

文章编号 1004-924X(2011)12-3016-09

人眼像差探测哈特曼波前传感器的质心优化

钮赛赛¹, 沈建新^{1*}, 梁 春¹, 张运海²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

2. 苏州六六视觉科技股份有限公司, 江苏 苏州 215005)

摘要:为提高自适应光学系统中 Hartmann-Shack 波前传感器的动态测量范围和测量精度,对由 CCD 采集的波前光斑图进行了质心探测研究。介绍了波前传感器的工作原理,根据 127 单元传感器的结构特征和实际人眼光斑图的畸变特点,提出了一种动态定位光斑区域、动态分割区域内部阈值以及锁定最优探测窗口的自适应光斑质心探测方法。讨论了该方法中阈值等级选取对人眼光斑图质心探测的影响,并通过仿真和实验分析了算法的质心探测精度和算法对噪声影响的鲁棒性。实验结果表明,光斑区域内选取阈值等级为总等级数的 $(50\pm 3)\%$ 时最合适;与其他方法相比,自适应质心探测方法的探测误差减小了 60%以上;将该探测方法运用至自适应光学视网膜成像系统的波前传感器中,可将人眼像差 RMS 值从 0.728λ 闭环校正到 0.081λ ($\lambda=785\text{ nm}$),达到衍射极限,并获得视网膜图像。本方法针对光斑特征选择不同实验参数,弥补了传统算法的局限性,基本满足了人眼像差测量的可行性和实用性。

关键词:自适应光学;Hartmann-Shack 波前传感器;质心探测;人眼像差

中图分类号:TP212.14;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111912.3016

Centroid optimization of Hartmann-Shack wave-front sensor for human eye aberration detection

NIU Sai-sai¹, SHEN Jian-xin^{1*}, LIANG Chun¹, ZHANG Yun-hai²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Suzhou 66 Vision Technology Co. Ltd., Suzhou 215005, China)

* Corresponding author, E-mail: cadatc@nuaa.edu.cn

Abstract: In order to improve the dynamic measurement range and measurement accuracy of the Hartmann-Shack Wavefront Sensor (HSWS) in an adaptive optics system, the centroid detection for a wavefront spot pattern collected by a CCD is researched. The principle of HSWS is introduced and an adaptive centroid detection method by dynamic positioning spot region, dynamic segmenting threshold level and locking optimal detection window is presented according to the structure features of HSWS with 127 units and the distortion characteristics of actual human eye spot pattern. The effects of threshold level selection on human eye spot centroid detection are discussed and the centroid detection accuracy and noise robustness of the method are analyzed through simulation and experiments. Exper-

收稿日期:2011-05-03;修订日期:2011-05-26.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA020804);2010 年江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(No. CX10B_107Z)

imental results indicate that selecting the threshold level to be $(50 \pm 3)\%$ of the total grade amount is more appropriate and the centroid detection error can be decreased by 60% or more as compared with that of other detection methods. By using adaptive centroid detection method in the HSWS of an adaptive optical retina imaging system, human eye aberration can be reduced from 0.728λ to 0.081λ in RMS($\lambda=785$ nm) through a closed loop correction. Moreover, the system can reach the diffraction limit basically and can obtain a retina image. These results show that the adaptive centroid detection method can select different experimental parameters aimed at the characteristics of spots, which makes up the limitations of the general methods. It meets the feasibility and practicability of human eye aberration measurement.

Key words: adaptive optics; Hartmann-Shack wavefront sensor; centroid detection; human eye aberration

1 引 言

Hartmann-Shack(H-S)波前传感器是自适应光学系统的核心部件^[1],主要用于实时测量波前的相位信息,它对畸变波前的感知能力很大程度上决定了自适应光学系统的工作能力,其中光斑质心探测和计算精度是波前测量的主要性能指标。H-S波前传感器中 CCD 采集的光斑图像除了有由目标背景、杂散光以及电路直流偏置等原因引起的均匀背景噪声外,还存在随机噪声,这些噪声将会严重影响光斑质心探测精度^[2]。

近几年随着自适应光学在眼科医疗等民用领域的迅速发展^[3],国内外众多研究者也对光斑质心探测做了更深一步的研究^[4-9],同时提出了很多比较经典的质心探测算法。应用比较普遍的有阈值分割法和窗口区域法,前者是对光斑图像全局设定阈值以提高图像的信噪比,如任剑峰等人提出的基于类别方差的自适应门限求取阈值的质心探测方法^[10];后者是通过调整探测窗口大小以减少噪声的影响,如 Prieto 等人提出的迭代缩小探测窗口尺寸的质心探测方法^[11]。Baik 等人还提出了幂因子质心探测算法^[12],通过对图像像素灰度值乘方处理,以加大图像中光斑信号与噪声的区分程度。但是上述都是对光斑图像采取全局处理的方法,对一些图像质量较高的光斑图能取得较好效果,而实际人眼光斑图的各光斑形状大小不一致、亮度不均匀、噪声影响严重,指定大小的探测窗口会导致探测窗口与部分光斑不相吻合,全局阈值处理导致部分光斑的有效信息衰减,因此这些方法对提高人眼光斑质心探测精度仍有

