大口径平面光学元件面形检测中激光光斑质心定位

巫 玲[1],李佳斌[1],陈念年[1],熊 召[2],刘长春[2],范 勇[1]

(1. 西南科技大学 计算机科学与技术学院,四川 绵阳 621010;
2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心,四川 绵阳 621900)

摘 要:如何快速准确计算透镜焦面上的光斑质心坐标是大口径平面光学元件面形检测系统的核心问题之一,直接决定面形检测的精度和重复性。定义一个半径为 r 的探测窗口,根据到中心距离建立一维卷积模板,在光斑覆盖区域中寻找窗口内能量和局部最大的位置,确定光斑有效区域;再使用传统重心法计算有效区域质心;最后应用 3σ 准则进行误差处理。实验结果表明,该算法检测精度为 0.1 像素,各指标比传统阈值加权质心定位法提高约 1 倍,面形测量的面形相似性和 PV 比阈值加权法更贴近干涉仪检测结果。目前,通过长时间的实验验证与改进,已成功运用于实际项目中。

关键词:光斑质心定位; 面形检测; 局部能量和; 重心法; 3σ 准则
中图分类号: TH741 **文献标志码**: A **文章编号**: 1007-2276(2014)06-1704-07

Centroid detection of laser spots in large plane optical components topography measurement system

Wu Ling[1], Li Jiabin[1], Chen Niannian[1], Xiong Zhao[2], Liu Changchun[2], Fan Yong[1]

(1. Department of Computer Science and Technology, SWUST, Mianyang 621010, China;
2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: One of the core issues of the large plane optical components topography measurement system is calculating the centroid coordinates of laser spots quickly and accurately, which determines the accuracy and repeatability of the measurement. According to visual perception, a 1D detection window with radius as r was defined, to find the local maximum energy in the field with a convolution template depending to center distance. Then traditional centroid method was used to calculate the subpixel centroid. Finally, 3σ rule of error processing was applied. The experimental results show that the detection accuracy of proposed algorithm is 0.1 pixel, and the index was improved about 1 time than existing threshold weighted centroid method. The similarity and PV of topography is closer to interferometer than threshold weighted measurment. It has been successfully applied in actual projects.

Key words: centroid detection of laser spot; optical components topography measurement; sum of local energy; centroid of gravity; 3σ rule

收稿日期:2013-10-10; **修订日期**:2013-11-03
基金项目:制造过程测试技术教育部重点实验室基金(12zxzk06)
作者简介:巫玲(1982-),女,硕士,讲师,主要从事视觉测量、图像分割方面的研究。Email:wuling751@126.com

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

0 引　言

光学元件面形的精密检测是国家重大光学工程项目中不同姿态、不同种类、面形梯度变化大的在线光学元件正确、安全、高效运行的保证。近年来,国内外相继开展了有关高精度、大口径光学平面镜的面形检测工作,主要方法有三种:(1) 基于子孔径拼接的检测技术;(2) 基于角差法的检测技术;(3) 瑞奇-康芒法。

利用角差法原理进行大口径平面光学元件面形检测时, 需要获取每一扫描点上光学元件前表面反射回的激光光斑质心变化量, 计算该点表面轮廓法线方向变化量, 利用全部扫描点的法线变化量可重构出光学元件面形[1]。

因此,如何快速、准确地计算光斑质心位置成为角差法面形检测性能的关键问题之一。当光学元件口径为 400 mm×400 mm,扫描点步距为 12 mm,面形检测精度不低于 λ/6(λ=632.8 nm),重复检测精度不低于 λ/10 时,要求光斑质心检测精度为 0.15 像素(约 0.06″)。

基于子孔径拼接的夏克-哈特曼波前传感器采用的光斑质心定位算法可以提供有益的借鉴。哈特曼光斑质心计算常采用重心法, 即计算光斑图像强度的一阶矩获得光斑质心位置。目前主要有 3 类提高质心检测精度的算法:(1) 加权法[2-4],加权函数常用基于亮度的高阶矩法。(2) 高斯曲线拟合法[5],对光斑 x、y 方向的剖面进行二次曲线拟合, 曲面顶点即为质心。(3) 圆拟合法[6-7],利用最小二乘法、Hough 变换等方法将有效光斑区域的边缘拟合成圆, 圆心即为光斑中心。

