

文章编号: 0253-2239(2010)11-3082-08

# 一种可用于人眼像差哈特曼-夏克测量仪的 自动离焦补偿方法

鲍 华<sup>1,2,3</sup> 饶长辉<sup>2,3</sup> 张雨东<sup>2,3</sup> 戴 云<sup>2,3</sup> 余 翔<sup>2,3</sup> 饶学军<sup>2,3</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学生物力学实验室, 四川 成都 610065; <sup>2</sup> 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209)  
<sup>3</sup> 中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 四川 成都 610209)

**摘要** 针对目前人眼像差哈特曼-夏克测量仪不能自动补偿人眼离焦的不足,通过分析不同调焦状态下连续采集的哈特曼-夏克光斑图像序列,构造了离焦补偿评价函数,在现有像差测量仪平台上实现了人眼像差自动离焦补偿。算法根据调焦过程中哈特曼-夏克光斑的形态变化,定义了通过光斑图像评估离焦补偿结果的评价标准,并依据评价函数确定最佳光斑图像对应的离焦补偿量,从而确保哈特曼-夏克波前传感器能准确测得离焦补偿后剩余的人眼像差。实验结果表明,本方法对杂散光噪声具有较强的稳健性,可以准确实现调焦系统的自动离焦补偿,为后续像差测量仪精密测量人眼高阶像差提供了十分重要的方法。

**关键词** 自适应光学;自动离焦补偿;哈特曼-夏克传感器;人眼像差

**中图分类号** TP317.4; TH77 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103011.3082

## An Automatic Defocus Compensation Method for Human Eye Hartmann-Shank Wave-Front Aberrometer

Bao Hua<sup>1,2,3</sup> Rao Changhui<sup>2,3</sup> Zhang Yudong<sup>2,3</sup> Dai Yun<sup>2,3</sup> Yu Xiang<sup>2,3</sup> Rao Xunjun<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Biomechanics Laboratory, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

<sup>2</sup> Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

<sup>3</sup> Research Center Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

**Abstract** An automatic defocus compensation method for human eye Hartmann-Shank (HS) wave-front aberrometer is proposed. According to the analysis of different geometric features of HS light spots during focalizing process, estimation algorithm is constructed to remove large-scale defocus amount, and then the residual high-order ocular aberrations can be measured by aberrometer successfully. Experimental results proved that the method has good robustness to control noise and can achieve accurate automatic defocus compensation from ocular aberrations, which is very useful method to human eye HS wave-front aberrometer.

**Key words** adaptive optics; automatic defocus compensation; Hartmann-Shank wave-front sensor; ocular aberration

### 1 引 言

人眼高阶像差测量已成为未来屈光检查的发展趋势<sup>[1~3]</sup>,并且在自适应光学高分辨率视网膜成像和人眼像差矫正中扮演着十分重要的角色<sup>[4~8]</sup>。人眼像差哈特曼-夏克测量技术具有客观、准确和快速等优点,已成为人眼像差测量的主流技术日本

Topcon 公司和美国博士伦公司等已成功研制出各自的人眼像差哈特曼-夏克测量仪并应用于临床。中国科学院光电技术研究所的凌宁等<sup>[9,10]</sup>成功研制了第三代人眼像差哈特曼-夏克测量仪,此后余翔等<sup>[11,12]</sup>进一步研制了可诱导人眼自主调节的动态像差测量仪,可以实时记录人眼在调节状态下像差

收稿日期: 2010-02-02; 收到修改稿日期: 2010-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(60808031)资助课题。

作者简介: 鲍 华(1981—),男,博士研究生,主要从事医学图像处理及三维重建方面的研究。

E-mail: hbao.ioe@gmail.com

导师简介: 饶长辉(1971—),男,博士,研究员,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: chrao@ioe.ac.cn(通信联系人)

的动态变化,为全面研究人眼像差特性提供了有力工具。

人眼像差哈特曼-夏克测量技术采用“双通道”方式测量人眼像差,眼底信标光斑的汇聚程度直接决定了像差测量仪的精度。统计研究发现,人眼像差中离焦分量占据主要成份且人群分散性较大,为尽量降低人眼离焦对眼底信标光斑汇聚程度的影响,哈特曼-夏克像差测量仪通常需要设置离焦补偿功能去除人眼大部分离焦,在此基础上完成后续高阶像差的测量。目前,中国科学院光电技术研究所研制的人眼像差哈特曼-夏克测量仪(以下简称像差测量仪),需要操作人员通过观察哈特曼-夏克光斑的形态手动完成离焦调节,其离焦补偿工作效率较低,对操作人员的知识背景、熟练程度以及受试者的配合程度都有较高要求,在实际运用中存在很多局限性,影响了像差测量仪的实用性和精度。

