



DOI: 10.12086/oe.2018.170699

哈特曼传感器子孔径光斑的局部自适应阈值分割方法

李旭旭^{1,2,3}, 李新阳^{1,2*}, 王彩霞^{1,2}¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;³中国科学院大学, 北京 100049

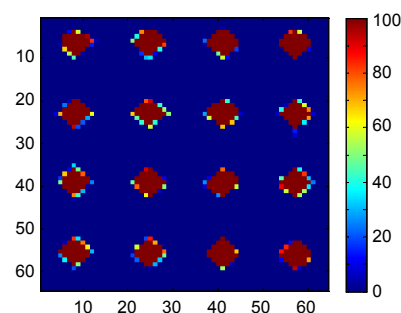
摘要: 夏克-哈特曼传感器的质心偏移估计精度受噪声的影响非常大, 在传统质心法(CoG)中尤为突出, 因而阈值的选取十分重要。本文提出了一种基于统计排序的局部自适应阈值分割方法, 并与传统的全局阈值法进行对比, 发现自适应的局部阈值能够更加有效地分割出阵列光斑, 从而减小背景噪声对质心估计的影响, 降低波面复原误差。本文通过静态相差的测量实验, 从质心偏移估计的精度和波前复原精度两个方面进行分析, 验证了该方法的有效性。另外, 本文发现自适应阈值结合灰度加权的质心提取方法, 是对传统质心法的较好改进, 可以有效提高峰值信噪比大约 10~40 的光斑质心提取精度。

关键词: 夏克-哈特曼传感器; 点源光斑; 自适应阈值; 质心提取; 质心算法

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

引用格式: 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): 170699



Local adaptive threshold segmentation method for subaperture spots of Shack-Hartmann sensor

Li Xuxu^{1,2,3}, Li Xinyang^{1,2*}, Wang Caixia^{1,2}¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The accuracy of centroid estimation for Shack-Hartmann wavefront sensor is highly dependent on noise, especially for the centre of gravity (CoG) method. Therefore, threshold selection is very important. This paper proposes a local adaptive threshold segmentation method based on statistical rank, which can reduce the influence of uneven background noise and decrease the wavefront reconstruction error more effectively, comparing with the traditional global threshold method. An experiment measuring static aberration was conducted, the accuracy of centroid estimation and wavefront reconstruction both testify the effectiveness of this method. Besides, we found that combining the local adaptive threshold method and intensity weighted centroiding (IWC) method can improve the performance of traditional centre of gravity method. It achieves higher centroiding accuracy under SNR_p between 10~40

收稿日期: 2017-12-19; 收到修改稿日期: 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61505215)

作者简介: 李旭旭(1989-), 女, 博士, 主要从事自适应光学系统哈特曼传感器的质心提取算法的研究。E-mail: lixuxu188@163.com

通信作者: 李新阳(1971-), 男, 博士, 研究员, 主要从事自适应光学及其应用中的信号处理和自动控制技术的研究。

E-mail: xyli@ioe.ac.cn

conditions.

Keywords: Shack-Hartmann sensor; point source spots; local adaptive threshold; centroiding; centre of gravity

Citation: Li X X, Li X Y, Wang C X. Local adaptive threshold segmentation method for subapture spots of Shack-Hartmann sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(10): 170699

1 引言

夏克-哈特曼传感器由于采用微透镜阵列结构,大大提高了光束的透过率和利用率,逐渐成为波前探测领域的核心器件^[1-4]。光斑偏离子孔径中心的距离对应了局部的波前斜率,其定位精度直接影响到波前复原和波前校正的效果。传统质心法(centre of gravity, CoG),又称为重心法,由于原理简单、计算量小、易于实现等特点而被广泛采用,然而随着噪声的引入和信号强度的降低,算法计算精度逐渐降低,甚至失效^[5]。因此阈值的选择对质心法的计算结果至关重要。

对此,姜文汉、沈峰等^[6]提出了存在最优阈值可以有效降低噪声对质心计算结果的影响。马晓燊等^[7]基于高斯光斑模型分析了噪声对质心估计的影响,提出了背景均值加上三倍标准差的最佳阈值选取方法($T_n = \mu_n + 3\sigma_n$),为阈值的选取提供了可靠的参考,然而噪声参数的统计成为了最佳阈值选取的制约因素。这是因为,在实际光斑图中,信号与噪声的界限是模糊的,难以将其完全分离而得到准确的噪声参数。另外,对于阵列光斑来说,子孔径间的信号强度和背景噪声差异是不可避免的,基于子孔径的局部自适应阈值十分有必要。因此,本文提出了一种基于子孔径内统计排序的局部阈值选取方法,实验表明分割光斑的效果较好。