一定的局限性。

本文在分析 H-S 波前传感器微透镜结构参数的基础上提出一种动态定位光斑区域、动态分割阈值等级以及确定最优探测窗口的自适应光斑质心计算方法。文章通过数学仿真的方法分析了算法的质心探测精度和算法对噪声影响的鲁棒性,最后将本方法运用至自适应光学视网膜成像系统中,通过人眼像差测量、校正实验验证了本方法在自适应光学系统中的可行性,实验结果表明这种方法能适用于 H-S 波前传感器的人眼光斑图像质心探测。

2 H-S 波前传感器工作原理

H-S 波前传感器的工作原理如图 1 所示,畸变波阵面在空间域内被一组孔径大小和焦距均相等的微透镜阵列分割成若干个等间距的小单元,称为子孔径,子孔径内光波通过透镜在探测器上聚焦成像为光斑(放大图中的灰色区域),探测器一般选用精度高、量子效率高和可靠性高的 CCD,CCD 所在的位置理论上能确保每个微透镜和一定数目的像素相对应。子孔径内实际波前的斜率正比于光斑实际质心点(图中黑色圆点)与理想质心点(O)的偏移量 Δx 、 Δy ,最后根据偏移量,运用波前复原算法重构畸变波前。本文中 H-S 波前传感器采用透镜数为 127、呈正六边形分布的微透镜阵列,微透镜焦距为 15 mm,直径为 0.18 mm。图 2 是 CCD 探测到的 H-S 子孔径模拟眼光斑图,为方便光斑区域探测和质心计算,按图示轨迹对各光斑依次从 1 至 127 进行编号,相邻光斑的理论距离约为 29 pixel。

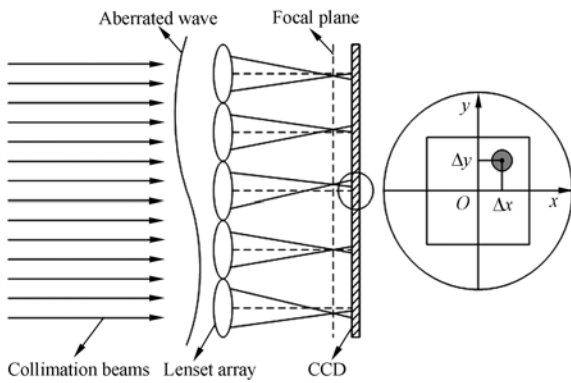


图 1 H-S 波前传感器工作原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of H-S wavefront sensor

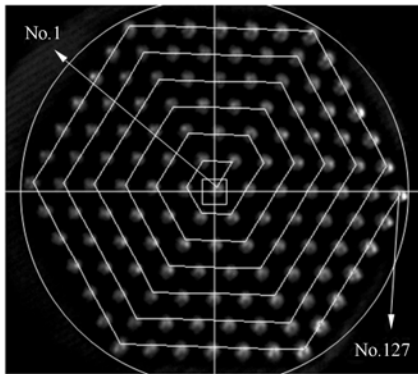


图 2 H-S 光斑图

Fig. 2 Spot pattern of H-S

3 自适应质心探测方法

本文所述的质心探测方法涉及了光斑区域、光斑、探测窗口等容易混淆的术语,现以 1 号光斑为例进行说明,见图 3。

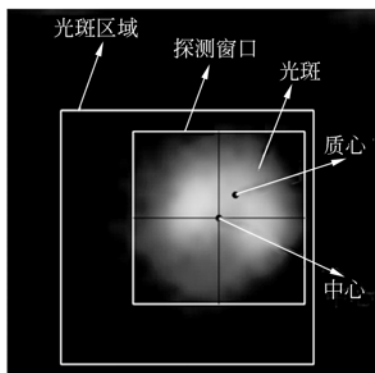


图 3 质心探测中术语说明

Fig. 3 Term explanation in centroid detection

3.1 动态定位光斑区域

传统的子孔径光斑区域探测大多通过匹配模板实现^[13],但是当被测像差存在较大像差时,光斑形状畸变程度以及光斑间的相对位置,特别是边缘处的子孔径,都随之发生较大改变,导致匹配模板不能定位全部光斑,影响质心探测。