典型的子孔径哈特曼检测仪,光斑半径约 4 像素;实验系统为了提高检测灵敏度,使用了大焦距透镜(组合焦距为 1.25 m),光斑半径增大到约 24 像素,若使用哈特曼质心检测算法[2-3],短时间(如 30 s)内监控到的光斑质心变化的峰谷值(PV)可能超过 0.5 像素。

为了提高鲁棒性, 现有算法在提取质心前常采用中值滤波、LoG 滤波等方法对光斑图像进行平滑[5,8-9]。但实验表明,图像平滑步骤并不一定能在量级上提高光斑质心检测的精度, 还会模糊光斑内部能量的分布,影响光斑质心检测结果的正确性。

文中分析了角差法面形检测过程中采集到的光斑图像的特点和常用典型算法的不足之处, 针对性的提出了一种鲁棒性更好的光斑质心计算方法。

1 面形检测中采集的激光光斑分析

光斑质心检测过程可以粗略地分为两步:(1) 定位有效光斑区域;(2) 有效区域内光斑质心计算。质心检测精度提高的关键在于第一步。

理想的不饱和光斑能量分布的基模为高斯分布,在垂直于传播轴的平面上,以传播轴为中心,场振幅以高斯函数形式向外平滑减小。实际测量中,光束质量,CCD 积分采样方式,透镜、分光镜、楔镜、光阑等光学设备引入的像差,空气扰动、电机振动、温度变化等因素,会造成光斑点扩展函数的畸变。光斑图像具有 3 个特点:

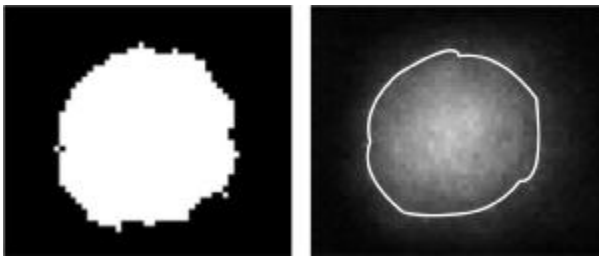
(1) 光斑能量分布基本对称;(2) 高斯函数模型不平滑, 场振幅抖动明显;(3) 振幅最大值不一定出现在中心处。

研究者常采用阈值法对激光光斑进行分割,确定光斑有效区域或边缘点,这主要有两个缺点:

(1) 有效区域的边缘不光滑,存在大量影响圆拟合或权重计算的误差点。

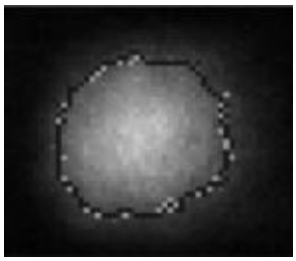
(2) 有效区域的半径依赖于阈值选择的方法。

图 1(a)给出了光斑阈值分割后的二值图像,为了结果直观可见,将其轮廓绘制到原始光斑上,如



(a) 光斑二值图　　(b)光斑有效区域轮廓

(a) Binary image　　(b) Contour of coverage



(c) 连续 3 帧有效区域轮廓

(c) Contours of 3 frames

图 1 传统的阈值法获得的有效光斑区域分析

Fig.1 Effective area analysis of laser spot with threshold value method

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

图1(b)所示。光斑有效区域并不是典型的圆形,形状判别因子式 $4\pi A/C^2$ 计算得到的圆形度仅大约 0.74(实验中甚至出现了降到 0.6 左右的光斑),其中 **A** 是连通域的面积,**C** 是连通域的周长。二值化的阈值采用常用的最大类间方差法计算[2],实验显示,最大熵、阈值迭代、矩不变阈值计算等方法会获得相似的结果。