另外,为了进一步对光斑信号进行增强,也有学者基于传统质心法提出了一些改进,包括加权法和加窗法^[8-10]。而采用高斯函数加权法或者加窗法时,权函数或窗函数中心选取成为另一难题,往往需要多次迭代才能获得精确解^[11],不利于阵列光斑的实时处理。因此,本文采用灰度加权质心法(intensity weighted centroiding, IWC)进行质心提取,可以避免窗口中心和窗口尺寸的选择问题。实验数据分析表明结合自适应阈值和灰度加权的质心法可以最大程度上减小背景噪声的影响,提高质心偏移的估计精度和波前复原精度。

本文结构安排如下,第2部分介绍了夏克-哈特曼传感器的工作原理及探测器的噪声分布、自适应阈值的选取方法和质心估计精度的评价指标。第3部分介绍了本文的实验设计。第4部分展示了详细的实验结

果并进行了分析,结论在第5部分阐述。

2 理论分析

2.1 夏克-哈特曼传感器原理及噪声分布

夏克-哈特曼传感器如图1所示,畸变的光束通过微透镜阵列,在焦平面聚焦形成点源光斑。焦平面上放置的CCD(或CMOS)对光斑阵列信号进行采样和记录,通过计算光斑的偏移量 Δx 和 Δy 得到局部波前的斜率 g_x 和 g_y ,从而进行波前复原和校正。

$$\begin{cases} g_x = \tan \theta_x = \frac{\Delta x}{f} \\ g_y = \tan \theta_y = \frac{\Delta y}{f} \end{cases} \quad (1)$$

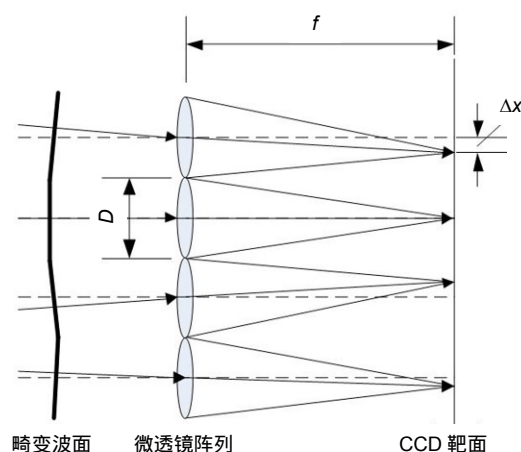


图1 夏克-哈特曼传感器原理图

Fig. 1 Principle diagram of Shack-Hartmann sensor

衍射主光斑宽度约为 $W = 2\lambda f/D$,其中 λ 为光波波长, D 为微透镜的直径, f 为微透镜焦距。假设CCD像素尺寸为 p ,则主光斑直径占有的像素数 w 约为

$$w = \frac{W}{p} = 2 \frac{\lambda f}{pD} \quad (2)$$

CCD在记录信号的同时,会引入多种噪声,包括:读出噪声、光子噪声、暗电流等^[5],且靶面的不同区域包含噪声的成分不同。图2给出了相机靶面不同区域的噪声分布情况,其中外围正方形区域代表整个相

机靶面,大圆形代表光束横截面,小圆形区域代表由卡塞克林结构的光路形成的中心遮拦,而虚线构成的一个个小正方形则代表光束被阵列透镜分割后对应的子孔径阵列。因此,图中区域1(靶面四角)主要包含的是读出噪声、暗电流等电噪声;区域2(中心遮拦)除电噪声外往往有少量信号光的散射形成背景光子噪声;区域3(光斑间隙)则包含了电噪声和更多的背景光子噪声,不同的间隙处光子噪声分布也是有差异的。

