

哈特曼-夏克波前传感器的高精度质心探测方法

李晶^{1,2} 巩岩¹ 呼新荣² 李春才^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为提高哈特曼-夏克波前传感器(HS-WFS)的光斑质心探测精度以实现光学系统的高精度波前检测,提出了一种有效的质心探测方法。该方法利用非线性滤波和窗口法对整幅光斑图像进行全局处理后,结合中值滤波、三次样条插值和自适应 Otsu 阈值法对单个光斑进行局部处理。分析了三次样条灰度插值点个数不同,探测精度和计算时间的变化规律。采用该方法探测了含有噪声的光斑图像,其质心探测误差仅为 0.0442 pixel,比传统的非线性滤波、Otsu 阈值法和探测窗口法探测精度分别提高了 91.86%、87.97%和 31.79%。对已知波像差的光学系统进行了仿真检测,得到的波前检测精度峰谷(P-V)值为 0.0098 λ ,精度均方根(RMS)值达到 0.0027 λ 。结果表明该方法能够提高质心探测精度,可用于高精度光学系统的检测。

关键词 探测器;哈特曼-夏克波前传感器;波前检测;图像处理;质心探测

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0316002

A High-Precision Centroid Detecting Method for Hartmann-Shack Wavefront Sensor

Li Jing^{1,2} Gong Yan¹ Hu Xinrong² Li Chuncai^{1,2}

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to improve spots centroid detection accuracy of Hartmann-Shack wavefront sensor (HS-WFS) to achieve high-precision of wavefront test of optical system, a centroid detecting method is proposed. The nonlinear filtering and the windowing spot image in global processing are used, combining with median filtering, cubic spline interpolation and adaptive Otsu thresholding for a single spot in local processing. The regulation of centroid error and calculation time with different interpolation points is discussed. For a spot image with noise, the centroid detection error is only 0.0442 pixel. Compared with the traditional methods of nonlinear filtering, the Otsu thresholding method and the detection windowing, the accuracies are increased by 91.86%, 87.97% and 31.79%. The known wavefront aberration of an optical system is simulation tested. The wavefront testing accuracy is 0.0098 λ in peak-valley (PV) value, and is 0.0027 λ in root-mean-square (RMS) value. The results show that this method enhances the accuracy of centroid detection, and is suitable for high-precision optical systems.

Key words detectors; Hartmann-Shack wavefront sensor; wavefront testing; image processing; centroid detection

OCIS codes 220.4840; 220.1080; 230.0040

1 引言

哈特曼-夏克波前传感器(HS-WFS)是一种基于波前斜率测量的光学检测装置,因具有结构简单、环境适应能力强、实时性强等优点被广泛应用在激

光波前检验、视光学、自适应光学、光学检测和装调等领域^[1-5]。光斑质心探测误差是决定 HS-WFS 波前检测精度的重要因素,人们对减小质心探测噪声的方法进行了深入研究,这些方法主要可归为三

收稿日期: 2013-08-14; 收到修改稿日期: 2013-10-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41104122)、科技部国际合作项目(2011DFR10010)

作者简介: 李晶(1987—),男,博士研究生,主要从事光学检测装调方面的研究。E-mail: lijing871215@126.com

导师简介: 巩岩(1968—),男,研究员,博士生导师,主要从事光机集成设计和系统装调技术等方面的研究。

E-mail: gony@sklao.ac.cn

类:图像抑噪法、探测窗口法和阈值法。图像抑噪法可加大光斑图像中光斑信号与噪声信号的分离程度^[6],但无法区分与光斑亮度近似的杂光噪声。探测窗口法可通过调整探测窗口大小去除窗口外噪声^[7],但是无法消除窗口内噪声对质心探测的影响。通过对光斑图像全局设定阈值可降低读出噪声、背景暗电平和干扰杂光的影响^[8-10],但是当子孔径内光斑强度不均匀时,不宜对整幅图像设置统一阈值。

由于单独使用某一类方法无法最大程度上减小质心探测误差,梁春等^[11]提出了一套结合多种方法的自适应质心探测方法;夏爱利等^[12]提出了将窗口优化和窗口内线性灰度插值相结合的方法;钮赛赛等^[13]提出了结合定位光斑区域、动态分割阈值和最优探测窗口的自适应光斑质心计算方法,均获得了较高的光斑质心探测精度。上述质心探测方法主要应用在视光学和自适应光学系统中,适用于被测波前动态范围较大的情况。