本文采用动态循迹的方法定位各个光斑区域。首先根据光路中的标定关系确定中心 1 号光斑的近似位置,并构建光斑区域,如图 2 所示;然后在光斑区域内计算光斑质心(3.2、3.3 中介绍),并按光斑编号顺序和理论间距确定下一光斑区域。光斑区域尺寸没有特别限制,唯一的要求就是确保每个区域内只包含一个光斑。由于动态定位光斑区域建立在前一光斑质心的基础上,可避免累积误差,保证光斑区域定位的准确性。

3.2 探测光斑

在光斑区域内通过自适应阈值分割的方法提取光斑,同时确定光斑中心位置,具体步骤如下:

Step1 在光斑区域内对像素的灰度值由大到小排序,排第 n 位的灰度值为 V_n^i ,并令阈值等级为 n , i 为光斑编号;

Step2 将 V_n^i 设为阈值,对光斑区域内的像素进行灰度二值化处理,灰度小于 V_n^i 的像素置 0,其余置为 255,然后筛选出面积最大的亮斑作为参考光斑;

Step3 计算面积最大的亮斑的中心 (C_{ix}, C_{iy}) ,并作为参考光斑的中心位置。

在不同的光斑区域内自适应选用不同阈值探测光斑主要是考虑了人眼光斑图中各光斑区域内亮度分布不均匀,很难找出一个适合所有光斑探测的阈值,利用这种方法还可在各光斑内有效地消除孤立噪声点和面积较小噪声块对质心计算的影响。

3.3 质心计算

光斑探测结束后,在原始光斑图上根据参考光斑的位置及大小动态构建质心探测窗口,探测窗口是以参考光斑中心 (C_{ix}, C_{iy}) 为中心的矩形窗口。在探测窗口内根据探测光斑所选用的阈值计算光斑质心,计算公式如下:

$$\begin{cases} x_{ic} = \frac{\sum_{p=1}^X \sum_{q=1}^Y (V_i(p, q) - V_i^n) H_i(p, q) \cdot p}{\sum_{p=1}^X \sum_{q=1}^Y (V_i(p, q) - V_i^n) H_i(p, q)} \\ y_{ic} = \frac{\sum_{p=1}^X \sum_{q=1}^Y (V_i(p, q) - V_i^n) H_i(p, q) \cdot q}{\sum_{p=1}^X \sum_{q=1}^Y (V_i(p, q) - V_i^n) H_i(p, q)} \end{cases}, \quad (1)$$

其中 x_{ic} 、 y_{ic} 是光斑的质心坐标, X 、 Y 分别是探测窗口在 x 和 y 方向上的像素个数, $V_i(p, q)$ 是对应 (p, q) 像素点的灰度值, V_i^n 是光斑探测区域内阈值等级为 n 的灰度值, $H_i(p, q)$ 为海维赛德函数, 表达式为:

$$H_i(p, q) = \begin{cases} 1, V_i(p, q) \geq V_i^n \\ 0, V_i(p, q) < V_i^n \end{cases}. \quad (2)$$

算法在实现时需提供两个参数, 分别为光斑区域窗口大小和阈值等级。对不同光斑图光斑区域窗口大小可以比较固定, 默认设置为 $29 \text{ pixel} \times 29 \text{ pixel}$; 阈值等级选取直接影响光斑探测和质心探测窗口大小的选定, 进而影响光斑质心探测结果, 本文重点分析了阈值等级选取对探测结果的影响。

4 阈值等级选取对质心探测的影响

活体人眼视网膜对光反射效率较低, 传感器获得的光斑图光强能量较弱, 且引入很多噪声, 对获取的人眼光斑图进行分析有如下结论:

- (a) 单个子孔径内光斑的光强成准高斯分布;
- (b) 各光斑尺寸相差很大, 光强分布范围不均匀, 且个体差异较大;

(c) 噪声点随机分布, 强度起伏较大, 且存在孤立的高亮噪声点。

图 4 是受试者 ZHY 的右眼光斑图, 对图中光强分布范围最大(115 号)、最小(100 号)及适中(10 号)的光斑区域进行了放大显示, 右侧显示的是对应光斑区域内最亮点沿 x 和 y 方向的光强分布。在这 3 个光斑内各自划分阈值等级, 阈值等级与灰度分布的关系如图 5 所示, 其余光斑的