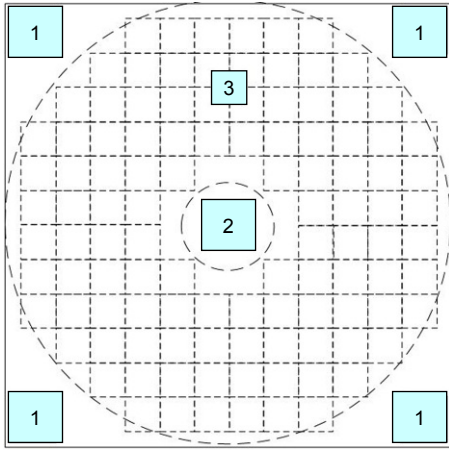


图2 相机靶面区域划分示意图
Fig. 2 Area division on a detector target surface

2.2 传统质心法及灰度加权质心法

设每个子孔径的总像素数为 $n \text{ pixels} \times n \text{ pixels}$, 传统质心法(CoG)计算式为

$$\begin{cases} x = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n j \cdot I_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij}} \\ y = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n i \cdot I_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij}} \end{cases}, \quad (3)$$

其中: I_{ij} 是该子孔径的第 i 行、第 j 列像素的灰度值。灰度加权质心法计算式:

$$\begin{cases} x = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n j \cdot I_{ij}^q}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij}^q} \\ y = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n i \cdot I_{ij}^q}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij}^q} \end{cases}. \quad (4)$$

该方法不需要提前选定权函数或者窗口,就可以对光斑进行增强,抑制噪声的影响。经验表明, q 的取值一般在 1~3 之间,为了减小计算量及实现难度,通常取整数。

2.3 阈值法去噪声

减阈值操作可以有效降低背景噪声对质心估计的影响,已经逐步成为质心计算的必要预处理步骤。由于像素灰度不存在负值,因而减去阈值后需要将负值置 0,对第 i 行、第 j 列像素 I_{ij} 取阈值的计算公式为

$$I'_{ij} = \begin{cases} I_{ij} - T, & I_{ij} \geq T \\ 0, & I_{ij} < T \end{cases}, \quad (5)$$

其中 T 为所选取的阈值。

2.3.1 全局阈值和迭代阈值

传统的阈值选取方法仅为整个靶面选取统一的阈值,通常对靶面的四角区域(图 2 中的 1 区)进行噪声统计得到均值 μ_{n1} 和标准差 σ_{n1} , 从而取得阈值 $T_{n1} = \mu_{n1} + 3\sigma_{n1}$ 。为对比起见,本文也分析了中心遮拦区域和子孔径间隙处的噪声均值 μ_{n2} 、 μ_{n3} , 及其标准差 σ_{n2} 和 σ_{n3} , 并分别取得其对应的阈值 $T_{n2} = \mu_{n2} + 3\sigma_{n2}$ 和 $T_{n3} = \mu_{n3} + 3\sigma_{n3}$ 。

由于实际靶面中各个子孔径的光斑强度有明显差异,噪声情况也并不相同,而统一阈值无法区分子孔径的差异,造成有的子孔径阈值偏高,另一些子孔径阈值偏低,无法取得最佳阈值。

因此有学者提出采用改进的 Otsu 法选取阈值^[12], 通过不断迭代,调整阈值,直到阈值分割得到的前景和背景的两类方差最大。但由于其迭代的本质,算法复杂且耗时,仅适合仿真计算。

2.3.2 局部自适应阈值的选取方法

本文提出的自适应阈值方法,采用当前子孔径的部分灰度值统计噪声的均值和标准差,再选取最佳阈值。若 μ_l 和 σ_l 分别表示第 l 个子孔径的噪声均值和标准差,则第 l 个子孔径的阈值为

$$T_l = \mu_l + k\sigma_l, \quad (6)$$

其中 k 通常取 3,也可以根据情况取 0~5 之间的整数。而当前子孔径的噪声估计方法如下:

- 1) 首先,估计主光斑所占的像素个数 m_s :

$$m_s = \lceil \pi(w/2)^2 \rceil, \quad (7)$$

本文实验中 m_s 约为 30~40;

- 2) 然后,将该子孔径内的所有像素灰度按照从大到小排序;

- 3) 对于 $n \times n$ 像素的子孔径,取最小的 $n^2 - m_s$ 个像素灰度估计均值 μ_l 和标准差 σ_l 。

这样,每个子孔径的阈值仅需要一次估计即可得到,避免了繁复的迭代。同时又结合了当前子孔径的实际噪声和信号水平。

2.3.3 自适应阈值的处理效果

为了最大限度地提高光束透过率,夏克-哈特曼传感器的微透镜多为方形且紧密排列,因而实际形成的光斑,会呈现“十”字形粘连状态(见图 3(a))。尤其在信号较强时,光斑在上下左右四个方向形成较为明显的延长线。该区域理论上属于信号,但是由于强度相对于较弱,更容易受到噪声的影响,对质心估计反而不利。