本文针对高精度光学系统被测波前具有动态范围较小的特点,提出一种提高 HS-WFS 质心探测精度的新方法。该方法利用非线性滤波和窗口法对整幅光斑图像进行全局处理,对单个光斑结合中值滤波、三次样条插值和自适应 Otsu 阈值法进行抑噪

处理以提高光斑质心的探测精度。仿真实验验证了该方法具有去除随机噪声、平滑离散噪声和干扰杂光噪声的能力,分析了三次样条灰度插值点个数与质心探测精度和质心计算时间的变化规律,并通过 HS-WFS 实验光学模型产生光斑图像,利用该方法探测该光斑图像质心并重构波前,结果表明本方法可以实现高精度光斑质心探测。

2 HS-WFS 工作原理

HS-WFS 主要由微透镜阵列和位于微透镜焦平面上的 CCD 组成。如图 1(a)所示,微透镜阵列将入射波前分割成若干子波前,由于变形波子波前是倾斜的,导致聚焦在 CCD 上的光斑位置相对平面波前的聚焦位置有所偏移。取单个子孔径放大如图 1(b)所示,图中波前斜率为

$$\tan \theta = \frac{\Delta y}{f} = \frac{\Delta z}{d}, \quad (1)$$

式中 Δy 为 CCD 上 y 方向光斑质心的偏移, f 、 d 分别为微透镜的焦距和子孔径大小, Δz 为变形波前的局部波像差。文中采用的光源波长为 $0.6328 \mu\text{m}$,微透镜为矩形分布,焦距为 18.6 mm ,子孔径为 $300 \mu\text{m}$,CCD 单位像素尺寸为 $10 \mu\text{m}$ 。

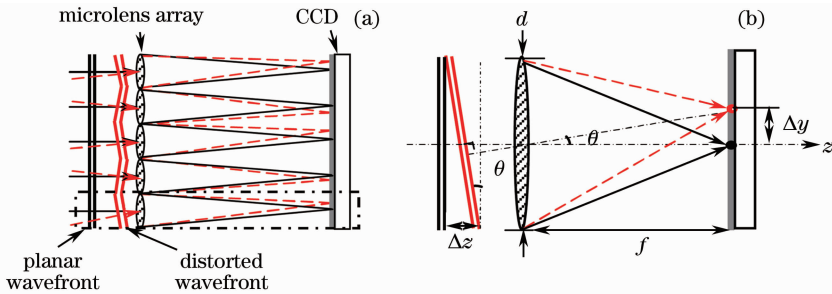


图 1 HS-WFS 工作原理。(a) 平面波、变形波入射; (b) 单个子孔径

Fig. 1 HS-WFS working principle. (a) Planar and distorted wavefront; (b) single aperture working principle

高精度光学系统的波像差一般小于 $\lambda/4$, 根据 (1) 式可算出 CCD 上光斑动态范围约为 $49.042 \mu\text{m}$, 微透镜衍射产生的艾里斑半径为 $47.865 \mu\text{m}$, 光斑的动态范围约为半个光斑尺寸。当波前存在像差时, CCD 上形成的光斑不再是艾里斑, 光斑质心位置也偏离了光斑的中心, 单个光斑所占像素数超过 $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$, 因此需要准确探测各光斑的质心位置。

使用 CCD 探测光斑质心位置时, 其探测精度受到光斑等效高斯宽度 σ_A 、CCD 读出噪声 σ_r 和光子起伏噪声等随机噪声的影响, x 方向探测误差可表示为^[14]

$$\sigma_{\text{scr}}^2 = \frac{\sigma_A^2}{V} + \frac{\sigma_r^2}{V} ML \left(\frac{L^2 - 1}{12} + X_c^2 \right) A_p^2, \quad (2)$$

