

综合诊断系统多维度重构小孔光斑中心测量方法

王拯洲^{1,2,3}, 胡炳樑³, 殷勤业¹, 曹世康³, 李东坚³, 李红光³

(1. 西安交通大学 电子与信息学院, 陕西 西安 710049; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要: 为了对准直过程中能量弱、分布不均匀的小孔光斑信息进行增强并抑制噪声, 消除光斑不稳定对计算结果的影响, 文中提出了一种新方法。首先, 将多幅分时采集的图像构建一个多维的图像立方体, 利用 MNF 变换将数据信息主要集中在第一维, 去除各维图像之间的相关性; 其次, 使用 Kmeans 方法将第一维图像分为光斑和背景, 对分类图像进行数学形态学处理, 寻找范围最大光斑的边缘为小孔光斑的边缘; 最后, 使用最小二乘法进行圆拟合来计算小孔图像圆心。实验结果表明, 该方法能提高弱对比度的小孔光斑区域检测的准确率, 达到理想光斑区域的 97.15%, 获得的小孔中心和半径误差小于 2 个像素, 实现了综合诊断系统对小孔光斑的精确测量。

关键词: 综合诊断系统; 多维度重构; 小孔激光光斑; MNF; Kmeans; 最小二乘法; 圆拟合

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)S-0073-07

Method for measuring laser spot center based on multi-dimensional reconstruction in integrated diagnostic system

Wang Zhengzhou^{1,2,3}, Hu Bingliang³, Yin Qinye², Cao Shikang³, Li Dongjian³, Li Hongguang³

(1. School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: In order to enhance the weak and asymmetrical image of small laser spot and suppress the noise information, eliminate unstable laser spot effect on the calculation results, a new method was proposed in this paper. Firstly, a multi-dimensional image cube was constructed by many images captured in different time, the primary information was concentrated in the first dimensional image, the correlation of each dimensional image was removed. Secondly, the first dimensional image was divided into laser spot and background by Kmeans method, the classified image was processed by mathematical morphology, the edge of largest spot was searched as edge of small laser spot. Finally, the least square method of circle fitting was used to calculate small laser spot center. The experimental results show that the method can improve the accurate rate on checking the weak and asymmetrical laser spot, the binary

收稿日期: 2015-04-05; 修订日期: 2015-05-15

基金项目: 国家 863 计划(051Z331BOA); 国家自然科学基金(11327303); 国家自然科学基金(61405244)

作者简介: 王拯洲(1976-), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事信号与信息处理方面的研究。Email: azhou_china@126.com

导师简介: 胡炳樑(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高速信号处理、数据压缩、光谱成像技术方面的研究。

laser spot area obtained by new method is 97.15% of ideal spot area, the error of small laser spot center and radius is less than 2 pixels, and realize the accuracy measure of small laser spot in the integrated diagnostic system.

Key words: integrated diagnostic system; mult-dimension reconstruct; small laser spot; MNF; Kmeans; least square method; circle fitting

0 引言

在大型激光装置中,为了对高通量下的关键光学元器件、组件或系统的负载能力进行综合验证^[1-3]。需要建立一套激光参数综合诊断系统,该系统是一个多功能、高精度的激光参数诊断平台,用来精密诊断装置输出激光光束的特性,为研究频率转换组件^[4]及相关科学技术问题提供全面、精确的激光参数。