图 3 显示了不同阈值处理后的光斑阵列图。为了

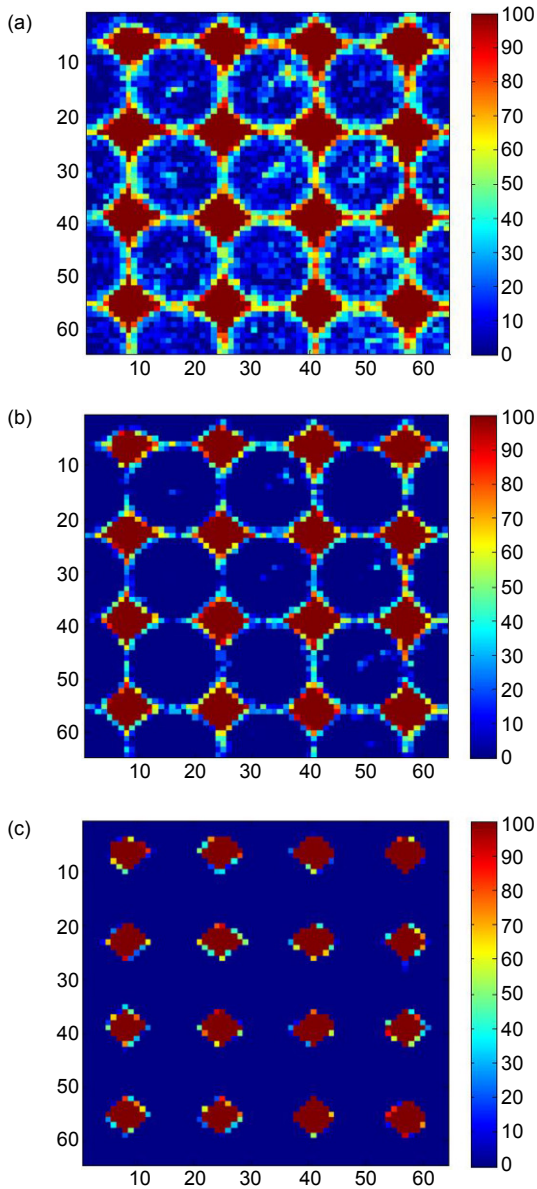


图 3 经过不同阈值处理的光斑阵列图。(a) 全局阈值 T_{n1} ; (b) 全局阈值 T_{n3} ; (c) 局部自适应阈值

Fig. 3 Spot array pattern obtained by different thresholding methods. (a) Global thresholding T_{n1} ; (b) Global thresholding T_{n3} ; (c) Local adaptive thresholding

显示次级信号的细节,伪彩色图片的最大值设为 100ADU(深红色区域为有效光斑区)。可以看到,根据四角区域估计的全局阈值,对噪声去除并不彻底;而根据某个子孔径间隙估计的全局统一阈值忽略了子孔径间的差异,仅有部分子孔径处理效果较好,而其他子孔径则仍有杂散噪声残余;本文提出的局部自适应阈值利用当前子孔径的噪声特性,可以更有针对性地去除背景噪声,保留主光斑区域。

3 实验设计及参数指标

3.1 实验光路设计

本文实验光路如图 4 所示,激光器光源经过准直后进入测量系统,先后经过变形镜、反射镜和缩束系统后透过微透镜阵列,到达 CMOS 相机靶面。通过对高压放大器施加电信号,可以产生固定的静态相差。

另外,通过调节激光器光功率、相机曝光时间和在光路中加衰减片(衰减倍数约为 15),可以控制采集到的光斑信号强度。曝光时间设置 10 ms, 5 ms, 2 ms, 1 ms 四档,用于获取不同信噪比等级的阵列光斑图。

