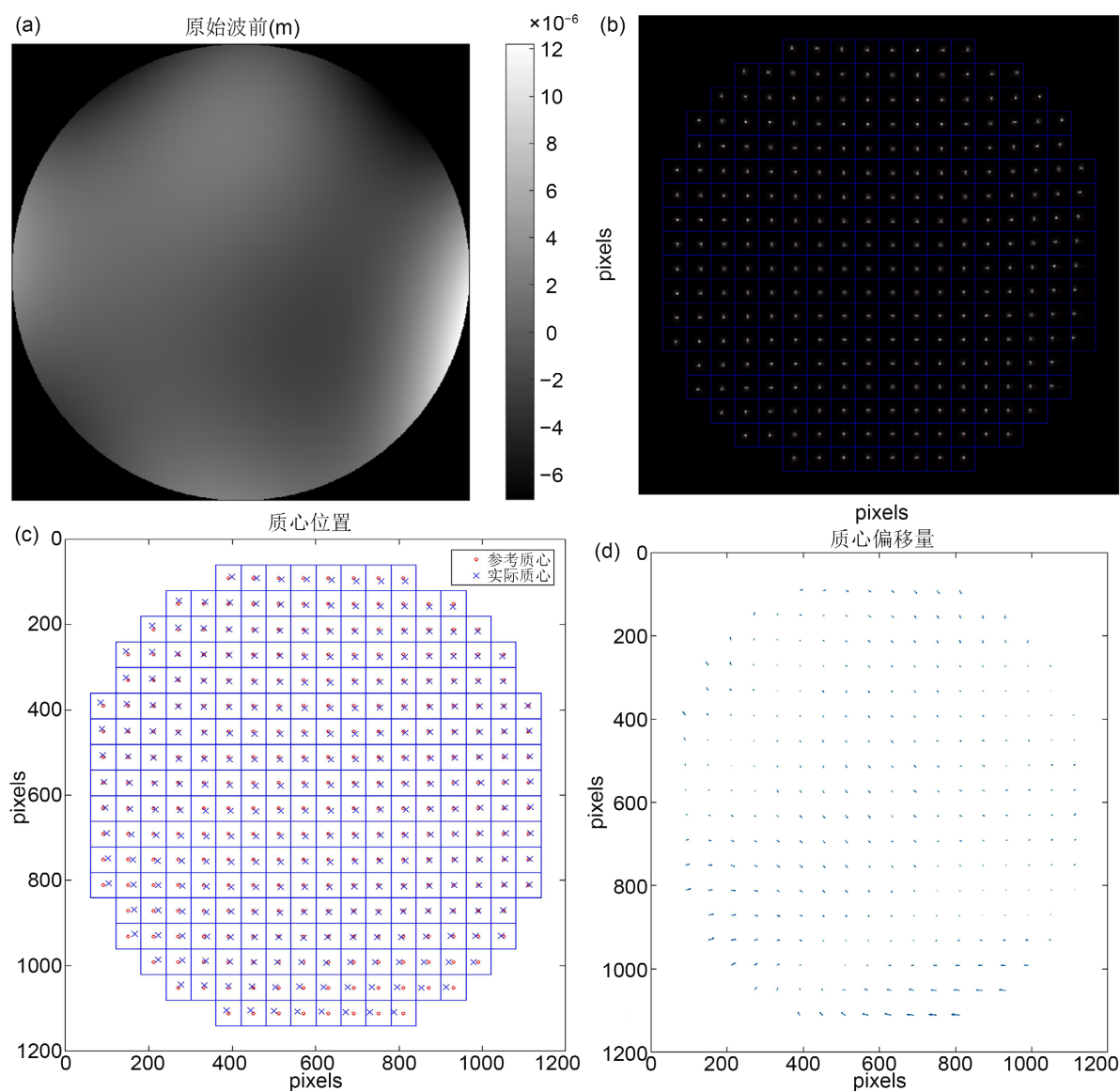


Figure 3. Simulation diagram of Hartmann wavefront spot. (a) Laser wavefront distribution; (b) Focal plane spot array of Hartmann sensor; (c) Reference centroid and calculated centroid results; (d) Centroid position offset diagram