激光参数综合诊断系统通过一套自动准直系统来对主、旁瓣光路调节,以保证两个光路的同轴性。准直主要分为两个区域:基频光准直和三倍频光准直。基频光准直的目的是将抽样激光束准直到模拟靶点,为了找到模拟靶点,先将一个小孔推入靶点位置,然后调焦获得放大的小孔图像,并获得精确的小孔图像中心作为三倍频光准直的基准。对于计算小孔图像中心的方法有很多种,一般采用的方法是在阈值分割后使用重心法求取光斑中心,该方法对于能量很不均匀的小孔光斑中心计算误差特别大;孔兵提出了基于圆拟合最小二乘原理的激光光斑中心检测算法^[5],该方法的前提是需要找到激光边缘,对弱对比度和非完整圆的光斑无法准确计算光斑中心;唐冠群提出高斯累积分布拟合算法^[6]和秦义提出的多椭圆拟合算法^[7]需要光斑能量呈高斯分布,对于分布均匀的理想光斑拟合效果极佳,对于分布不均匀的很不适用。以上图像只是对采集的单幅图像进行拟合,没有考虑采集多幅图像,利用图像之间的相关性来增强图像信息而分离噪声来进行处理。实际上,虽然每一帧图像都不同,但是两帧图像之间具有很强的相关性。文中的基本思想是,将不同时间采集的图像构建一个多维的图像立方体,与单幅图像相比,多出一个时间维,在获取空间图像的同时,得到每个像元对应的时间维信息。通过 MNF 变换可以判定图像数据的内在维数,隔离数据中的噪声,减少

数据处理的计算需求。

针对光路准直过程小孔光斑能量很弱、分布不均匀、飘忽不定的特点,为了充分利用各个图像之间的相关性来消除光斑不稳定对计算结果的影响。首先,构建多维图像立方体,利用 MNF 变换将数据信息主要集中在第一维,去除各个波段之间的相关性,分离和重新调节数据中的噪声;然后,使用高光谱图像处理中非监督分类的思想,使用 kmeans 方法将图像分为两类,即小孔光斑和背景;其次,对分类图像进行数学形态学处理,寻找范围最大光斑的边缘为小孔光斑的边缘;最后,使用最小二乘法进行圆拟合来计算小孔图像圆心。

1 Kmeans 分类算法介绍

Kmeans 算法的原理^[7]是把 n 个样本点分成 k 个簇,各簇内的样本点具有较高的相似性,而各簇间样本点相似程度比较低。算法步骤如下:

- (1) 在样本数据 D 中选择 k 个样本点,将 k 个样本点值分别赋给初始的聚类中心 (m_1, m_2, \dots, m_k) ;
- (2) 在第 j 次迭代时,对样本点 D 中的所有点 p_i ($i=1, \dots, n$),依次计算到各簇中心 m_i^j 的欧氏距离:

$$d(t, i) = \sqrt{(p_i - m_i^j)^2} \quad (1)$$

- (3) 找出 p_i 关于 m_i^j 的最小距离,将 p_i 归入到关于 m_i^j 距离最小的簇中;

- (4) 更新各簇的聚类中心

$$m_i^{(j+1)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_i} p_{ii} \quad i=1, 2, \dots, k \quad (2)$$

- (5) 计算数据集 D 中所有点的平方误差 E_i ,并与前一次误差 E_{i-1} 比较

$$E_i = \sum_{i=1}^k \sum_{i=1}^{n_i} |p_{ii} - m_i^{j+1}| \quad (3)$$

若 $|E_i - E_{i+1}| < \delta$,则算法结束,否则转入(2)进行再一次迭代。

2 综合诊断系统

综合诊断系统是一个包含光学取样组件、探测元器件、伺服系统、监视系统、控制系统等系统的闭环调控监视系统,位于主机装置的末端,是针对大动态范围远场焦斑的测量而设计的,光路原理图如

图 1 所示。为了在打靶阶段准确测量到主旁瓣数据,需要在预发射阶段对光路进行自动准直。该系统通过基频光准直和三倍频光准直来对主、旁瓣光路调节。基频光准直的目的是将抽样激光束准直到模拟靶点,三倍频光准直的目的是将模拟靶点上的激光远场光斑准确成像到探测 CCD 上,以便获得焦斑的正确形态分布。