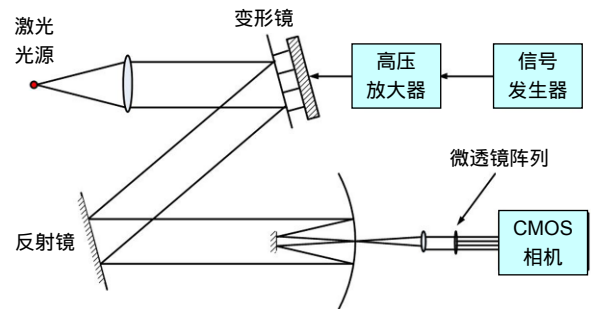


图 4 静态相差测量实验光路图

Fig. 4 The light path schematic of static aberration measuring experiment

3.2 质心误差评价指标及信噪比度量

不同于理论仿真的是,在实际实验中,理想的光斑偏移位置是未知的,为了评价质心估计误差,通常有两种解决方案。一种解决方案是,对于静态相差,可以假设光斑偏移量为恒定的,通过计算多次测量的起伏标准差 σ_x 和 σ_y 来进行评价

$$\begin{cases} \sigma_x = \sqrt{\langle (x - \bar{x})^2 \rangle} \\ \sigma_y = \sqrt{\langle (y - \bar{y})^2 \rangle} \end{cases} \quad (8)$$

另一种是以信噪比极高时的质心估计结果 (x_0, y_0) 为标准质心位置, 并以此作为较低信噪比时的质心位置参考, 用于计算质心偏移误差(CEE)的 RMS 值 Δx_{CEE} 和 Δy_{CEE} :

$$\begin{cases} \Delta x_{CEE} = \sqrt{\langle (x - x_0)^2 \rangle} \\ \Delta y_{CEE} = \sqrt{\langle (y - y_0)^2 \rangle} \end{cases} \quad (9)$$

本文采用这两种评价指标来判断在不同信噪比下质心估计的准确性。式中 $\langle \cdot \rangle$ 表示总体平均。

由于实际光斑的信号与噪声之间没有明显的界限, 因而信噪比(SNR)的估计值往往随着不同噪声区域的界定而有所差异, 但是同样计算标准下只要能有效衡量子孔径高低信噪比的状态即可。因此本文采用基于高斯光斑模型定义的峰值信噪比^[13] :

$$SNR_p = \frac{I_p - \mu_n}{\sigma_n} \quad (10)$$

其中: I_p 为取阈值前的子孔径光强最大值, μ_n 为背景噪声的均值, σ_n 为噪声标准差。经试验, 本文取子孔径内灰度值最小的 156 个像素为噪声, 估计其均值和标准差。另外, 多帧测量时, 特定子孔径的峰值也并非固定不变, 而是在某个值上下起伏(存在信号光子噪声)。因此可计算连续多帧峰值的平均值作为该子孔径的信号峰值。

质心偏移误差与信噪比有较强的负相关性, 即随着信噪比的降低质心偏移误差会相应增大, 这是由噪声的本质决定的, 好的质心提取算法可以在相对低的噪声水平上获得尽可能高的质心提取精度。

4 实验结果及分析

4.1 背景噪声及信噪比估计

表 1 给出了不同曝光时间下靶面四角、中心遮拦

和光斑间隙处的噪声均值和标准差统计结果及相应的最佳阈值。光斑间隙指相邻的 2×2 光斑围起来的区域中避开粘连信号的小正方形区域(约 10 pixels $\times$ 10 pixels)。表中峰值指靶面上光强最强的子孔径的信号峰值, 代表相应曝光时间下的靶面光强度, 可以看出靶面整体光强与曝光时间成正相关。当光路中仅有 1 个衰减片时, 四档曝光时间对应的信号水平分别为 L1~L4, 在光路中加入 2 个衰减片时, 对应信号水平为 L5~L7。

由表 1 可看出, 四角区域估算结果仅能代表相机本底噪声(读出噪声, 暗电流等), 中心遮拦处噪声比四角偏大是因为有部分信号光的射散(部分信号光子噪声), 而子孔径间隙处的估计相对较接近实际噪声水平。并且随着信号强度增大, 三者差异逐渐明显。

4.2 质心偏移误差

从 4.1 的分析看出, 高信噪比下(L1), 靶面上的噪声分布较不均匀, 可以用来模拟实际场景下不均匀背景光的影响。虽然相同曝光时间下不同子孔径之间的光斑强度有所差异, 但是同一个子孔径的光强与曝光时间有较强的正相关, 因此可将靶面(108 个子孔径)看成一个整体进行平均, 计算同一靶面子孔径间起伏误差的 RMS 值。表 2 记录了对 L1~L4 信噪比下的阵列光斑采用不同的阈值方法时, 100 帧质心提取结果的起伏误差(式(8))。表 3 则记录了 L2~L4 信噪比下, 相对于标准质心位置(L1)的偏移误差(式(9)), 同样地, 取 108 个子孔径下的 RMS 值进行对比。可以看出自适应阈值法取得的质心起伏误差最小, 计算结果最稳定。