式中 X_c 为 x 方向质心坐标, V 为探测到的总光子数, A_p 为探测窗口内的像素数, M 和 L 为焦平面上每个光斑所占的探测窗口区域大小。由 (2) 式可知探测窗口的大小直接影响质心探测精度, 选取过大将增大探测误差, 过小会截断光斑的有效信息, 通过选用合适的探测窗口法计算质心位置可减小探测误差。

3 提高光斑质心探测精度的方法

单独使用传统 HS-WFS 光斑质心探测方法无法最大程度提高质心探测精度。本文将探测窗口

法、阈值法与图像处理方法相结合,依次进行全局和局部处理,实现降低和平滑噪声,提高质心探测精度。具体流程如图 2 所示,虚线部分为全局处理过程,其余为局部处理过程。首先对获得的光斑图进行非线性滤波处理,然后使用有效区域分割的窗口法将光斑图分为若干个光斑子区域,在每个子区域内分别使用中值滤波、三次样条插值和 Otsu 阈值处理,最后分别计算每个区域内光斑的质心。

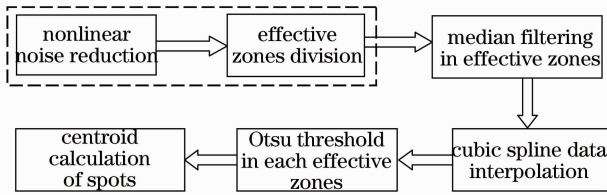


图 2 HS-WFS 光斑质心探测精度方法的流程
Fig. 2 Flow chart for HS-WFS spots centroid detecting method

3.1 理论依据

光斑质心探测误差主要受到 CCD 读出噪声、离散采样误差、光子起伏噪声、背景暗电平和环境干扰杂光等因素的影响^[5]。光子起伏噪声误差在信号极弱时才有明显的影响,在本应用范畴内可忽略此误差。CCD 读出噪声、背景暗电平和环境干扰杂光三种误差相互独立,且与光斑信号无关,可通过设置合适的阈值降低。常用的阈值法有灰度值统计法、迭代法和 Otsu 法等^[11]。CCD 离散采样误差可采用图像灰度插值法抑制。根据(2)式可知,还应该使用合适的窗口法降低探测误差。单独使用阈值法、图像处理法或窗口法只能降低一种或几种噪声,只有将多种方法结合才能全面消除不同噪声的影响。

3.2 全局处理

采用自平方的非线性滤波法对光斑图像进行预处理,使光斑信号与噪声初步分离。将光斑图的像素矩阵的第一行灰度值置于矩阵最后一行的下方,形成一个新的像素矩阵。将原像素矩阵中各灰度值与新矩阵中对应位置的灰度值相乘,所得矩阵即为自平方抑噪后的待处理像素矩阵。

如第 2 节分析,高精度光学系统检测的动态范围不大,光斑偏移小于单个光斑尺寸的一半,因此提出使用有效区域分割法调整探测窗口。首先利用迭

代阈值法求得图像的全局阈值 T : 将图像的平均灰度值设为初始阈值 T_0 , 迭代次数为 i , 阈值将图像分为前景和背景, 计算前景和背景的平均灰度值分别为 $t_0(i)$ 和 $t_1(i)$, 新阈值为 $T_i = [t_0(i) + t_1(i)]/2$, 若 $T_i \neq T_{i-1}$, 再次迭代, 直到 $T_i = T_{i-1}$, 此时, T_i 即为全局阈值 T 。全局搜索并记录灰度值大于 T 的像素点的位置。以行像素为例, 计算行像素位置之间的间距, 间距大于 5 且上下区域连续的两行之间被认为是光斑区域的行分割带, 其余部分为有效行带。列像素位置的分割同理。将行分割和列分割交错的区域归为有效区域, 即探测窗口, 其尺寸由所在行列的最大光斑决定。通过有效区域的分割, 去除了灰度值小于阈值 T 的噪声像素和光斑区域外尺寸小于 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 的高亮度杂光光斑干扰。有效区域在随光斑大小进行调整的同时保留了全部有效光斑信息。

3.3 局部区域处理

光斑图像经过全局处理后, 被分割成数量等于光斑个数的有效区域, 区域外的噪声能够得到有效抑制, 但区域内仍会受到高亮度杂光、离散采样误差和 CCD 读出噪声等因素的影响, 须进行局部区域处理。