分布关系曲线分布于 100 号和 115 号之间。上述情况反映了若选用同一阈值或同一探测窗口势必会对质心计算产生不利影响。

分析不同阈值等级对质心探测的影响, 取 100 号、115 号光斑为研究对象, 各自按光斑区域内各个阈值等级分割提取参考光斑, 并计算光斑质心。通过取相邻阈值等级时质心位置的相对偏移量表明质心计算方法的收敛性:

$$\Delta = \sqrt{(x_{ic}^n - x_{ic}^{n+1})^2 + (y_{ic}^n - y_{ic}^{n+1})^2}, \quad (3)$$

其中 x_{ic}^n 、 y_{ic}^n 和 x_{ic}^{n+1} 、 y_{ic}^{n+1} 分别是阈值等级为 n 和 $n+1$ 时的质心坐标, i 为光斑序号。

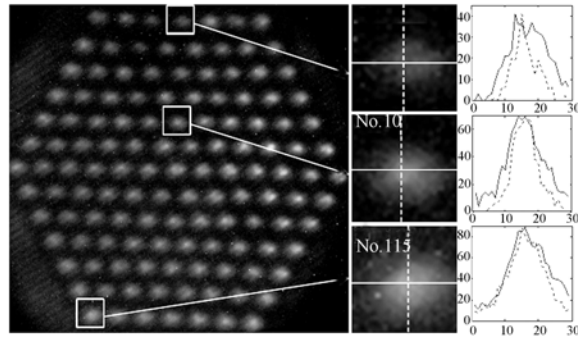


图 4 ZHY 右眼光斑图

Fig. 4 Spot pattern of ZHY's right eye

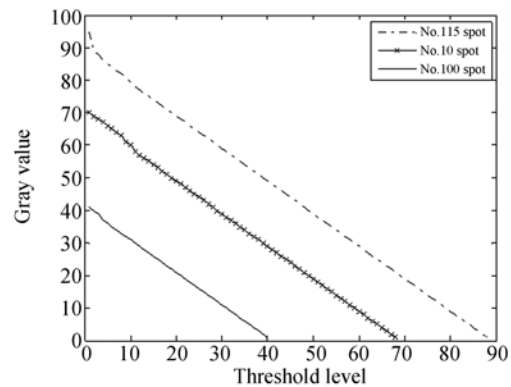


图 5 阈值等级与灰度值分布图

Fig. 5 Distribution between threshold level and gray value

相对偏移量如图 6 所示, 其中 a、b、c、d 分别是光斑在不同阈值等级时提取的光斑示意图, 亮斑面积最大的位置即为光斑位置。图中曲线可以看出, 随着阈值等级增大, 质心的相对偏移量呈逐

渐减小的趋势,当到达某一等级时,开始小于 0.05 pixel,此时光斑的质心探测精度已在允许误差范围之内。当阈值等级为 19 时,115 号光斑(a)阈值偏大,导致光斑信息丢失,此时质心位置误差较大,而 100 号光斑(b)阈值比较合适,滤噪效果比较满意,可有效地保留了有效光斑信息;当阈值等级为 39 时,100 号光斑(c)由于阈值偏小,基本丢失滤噪能力,加大了质心探测误差,这也正好解释了图中当灰度等级再次增大时,质心的相对偏移量又逐渐开始增大的合理性,而此阈值等级下的 115 号光斑(d)却又能很好地保留了光斑的有效信息。以上分析表明:不同的光斑在质心计算时也不能选用同一阈值等级,同时,100 号、115 号光斑阈值等级分别为 19 和 43 时开始保证质心位置在允许误差范围内,即各光斑选用的阈值等级应为总等级数的 50%左右(100 号光斑为 19/39, 115 号光斑为 43/86)。

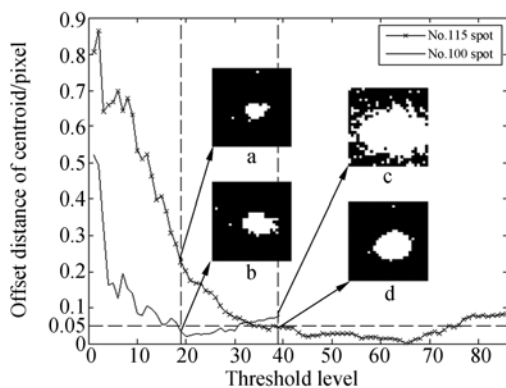


图 6 不同阈值等级时质心相对偏移距离

Fig. 6 Offsets of centroids with different threshold levels

考虑不同人眼对光斑特征影响的因素,对不同年龄、不同像差特征受试者的光斑图进行阈值等级选取。受试者 GYM, 27 岁, 右眼 $-5 \text{ m}^{-1} \cdot \text{S}$; SJX, 41 岁, 右眼 $-4 \text{ m}^{-1} \cdot \text{S}$; ZHY, 26 岁, 右眼 $-2 \text{ m}^{-1} \cdot \text{S}$; ZYH, 35 岁, 右眼 $-2 \text{ m}^{-1} \cdot \text{C}$; ZW, 30 岁, 右眼 $-1 \text{ m}^{-1} \cdot \text{S}$; GSL, 27 岁, 右眼正视眼, 各采集 20 幅光斑图。阈值等级选取如表 1 所示, 当光斑选取的阈值等级占总等级数(50±3)%时, 可满足人眼光斑质心位置在允许误差范

