

基于哈特曼-夏克传感器的人眼像差测量仪误差分析

徐安成^{1,2} 陈家璧¹ 张培茗³

(¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院生物医学光学与视光学研究所, 上海 200093
²常州工学院光电工程学院, 江苏 常州 213002; ³上海医疗器械高等专科学校, 上海 200093)

摘要 人眼是一个不完善的成像系统, 不仅存在离焦和散光, 还存在着球差、彗差以及不规则的高阶像差。这些像差影响视网膜的成像质量, 尤其在暗视场弱光下人眼呈现大瞳孔, 像差更大, 使人眼的视觉性能远远低于衍射极限。近年来, 人眼波前像差的测量技术得到不断发展, 应用于人眼波前像差测量的仪器也不断更新, 而在人眼波前像差测量中, 基于哈特曼-夏克(HS)波前传感器的测量仪器较为多数。因此着重论述哈特曼-夏克波前传感器的误差分析, 并提出人眼波前像差测量需要解决的问题的新思路。

关键词 传感器; 哈特曼-夏克传感器; 波前像差; 误差分析

中图分类号 TP212.3

OCIS 280.4788 110.3000

文献标识码 A

Error Analysis of Ocular Aberration Measurement Instrument Based on Hartmann-Shack Wavefront Sensor

Xu Ancheng^{1,2} Chen Jiabi¹ Zhang Peiming³

¹ School of Optical-Electrical and Computer Engineering, Institute of Medical Optics Optometry, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

² School of Opto-Electrical Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, Jiangsu 213002, China

³ Shanghai Medical Instrumentation College, Shanghai 200093, China

Abstract The human eye is an imperfect refractive system which has not only defocus and astigmatism, but also spherical aberration, coma and anomalous high-order aberration, all of which have influence on the imaging quality of retina. What's worse, aberration is further enlarged as a result of mydriasis in dark field and weak light, thus making the vision performance of human eyes far below diffraction limitation. In recent years, the measuring technology of wavefront aberration of human eyes has got constant development, and the advanced measuring instruments for measurement of ocular aberration appeared soon after. The measurement instruments based on Hartmann-Shack (HS) sensor are very popular. The errors analysis of the measuring instrument based on Hartmann-Shack wavefront sensor is introduced. Then the new way to solve this problem is put forward.

Key words sensors; Hartman-Shack sensor; wavefront aberration; error analysis

1 引言

视光学科技水平的不断发展, 使得人们能够对眼睛的近视、远视或散光的治疗不断采取新的更加可靠的方法, 治疗后的眼睛达到更佳的成像质量。通过治疗后获得高质量的眼睛成像的基本要求之一, 就是要对每个个体的眼睛的像差能够有符合其本质特征的测量, 从而制定出符合要求的治疗方案。

人眼像差测量技术经过数百年的发展已经涌现出了很多测量方法, 这些测量方法大致可以分为主观测量法和客观测量法。常用的主观测量法包括主观阴影像差仪、干涉度量法和主观光路追迹法等^[1~4]。客观测量法主要包括基于哈特曼-夏克(Hartmann-Shack, HS)波前传感器的测量仪、客观阴影像差仪、双光程

收稿日期: 2010-02-01; 收到修改稿日期: 2010-05-01

基金项目: 国家 973 计划(2007CB935303)、国家自然科学基金(60778031)、高等学校博士学科点专项科研基金(20050252004)、上海市研究生创新基金(JWCXSL0901)和江苏省高校自然科学研究项目(09KJD140001)资助课题。

作者简介: 徐安成(1974—), 男, 博士研究生, 主要从事视光学、光电测量技术等方面的研究。E-mail: jackyxac@163.com

导师简介: 陈家璧(1946—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电精密测量技术、光学信息处理和视光学等方面的研究。

E-mail: jibchenk@online.sh.cn

法、视网膜仪和同步像差仪等^[5-8]。在众多的测量仪器中,由于 HS 传感器的显著优点而被广泛采用,其测量结果的准确性和重复性决定了人眼波像差的测量结果是否真实、可用。而测量结果的准确性和重复性,都非常依赖于所采用波前像差仪器及其关键部件本身的误差特性。