曝光时间为 0.1 ms 时连续采集 3 帧, 分别将每帧二值分割轮廓绘制到光斑图像上,如图 1(c)所示。可以观察到:光斑序列的有效区域基本重合,边缘点可能存在内、外一个像素的变化,存在大量噪声边缘点。

2 面形检测中使用的质心检测算法

首先定义一个半径为**r** 的探测窗口,寻找窗口内能量和局部最大处,确定光斑有效区域,再使用传统重心法计算有效区域质心,最后根据 3σ 准则进行剔除粗差。算法步骤如图2 所示。

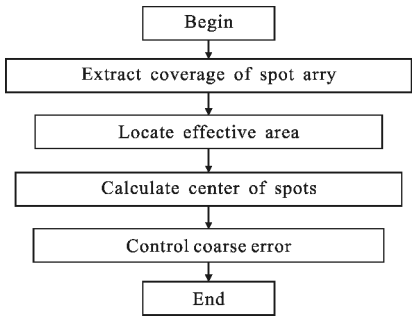


图 2 质心检测算法流程图

Fig.2 Algorithm diagram of centroid detection

2.1 提取光斑阵列覆盖区域

此步骤主要目的是提高后续处理的效率。角差法光斑阵列中光斑数量较少,只占据 CCD 视场的部分区域;由于被测元件的放置位置,可能位于 CCD 视场的不同区域。采用投影法寻找光斑群覆盖区域,分为 4 步:

(1) 定义阈值 **T**, 减除视场本底噪声;(2) 计算 **x**、**y** 方向的 1 维投影;(3) 设置半径 Rad_1 的窗口进行均值滤波,平滑投影曲线,去除鬼影、衍射条纹等小区域高亮噪声的影响;(4) 寻找 1 维投影值大于 0 的坐标范围,通过外接矩形坐标提取光斑阵列区域,如图 3 所示。

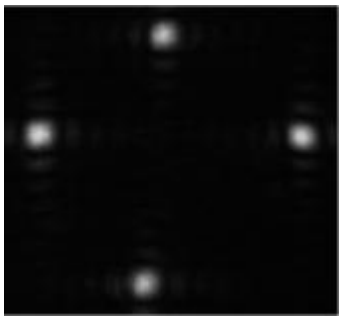


图 3 光斑阵列覆盖区域

Fig.3 Coverage region of laser spots array

2.2 确定各光斑有效区域

这是该算法最关键的步骤。CCD 采样误差、本底噪声、光学系统像差、电机振动等因素会导致光斑能量分布的起伏、位移,使光斑有效区域不稳定。

早期哈特曼采用子孔径窗口固定网格划分方法,会极大局限检测动态范围,后来的研究者提出光斑自动搜索方法。参考文献[2]通过寻找局部最大光强值定位光斑的大致位置, 然后再选取恰当的质心探测窗口。该算法需要设置局部阈值过滤背景像素,定义 **x**、**y** 方向像素强度倾斜面避免出现多个最亮像素,假设局部最大值位置近似代表一个光斑质心位置,设置恰当的质心探测窗口半径。此外,仅通过邻域比较获得局部极大值,可能将衍射条纹、鬼影误判为光斑。

人眼观察时,会忽略微小的亮度差异,认为光斑图像是一个类圆形,中心亮、随着到中心距离的增加亮度逐渐变暗,无孔洞的区域。因此,定义一个半径为 Rad_2 的探测窗口,圆形或正方形,滑动探测窗口,在光斑覆盖区域内寻找窗口内能量和局部最大的位置。当光斑覆盖区域大小为 **m*n** 像素时,此卷积操作的算法复杂度为 **O**(**m*n**)。为提高处理速度,文中探测窗口被设置为 1 维, 水平或垂直方向, 半径均为 Rad_2, 先后沿水平和垂直方向在光斑有效区域中滑动,按列和行卷积,如公式(1)所示,算法复杂度降为 **O**(**m+n**)。

$$\begin{cases} X_{row}(i,j)=\sum_{k=i-r}^{k=i+r} I(k,j)*R(2r+1-\mathrm{mod}(k,2r+1)) \\ X(i,j)=\sum_{k=j-r}^{k=j+r} X_{row}(i,k)*R(2r+1-\mathrm{mod}(k,2r+1)) \end{cases} \tag{1}$$