图 3. 哈特曼波前光斑仿真图。(a) 激光波前分布图; (b) 哈特曼传感器的焦平面光斑阵列图; (c) 参考质心与计算质心结果图; (d) 质心位置偏移图

为了评估光斑质心的检测误差, 这里使用平均误差(mean)、均方根误差(RMSE)和最大误差(Max)对质心提取精度进行评价, 它们的计算公式分别为

$$\text{Mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (7)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (8)$$

式中： M 表示平均误差；RMSE 表示均方根误差； (x_i, y_i) 表示第 i 个仿真光斑提取的质心坐标， $i=1 \sim n$ ， n 为光斑个数； (x_0, y_0) 表示仿真光斑质心坐标真值。

对于用泽尼克模式法还原的波前，这里使用均方根值(V_{rms})进行波前重构算法的准确性评估，计算公式如下，

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (c_i)^2} \quad (9)$$

式中： k 为 Zernike 取的项数； c_i 为 Zernike 系数的第 i 项。

4. 讨论

4.1. 光斑质心检测实验与性能分析

本文开展不同质心检测算法对于激光波前的光斑质心检测的定量对比实验。通过数值仿真方法生成激光畸变波前在哈特曼波前传感器的焦平面上的光斑阵列图像，叠加高斯噪声模拟实际强噪声条件下典型探测场景，对比灰度重心法(Gray Centroid Method, GCM)、平方加权质心法(Squared Intensity Weighted Centroid, SIWC)、椭圆拟合质心法(Ellipse Fitting Centroid, EFC)、随机样本一致性质心法(Random Sample Consensus, RANSAC)和本文所提算法的检测光斑质心的性能。灰度重心法属于经典基础算法，结构极简、运算速度快、不会放大边缘噪声，梯度场整体稳定性强，是光学定位领域普及最久的基础算法；平方加权质心法是灰度重心法的经典改进变体，属于成熟传统改进算法，广泛应用于稳态高斯光束质量分析、弱扰动短距光通信精对准、静态星点定位等领域；随机样本一致性(RANSAC)是一种迭代的参数估计算法，用于从包含噪声和异常值的数据中拟合数学模型，被广泛应用于计算机视觉和计算机图形学等领域；椭圆拟合质心法依托光斑轮廓几何定位，不依赖灰度权重运算、不会放大边缘噪声，对湍流拉伸、局部截断、形变光斑适配性强，近年广泛应用于精密光学测量、航天测控、工业质检等领域。这里选取具有代表性哈特曼波前的边缘位置光斑图像为例，该光斑图像显示激光的光斑非高斯分布，不同算法质