围内, 其中具体比例参数与人眼的像差大小有一定关系。

表 1 不同人眼光斑选取的阈值等级

Tab. 1 Selected threshold levels of different human spots

受试者	选取等级占总等级数的比例		
	光强分布最大	光强分布适中	光强分布最小
GYM	48% (31/65)	48% (28/58)	47% (23/49)
SJX	49% (37/75)	49% (30/61)	48% (24/50)
ZHY	50% (43/86)	48% (34/70)	49% (19/39)
ZYH	53% (52/99)	51% (35/69)	53% (24/45)
ZW	52% (54/103)	51% (46/90)	49% (37/75)
GSL	49% (45/92)	52% (45/86)	52% (31/60)

5 仿真与实验结果分析

通过与传统的质心探测算法比较, 分析自适应质心探测方法(自适应法)对噪声影响的鲁棒性和质心探测精度, 这些算法分别是引言中提到的阈值分割质心探测算法(阈值法)、窗口迭代缩小质心探测算法(窗口法)和光斑像素幂因子质心探测算法(幂因子法), 它们的实现过程在大量文献中都有详细介绍, 本文不作复述。实验过程是先由计算机仿真生成一个准高斯分布的光斑, 如图 7(a)所示, 其光斑区域大小为 $29 \text{ pixel} \times 29 \text{ pixel}$, 为模拟实际动态定位的光斑区域, 故将光斑偏离区域的中心, ‘+’ 为光斑质心位置, 坐标 (11.174 6, 11.174 6)。然后在光斑区域内加入均值为 0.1、方差为 0.000 8 的高斯噪声和密度为 0.035 的随机椒盐噪声, 以模拟实际光斑图中的背景噪声和亮点噪声, 如图 7(b)所示。随后设定各算法的实验参数, 自适应质心探测算法的实验参数设置如下: (1) 光斑区域窗口大小为 $29 \text{ pixel} \times 29 \text{ pixel}$, (2) 阈值等级设为该光斑总等级数的 50%; 阈值法和幂因子法的探测窗口大小设定为 $27 \text{ pixel} \times 27 \text{ pixel}$, 以光斑区域窗口的中心为中心, 阈值法中阈值由大津法(OTSU 法)求得为 21, 幂因子法中幂因子设为 2.5; 窗口法是以光斑区域中最亮像素点为中心, 初始探测窗口大小为 $23 \text{ pixel} \times 23 \text{ pixel}$, 迭代 3 次。