式中:**X** 为卷积结果;**I** 为光斑图像;**r** 为探测窗口半径;* 为卷积操作;**R** 为卷积模板。卷积结果符合理想

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

的高斯光束模型，算法探测到的光斑有效区域具有两个优点：

(1) 类圆形,圆形度约为 0.95,边缘平滑,不存在噪声边缘点;(2) 光斑有效区域范围与人眼认知一致。

算法的一个关键参数是卷积半径 $\mathbf{Rad}_2$,理论上,高斯光束将半径定义为振幅下降到中心值 1/e 处的中心距离,如图 4 中虚线轮廓所示,可拟合成圆,半径约 16 像素;根据衍射理论,透镜形成的焦斑的衍射半径约为 $1.22\lambda f/kD$ 像素,其中 λ 为激光波长、f 为透镜焦距、D 为光阑口径,k 为 CCD 像素尺寸,约 24 像素,如图 4 中“+”轮廓所示。

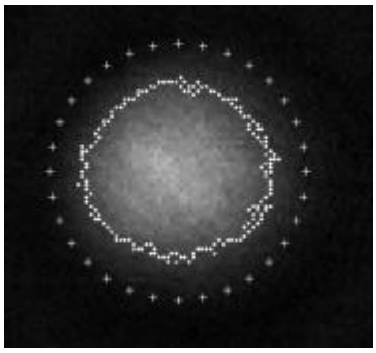


图 4 光斑区域半径

Fig.4 Radius of laser spot

实验结果观察到，当 $\mathbf{Rad}_2$ 取值范围为 10 到 25 像素时，取值大小对光斑质心检测精度并无量级上的影响,如图 5 所示。

需要指出的是，实际测量中由于光学元件表面反射率不一致、楔镜加工工艺的限制等原因,光斑阵列各光斑能量强度不一致，导致二值图 BW 的各连通域半径不相等,如图 3 中,各连通域半径的 PV 为 4。理论上,各光斑半径应该相同,可以通过数学形态学膨胀、腐蚀等方法进行调整。但实验表明,此差异对于质心计算的影响几乎可以忽略不计。

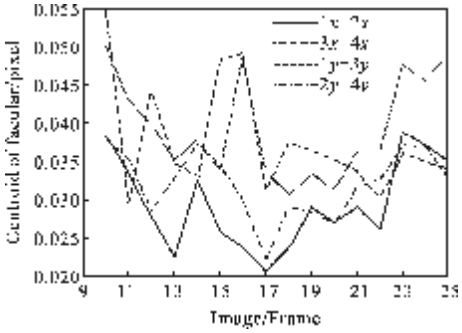


图 5 光斑相对位置 PV 随 $\mathbf{Rad}_2$ 变化

Fig.5 PV variation of relative distance of laser spots with $\mathbf{Rad}_2$

2.3 质心计算

重心法是对类圆形、矩形等中心对称目标进行高精度定位最常用的亚像素算法，基本原理如公式(2)所示。计算得到的(x_0,y_0)即为图像 I(i,j)中目标 S 的重心,S 由光斑有效区域二值图 BW 决定。

$$\begin{cases} x_0=\dfrac{m_{10}}{m_{00}}=\dfrac{\sum\limits_{(i,j)\in S} iI(i,j)}{\sum\limits_{(i,j)\in S} I(i,j)} \\ y_0=\dfrac{m_{01}}{m_{00}}=\dfrac{\sum\limits_{(i,j)\in S} jI(i,j)}{\sum\limits_{(i,j)\in S} I(i,j)} \end{cases} \tag{2}$$