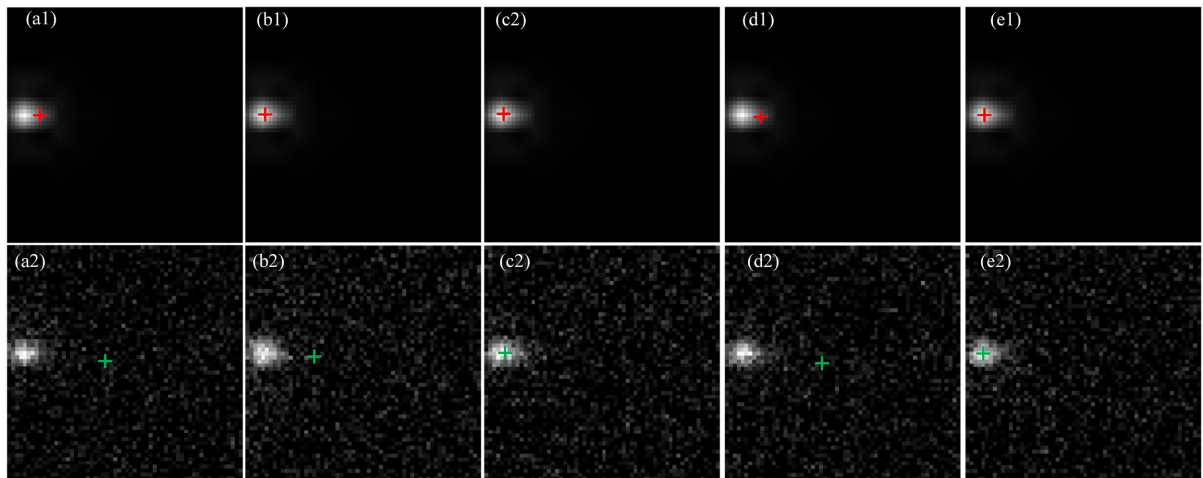


Figure 4. Performance of different algorithms in detecting the spot centroid for ideal and noisy images

图 4. 不同算法检测理想图像和加噪图像的光斑质心检测效果

心检测效果如图 4 所示, 其中图 4(a1)、图 4(b1)、图 4(c1)、图 4(d1)和图 4(e1)分别为灰度重心法、平方加权质心法、椭圆拟合质心法、RANDSAC 质心法和本文所提算法检测理想光斑质心结果, 图 4(a2)、图 4(b2)、图 4(c2)、图 4(d2)和图 4(e2)分别为以上五种算法检测加噪图像结果。

无噪声理想工况下, 激光光子光斑能量分布完整、边缘无杂散光扰动、不存在能量截断效应, 灰度重心法(GCM)、平方加权质心法(SIWC)和 RANSAC 质心法在无噪声图像中可以基本确定光斑的质心范围。在含有背景噪声的光斑图像中, 灰度重心法通过像素灰度加权平均求解光斑中心, RANSAC 鲁棒质心法通过随机抽取迭代提出光斑离群噪声像素进而提取光斑质心, 导致这两种算法并不能很好地把光斑的质心检测出来; 平方加权质心法通过灰度平方加权的非线性权重优化机制提升中心定位的稳定性; 椭圆拟合质心法(EFC)和本文所提算法对于噪声抑制能力较强, 具备较好的光斑定位能力。使用五种算法对于将哈特曼波前图像全部的 276 个子光斑图像的分别进行质心检测, 得到不同算法的对于加噪图像相对于理想图像的质心位置误差平均值和均方根结果, 计算如表 1 所示。

Table 1. Mean error and root mean square error of centroid detection with different algorithms
表 1. 不同算法质心检测的平均误差和均方根误差

	平均误差	均方根误差
GCM 方法	1.706	5.918
SIWC 方法	0.880	4.287
EFC 方法	0.045	0.690
RANDSAC 方法	1.623	5.695
本方法	0.095	0.989

可以看出, 哈特曼波前图像叠加了噪声后不同质心检测算法性能出现显著分化, 其中灰度重心法和 RANSAC 质心法受噪声影响程度相对较大, 两者的平均误差大于 1.5 pixel, 均方根误差均大于 5 pixel; 受影响程度较小的是平方加权质心法, 平均误差为 0.880 pixel, 均方根误差 4.287 pixel。椭圆拟合质心法受背景噪声的影响程度相对较小, 质心提取误差相对于前 3 种传统方法更低降低, 平均误差值为 0.045 pixel, 误差均方根值为 0.690 pixel, 说明该方法对于图像噪声不敏感。本文方法平均质心误差约为 0.095 pixel, 均方根误差为 0.989 pixel, 具有较高提取精度, 说明本文算法对于理想图像和含噪图像的质心检测具有较强抗干扰能力。