中值滤波将灰度相差比较大的临近像素改为彼此接近的值, 既能消除噪声又能保持图像的细节^[15], 可去除高亮度杂光噪声。本文采用的模板尺寸为 3×3 , 滤波处理后每个有效区域内的像素点灰度值为: 与其相邻 8 个像素点按灰度值排序后的第 5 个灰度值。

CCD 的离散采样误差可用灰度插值法抑制, 常用的灰度插值法主要有最近邻插值、双线性插值和三次插值(包括三次线性插值和三次样条插值)^[15]。最近邻插值和双线性插值计算简单, 但精度较低, 为最大程度上降低离散采样误差, 选择在有效区域内使用三次样条灰度插值。图像中点 (x, y) 处的插值公式为

$$g(x, y) = \sum W_x(d_x)W_y(d_y), \quad (3)$$

式中 d_x, d_y 分别为插值点与邻近像素点坐标间距的绝对值, W_x, W_y 分别为 x, y 坐标值的权重, 均以像素为单位。计算三次样条插值点 (x, y) 的灰度值需要利用其 16 个最邻近像素的灰度值, 当选取的插值点均匀分布时, 三次样条灰度插值的加权值为

$$W_\eta = \begin{cases} d_\eta^3 - 2d_\eta + 1, & d_\eta < 1 \\ -d_\eta^3 + 5d_\eta^2 - 8d_\eta + 4, & 1 < d_\eta < 2 \end{cases}, \eta = x, y. \quad (4)$$

由于不同光斑区域亮度不均匀,设定全局阈值无法满足每个光斑区域的去除噪声要求,通过对不同有效区域分别计算 Otsu 阈值,可以进一步消除 CCD 读出噪声、背景暗电平和干扰杂光对质心探测的影响。Otsu 阈值法将图像灰度值按任意阈值分成两部分,根据选取的类别分离特征作为判据,使这两部分与图像整体类别分离特征相距最大的灰度值即为图像分割的最佳阈值^[11]。选择图像灰度的方差分布作为类别分离,更加适用于灰度值集中且分散性小的 HS-WFS 得到的光斑图,该灰度方差可通过下式计算得到^[10]:

$$g = \text{ArgMax} \{ \omega_0(t) [\sigma_0^2(t) - \sigma^2]^2 + \omega_1(t) [\sigma_1^2(t) - \sigma^2]^2 \}, \quad (5)$$

式中 $\text{ArgMax}(\cdot)$ 表示目标函数最大值,

$$\begin{aligned} \sigma_0^2(t) &= \sum_{0 \leq i \leq t} [i - \mu_0(t)]^2 p(i) / \omega_0(t), \sigma_1^2(t) = \sum_{t \leq i \leq m-1} [i - \mu_1(t)]^2 p(i) / \omega_1(t), \\ \omega_0(t) &= \sum_{0 \leq i \leq t} p(i), \omega_1(t) = \sum_{t \leq i \leq m-1} p(i), \mu_0(t) = \sum_{0 \leq i \leq t} ip(i) / \omega_0(t), \mu_1(t) = \sum_{t \leq i \leq m-1} ip(i) / \omega_1(t), \end{aligned} \quad (6)$$

式中 i 为灰度值, $p(i)$ 为灰度值为 i 的频率, σ 为灰度值的方差, t 为阈值, g 为所求的最佳阈值。

有效区域内像素灰度值减去 Otsu 阈值后,光斑质心位置通过一阶矩阵求得

$$X_i = \frac{\sum_{x,y \in A_i} xI(x,y)}{\sum_{x,y \in A_i} I(x,y)}, Y_i = \frac{\sum_{x,y \in A_i} yI(x,y)}{\sum_{x,y \in A_i} I(x,y)}, \quad (7)$$

式中 A_i 为第 i 个有效区域范围, x, y 为有效区域中像素的位置, $I(x, y)$ 为 (x, y) 像素点对应的灰度值, X_i, Y_i 为第 i 个有效区域的光斑质心位置。