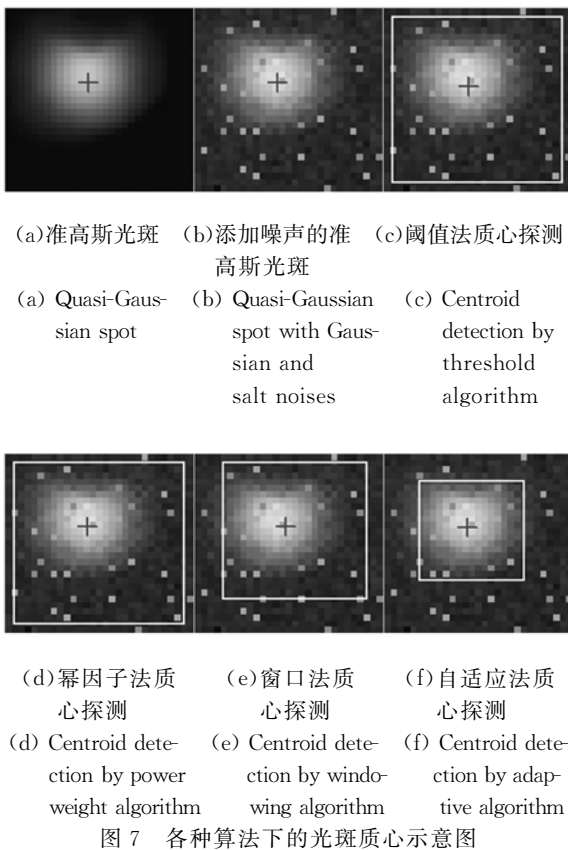


图 7 各种算法下的光斑质心示意图

图 7(c)、(d)、(e)、(f)分别是对加噪声的光斑采用阈值法、幂因子法、窗口法和自适应法获得的质心示意图,结果可以看出,由于背景噪声的影响严重及孤立亮点噪声的存在,使得大津法求得的阈值不能有效地抑制所有噪声,影响了阈值法的计算精度。窗口法仍是由于高亮噪声的存在使得初始探测窗口未能完整地包络光斑,丢失了光斑信息,造成的质心位置误差又影响了下次迭代时的探测窗口位置确定,最终以累积误差的形式严重偏离实际位置。虽然幂因子的质心位置精度有所提高,但幂因子的作用仍不能很有效地提高光斑与噪声的对比度,最终结果也偏离了实际质心位置。自适应法由阈值等级确定参考光斑并由此确定质心探测窗口,使算法免于受到光斑以外噪声的影响,计算得到的质心位置能与实际质心位置相一致,表明光斑在严重的噪声情况下,自适应法具有较高的质心探测精度。

用同样的噪声参数随机生成 20 组噪声分布不同的光斑,分别采用上述 4 种质心探测算法计

算质心,图 8 列出了其质心结果与实际质心相对误差的关系。可以看出,在噪声的影响之下,阈值法和窗口法的质心结果误差最严重,平均误差在 0.5 pixel 以上,质心误差次之的是幂因子法,误差均值在 0.3 pixel 左右,本文提出的自适应法质心误差最小,稳定地控制在 0.1 pixel 左右。结果表明,自适应法的质心探测精度和算法对噪声影响的鲁棒性均优于其他传统的质心探测算法,从仿真的角度看,质心平均探测误差比窗口法减小 81.7%,比阈值法减小 75.9%,比幂因子法减小 60.2%以上。

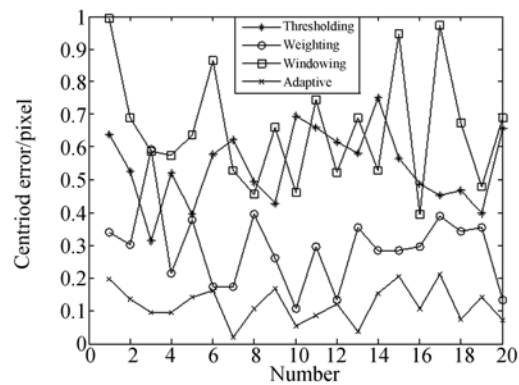


图 8 不同算法质心误差对比

Fig. 8 Contrast of centroid error with different algorithms

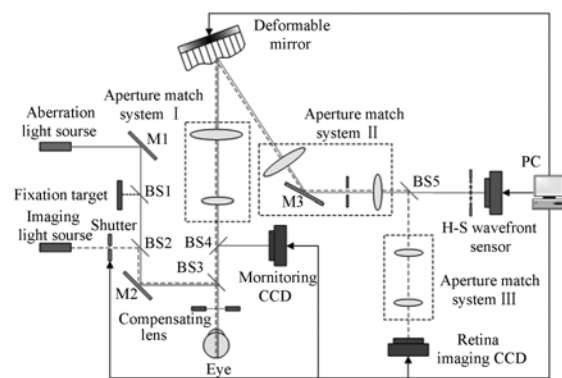
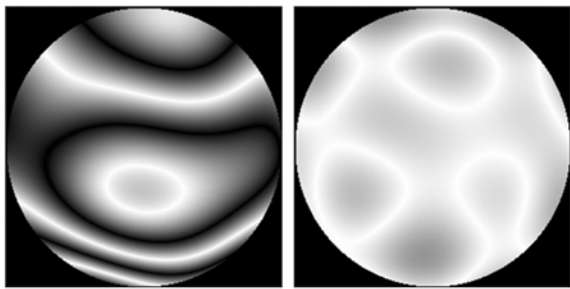