本文提出了一种基于哈特曼-夏克光斑形态特征的自动离焦补偿方法。该方法首先采集不同调焦状态下的哈特曼-夏克光斑图像序列,然后根据哈特曼-夏克光斑的空间位置、能量会聚程度以及几何形态,构造了离焦补偿评价函数,对不同调焦状态下的

哈特曼-夏克光斑图像进行评估,从而确定使得调焦质量最好的离焦补偿量。实验结果表明,本方法具有很好的噪声稳健性,可以在离焦、像散和其它高阶像差同时存在的情况下,有效补偿待测人眼的大部分离焦量,在此基础上像差测量仪能够很好地完成后续人眼高阶像差的测量,大大提高了仪器的操控性和测量效率,具有显著的实际应用价值。

### 2 离焦补偿及评价算法

人眼像差哈特曼-夏克测量仪的基本工作原理是利用哈特曼-夏克波前传感器测量去除人眼大部分离焦以后的高阶像差<sup>[9,11]</sup>,而待测人眼的总离焦量(即屈光度)由系统补偿的离焦量和哈特曼-夏克波前传感器测得的波面中剩余离焦量求和得到。像差测量仪系统光路如图 1 所示,主要由调焦系统、光束匹配系统、哈特曼-夏克波前传感器和信标光源等几部分组成<sup>[13]</sup>,图中虚线所示部分通过步进电机前后平移实现离焦调节,其中待测人眼 1 通过瞳孔相机完成瞳孔和光路的对准,并且与前组调焦物镜 2 保持位置不变。

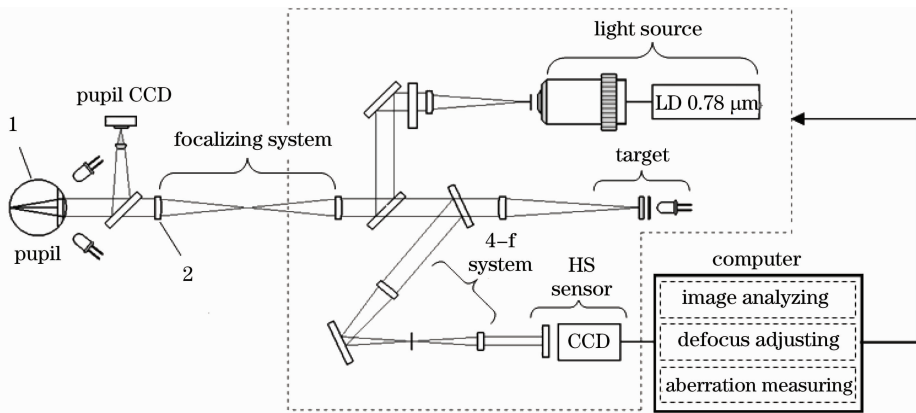


图 1 包含内部调焦系统的人眼像差哈特曼-夏克测量仪光路图

Fig. 1 Optical layout of HS wave-front human eye aberrometer with focalizing system

像差测量仪的主要部件哈特曼-夏克波前传感器采用孔径分割元件和光学聚焦器件将被测波面分割成若干子孔径并会聚到光电探测器上形成光斑阵列<sup>[14]</sup>,然后通过测量光斑相对于标定位置的偏移,并结合波前复原算法得到波前像差,传感器原理如图 2 所示。由于像差测量仪在离焦补偿过程中,哈特曼-夏克光斑的几何形态会随着调焦系统的位置不同而改变,因此可以通过检测哈特曼-夏克光斑的几何形态来评价离焦补偿结果。

针对手动离焦调节的不足和人眼像差哈特曼-夏克测量仪的特点,构造了基于哈特曼-夏克光斑几

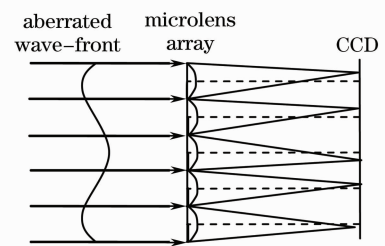


图 2 哈特曼-夏克波前传感器原理示意图

Fig. 2 Principle of a Hartmann-Shack sensor

何特征的离焦补偿评价函数,通过评价函数对不同调焦状态下采集的哈特曼-夏克光斑图像序列进行

评估,从而确定最佳光斑图像对应的离焦补偿量。自动离焦补偿方法流程如图3所示,包括哈特曼-夏克光斑图像序列采集,噪声抑制,离焦补偿评价以及最佳离焦补偿量计算4个步骤。实际系统中,像差测量仪通过步进电机搭载调焦系统在导轨上从最大负离焦补偿位置,以等间距方式精密平移至最大正离焦补偿位置,并通过高频哈特曼-夏克相机实时采集哈特曼-夏克光斑图像,从而获得处于不同调焦状态的光斑图像序列。