2 波前像差及人眼波前像差的来源

从物点发出的波面经理想光学系统后,其出射波面应该是球面。但由于实际光学系统存在像差,实际波面与理想波面便有了偏差。波前像差的基本概念就是:理想波面和实际波面之间的光程差(Optical path difference, OPD),即称为波前像差(Wavefront aberration, WA)。理想波面既可以是平面波也可以是球面波。图 1 为波前像差示意图,分别为平面波和球面波的波前像差^[9]。

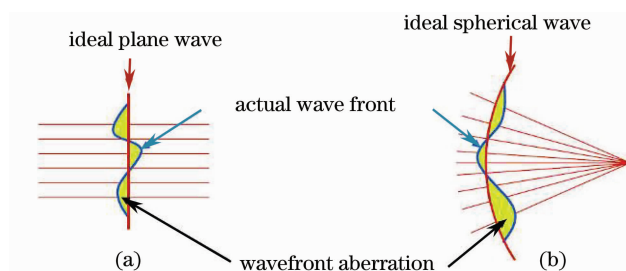


图 1 (a) 平面波的波前像差, (b) 球面波的波前像差

Fig. 1 (a) WA of plane wave, (b) WA of spherical wave

对于人眼成像来说,在没有像差时,进入人眼的波前可以很好地在视网膜上会聚成一个焦点,人眼波前像差即是由实际波前和理想的无偏差状态的波前之间的差来定义^[8]。实际人眼存在的像差有低阶像差和高阶像差。低阶像差包括近视、远视、散光;高阶像差主要包括球差、彗差、不规则散光等。研究表明,人眼波前像差的主要来源有^[10]:1)角膜和晶状体的表面不理想,其表面曲度存在局部偏差;2)角膜与晶状体、玻璃体不同轴;3)角膜和晶状体以及玻璃体的内含物质不均匀,使折射率有局部偏差。这些结构上的偏差使得经过偏差部位的光线偏离理想光路,以至物体上的某一点在视网膜的对应点上不是一个理想的像点,而是一个弥散圆,其实际焦点可能在视网膜的前面(近视)或者后面(远视)。这样,人眼就不能获得清晰的像。

3 基于 HS 传感器的人眼波前像差测量原理

自从 J. Liang 等^[8,11]采用 HS 波前传感器测量人眼像差以来,大多数研究人员采用基于 HS 传感器作为测量人眼像差仪的主要器件。由于人眼的像空间无法测量,人眼的像差函数往往是在物空间中被定义和测量的。人眼像差的客观测量一般是通过辅助光源照射到视网膜上,通过视网膜的反射(反射光波信号包含了人眼像差信息),然后再测量出人眼的像差信息。图 2 所示为基于 HS 传感器的人眼像差仪示意图^[12]。激光二极管 LD 发出的激光经空间滤波 L_1 , 然后经过准直透镜 L_2 , 通过反射镜 M_1 反射到分束器 BS_1 上,经扩束后入射到人眼,然后入射光波获得人眼的像差信息反射传输入 HS 波前传感器。