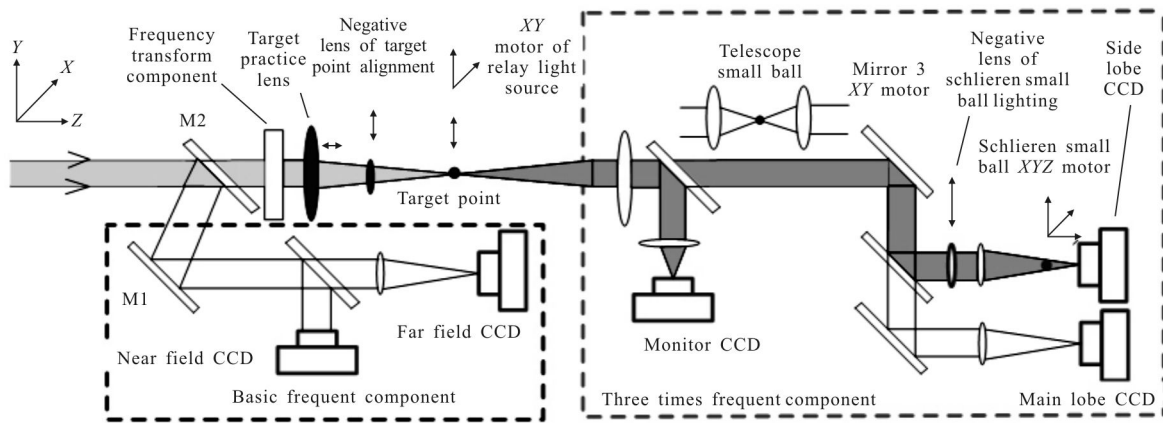


图 1 综合诊断光路示意图

Fig.1 Optical schematic of integrated diagnostic system

整个光路共有两个光源,在光路中的靶点前使用模拟光源,由于模拟光能量比较小,无法准确测量旁瓣和主瓣,所以靶点位置增加接力光源来替代模拟光源来完成三倍频组件光路的准直。只有在准直阶段完全将主瓣和旁瓣光路同轴,才能准确测量出主瓣和旁瓣光斑,为重构靶点远场焦瓣提供条件。

分类和目标探测的思想进行处理。先利用最小噪声分离变换,去除各维图像之间的相关性,分离和重新调节数据中的噪声,将数据信息主要集中在第一维图像,对小孔图像进行增强;再使用 Kmeans 方法将一维图像分为两类,即小孔光斑和背景,对小孔光斑区域进行自动检测。

3 处理过程

3.1 数据重构

假设连续采集了 L 幅小孔光斑图像,每一幅图像的尺寸为 $M \times N$,图像编号从 $0 \sim L-1$ 。传统的方法是分别计算这 L 幅图像的小孔中心,将 L 幅图像的平均值当作最终小孔中心。该文的方法就是将采集的 L 幅图像构建一个 $M \times N \times L$ 的数据块,即第 0 幅图作为第 1 维,第 1 幅图作为第 2 维,依次类推,第 $L-1$ 幅图作为第 L 维,如图 2 所示。虽然每一幅图像都不同,但是两帧图像之间具有很强的相似性和相关性。将 $M \times N \times L$ 的数据当作一个多维度的数据立方体,这样,就可以利用高光谱数据处理中的降维、

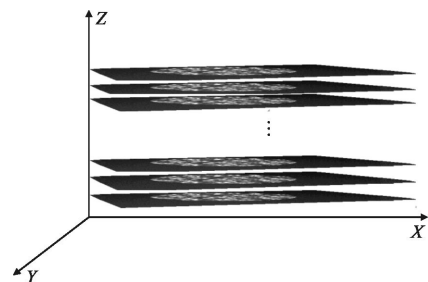


图 2 多维度数据立方体

Fig.2 Multi-dimension data cube

3.2 MNF 变换

主成分分析(PCA)是光谱图像处理的一项重要技术,它通过多个波段的线性变换,使原始数据映射到一个新的坐标系统,以使数据的差异性达到最大,

PCA 经常用于增强光谱图像的信息含量、隔离噪声、降低数据维数。最小噪声分离 (Minimum Noise Fraction, MNF)^[9]变换用于确定影像数据内在的维数, 隔离数据中的噪声。MNF 本质上是两次叠置处理的主成分变换。第一步是噪声白化, 求噪声矩阵 Σ_s , 将其变为单位阵。第二步对白化的噪声数据进行标准的主成分变换, 可得到以信噪比大小为指标的成分序列。在假设数据中噪声和信号不相关的情况下,