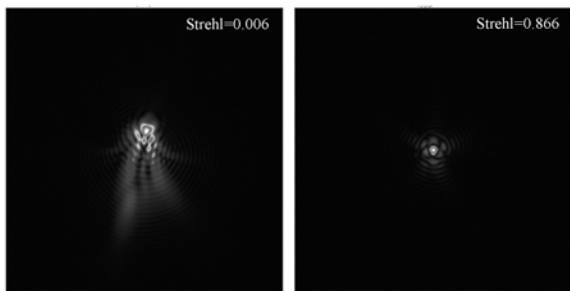
图 9 自适应光学成像系统光路原理图

Fig. 9 Schematic diagram of adaptive optical imaging system

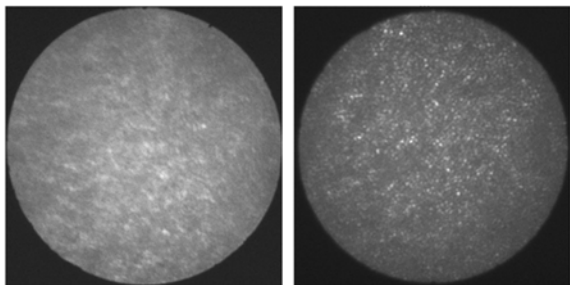
将自适应质心探测方法应用到自适应光学视网膜成像系统的 H-S 波前传感器中,进行像差测量、校正和视网膜成像实验^[14]。系统中波前校正器采用荷兰 OKO 公司的 37 通道微机械薄膜变形镜。图 9 为自适应光学成像系统的光路原理



(a) 校正前像差干涉图 (b) 校正后像差干涉图
 (a) Interference pattern of aberration before correction (b) Interference pattern of aberration after correction



(c) 校正前点扩散函数 (d) 校正后点扩散函数
 (c) PSF before correction (d) PSF after correction



(e) 校正前视网膜图像 (f) 校正后视网膜图像
 (e) Retina image before correction (f) Retina image after correction

图 10 像差校正前后结果对比

Fig. 10 Compared results before and after aberration corrections

参考文献:

- [1] 姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2006, 28(1):7-13.
 JIANG W H. Adaptive optical technology[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2006, 28(1):7-13. (in Chinese)

图, 测量像差的光源波长 $\lambda_1 = 785 \text{ nm}$, 视网膜成像的光源波长 $\lambda_2 = 632 \text{ nm}$ 。对受试者 ZHY 进行像差测量、校正及视网膜成像实验, 波前像差 RMS 值由 $0.728\lambda_1$ 闭环校正到 $0.081\lambda_1$, 像差校正后的成像系统斯特列尔比为 0.866, 达到衍射极限, 从而获得了高分辨率的视网膜图像, 图 10 是实验过程中像差校正前后的各项结果对比图。结果表明 H-S 波前传感器的自适应质心探测方法符合人眼像差测量的实用要求。

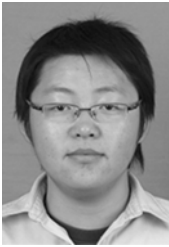
6 结 论

本文介绍了 H-S 波前传感器的工作原理和结构特点, 分析了光斑图像在大像差时光斑位置畸变及受多种噪声影响的特征, 对 CCD 采集的光斑图像进行了质心探测研究。提出了动态定位光斑区域、动态分割区域内部阈值以及锁定最优探测窗口的自适应光斑质心探测方法。该方法根据不同光斑特征选择各自最佳的实验参数, 结果显示, 阈值等级为该光斑总等级数的 $(50 \pm 3)\%$ 时最合适, 并以此确定了最优探测窗口, 从而弥补了传统算法对光斑图全局处理的局限性。最后通过仿真与实验分析可知: 相比于传统质心探测方法, 本方法的质心探测误差降低了 60% 以上 (窗口法 81.7%, 阈值法 75.9%, 幂因子法 60.2%); 将本文方法应用至自适应光学视网膜成像系统的 H-S 波前传感器中, 可将人眼像差 RMS 值从 0.728λ 闭环校正到 0.081λ ($\lambda = 785 \text{ nm}$), 基本达到衍射极限, 并获得高分辨率视网膜图像。结果表明, 本文提出的自适应质心探测方法满足人眼像差测量的可行性和实用性要求。

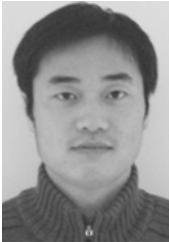
- [2] 夏明亮, 李抄, 刘肇南, 等. Shack-Hartmann 波前传感器图像自适应阈值的选取[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2):334-340.
 XIA M L, LI CH, LIU ZH N, *et al.*. Adaptive threshold selection method for Shack-Hartmann wavefront sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2):334-340. (in Chinese)