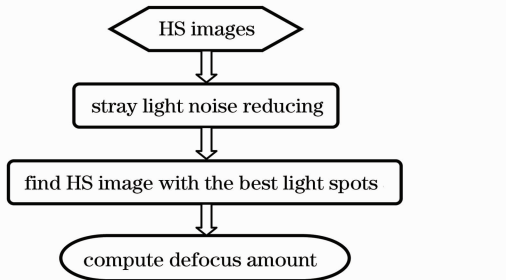


图3 自动离焦补偿算法流程图

Fig. 3 Flow chat of auto defocus compensation

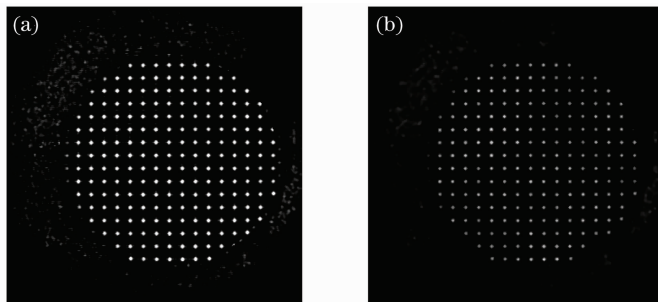


图4 中值滤波抑制哈特曼-夏克光斑图像中杂散光噪声。(a)初始光斑图像;(b)5×5窗口中值滤波结果

Fig. 4 Noise in HS spot image suppressed by median filtering. (a) original HS light spots image; (b) median filtering result with window size 5×5

## 2.2 离焦补偿评价

根据光学调焦原理可知,像差测量仪在调焦过程中,如果哈特曼-夏克波前传感器探测到每个子孔径中光斑会聚的程度越高,那么系统离焦补偿的效果越好。然而实际运用中哈特曼-夏克波前传感器测得的光斑图像存在噪声干扰,并且通常人眼像差同时存在离焦、像散和其它高阶像差等,光斑的形态也随着调焦状态的改变而改变,因此无法通过单一的评价方法准确判断调焦系统是否合理。图5显示了实际采集的哈特曼-夏克光斑图像,它们分别代表调焦过程中光斑的不同形态和杂散光噪声对图像的污染。

观察图5(a)可以看到,对于调焦系统远离最佳离焦补偿位置的光斑图像,大尺度离焦使得光斑完全弥散,窗口中光强的能量分布比较分散,因此通过以质心为中心的小区域所占据的能量与子窗口中总

## 2.1 噪声抑制

像差测量仪在离焦调节过程中,环境杂散光以及角膜的后向反射光都有可能进入哈特曼-夏克波前传感器,虽然硬件设计上已经考虑了对杂散光的抑制,但仍然无法有效解决由于杂散光引入的噪声。所以需要采集的原始图像进行滤波处理,提高后续算法对哈特曼-夏克光斑质量评价的准确性。通过分析杂散光在光斑图像中的分布特性,发现由于杂散光引入的噪声近似于散粒分布,因而采用中值滤波的方法实现图像降噪,该方法表示为

$$\hat{f}(x,y) = \underset{(s,t) \in W_{x,y}}{\text{median}} [g(s,t)], \quad (1)$$

式中  $g(s,t)$  为原始含噪声图像; $\hat{f}(x,y)$  为滤波后的结果; $W_{x,y}$  是以  $(x,y)$  为中心的滤波窗口; $\text{median}\{\cdot\}$  是快速中值滤波算子<sup>[15]</sup>。图4显示了中值滤波对哈特曼-夏克光斑图像中杂散光噪声的抑制结果,从图中可以看出选择5×5的滤波窗口可以有效滤除杂散光噪声,并且保持光斑的几何形态和空间位置不变。

能量的比值可以初步判断光斑的会聚程度。

图5(b)显示了调焦系统靠近最佳离焦补偿位置的光斑图像,此时光斑已经在一定程度上会聚,所以难以直接利用能量比值有效判断离焦补偿结果。但是对比图5(c)在最佳离焦补偿位置测得的光斑图像可以发现,图5(b)与(c)中的光斑在形态上存在明显差异,像散对光斑形态影响很大。因为如果调焦系统偏离最佳离焦补偿位置时,像散使得光斑成为椭圆;而调焦系统位于最佳离焦补偿位置时,光斑的会聚程度最好,其形态更接近于圆形。

根据图5的实验结果可以看到,离焦和像散对光斑形态的影响最大,这是因为人眼像差中离焦和像散通常占据主要成份,对于像散影响哈特曼-夏克光斑形态的原理分析如图6所示,其仿真结果显示如图7所示。