4.2. 哈特曼波前重构实验与性能分析

本文设置理想无噪声与实际高斯噪声两组对照波前重构实验。在仿真模拟过程中输入波前的均方根 V_{RMS} 值为 2.1053。采用本文所提算法对哈特曼波前理想无噪声图像进行波前重构精度, 理想无噪声图像的重构波前如图 5 所示, 其波前均方根 V_{RMS} 值为 1.5607; 采用本文所提算法对于包含高斯噪声的图像进行波前重构结果如图 6 所示, 其波前均方根 V_{RMS} 值为 1.5377。图 7 展示了输入波前的 Zernike 系数与本文所提算法复原理想无噪声图像以及包含高斯噪声的图像波前的 Zernike 系数的对比结果, 可以看到, 本文所提算法重构理想无噪声图像以及包含高斯噪声的图像波前的 Zernike 系数与输入波前的 Zernike 系数的分布特性基本一致。结果表明, 本文所提算法在入射波前叠加噪声条件下能够有效地进行波前复原。

为了进一步探究质心检测策略对激光哈特曼波前重构精度的影响, 本实验对比传统灰度重心法(GCM)、平方加权质心法(SIWC)、椭圆拟合质心法(EFC)、RANDSAC 质心法和本文所提算法的波前重构精度, 以重构波前 V_{RMS} 值的 5 次平均值为定量评价指标, 结果如表 2 所示。

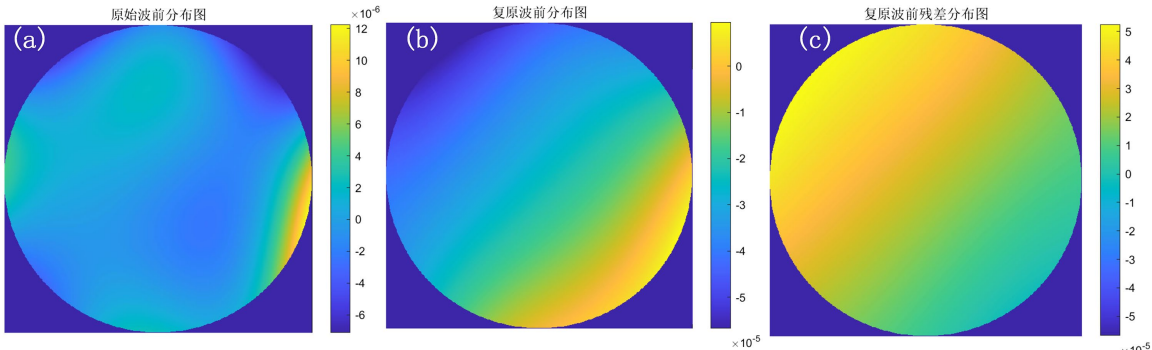


Figure 5. Wavefront reconstruction results of an ideal image: (a) Input wavefront map; (b) Reconstructed wavefront map; (c) Residual map

图 5. 理想图像波前重构结果: (a) 输入波前图; (b) 重构波前图; (c) 残差图

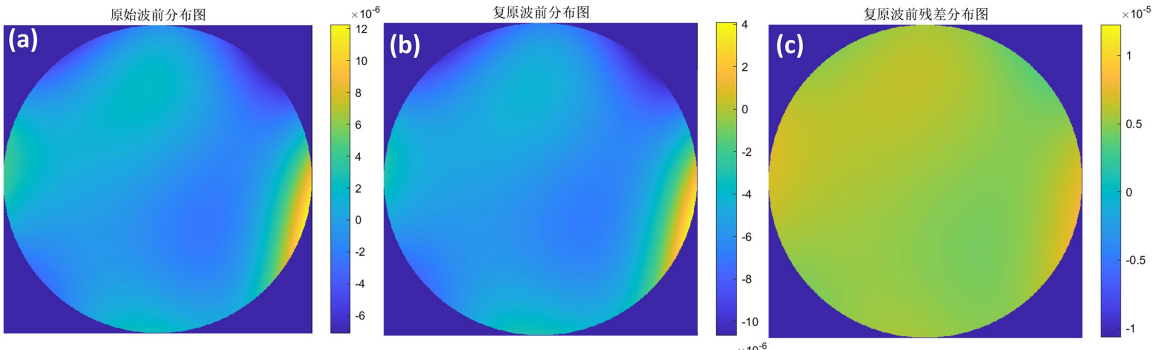


Figure 6. Wavefront reconstruction results of noisy image: (a) Input wavefront map; (b) Reconstructed wavefront map; (c) Residual map