MNF 变换就是求变换向量使得该成分在剩余成分中的信噪比最大且与其他成分正交。所以, 经过 MNF 变换后, 第一维的数据信噪比最大, 所以小孔图像得到增强, 原始各维小孔图像和变换结果如图 3 所示。由图可以看出, 变换后的第一维图像的对比特度得到增强^[9], 第一维图像的图像标准差为 18.20, 未变换前 6 幅图像的平均标准差为 7.41, 所以变换后信息量增大, 图像得到增强。

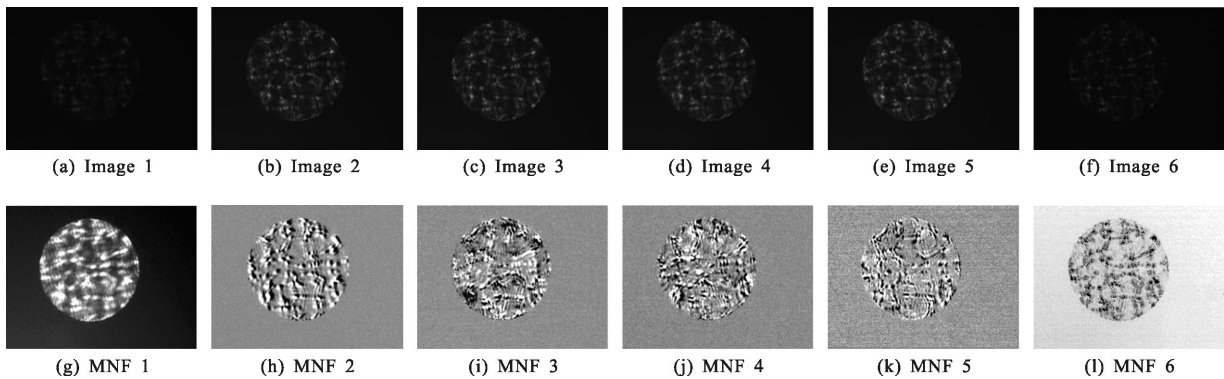


图 3 MNF 变换结果

Fig.3 Result of MNF transform

3.3 Kmeans 分类

在监督分类中, 需要稳定的训练样本才能得到较好的分类结果。非监督分类则不需要训练样本, 可以根据分类准则进行无人监督的自动分类。非监督分类无需事先知道各类的统计特征, 只需提供少量阈值对分类过程加以控制。非监督分类在模式识别中称为聚类, 它是把特征相似的数据作为相似的东西进行归类(聚类)的方法。非监督分类首先要确定图像的类别数, 其次是选择相似度量, 最常用的度量就是欧式距离和绝对距离。Kmeans 基本思想是: 通过迭代, 逐步移动各个类的中心, 直至得到最好的聚类结果。Kmeans 分类是将图像的各个点按照到类中心的距离分为 k 个类, 对一个光斑来说, 恰好只有 2 类, 背景和光斑, 所以, 光斑检测就可以看作对图像进行类别数为 2 的 Kmeans 分类。

MNF 变换后 6 个维度图像的特征值分别为 331.33、44.23、16.10、13.67、5.68、0, 如图 4 所示。前面 3 维的特征值之和为所有特征值之和的 95.3%, 所以选择前 3 个维度的数据来近似表示全部的 6 幅图像的信息。对降维后的 MNF 图像分别选择前 1、2、3 个维度进行 Kmeas 分类, 分类结果分别如图 5 所示, 比较 3 种方案, 前 2 维分类结果的小孔