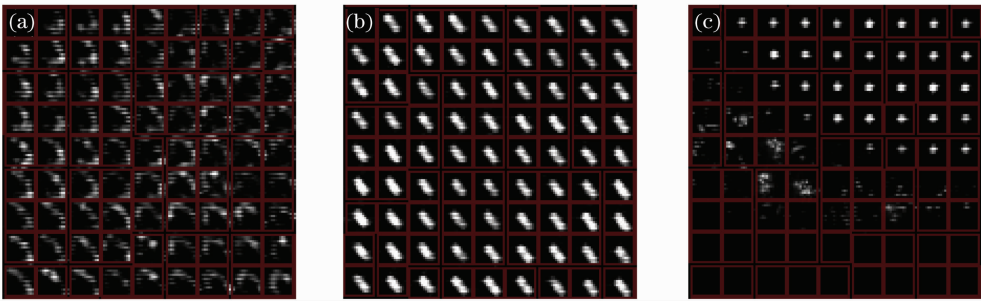


图 5 不同调焦状态的光斑图像。(a) 远离最佳离焦补偿；(b) 靠近最佳离焦补偿；  
(c) 位于最佳离焦补偿的光斑图像受到噪声污染

Fig. 5 HS images of different focalizing states. (a) away from the best defocus compensation; (b) nearby the best defocus compensation; (c) spot image polluted by noise, on the best defocus compensation

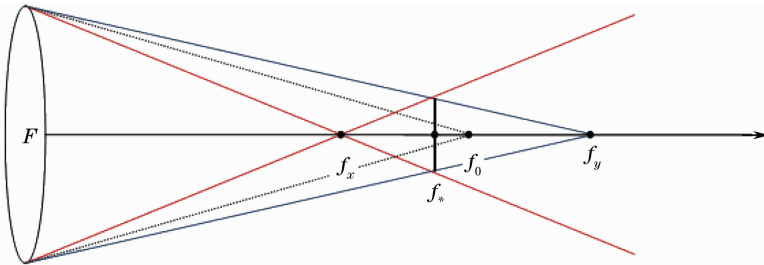


图 6 像散对光斑形态影响的原理分析

Fig. 6 Theoretical analysis of HS light spot effected by astigmatism

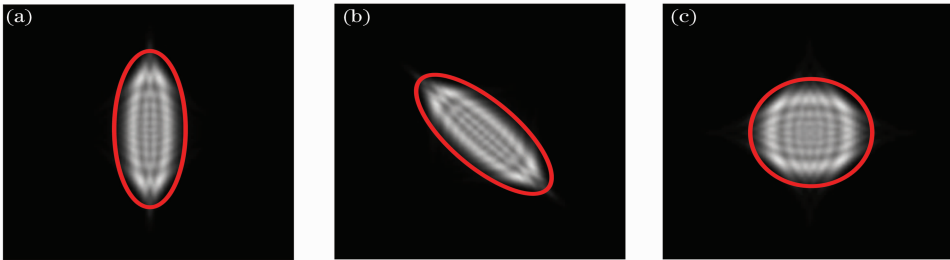


图 7 像散光斑形态的仿真结果。(a)  $0^\circ$  像散的椭圆光斑；(b)  $45^\circ$  像散的椭圆光斑；(c) 焦面上光斑的形态更接近圆形

Fig. 7 Light spots simulation of astigmatism. (a) elliptic light spot of  $0^\circ$  astigmatism; (b) elliptic light spot of  $45^\circ$  astigmatism; (c) close to circular light spot at focal plane

根据图 6 所示的光学原理可知，平行光经过透镜  $F$  后，将在透镜的焦点  $f_0$  处会聚，由于衍射现象的存在， $f_0$  处的光点并非严格的几何像点，而是在成像平面上表现为一定大小的圆形光斑。假设经过透镜  $F$  的入射光仅包含像散成份，那么光线将在  $x$  方向和  $y$  方向分别会聚于  $f_x$  和  $f_y$  处，此时成像平面上光斑的形态为任意方向的椭圆，如图 7(a) 和 (b) 所示；当成像平面位于  $f_*$  的时候，根据几何关系可知光斑的形态为圆形，此时  $f_*$  的位置将十分靠近透镜的焦点；而成像平面位于  $f_0$  处所在焦平面的时候，光斑形态也十分接近于圆形，如图 7(c) 所示。对于入射光同时包含离焦和像散的情况， $f_*$  和  $f_0$  将在中心轴上整体平移而保持几何关系不变，因此算法可以通过  $f_*$  来估计人眼像差中包含的大离焦

量，即根据光斑的形态是否接近于圆形来判断离焦补偿结果的好坏。

图 5(c) 展现了杂散光噪声对图像的污染，选用的算法虽然在图像预处理阶段对杂散光进行了抑制，但是仍然无法完全滤除噪声。通过观察可以发现杂散光噪声大多分布在子窗口边缘，与会聚光斑在窗口中的位置存在明显不同。

根据以上分析，算法定义离焦补偿评价标准包含以下 3 个指标：

- 1) 光斑质心应靠近子窗口中心，确保算法对杂散光噪声具有更强的抗干扰能力；
- 2) 以质心为中心的小区域占据子窗口中较多的能量，使得会聚光斑具有更大的权值；
- 3) 光斑的形态应接近于圆形，解决像散等其它