- [3] 梁春, 廖文和, 沈建新. 自适应光学在眼科医疗中的应用[J]. 应用激光, 2007, 27(3): 237-240.
LIANG CH, LIAO W H, SHEN J X. Applications of adaptive optics in ophthalmic medical treatment [J]. *Applied Laser*, 2007, 27(3): 237-240. (in Chinese)
- [4] YIN X, LI X, ZHAO L, *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.
- [5] PARK S, BAIK S, KIM C, *et al.*. A study on a fast measuring technique of wavefront using a Shack-Hartmann sensor [J]. *Optics and Laser Technology*, 2002, 34(8): 687-694.
- [6] 王鹏, 周昕, 王勇, 等. 哈特曼波前传感器光斑质心探测窗口的自动确定方法研究[J]. 激光杂志, 2005, 26(5): 46-47.
WANG P, ZHOU X, WANG Y, *et al.*. Study on an automatic selection method for spot centroid detection window of Hartman wavefront sensor [J]. *Laser Journal*, 2005, 26(5): 46-47. (in Chinese)
- [7] 王薇, 陈怀新. 基于优化探测窗口的光斑质心探测方法[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(8): 1249-1252.
WANG W, CHEN H X. New method for centroid detecting of focal spot based on optimizing detecting window [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(8): 1249-1252. (in Chinese)
- [8] 李华强, 宋贺伦, 饶长辉, 等. 增大夏克-哈特曼波前传感器动态测量范围的方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(7): 1203-1207.
LI H Q, SONG H L, RAO CH H, *et al.*. Extrapolation method to extend dynamic range of Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1203-1207. (in Chinese)
- [9] 程少园, 曹召良, 胡立发, 等. 用夏克-哈特曼探测器测量人眼波前像差[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1060-1067.
CHENG SH Y, CAO ZH L, HU L F, *et al.*. Measurement of wavefront aberrations of human eyes with Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1060-1067. (in Chinese)
- [10] 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.
REN J F, RAO CH H, LI M Q. An adaptive threshold selection method for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(1): 1-5. (in Chinese)
- [11] PRIETO P M, VARGAS M F, GOELZ S, *et al.*. Analysis of the performance of the Hartmann-Shack sensor in the human eye [J]. *Journal of the Optical Society of America A (Optics, Image Science and Vision)*, 2000, 17(8): 1388-1398.
- [12] BAIK S H, PARK S K, KIM C J, *et al.*. A center detection algorithm for Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Optics and Laser Technology*, 2007, 39(2): 262-267.
- [13] 全薇, 王肇圻, 张春书, 等. 用模板匹配法选取光斑质心探测窗口[J]. 光电子·激光, 2002, 13(11): 1148-1151.
QUAN W, WANG ZH Q, ZHANG CH SH, *et al.*. The use of template matching for Hartman sensor spot centroid detection window [J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2002, 13(11): 1148-1151. (in Chinese)
- [14] NIU S S, SHEN J X, LIANG CH, *et al.*. Human eye aberration measurement and correction based on micro adaptive optics system [C]. *Proceedings of the 2009 2ND International Conference on Biomedical Engineering and Informatics, Tianjing, P. R. China: BMEI*, 2009: 1203-1207.

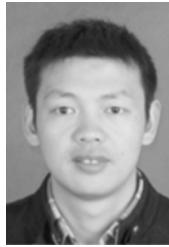
作者简介:



钮赛赛(1984—),男,江苏启东人,博士研究生,主要从事微型自适应光学成像系统以及自适应光学图像后处理复原等方面的研究。E-mail: nssycit@163.com



梁春(1977—),男,江苏南京人,博士后,2005年、2009年于南京航空航天大学分别获得硕士、博士学位,现为航空宇航制造科学专业博士后,主要从事自适应光学及数字化医疗装备方面的研究。E-mail: bloomlc@sina.com



张运海(1975—),男,湖北枣阳人,博士,工程师,2003年、2006年于南京航空航天大学分别获得硕士和博士学位,现为苏州六六视觉科技股份有限公司技术中心主任,主要从事应用光学方面的研究和眼科光学仪器的研发工作。E-mail: zhangyunhaiguan8@163.com

导师简介:



沈建新(1969—),男,江苏常熟人,教授,博士生导师,1996年于浙江大学获得硕士学位,2003年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事数字化设计制造、数字化医疗装备技术、飞机柔性装配技术等方面的研究。E-mail: cadatc@nuaa.edu.cn

● 下期预告

基于槽式悬臂梁结构的微质量传感器设计

高仁璟¹, 李雪², 赵剑¹

(1. 大连理工大学 汽车工程学院, 辽宁 大连 116024)

(2. 大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

压电式微质量传感器的测试精度直接依赖于结构频率对质量变化的灵敏程度。利用对称槽型梁和压电薄膜组成的对称敏感结构,提出了一种提高传感器灵敏度的结构设计方法,并设计了一种新型高精度谐振式微质量传感器。建立了结构频率变化对吸附质量敏感性的分析模型,并研究了槽型截面参数、自振频率及振动模态对灵敏度的影响。仿真与实验结果表明,与矩形截面结构相比,相同尺寸参数的槽型截面悬臂梁结构传感器的灵敏度可提高一倍,为提高微质量传感器灵敏度提供了一种新思路。