区域外被划分为目标的独立点最少, 分类效果最佳。

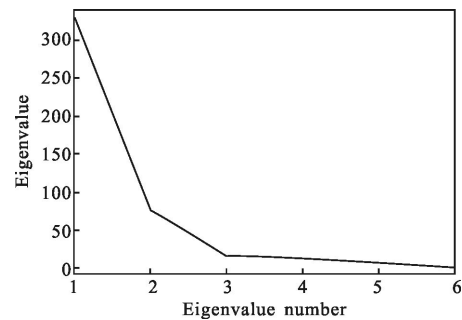


图 4 MNF 变换的特征值

Fig.4 Eigenvalue of MNF transform

在 Kmeans 分类前, 需要选择 k 个样本点值作为初始聚类中心, 选择 $(0,0) \sim (100, 100)$ 灰度的平均值为背景聚类中心, 选择类间最大方差获得的阈值作为图像类聚中心, 并且经过一次迭代就能得到最理想的激光光斑, 如图 5(c)所示。

文中使用 Kmeans 方法对小孔图像进行分类时, 对于质量较好的图像(如图 3)分类精度可以达到 97 以上, 但是对于不太规则的小孔图像则有可能分类失败, 无法获得真正的小孔光斑, 这时使用 otsu 方法进行二值化处理。

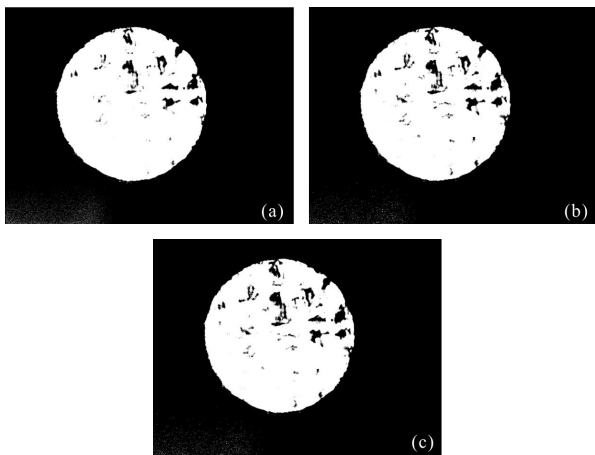


图 5 Kmeans 分类结果

Fig.5 Result of Kmeans classification

3.4 光斑边缘特征点提取^[10]

在 Kmeans 分类后的图像中除过光斑外,还有部分的离散点被误划分为光斑,使用数字形态学中腐蚀的方法可以去除这些离散点,寻找面积最大的光斑作为小孔光斑,结果分别如图 6(a)和(b)所示。因为光斑为圆形的小孔光斑,在使用数字形态学对光斑进行腐蚀处理时腐蚀掉的像素相对于整个光斑来说是对称的,所以只影响光斑的整体大小,不会对小孔图像中心的计算精度造成影响。为了进行圆拟合,需要寻找光斑边缘上最佳的特征点来完成圆拟合,寻找最佳特征点的步骤如下:

(1) 计算小孔图像粗略的圆心和半径,在图 6(b)的最大光斑图像中,通过在水平和垂直方向分别获得最小和最大的 10 个点,然后计算平均值得到圆轮廓最左和最右的点 X_1 和 X_2 ,平均为 X_0 ,以及最上和最下的点 Y_1 和 Y_2 ,平均为 Y_0 ; $(X_2-X_1)/2$ 为水平方向圆半径, $(Y_2-Y_1)/2$ 为垂直方向圆半径,水平和垂直方向圆半径的平均为 R_0 ,则小孔图像大致的圆心和半

径为 (X_0, Y_0) 和半径 R_0 。

(2) 将半径 R_0 逐渐增大为 R_1 ,直到最大光斑图像的 99.9%都在新的圆内为止。

(3) 增加半径 R_0 ,在 (X_2, Y_2) 的 20×20 邻域内搜索包含 99.9%最大光斑图像的最小半径的圆,即最小外切圆,则圆心 (X_3, Y_3) 和半径 R_3 为最佳的圆心和半径。