图 6. 加噪图像波前重构结果: (a) 输入波前图; (b) 重构波前图; (c) 残差图

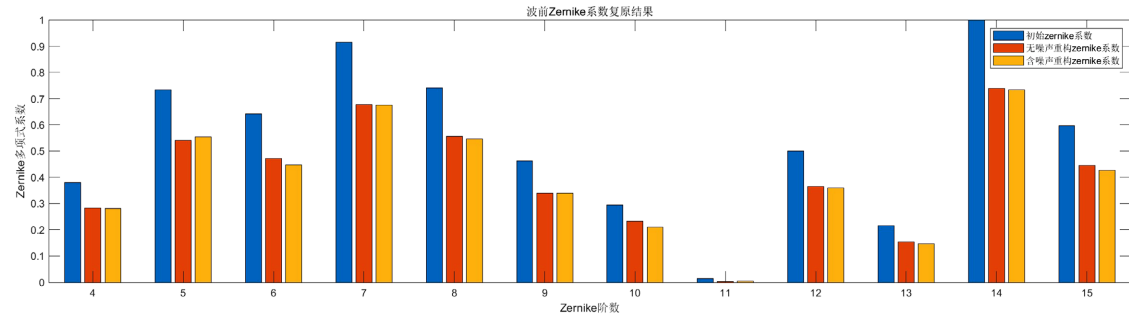


Figure 7. Comparison of Zernike polynomial reconstruction results

图 7. Zernike 多项式重构结果对比图

Table 2. Comparison of wavefront reconstruction V_{RMS} metrics of different algorithms for ideal images and noisy images
表 2. 不同算法对理想图像和含噪图像的波前重构 V_{RMS} 指标对比

	理想图像波前重构	含噪图像波前重构
GCM 方法	2.3868	0.7316
SIWC 方法	6.09589	3.4016
EFC 方法	0.8032	0.6535
RANDSAC 方法	0.061	0.0230
本方法	1.5607	1.5398

可以看出,灰度重心法、RANDSAC 方法虽然质心检测精度相近,但灰度重心法对应的波前重构精度更优,其原因在于 RANDSAC 方法容易引入空间相关性的梯度偏差,出现系统性偏差,而灰度重心法利用了全部灰度信息,对边缘微小形变鲁棒性更强,不容易产生定向系统偏差。而且灰度重心法和 RANDSAC 方法对于噪声都比较敏感,对于含噪图像波前重构的精度都有较大程度衰减。平方加权法虽通过增强高灰度区域权重提升了抗噪能力,但在光斑非对称、边缘弥散条件下中极易产生像素级偏移导致波前重构的精度较差。椭圆拟合质心法虽然在子孔径光斑中心定位精度较高,但该方法只利用边缘信息,丢弃光斑内部灰度有效信息,求解的几何中心存在固有偏差,导致整体波前重建精度不高。相比较以上方法,本文所提质心检测方法在波前重构效果最好,系统性定位偏移更小,对于理想图像和含噪图像的波前重构鲁棒性更强,验证了该算法的可行性和有效性。