像差对离焦调节的影响。

根据上面提出的评价标准,对应的3种指标数学描述如下:

1) 可将光斑质心与窗口中心的邻近程度通过归一化的欧式距离进行表示:

$$D = \sqrt{\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{(m/2)^2 + (n/2)^2}}, \quad (2)$$

式中  $m$  和  $n$  是子窗口的长和宽;  $(x_0, y_0)$  是子窗口中心;  $(x, y)$  是光斑质心。

$(x, y)$  计算方式如下:

$$x = \frac{\sum_{(i,j) \in W_{m,n}} x_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{(i,j) \in W_{m,n}} I_{i,j}}, \quad y = \frac{\sum_{(i,j) \in W_{m,n}} y_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{(i,j) \in W_{m,n}} I_{i,j}}, \quad (3)$$

式中  $W_{m,n}$  是子窗口中像素点坐标集合;  $(i, j)$  是子窗口中像素点坐标;  $I_{i,j}$  是对应像素点的光强;  $(x_{i,j}, y_{i,j})$  是第  $(i, j)$  个像素点的  $x$  坐标和  $y$  坐标。

2) 以质心为中心的小区域和子窗口中总能量的比值定义为

$$E = \frac{\sum_{(x,y) \in W_{s,t}} I_{x,y}}{\sum_{(i,j) \in W_{m,n}} I_{i,j}}, \quad (4)$$

式中  $s$  和  $t$  是以光斑质心  $(x, y)$  为中心的小区域  $W_{s,t}$  的长和宽, 本文选择  $5 \times 5$  的窗口计算光斑中心能量。

3) 光斑形态似圆度定义如下:

$$S = \frac{\max_{i \in \bar{\eta}} \{R_i\}}{\min_{i \in \bar{\eta}} \{R_i\}}, \quad (5)$$

式中  $\bar{\eta}$  是以质心为中心的8个检测方向, 原理如图8所示;  $R_i$  是检测方向上像素点光强的总和。计算方式如下:

$$R_i = \sum_{x,y \in W_i} I_{x,y}, \quad (6)$$

式中  $W_i$  是该方向上像素点坐标集合。

在获得以上评价指标数学表达的基础上, 本文定义像差测量仪在调焦过程中基于光斑特征的离焦

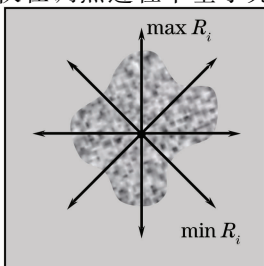


图8 光斑似圆度形态检测示意图

Fig. 8 Schematic diagram of circle estimation of a light spot

补偿评价函数如下:

$$P(I_{i,j}) = \sum_{n \in N} \left( \cos \frac{\pi D_n}{2} + E_n + S_n - 1.5 \right), \quad (7)$$

式中  $N$  是哈特曼-夏克子窗口阵列数目; 常数 1.5 用于控制判别式的输出在  $[-1.5, 1.5]$  之间, 这种处理方式可以保证低于平均值以下的子窗口不会产生正数输出。

### 2.3 最佳离焦补偿量计算

根据本文定义的离焦补偿评价函数, 当  $P(I_{i,j})$  取最大值时, 算法评估光斑图像质量最好, 对应最佳离焦补偿量  $f$  由下式确定:

$$f = (F_P + F_N) \times \frac{m}{M-1} - F_N, \quad (8)$$

式中  $F_P$  是最大正离焦补偿量;  $F_N$  是最大负离焦补偿量的绝对值;  $M$  是哈特曼-夏克相机采集的光斑图像序列总帧数;  $m \in [0, M-1]$  是  $P(I_{i,j})$  取最大值时对应的图像序号, 初始时刻调焦系统位于最大负离焦补偿位置, 此时  $m$  的取值为 0。

## 3 实验结果与分析

实验系统工作参数如下: 步进电机从机械零点移动 20 mm 至最远端, 对应离焦调节为远视 +10.0D (1D 对应于眼科球镜顶焦不正  $100^\circ$ ) 到近视 -10.0D; 测量过程中哈特曼-夏克相机以 25 frame/s 的频率连续采集 171 frame 图像; 哈特曼-夏克子窗口阵列为  $31 \times 31$ ; 子窗口大小为 14 pixel  $\times$  14 pixel。实验中采用眼科临床验光片和计量科学研究院提供的标准验光仪验证算法的可靠性。

验证实验中, 采用仅包含离焦的模拟人眼, 检验本文方法去除大尺度离焦的能力, 图9显示了模拟人眼离焦量理论直线和算法的估计值。

分析图9显示的误差可以看到, 算法估计值与离焦量理论直线之间的偏差很小; 实验采集的35组

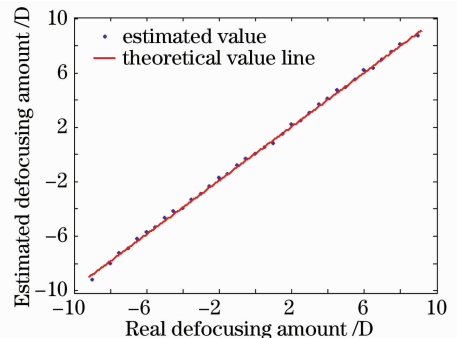


图9 光斑评价算法去除大尺度离焦量误差

Fig. 9 Deviations of removing large scale defocus error computed by spots estimation algorithm