(4) 为了减少特征点的搜索范围,在最大光斑图像上寻找以 (X_3, Y_3) 为圆心宽度为 10 的近似圆环,如图 6(c)所示。

(5) 在圆环上计算每两个像素之间的距离,取最大欧氏距离的 200 个点为特征点,如图 6(d)所示。

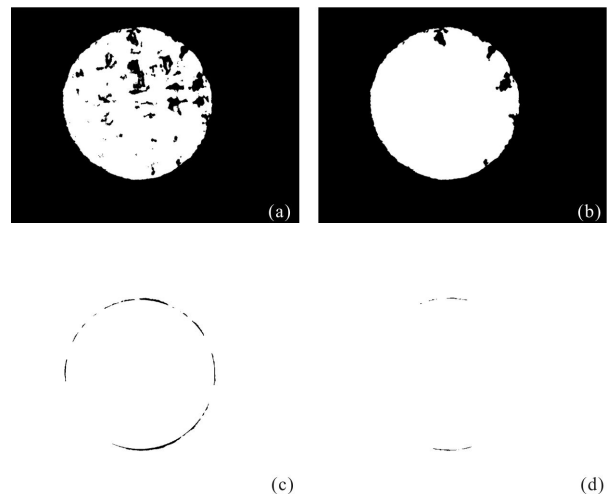


图 6 边缘检测结果

Fig.6 Result of edge detection

3.5 圆拟合

在获得最佳特征点后,就可以使用最小二乘法进行圆拟合,以提高拟合精度。根据参考文献[5]圆拟合公式为:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{(\overline{x^2 x + xy^2 - x^3 - xy^2})(\overline{(y)^2 - y^2}) - (\overline{x^2 y + yy^2 - x^2 y - y^3})(\overline{xy - xy})}{2((\overline{x})^2 - \overline{x^2})(\overline{(y)^2 - y^2}) - 2(\overline{xy - xy})^2} \\ y_0 = \frac{(\overline{x^2 y + yy^2 - x^2 y - y^3})(\overline{(x)^2 - x^2}) - (\overline{x^2 x + xy^2 - x^3 - xy^2})(\overline{xy - xy})}{2((\overline{x})^2 - \overline{x^2})(\overline{(y)^2 - y^2}) - 2(\overline{xy - xy})^2} \\ r = \sqrt{x_0^2 - 2\overline{xx_0} + y_0^2 - 2\overline{yy_0} + \overline{x^2 + y^2}} \end{cases}$$

式中: $\overline{x^m y^n} = \frac{1}{N} \sum_{i \in E} x_i^m y_i^n$, N 为检测到的圆轮廓点的个数; (x_i, y_j) 为图像的边界坐标; (x_0, y_0) 为拟合出的圆心

坐标; r 为半径。最终拟合的圆心为(611.98, 463.17),半径为 365.59,如图 7 所示。

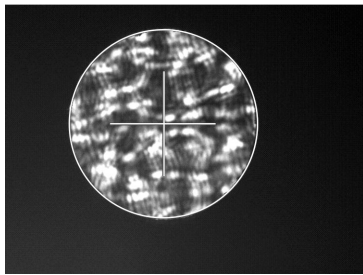


图 7 最终拟合的圆心和半径

Fig.7 Final centre and radius fitted by the circle fitting method

4 结果分析

为了验证基于多维度重构小孔中心测量方法的准确性,主要从 MNF 图像增强、Kmeans 分类和 otsu 二值化效果、最佳特征点圆拟合法计算圆心和标定圆心误差 3 个方面进行比较。