4 实验和结果分析

4.1 噪声光斑处理

利用 Matlab 软件生成 8×8 个光斑的阵列,图像大小为 $408 \text{ pixel} \times 408 \text{ pixel}$,加入均值为 0.1、方差为 1×10^{-3} 的随机高斯噪声和分布密度为 0.01 的随机椒盐噪声,以模拟 CCD 读出噪声、背景暗电平和干扰杂光。使用有效窗口分割后的处理效果见图 3(c),可见窗口大小与光斑大小和噪声密度有关,窗口区域包含了光斑的全部信息,能够去除部分背景高亮度噪声。

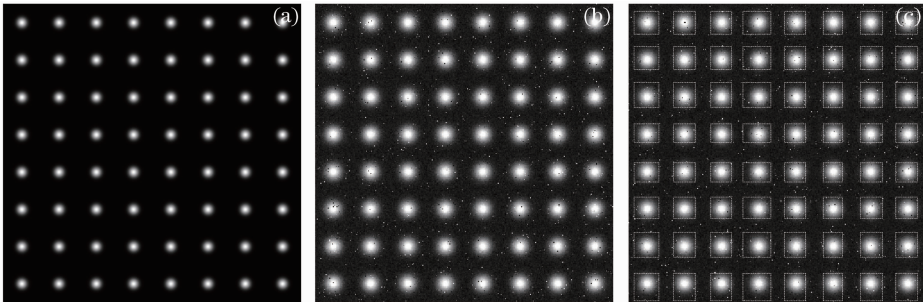


图 3 8×8 光斑阵列。(a) 原始光斑; (b) 加入高斯和椒盐噪声后的光斑图; (c) 有效窗口分割

Fig. 3 8×8 spots array . (a) Original spots array; (b) spots array after inserting Gaussian and pepper & salt noise; (c) effective zone division

使用新方法计算阵列的各光斑质心,在局部处理使用三次样条插值时,插值点个数 k 分别取 1—9,得到探测误差均值与 k 的关系如图 4 所示。可以看出随插值点个数增多,质心探测误差降低,当 k 较小时,增加插值点个数质心探测误差降低显著,当 k 大于 4 时,每增加一个插值点质心探测精度增加缓慢。此外,随插值点增多,数据处理时间也将增加。综合考虑质心探测精度和计算时间,选取三次样条插值点个数为 4。

将未加噪声的光斑质心位置作为光斑实际位置,比较窗口法、自平方法、Otsu 阈值法与新方法的

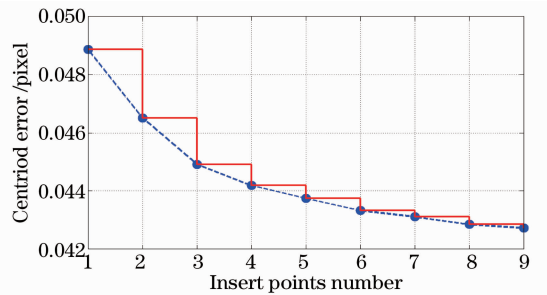


图 4 插值点个数与质心探测误差的关系

Fig. 4 Relationship between centroid error & interpolation points

质心探测精度,结果如图 5 所示。横坐标为光斑序号,纵坐标为加入噪声后探测的质心位置相对原始光斑图质心位置的偏移。表 1 为图 5 中四种质心探测方法测量误差的均值和标准差。由图 5 和表 1 可以看出:自平方去噪法的质心计算精度不高,但是标准差较小,说明这种方法的计算稳定性较高;Otsu 阈值法对于包含高亮度噪声的光斑去噪能力有限,探测精度不稳定,起伏较大;窗口法可以有效消除窗口外的噪声对质心探测的影响,但对于在窗口内噪声较大的

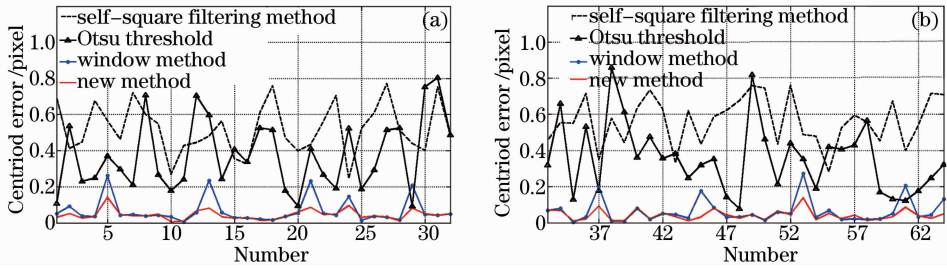


图 5 光斑质心探测误差对比。(a) 第 1~32 个光斑的质心探测误差;(b) 第 33~64 个光斑的质心探测误差

Fig. 5 Comparison of centroid error by different methods. (a) Centroid error of 1~32 spots;
(b) centroid error of 33~64 spots