数据平均偏差小于  $0.15\text{D}$ ，表明基于光斑特征的离焦补偿评估算法能很好地测得像差中存在的离焦量，可以确保哈特曼-夏克波前传感器测量去除离焦后剩余像差的波面。

测试实验模拟了离焦和像散同时存在的情况，模拟人眼使用的标准验光仪参数如下：离焦为  $0\text{D}$ ， $+5.0\text{D}$ ， $-5.0\text{D}$  和  $-10.0\text{D}$ ；并且验光仪前方叠加

了  $2.0\text{A}$  ( $1\text{A}$  对应于眼科构镜顶焦不的  $100^\circ$ ) 的散光片。像差测量仪首先通过本文方法去除复合像差中大尺度离焦量，然后利用哈特曼-夏克波前传感器测量离焦补偿后剩余像差的波面。图 10 显示了波前重构算法复原自动离焦补偿后剩余像差的二维和三维波面图。

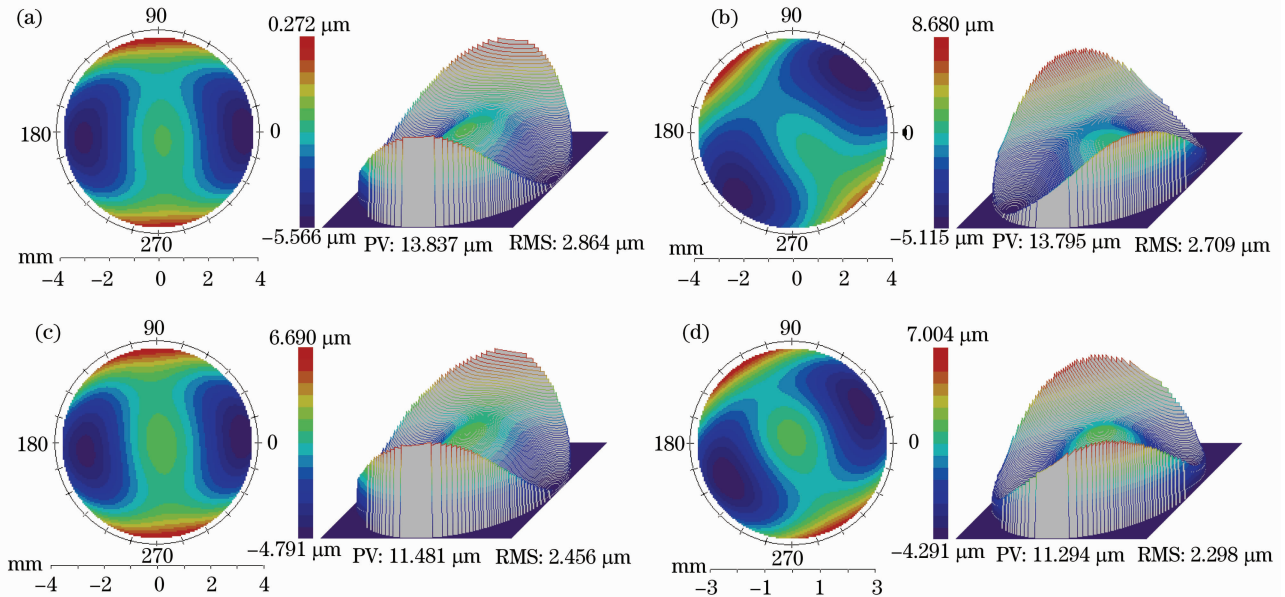


图 10 模拟人眼实验结果。(a)离焦  $0\text{D}$ ，散光  $2.0\text{A}$ ；(b)离焦  $+5.0\text{D}$ ，散光  $2.0\text{A}$ ；(c)离焦  $-5\text{D}$ ，散光  $2.0\text{A}$ ；(d)离焦  $-10.0\text{D}$ ，散光  $2.0\text{A}$

Fig. 10 Results of simulated eye. (a) defocus  $0\text{D}$ , astigmatism  $2.0\text{A}$ ; (b) defocus  $+5.0\text{D}$ , astigmatism  $2.0\text{A}$ ; (c) defocus  $-5.0\text{D}$ , astigmatism  $2.0\text{A}$ ; (d) defocus  $-10.0\text{D}$ , astigmatism  $2.0\text{A}$