2.4 误差处理

由于实际测量结果中误差存在的必然性与普遍性，为提高测量实验数据的精度和可信赖性，根据 3σ 准则(莱以特准则)进行粗差处理,处理规则如公式(3)所示。

$$\text{centroid}\mathbf{X}=\mathbf{E}(\mathbf{X}(i))\quad \text{s.t.}|\mathbf{X}(i))-\mathbf{E}(\mathbf{X}))|<1.5\mathbf{D}(\mathbf{X}) \tag{3}$$

式中:X 为公式(2)计算出的质心序列;E(X)和 D(X)分别为 X 的期望和方差,当某一个质心 X(i)与 E(X)的绝对差值(即残差)大于 D(X)的 1.5 倍时应予以剔除,重新计算剩余质心序列的期望,得到误差处理后的质心 centroidX。

3 实验数据分析

大口径平面光学元件面形检测系统主要由光学系统、机电系统和面形检测控制与处理系统等 3 部分组成。要求设备具有 2 维运动控制平台,光学系统在电机控制下沿导轨移动；激光器射出的光被楔镜分离成 4 束,照射在光学元件各扫描点上,获得反射回的 4 个激光光斑质心位置。

实验在中国工程物理研究院激光聚变研究中心“百级”实验室中进行,设备放置于减震台上,实验过程中尽量减小了地面振动、空气扰动、气温变化等外界条件的影响，质心检测误差主要来源于光学系统像差和电机振动。受到电机振动的影响,每个光斑质心将发生正负约 1 个像素的偏移。理论上,各光斑受到的振动影响是同向、等效的,因此各光斑质心相对位置应该保持不变。

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

实验中,曝光时间为 0.1 ms;阈值 **T** 和投影平滑半径 $\mathbf{Rad}_1$ 分别取为 10 和 5;1 维卷积模板 **R** 依赖于中心距离的倒数建立,模板半径 $\mathbf{Rad}_1$ 取 17;误差处理时应用一次 3σ 准则,以避免小样本问题;二值化阈值计算均使用最大类间方差法。

对比实验算法采用最常用的质心加权法, 根据参考文献[3-4]将强度参数设置为 3,为加强实验结果可比性,同样使用了一次 3σ 准则进行误差处理。

为方便描述, 按照物理位置对图 3 中的光斑进行编号:左-1,右-2,上-3,下-4。图 6、图 7 归一化给出了光斑 1 和 2,光斑 3 和 4 在 **x** 方向质心相对位置在连续 40 帧中的变化曲线。

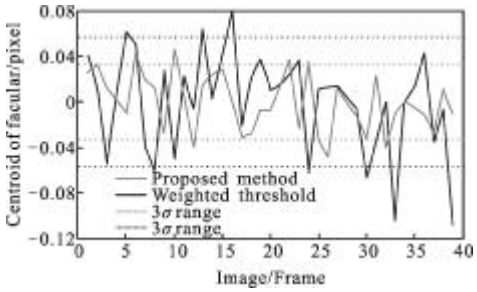


图 6 开电机状态下光斑 1 和光斑 2 质心 **x** 方向相对位置变化曲线

Fig.6 Relative centroid variation in the **x** direction of spot-1 and spot-2 under motor operation

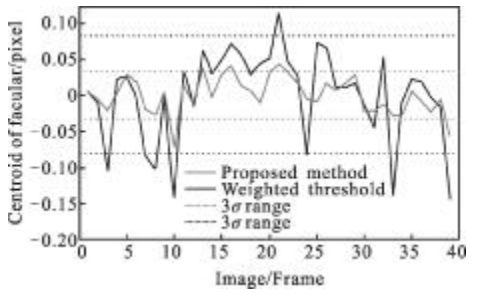


图 7 开电机状态下光斑 3 和 4 质心 **x** 方向相对位置变化曲线

Fig.7 Relative centroid variation in the **x** direction of spot-3 and spot-4 under motor operation

表 1 给出了两种算法对比结果。可以看出:

表 1 电机运行时光斑质心相对变化处理对比 (x 方向,40 帧)

Tab.1 Statistical comparisons of relative centroids under motor operation (x direction,40 frames)

Relative distance (x direction,pixels)		Spot I and spot II		Spot III and spot IV	
		Proposed method	Weighted thre-shold method	Proposed method	weighted thre-shold method
Befor error processing	STD	0.025 1	0.049 3	0.025 6	0.062 9
	PV	0.094 5	0.188 4	0.116 5	0.257 4
	Eliminated frames	7	9	6	9
After error processing	STD	0.018 1	0.027 6	0.018 4	0.029 4
	PV	0.062 2	0.114 0	0.060 2	0.117 4
	Change of mean	0.000 6	0.008 3	0.000 1	0.022 2

(1) 对于粗差处理前的原始数据方差、PV、错误处理的 3σ 范围和处理后的 PV 等指标,阈值加权算法均约为文中算法的 2 倍;

(2) 粗差处理前后文中算法统计均值的变化量级约 10^{-3} 像素,远优于阈值加权算法,使算法的误差处理方式与结果更具有可信赖性;

(3) 文中算法计算得到光斑相对位置 PV 在 0.1 像素内,使光斑质心检测的计算精度达到 0.1 像素。

由于篇幅所限, 仅将 5 次实验统计结果显示在表 2 中。其中 1x 和 1y 分别表示 1 号光斑质心的 **x** 和 **y** 坐标;2x-1x 表示 1 号光斑质心与 2 号光斑质心 **x** 方向的相对距离(像素)。

当被测镜口径为 400 mm×400 mm, 测量步长 12 mm 时,传统方法、文中方法恢复的面形与干涉仪

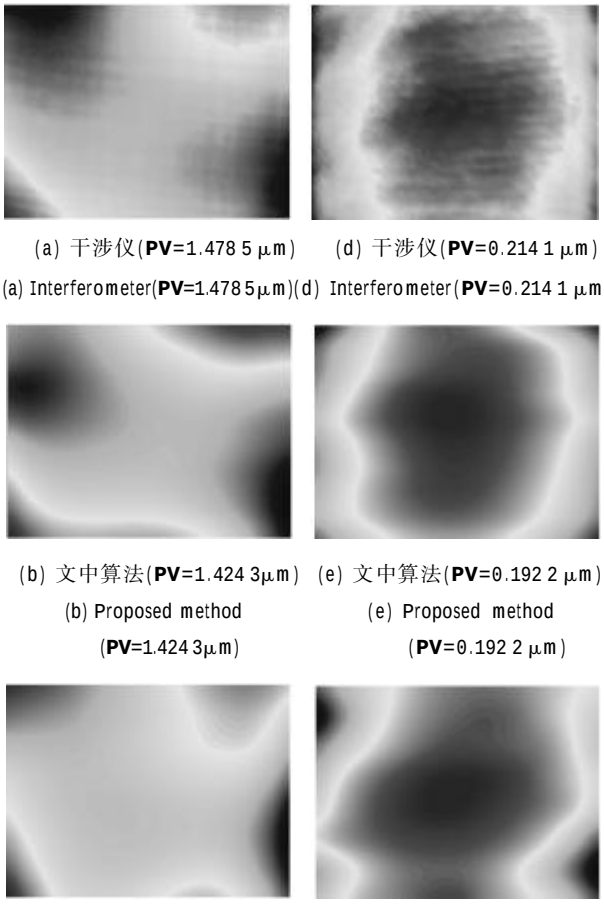
表 2 光斑相对质心变化统计(40 帧)

Tab.2 Statistical comparisons of relative centroids (40 frames)

PV of centers/pixels		2x-1x	4x-3x	1y-3y	2y-4y	1x-3x	2x-4x	2y-1y	4y-3y
Proposed method	Motor off	0.024	0.020	0.034	0.025	0.029	0.021	0.024	0.031
	Motor on	0.065	0.071	0.057	0.080	0.072	0.064	0.061	0.053
Weighted threshold method	Motor off	0.043	0.036	0.063	0.055	0.050	0.065	0.035	0.049
	Motor on	0.183	0.161	0.107	0.160	0.112	0.133	0.122	0.094