表 1 光斑质心探测误差对比

Table 1 Comparison of centroid error by different methods

Method	Self-square filtering	Otsu threshold	Window method	New method
μ / pixel	0.5427	0.3673	0.0648	0.0442
σ / pixel	0.1375	0.1976	0.0665	0.0289

4.2 检测光学系统

在 Zemax 软件中建立 HS-WFS 光学模型,系统孔径光阑为圆形,如图 6(a)所示,微透镜阵列面型如下方所示。进行物理光线分析,生成的参考光斑图如图 7(a),光斑阵列为 15×15 单元矩形阵列排布,将某一子孔径的光斑放大,可见单个光斑占据多个像素位置,需要精确探测光斑质心。在微透镜

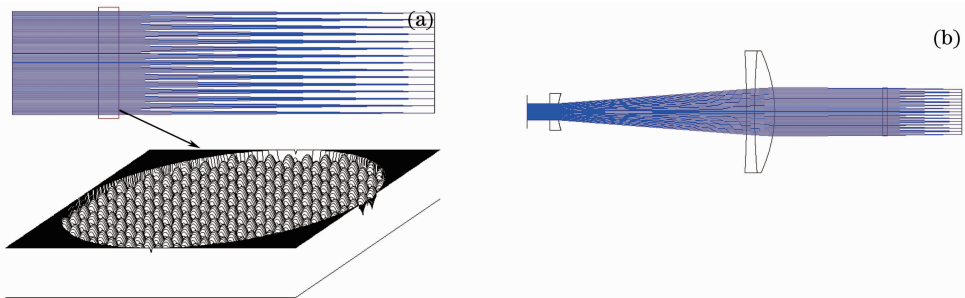


图 6 检测准直光学系统。(a) 参考光路;(b) 测量光路

Fig. 6 Optical system test. (a) Reference light path; (b) testing light path

已知波像差的波前图如图 8(a)所示,可以看出系统主要存在离焦和球差。根据测得光斑的质心偏移,利用 HS-WFS 波前重构原理^[16]将波前拟合成

光斑,该方法质心探测精度较低,比如图 5 中的第 5、13、21、24 等点;新方法对于窗口内噪声较小的光斑,探测精度与窗口法近似,但是当窗口内噪声较大时,有效地提高了质心探测精度,比如对于第 13 个光斑,质心探测误差较窗口法提高了 0.1537 pixel。新方法的质心探测误差均值达到 0.0442 pixel,相比前三种方法分别提高 91.86%、87.97%和 31.79%,标准差仅为 0.0289 pixel,可见新方法在提高质心探测精度的同时,还具有较强的稳定性。

阵列之前加入波像差 P-V 值为 0.4598λ ,RMS 值为 0.1327λ 的被检测准直光学系统,如图 6(b)所示,物理光线分析后生成的测量光斑图如图 7(b)所示。利用新方法计算两幅图中光斑质心位置的偏移,质心变化示意图如图 7(c)所示,可以看出距离出瞳中心越远光斑位移越大。

36 项 Zernike 多项式。由于 19 项之后的系数极小,仅列出前 18 项 Zernike 系数如图 9 所示,忽略倾斜,可以看出其中离焦项 Z4 和球差项 Z9 较大。波