4.3 波前复原误差

图 5 显示了最高信噪比下(L1)采用自适应阈值加重心法计算质心并复原得到的波面。由于此时信噪比

表 1 靶面不同区域噪声分布的统计参数

Table 1 Statistical parameters of noise at different target surface regions

信噪比等级			四角			中心			间隙			靶面上最高信噪比	
衰减片	曝光时间/ms		μ_{n1}	σ_{n1}	T_{n1}	μ_{n2}	σ_{n2}	T_{n2}	μ_{n3}	σ_{n3}	T_{n3}	I_p	SNR_p
L1	1	10	100.9	4.1	114	109.4	6.4	129	120.4	9.8	150	4566	465
L2	1	5	99.4	3.8	111	103.3	5.0	119	108.8	6.4	128	2238	349
L3	1	2	98.8	3.1	109	99.9	4.1	113	102.1	4.6	116	882	191
L4	1	1	98.2	3.0	108	98.9	3.5	110	100.0	3.9	112	481	123
L5	2	10	98.5	3.4	109	98.8	3.7	110	99.3	4.4	113	307	69
L6	2	5	98.1	3.4	109	98.6	3.5	110	99.0	4.1	112	153	37
L7	2	2	98.2	3.2	108	98.2	3.1	108	98.5	3.2	109	67	20

表 2 三种阈值方法在不同曝光时间下的质心起伏误差

Table 2 Deviation of CEE under different exposure time using three thresholding methods

阈值方法	10 ms		5 ms		2 ms		1 ms	
	RMS- σ_x	RMS- σ_y	RMS- σ_x	RMS- σ_y	RMS- σ_x	RMS- σ_y	RMS- σ_x	RMS- σ_y
T_{n1}	0.024	0.022	0.034	0.031	0.049	0.044	0.064	0.059
T_{n3}	0.021	0.019	0.031	0.026	0.044	0.038	0.059	0.053
自适应阈值	0.019	0.016	0.029	0.023	0.041	0.035	0.056	0.050

表 3 三种阈值方法的质心偏移估计误差对比

Table 3 Comparison of the CEE using three thresholding methods

阈值方法	5 ms		2 ms		1 ms	
	Δx_{CEE}	Δy_{CEE}	Δx_{CEE}	Δy_{CEE}	Δx_{CEE}	Δy_{CEE}
T_{n1}	0.121	0.106	0.099	0.072	0.095	0.068
T_{n3}	0.066	0.042	0.074	0.046	0.082	0.057
自适应阈值	0.047	0.030	0.061	0.043	0.076	0.054

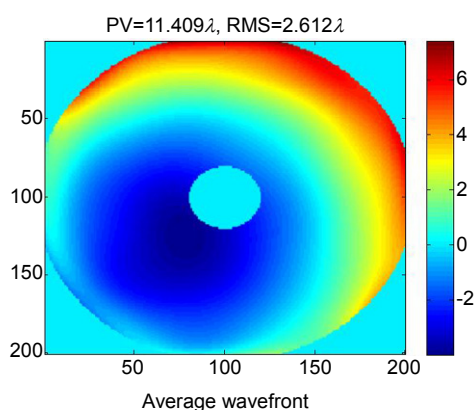


图 5 测量得到的标准波面

Fig. 5 The estimated standard wavefront

很高，波面复原的起伏误差很小，可以将其作为标准波面，为低信噪比时提供参考。标准波面的 PV 值约为 11.4λ、RMS 值为 2.6λ(绿光，波长为 532 nm)。

图 6 给出了光强 L2 下采用不同阈值方法时的波面复原误差，并计算了相应的复原误差的 PV 值和 RMS 值。从图中可看出，自适应阈值法波面复原误差最小。

4.4 灰度加权质心法的参数优化

对灰度加权参数 q 的试验发现， q 的取值并不是越大越好。图 7 给出了不同信噪比等级下， q 的取值与质心估计起伏误差之间的关系。发现最佳的 q 值通常在 1~2 之间，不应超过 3。在较高信噪比下，质心提取精度已经足够，IWC 法改善并不明显；然而在中低信噪比下(L6， SNR_p 小于 40)，质心提取精度有所改善，最佳 q 值大约在 1.5 处。