自动离焦补偿方法对以上 4 组像差的离焦补偿分别为  $0.1\text{D}$ ， $5.25\text{D}$ ， $-4.8\text{D}$  和  $-9.75\text{D}$ ；去除大尺度离焦后，像差测量仪测得剩余像差中包含的像散分量分别为  $1.72$ ， $1.66$ ， $1.67$  和  $1.63\text{A}$ 。实验数据证明，对于离焦和像散同时存在的复合像差，本方法同样能很好地完成自动离焦补偿。图 10 正确显示了剩余像差中像散分量的波面图，进一步证明了自动离焦补偿方法具备准确去除复合像差中大部分离焦的能力，在此基础上像差测量仪可以完成后续人眼高阶像差的准确测量。

最后本文将结合自动离焦补偿方法的人眼像差哈特曼-夏克测量仪用于真实人眼像差测量。受试者单眼近视并且存在散光。

本方法实现自动离焦补偿  $-5.0\text{D}$ ，在此基础上像差仪测得离焦量  $-4.8\text{D}$  和散光  $1.0\text{A}$ 。图 11 显示了自动离焦补偿前后哈特曼-夏克波前传感器测得的光斑图像以及通过自动离焦补偿和手动离焦补

偿不充分的情况下，波前重构算法复原剩余像差的二维和三维波面图。

对比图 11(a)和(b)可以看到，本文方法能够准确找到使得哈特曼-夏克光斑质量最好的离焦补偿量。对于实验中存在较大离焦量的真实人眼，一方面，如果不进行离焦补偿，哈特曼-夏克波前传感器将无法正常工作；另一方面，如果手动离焦补偿不充分，将导致哈特曼-夏克光斑质心的计算不准确，这种情况下像差仪的测量结果不可信，图 11(c)将无法识别剩余像差中包含的像散成份。通过本方法实现待测人眼的自动离焦补偿，波前重构算法能够准确计算剩余像差中包含的像散分量，如图 11(d)所示以及去除离焦和像散后剩余像差中包含的其它高阶分量，如图 11(e)所示。从结果中还可以看到人眼像差包含较大的球差，这与近视眼的生理特征完全吻合。

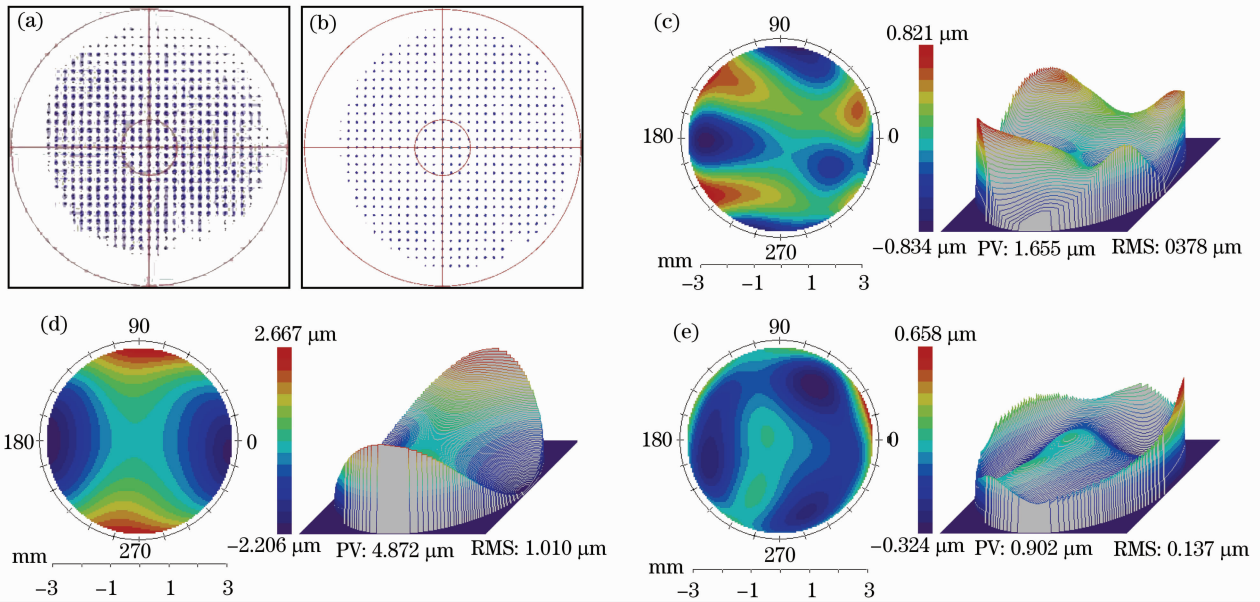


图 11 真实人眼测试结果。(a) 手动离焦补偿;(b) 自动离焦补偿;(c) 通过图(a)测得不正确的剩余像差;(d) 通过图(b)测得的剩余像差;(e) 通过图(b)测得去除离焦和像散后剩余的高阶像差