原图和 MNF 变换图像的均值和标准差如表 1 所示。从表中可以看出,MNF 变换前各个维度的均值最大值为 15.43,标准差最大值为 9.86,经过 MNF

表 1 小孔图像和 MNF 变换图像参数比较

Tab.1 Comparison of parameters between origin and MNF image

No.	Origin image			MNF image		
	Mean	Stdev	Entropy	Mean	Stdev	Entropy
1	7.82	3.48	0.88	0	18.20	2.06
2	15.43	9.86	1.27	0	8.79	1.71
3	15.31	8.97	1.27	0	4.01	1.95
4	15.38	9.34	1.27	0	3.70	1.97
5	15.35	9.32	1.29	0	2.38	2.06
6	7.82	3.48	0.88	0	0	0.86

变换后,各个维度的均值全部为 0,第一维的标准差最大为 18.20,所以,MNF 变换后图像对比度增大。在信息论里,熵是对不确定性的测量,信息熵^[4]是用来度量信息量的,一个系统越是有序,信息熵就越低;反之,则越高。原图的信息熵最大值为 1.29,经过 MNF 变换后第一维度的信息熵为 2.06。这说明经过 MNF 变换第一维度的图像得到增强。

为了使用圆拟合法获得圆心和半径,必须尽可能的获得有效的光斑区域和边缘,对光斑区域的检测,传统的方法是用最大类间方差法 otsu 进行二值化来检测光斑区域和中心。该文章将 Kmeans 分类方法用于光斑区域的检测中,取得了良好的分类效果,两种分类效果的比较如图 8 所示,从图中可以看出,使用 otsu 方法获得的二值化光斑中包含很多孔洞,所得到的光斑区域像素数为理想光斑区域像素数的 58.53%。而 Kmeans 分类方法所得到的光斑中包含的孔洞较少,所得光斑区域像素数为理想光斑区域像素数的 97.15%,其中理想光斑是采用标准光源照射而采集的高质量小孔光斑图像二值化获得的。可见,在小孔光斑对比度很弱、分布很不均匀的情况下,Kmeans 方法能够检测到更有效的光斑区域,就能检测到更有效的光斑边缘,以便使用圆拟合方法获得更加精确的圆心和半径。

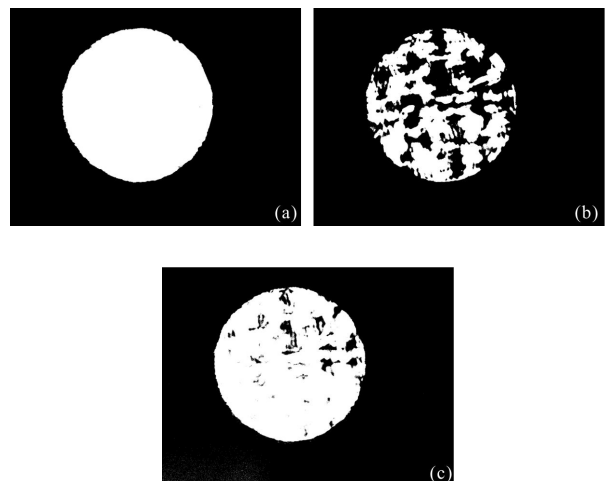


图 8 两种分类结果比较

Fig.8 Comparison result of two classified methods

表 2 为 10 次准直过程中的小孔基准图像使用最佳特征点圆拟合法计算圆心和实际标定圆心之间的误差比较,其中真实圆心和半径是通过人工判读的方法定标的。从表中可以看出,圆心误差水平和垂直方向都在 2 个像素之内,其中水平方向误差均值 0.54,垂直方向误差均值 0.72,满足了综合诊断系统中小孔基准误差在 3 个像素之内的要求。而且该方法进行圆拟合时只要对边界点循环一次就可以计算出圆心和半径,时间复杂度为,整个算法耗时为 0.8 s,为整个准直过程节省了时间,满足了快速准直的需要。

表 2 最佳特征点圆拟合法计算圆心和真实圆心误差比较(单位:像素)

Tab.2 Error comparison between fitted centre and true centre(Unit: pixel)