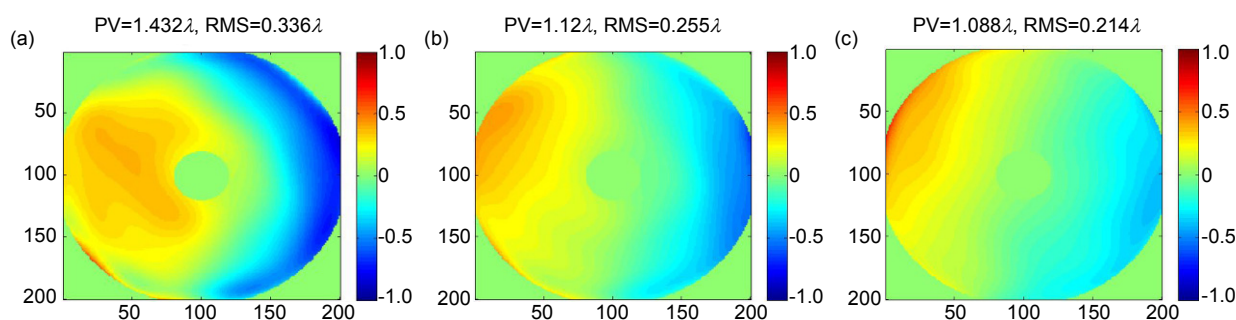


图 6 采用不同阈值方法时的复原误差。(a) 全局阈值 T_{n1} ；(b) 全局阈值 T_{n3} ；(c) 局部自适应阈值

Fig. 6 Wavefront reconstruction error using different threshold methods. (a) Global thresholding T_{n1} ; (b) Global thresholding T_{n3} ; (c) Local adaptive thresholding

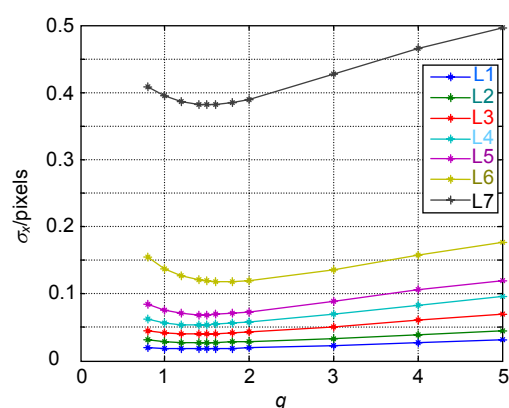


图7 不同信噪比下参数 q 与质心测量起伏的关系
Fig. 7 Relationship between q and deviation of centroiding error under different SNR levels

5 结论

本文基于静态相差测量的实验数据,分析了哈特曼传感器的噪声分布情况,并提出了一种基于统计排序的局部自适应阈值分割方法。该方法根据当前子孔径的灰度信息统计局部背景噪声的参数,与统一阈值相比更能适应子孔径间的差异,有利于选择适合当前子孔径的最佳阈值,从而保留主要光斑区域,有效地分割出哈特曼传感器的阵列光斑。质心估计误差和波前复原误差的计算结果都表明了该方法的有效性。灰度加权质心法(IWC)相对于其他加权法和加窗,具有参数选择简便,增强效果显著的特点。试验发现 q 的最佳取值大约为1.5。通过自适应阈值和灰度加权算法的结合,可以使得峰值信噪比在10~40的光斑质心提取精度获得较大提高。