综合分析本文的质心检测实验和波前重构实验,可以发现光斑阵列质心精度和波前重构精度并非简单正相关,其原因在于质心检测聚焦独立光斑坐标误差,波前重构依赖波前全阵列梯度场整体连续性,如传统灰度重心法单点精度偏弱,但不存在噪声放大效应,全阵列梯度波动均匀,波前重构综合表现反而更稳定,而椭圆拟合质心法虽然可提升光斑质心检测的亚像素定位能力,却会放大阵列边缘截断光斑的噪声扰动与系统性偏移,造成波前梯度分布局部失真,最终出现质心精度优异、波前重构残差升高的失配现象。随着图像噪声水平进一步增加,灰度重心法和 RANDSAC 方法两者的质心检测精度低且受噪声变化影响较小,而平方加权方法的质心检测精度较低而且波前重构受噪声影响较大;本文所提方法和椭圆拟合方法的质心检测保持相对较高精度,但在波前重构方面椭圆拟合方法的波前重构受噪声影响衰减明显,而本文所提方法兼顾单点定位分辨率与全域梯度平滑性,有效提升复杂噪声环境下波前探测稳定性。

5. 总结

本文提出了一种基于哈特曼传感器的激光波前高精度检测方法,首先使用 Canny 算子对激光光斑的轮廓提取算法减少图像的背景噪声,然后随机 Hough 变换减少计算过程中的冗余采样,快速找出真实的光斑窗口,优化减小远离光斑像素噪声的影响,最后选用了灰度加权质心法进行光斑定位,提高准确性与稳定性。通过理想图像和加噪图像的光斑阵列质心检测与波前重构的实验结果表明,该方法有效克服了传统质心方法的缺陷,质心检测精度大幅提升,在无噪声环境与噪声干扰环境下波前重构误差显著降低,具备检测精度高、抗干扰能力强、稳定性好等优点,为高精度激光波前检测和应用提供了新的技术路径。

基金项目

国家自然科学基金项目(62127804)。

参考文献

- [1] Hu, Y.W., Liu, X., Kuang, C., *et al.* (2023) Research Progress and Prospect of Adaptive Optics Based on Deep Learning. *Chinese Journal of Lasers*, **50**, Article ID: 1101009. (In Chinese) <https://doi.org/10.3788/cj1230470>
- [2] Thomas, S., Fusco, T., Tokovinin, A., Nicolle, M., Michau, V. and Rousset, G. (2006) Comparison of Centroid Computation Algorithms in a Shack-Hartmann Sensor. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **371**, 323-336. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10661.x>
- [3] 李旭旭, 李新阳, 王彩霞. 哈特曼传感器子孔径光斑的局部自适应阈值分割方法[J]. 光电工程, 2018, 45(10): 170687-170694.
- [4] 李熙, 汤儒峰, 李祝莲, 等. 基于二值图像的卫星激光测距数据处理[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 188-195.
- [5] Hu, L., Hu, S., Gong, W. and Si, K. (2020) Deep Learning Assisted Shack-Hartmann Wavefront Sensor for Direct Wavefront Detection. *Optics Letters*, **45**, 3741-3744. <https://doi.org/10.1364/ol.395579>

-
- [6] Guo, Y., Wu, Y., Li, Y., Rao, X. and Rao, C. (2022) Deep Phase Retrieval for Astronomical Shack-Hartmann Wavefront Sensors. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **510**, 4347-4354. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab3690>
 - [7] 宋睿, 张合新, 吴玉彬, 等. 激光主动成像图像边缘检测算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 159-166.
 - [8] Wang, C., Hu, L., Xu, H., Wang, Y., Li, D., Wang, S., *et al.* (2015) Wavefront Detection Method of a Single-Sensor Based Adaptive Optics System. *Optics Express*, **23**, 21403-21413. <https://doi.org/10.1364/oe.23.021403>
 - [9] Kong, W.B., Chen, J.Z., Song, Y.B., *et al.* (2023) Sobel Edge Detection Algorithm with Adaptive Threshold Based on Improved Genetic Algorithm for Image Processing. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, **14**, 557-562. <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2023.0140266>
 - [10] Yang, W., Wang, J. and Wang, B. (2022) A Method Used to Improve the Dynamic Range of Shack-Hartmann Wavefront Sensor in Presence of Large Aberration. *Sensors*, **22**, Article No. 7120. <https://doi.org/10.3390/s22197120>