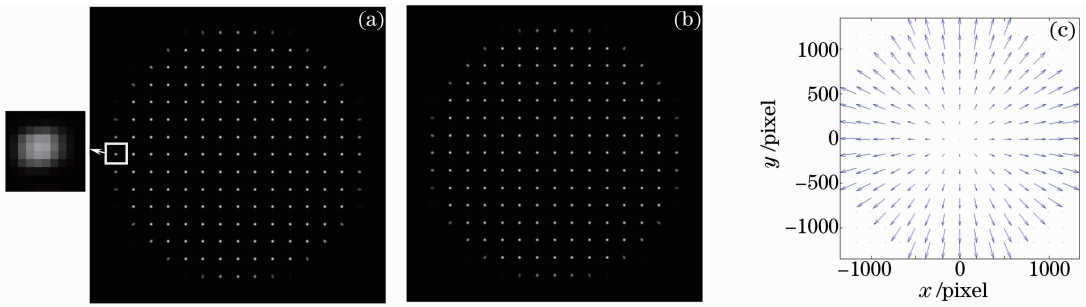


图 7 圆形孔径光斑阵列。(a) 参考光斑图；(b) 测量光斑图；(c) 质心偏移

Fig. 7 Sphere aperture spots array. (a) Reference spots array; (b) testing spots array; (c) distance of spots' movement

前重构结果如图 8(b)所示,横纵坐标为出瞳尺寸(单位为 mm),明暗程度表示波像差大小。由于 HS-WFS 采样点数有限,得到的波前严重离散,因此利用计算得到的 Zernike 系数,通过增加波前的

采样点,得到的重构波前波像差如图 8(c)所示,换算为波长单位,重构波前的波像差 P-V 值为 0.450λ ,RMS 为 0.130λ ,重构波前的误差 P-V 值为 0.0098λ ,RMS 为 0.0027λ 。

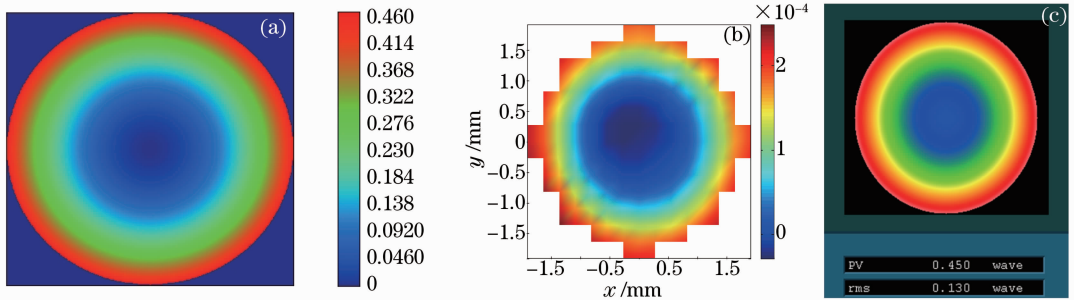


图 8 波前图。(a) 光学系统检测波前图；(b) HS-WFS 采样点重构波前图；(c) 36 项 Zernike 多项式重构波前图

Fig. 8 Wavefront map. (a) Wavefront map of optical system by testing; (b) wavefront map of HS-WFS reconstruction by sample spots; (c) wavefront map of 36 Zernike polynomials reconstruction

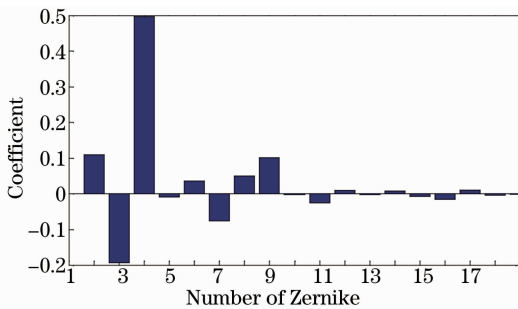


图 9 前 18 项 Zernike 系数

Fig. 9 Primary 18 Zernike polynomials coefficient

5 结 论

提出了结合图像抑噪、探测窗口和阈值选取的 HS-WFS 光斑质心探测方法,在对整幅光斑图像进行非线性滤波和有效区域分割的全局处理后,在子区域进行中值滤波、三次样条灰度插值和 Otsu 阈值局部处理。全局处理分离出了有效光斑信息,局部处理进一步消除了区域内高亮度杂光、离散采样误差和 CCD 读出噪声的影响。探测了含噪声的光斑图的光斑质心,质心探测精度达到 0.0442 pixel ,