参考文献

- [1] Lukin V P, Botygina N N, Emaleev O N, et al. Wavefront sensors for adaptive optical systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, **7828**: 78280P.
- [2] Vargas J, González-Fernandez L, Quiroga J A, et al. Shack-Hartmann centroid detection method based on high dynamic range imaging and normalization techniques[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(13): 2409–2416.
- [3] Rao C H, Zhu L, Zhang L Q, et al. Development of solar adaptive optics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(3): 170733.
饶长辉, 朱磊, 张兰强, 等. 太阳自适应光学技术进展[J]. *光电工程*, 2018, **45**(3): 170733.
- [4] Jiang W H. Overview of adaptive optics development[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(3): 170489.
姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. *光电工程*, 2018, **45**(3): 170489.
- [5] Ares J, Arines J. Effective noise in thresholded intensity distribution: influence on centroid statistics[J]. *Optics Letters*, 2001, **26**(23): 1831–1833.
- [6] Shen F, Jiang W H. A method for improving the centroid sensing accuracy threshold of Hartmann wavefront sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1997, **24**(3): 1–8.
沈锋, 姜文汉. 提高 Hartmann 波前传感器质心探测精度的阈值方法[J]. *光电工程*, 1997, **24**(3): 1–8.
- [7] Ma X Y, Rao C H, Zheng H Q. Error analysis of CCD-based point source centroid computation under the background light[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(10): 8525–8541.
- [8] Thomas S, Fusco T, Tokovinin A, et al. Comparison of centroid computation algorithms in a Shack-Hartmann sensor[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2006, **371**(1): 323–336.
- [9] Yin X M, Li X, Zhao L P, et al. Adaptive thresholding and dynamic windowing method for automatic centroid detection of digital Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(32): 6088–6098.
- [10] Vyas A, Roopashree M B, Prasad B R. Centroid detection by Gaussian pattern matching in adaptive optics[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2010, **1**(26): 32–37.
- [11] Baker K L, Moallem M M. Iteratively weighted centroiding for Shack-Hartmann wave-front sensors[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(8): 5147–5159.
- [12] Ren J F, Rao C H, Li M Q. An adaptive threshold selection method for Hartmann-Shack 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.
- [13] Li X X, Li X Y, Wang C X. Optimum threshold selection method of centroid computation for Gaussian spot[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, **9675**: 967517.

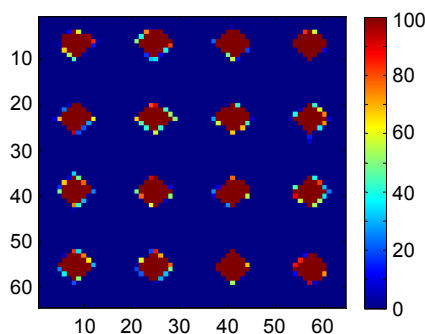
Local adaptive threshold segmentation method for subapture spots of Shack-Hartmann sensor

Li Xuxu^{1,2,3}, Li Xinyang^{1,2*}, Wang Caixia^{1,2}

¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China



Spot array pattern obtained by local adaptive thresholding method

Overview: The accuracy of centroid estimation for Shack-Hartmann wavefront sensor is highly dependent on noise, especially for the centre of gravity (CoG) method. Therefore, threshold selection is very important. A globally estimated threshold using the best threshold method (mean of noise plus three times of its standard deviation) ignores the difference between subaptures, thus causing large centroiding estimation error for subaptures with higher noise level. Therefore we propose an adaptive threshold segmentation method based on statistical rank, which can reduce the influence of background noise effectively. The pixels within a subaperture is ranked by their intensities at first. The mean and standard deviation of the subaperture noise is estimated using the last certain numbers of pixels. The number of pixels used for noise estimation is determined by estimating the size of Shack-Hartmann spots, which is related to the focal length, the wavelength, the diameter of micro lens and the size of pixel.

An experiment measuring static aberration was conducted, the accuracy of centroid estimation and wavefront reconstruction both testify the effectiveness of this method. Different from theoretical simulations, the ideal position of a spot is unknown in real experiments. However we have two ways to evaluate the accuracy of centroiding methods. Firstly, the actual position of a certain subaperture is constant for static aberrations, and the variation of centroiding for a subaperture within multiple frames can be calculated and used as a criteria. Another is that we calculate the center of a spot under high signal-to-noise ratio (SNR) as the ideal position, which can be used to estimate the errors under low SNR conditions. Since the intensity of a subaperture increases with the exposure time, we controlled the signal-to-noise ratio by adjusting the exposure time of the camera, which was set as 10 ms, 5 ms, 2 ms and 1 ms. Furthermore, the wavefront reconstruction errors (PV and RMS) had been calculated and displayed within this paper.

We also found that combining adaptive threshold method with intensity weighted centroiding (IWC) method can improve the performance of traditional centre of gravity method. It achieves higher centroiding accuracy under low SNR conditions ($10 < SNR_p < 40$), comparing with the traditional method. Although several methods have been proposed to improve the CoG method, such as using Gaussian weighting function or window, the center of the weighting function or the window is difficult to define at first. However, IWC method can avoid this problem by simply using the intensities of the spot itself and the choice of parameter is much more flexible and easy.

Citation: Li X X, Li X Y, Wang C X. Local adaptive threshold segmentation method for subapture spots of Shack-Hartmann sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(10): 170699

Supported by National Natural Science Foundation of China (61505215)

* E-mail: xyli@ioe.ac.cn