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

测量结果的对比如图 8 所示，为了对比直观清晰，图(a)到(c)和(d)到(f)分别给出了两块不同的平面镜的对比测量结果。可以看出,文中算法无论是精度还是面形相似性,都比现有阈值加权法更优。



(a) 干涉仪(**PV**=1.478 5 μm)　(d) 干涉仪(**PV**=0.214 1 μm)

(a) Interferometer(**PV**=1.478 5μm)(d) Interferometer(**PV**=0.214 1 μm)

(b) 文中算法(**PV**=1.424 3μm)　(e) 文中算法(**PV**=0.192 2 μm)

(b) Proposed method (**PV**=1.424 3μm)　(e) Proposed method (**PV**=0.192 2 μm)

(c) 阈值加权法(**PV**=1.264 3 μm)(f) 阈值加权法(**PV**=0.284 4μm)

(c) Weighted threshold (**PV**=1.264 3 μm)　(f) Weighted threshold (**PV**=0.284 4 μm)

图 8 文中算法、传统方法面形恢复结果与干涉仪测量结果对比图

Fig.8 Comparison of topography measurement of proposed method algorithm, threshold weighted method and interferometer

4 结束语

大口径平面光学元件面形检测中，质心检测算法的精度是约束面形检测准确性、重复度的关键要求之一。采用两个措施提高检测精度:(1) 根据探测窗口中能量和局部最大定位光斑有效区域，以避免现有方法的有效区域不规则、自适应阈值计算困难等问题;(2) 3σ 准则进行粗差处理,提高实验数据的精度和可信赖性。

实验结果表明，文中算法检测精度达到 0.1 像素,各指标比传统阈值加权质心定位法提高约 1 倍,误差处理方式与结果更具可信赖性。文中算法面形测量的精度和面形相似性比阈值加权法更接近干涉仪测试结果。目前,通过长时间的实验验证与改进,该算法已成功运用于实际项目中。

参考文献:

[1] Chen Niannian, Fan Yong, Zhang Junnan, et al. Study on laser spot segmentation and classification of optical component topography measurement system [J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(6): 1266-1268. (in Chinese)

[2] Zhang Jinping, Zhang Zhongyu, Zhang Xuejun, et al. Algorithm for extending dynamic range of shack-hartmann wavefront sensor [J]. Acta Optica Sinic, 2011, 31 (8): 140-144. (in Chinses)

[3] Xia Aili, Ma Caiwen. Method for improving wavefront detection accuracy based on high moment [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 472-477. (in Chinese)

[4] Jing Wenbo, Duan Jin, Wang Xiaoman, et al. Comparison of Shack-Hart-mann array spot centroid detection errors [J]. Journal of Jilin University(Sci Ed), 2010, 48(6): 1013-1017. (in Chinese)

[5] Liu Zhaorong, Wang Zhiqian, Liu Shaojin, et al. Research of precise laser spot center location algorithm [J]. Computer Simulation, 2011, 28(5): 399-401. (in Chinese)

[6] Zhang Xiufeng, Du Haiying. Study on the center fitting method for non-diffraction laser circular images [J]. Optoelectronic Technology, 2011, 31(9): 149-152. (in Chinese)

[7] Mu Yining, Liu Quan, Yu Lintao, et al. Application of Hartmann technique in sequence spot detection [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(9): 2197-2204. (in Chinese)

[8] Li Huaqiang, Song Helun, Rao Changhui, et al. Accuracy analysis of centroid calculated by a modified center detection algorithm for Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. Optics Communications, 2008(281): 750-755.

[9] Xiao Fenggang, Liu Jianguo, Zeng Congyong, et al. New denosing method for improving speckle image centroid accuracy [J]. Application Research of Computers, 2008, 25(12): 3683-3684, 3687. (in Chinese)

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com