No.	Fitted centre	True centre	Centre error
1	X:611.16 Y:462.79	X:610.5 Y:462.5	X:0.66 Y:0.29
2	X:606.27 Y:466.13	X:607 Y:463.5	X:-0.73 Y:1.63
3	X:608.42 Y:467.92	X:608 Y:467	X:0.42 Y:0.92
4	X:611.36 Y:466.39	X:611 Y:465.5	X:0.36 Y:0.89
5	X:610.02 Y:463.61	X:609 Y:463	X:1.02 Y:0.61
6	X:614.51 Y:461	X:614 Y:461	X:0.51 Y:0
7	X:610.39 Y:463.07	X:610.5 Y:462.5	X:-0.11 Y:0.57
8	X:611.83 Y:461.84	X:611 Y:462	X:0.83 Y:-0.16
9	X:611.37 Y:466.39	X:610 Y:465	X:1.37 Y:1.39
10	X:608.11 Y:463.54	X:608 Y:463	X:0.11 Y:0.54

5 结 论

为了准确计算综合诊断系统准直过程中能量弱、分布不均匀的小孔光斑中心,使用多维重构的方法,将多幅分时采集的图像构建一个多维的图像立方体,通过 MNF 变换将数据信息主要集中在第一维图像,实现了图像信息的增强;通过非监督分类 Kmeans 方法实现了小孔区域的有效检测;通过数学形态学和最佳特征点法来获得最佳的小孔边缘;最后,使用最小二乘法完成了对小孔图像圆心和半径的拟合。实验结果表明,通过多维度重构、MNF 变换、Kmeans 分类、特征点提取和圆拟合几个方面措施的改进,使得该方法对于能量弱、分布不均匀小孔光斑区域的检测能达到理想光斑区域的 97.15%,小孔中心和半径误差小于 2 个像素,保证了综合诊断系统对大动态范围远场焦斑^[12]的精确测量。

参考文献:

[1] Haynam C, Wegner P, Auerbach J, et al. National ignition

facility laser performance status[J]. *Applied Optics*, 2007, 46 (16): 112-115.

- [2] Zhang Xiaoming, Zheng Wanguo, Wei Xiaofeng, et al. Preliminary experimental results of Shenguang III technical integration experiment line[C]//SPIE, 2005, 56(27): 6-12.
- [3] Chen Qin hao, Xu Renfang, Peng Zhengyun, et al. Automatic beam alignment for laser-fusion facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(5): 531-533. (in Chinese)
- [4] Kong Bing, Wang Zhao, Tan Yushan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 31(3): 275-279. (in Chinese)
- [5] Tang Guanqun. Analysis and comparison of several calculation methods of beam spot center [J]. *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2009, 24(3): 61-64. (in Chinese)
- [6] Qin Yi, Fu Xiaoning, Huang Feng. Multi-circle fitting algorithms for laser spot location [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2006, 26 (12): 519-523. (in Chinese)
- [7] Wang Wei, Song Weiguang, Liu Shixing, et al. A cloud detection algorithm for MODIS images combining Kmeans clustering and Mult-spectral threshold method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31 (4): 1061-1064. (in Chinese)
- [8] Zhang Baohua, Huang Wenqian, Li Jiangbo, et al. Detection of slight bruises on apples based on Hyperspectral images and MNF transform [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(5): 1367-1372. (in Chinese)
- [9] Zhang Changjiang, Fu Mengyin, Jin Mei, et al. Approach to enhance contrast of infrared image based on wavelet transformation [J]. *Journal of Infrared and Millim Waves*, 2004, 23(2): 120-124. (in Chinese)
- [10] Tian Haonan, Li Sumei. Objective evaluation method for image quality based on edge structure similarity [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 42(1): 110-114. (in Chinese)
- [11] Li Shanshan, Zhang Bing, Gao Lianru, et al. Research of hyperspectral target detection algorithms based on variance Minimum[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2116-2122. (in Chinese)
- [12] He Yuanxing, Li Xinyang. Far-field focal spot measurement based on diffraction grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 1-8. (in Chinese)