Fig. 11 Test results of real eye. (a) defocus compensation by hand; (b) automatic defocus compensation; (c) incorrect residual aberrations computed from image (a); (d) residual aberrations computed from image (b); (e) residual high-order aberrations computed from image (b), without defocus and astigmatism

## 4 结 论

本文根据调焦过程中哈特曼-夏克光斑的几何特征,构造了基于光斑空间位置、能量会聚程度及其几何形态的离焦补偿评价算法,在当前像差测量仪平台上实现了人眼像差自动离焦补偿。实验结果表明,算法对杂散光噪声具有很好的稳健性,可以在离焦、像散和其它高阶像差同时存在的情况下,准确判断调焦过程中使得哈特曼-夏克光斑图像质量最好的离焦补偿量,实现对待测人眼大部分离焦量的自动补偿,在此基础上哈特曼-夏克波前传感器可以准确测得去除离焦后剩余像差的波面。自动离焦补偿方法为像差测量仪提供了自动快速和稳定可靠的离焦补偿工具,确保了像差测量仪后续能够精密测量人眼高阶像差,具有显著的实际应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 T. Oshika, T. Mimura, S. Tanaka. Apparent accommodation and corneal wavefront aberration in pseudophakic eyes [J]. *Invest Ophthalmol Vis. Sci.*, 2002, **43**(9): 2882~2886
- 2 S. Ninomiya, T. Fujikado, T. Kuroda *et al.*. Changes of ocular aberration with accommodation [J]. *Am. J. Ophthalmol.*, 2002, **134**(6): 924~926
- 3 S. Ninomiya, T. Fujikado, T. Kuroda. Wavefront analysis in eyes with accommodative spasm [J]. *Am. J. Ophthalmol.*, 2003, **136**(6): 1161~1163
- 4 Cheng Shaoyuan, Hu Lifa, Cao Zhaoliang *et al.*. Application of liquid crystal adaptive system on human eye fundus imaging with

- high spatial resolution [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **39**(10): 2524~2527
- 程少园, 胡立发, 曹召良等. 液晶自适应光学在人眼眼底高分辨率成像中的应用[J]. *中国激光*, 2009, **39**(10): 2524~2527
- 5 Zhao Haoxing, Xu Bing. Position tolerance analysis for wavefront aberrations correction of human eyes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 949~954
- 赵豪欣, 许冰. 矫正器平移和旋转对人眼高阶像差矫正的容限分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 949~954
- 6 Zhang Peiming, Chen Jiabi, Zhuang Songlin. Measurement of human eye's aberrations based on information fusion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2571~2576
- 张培茗, 陈家璧, 庄松林. 基于信息融合的人眼波前像差测量[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2571~2576
- 7 Liu Ming, Wang Zhaoqi, Wang Yan *et al.*. Aberrations compensation of cornea and crystalline lens based on individual eye model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1977~1982
- 刘铭, 王肇圻, 王雁等. 基于个体眼光学结构的角膜与晶状体的像差补偿[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1977~1982
- 8 Li Chao, Jiang Baoguang, Xia Minglian *et al.*. Laser speckle reduction in retina imaging illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2245~2249
- 李抄, 姜宝光, 夏明亮等. 用于人眼视网膜成像照明的激光消散斑技术研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2245~2249
- 9 Ning Ling, Rao Xuejun, Yang Zheping *et al.*. Wave front sensor for the measurement of vivid human eye [C]. Proc. of the 3rd International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine, Albuquerque, 2001, 85~90
- 10 Ling Ning, Rao Xuejun, Wang Cheng *et al.*. Hartmann-Shack wavefront sensor for the human eye aberration [C]. Proc. of the 5th International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine, Beijing, 2005, 60~66
- 11 Yu Xiang, Rao Xuejun, Xue Lixia *et al.*. Dynamic aberration measuring instrument inducing human eye accommodation [J].

- Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1198~1204
- 余 翔, 饶学军, 薛丽霞 等. 可诱导人眼自主调节的动态像差测量仪[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1198~1204
- 12 Yu Xiang, Dai Yun, Rao Xuejun *et al.*. A wavefront aberrometer for dynamic high-order aberration measurement [J]. *Optik, in press*, 2010, **21**(15): 1405~1411
- 13 Rao Xuejun. The Research of Measuring Human Eye Aberrations Based on Hartmann-Shank Wavefront Sensor [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2003. 26~28  
饶学军. 用哈特曼-夏克波前传感器测量人眼像差的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2003. 26~28
- 14 Jiang Wenhan, Xian Hao, Yang Zheping *et al.*. Application of Hartmann wavefront sensor [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 1998, **15**(2): 228~235  
姜文汉, 鲜 浩, 杨泽平 等. 哈特曼-夏克波前传感器的应用[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(2): 228~235
- 15 T. Huang, G. Yang, G. Tang. A fast two-dimensional median filtering algorithm [J]. *IEEE Trans. On ASSP*, 1979, **27**(1): 13~18