与非线性滤波法、Otsu 阈值法和探测窗口法进行对比分析,质心探测精度分别提高了 91.86%、87.97%和 31.79%。结果表明本文的方法具有更强的去除噪声能力和更高的质心探测精度。利用本文的方法对已知波像差 P-V 值 0.4598λ ,RMS 值为 0.1327λ 的光学系统进行仿真检测分析,得到的重构波前 P-V 值为 0.450λ ,RMS 为 0.130λ ,测量精度 P-V 值为 0.0098λ ,RMS 值达到 0.0027λ ,结果表明该方法可以进行高精度质心探测,并满足低动态范围的高精度光学系统检测需要。

参 考 文 献

- 1 Danial M. Optical Shop Testing[M]. Canada: John Wiley & Sons, Inc, 2007. 361-375.
- 2 Platt B C, Shack R. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing[J]. J Refract Surg, 2001, 17(5): S573-S577.
- 3 Liping Zhao, Wenjiang Guo, Xiang Li, et al.. Reference-free Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. Opt Lett, 2011, 36(15): 2752-2754.
- 4 Javier Vargas, Luis González-Fernández, Juan Antonio Quiroga, et al.. Shack-Hartmann centroid detection method based on high dynamic range imaging and normalization techniques[J]. Appl

- Opt, 2010, 49(13): 2409-2416.
- 5 Andre Fleck, Vasudevan Lakshminarayanan. Statistical error of a compact high-resolution Shack-Hartmann wavefront sensor with a discrete detector array[J]. Appl Opt, 2010, 49(31): G136-G139.
 - 6 Baik S H, Park S K, Kim C J, *et al.*. A center detection algorithm for Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. Opt & Laser Technol, 2007, 39(2): 262-267.
 - 7 Pedro M P, Fernando V M, Stefan Goelz, *et al.*. Analysis of the performance of the Hartmann-Shack sensor in the human eye[J]. J Opt Soc Am A, 2000, 17(8): 1388-1398.
 - 8 Otsu N. Discriminant and Least Square Threshold Selection[M]. Proc 4 IJCP, 1978. 592-596.
 - 9 Xia Mingliang, Li Chao, Liu Zhaonan, *et al.*. Adaptive threshold selection method for Shack-Hartmann wavefront sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(2): 334-340.
夏明亮, 李 抄, 刘肇南, 等. Shack-Hartmann 波前传感器图像自适应阈值的选取[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(2): 334-340.
 - 10 Ren Jianfeng, Rao Changhui, Li Mingquan. An adaptive threshold selection method for Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. Opto-Electronic Engineering, 2002, 29 (1): 1-5.
任剑峰, 饶长辉, 李明全. 一种 Hartmann-Shack 波前传感器图像的自适应阈值选取方法[J]. 光电工程, 2002, 29(1): 1-5.
 - 11 Liang Chun, Liao Wenhe, Shen Jianxin, *et al.*. An adaptive detecting centroid method for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(2): 430-434.
梁 春, 廖文和, 沈建新, 等. Hartmann-Shack 波前传感器的自适应质心探测方法[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 430-434.
 - 12 Xia Aili, Ma Caiwen. Measurement of focal spot centroid based on image processing [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2011, 22(10): 1542-1545.
夏爱利, 马彩文. 基于图像处理技术的光斑质心高精度测量[J]. 光电子·激光, 2011, 22(10): 1542-1545.
 - 13 Niu Saisai, Shen Jianxin, Liang Chun, *et al.*. Centroid optimization of Hartmann-Shack wave-front sensor human eye aberration detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 3016-3024.
钮赛赛, 沈建新, 梁 春, 等. 人眼像差探测哈特曼波前传感器的质心优化[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(12): 3016-3024.
 - 14 Cao G R, Yu X. Accuracy analysis of a Hartmann-Shack wavefront sensor operated with a faint object [J]. Opt Eng, 1994, 33(7): 2331-2335.
 - 15 Zhang Yujin. Image Engineering (I) Image Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. 73-75.
章毓晋. 图像工程(上册)图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. 73-75.
 - 16 Li Jing, Gong Yan. Insert algorithm of wavefront reconstructions for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(12): 120101.
李 晶, 巩 岩. 哈特曼-夏克波前传感器的插值重构算法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(12): 120101.

栏目编辑:何卓铭