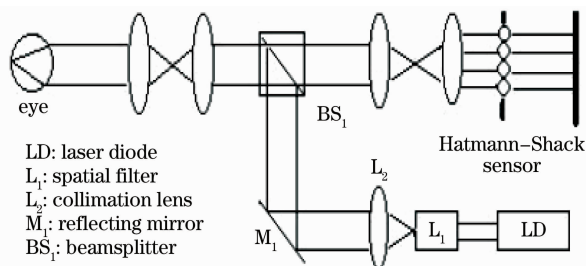


图 2 HS 传感器人眼像差仪示意图

Fig. 2 Sketch map of ocular aberrator of HS sensor

HS 波前传感器一般由球面微透镜阵列与其焦平面上的电荷耦合器(CCD)组成,其基本原理如图 3 所示。透镜阵列把波阵面划分为若干个子孔径,光线通过各个

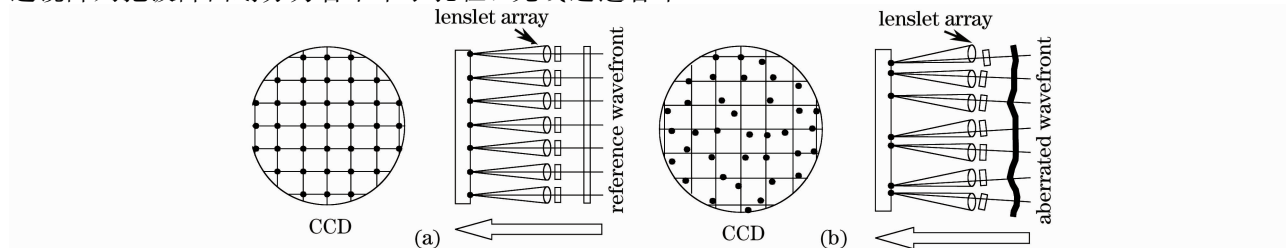


图 3 HS 波阵面传感器原理

Fig. 3 Principle of HS wavefront sensor

子孔径到达透镜阵列对应的焦平面处。如果是理想的平面,光线将会聚于各个微透镜光轴上的焦点上,如图 3(a)所示;而变形的波阵面对应于每个子孔径微透镜来说,像点将发生如图 3(b)所示的偏移,即像点不在各个孔径的焦点上。

图 4 为畸变波前进入 HS 传感器在 y 方向上的偏移量的示意图。测量出这个偏移量,然后根据子孔径上的波前斜率就可以进行波阵面的复原,从而得到整个孔径上的波前像差。根据图 4 原理可以推导出在 x, y 方向上的波前斜率计算公式分别为^[9]

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = \frac{\Delta x}{f}, \quad \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = \frac{\Delta y}{f}, \quad (1)$$

式中 $W(x, y)$ 为入射光波的波前像差, $\Delta x, \Delta y$ 分别为子光斑沿 x 轴方向和沿 y 轴方向的相对偏移量, f 为微透镜的焦距。

利用平面 (x, y) 作为理想的参考波前,则波前像差函数 $W(x, y)$ 可以利用泽尼克多项式描述为^[13,14]

$$W(x, y) = \sum_{k=0}^n c_k Z_k(x, y), \quad (2)$$

式中 c_k 是泽尼克多项式的系数, $Z_k(x, y)$ 是泽尼克多项式第 k 个模。

4 基于 HS 传感器的波前像差测量误差分析

4.1 成像传感器 CCD 误差

作为 HS 传感器的主要组成部分之一的 CCD 像素在 x 和 y 方向上的倾斜误差可以达到 25%, 这些误差的存在会引起波前重建时产生“伪”像散, 解决的办法一般是采用专门的校准程序来消除这些误差。另外阵列透镜与其焦平面上成像传感器 CCD 之间的位置误差也反应了其自身的重建像差的振幅大小。由于 CCD 与透镜阵列间的距离很难被准确测量, 波前传感器一般用校准程序来准确校准这些误差, 即用位于光轴上的子孔径与传感器上对应点之间的距离来校准。这种方法能够将波前重建精度提高 10%。文献[15]中对 HS 波前传感器平移误差进行了研究, 确定平移误差的最佳范围为残余像差与理论像差的均方根比值不大于 0.5%。这为 HS 传感器的装配提供了理论依据和技术指标。

4.2 采样误差

HS 传感器阵列面的填充因子(采样面与整个面的比值)一般在 0.25~0.35 范围, 这就意味着理论上损失的波前能量最高达到 75%。根据抽样定理^[16], 如果测量函数的最高次谐波在每周期内采样 4 次以上, 波前重建的误差就能够被正确校正, 采样次数越多, 校正效果越好, 即采样误差可以通过提高最高次谐波的每周期采样次数来解决。

4.3 重复性误差

重复性对波前像差来说是非常重要的指标, 因而对人眼像差哈特曼测量仪的重复性测试进行研究是非常必要的^[17]。实验研究通过测量活体人眼的动态波前像差, 来说明基于 HS 传感器的测量仪具有较高的重复性。有研究表明, 基于 HS 传感器的波前像差仪测量人眼离焦的精度为 0.2 D(D 为屈光度), 波像差的平均偏差为 0.065 μm , 充分说明利用 HS 传感器测量人眼波像差, 不仅具有快速、实时的优点, 而且测量精度和重复性也都比较理想^[15]。

4.4 HS 传感器信噪比对测量的影响

HS 波前传感器信噪比的大小对测量结果具有重要的影响^[18], HS 波前传感器的噪声主要是角膜的反射光, 可以用模拟眼消噪声的方法进行实验研究。实验证明, 与采用薄的半透射半反射镜实验方法相比, 在光线斜入射消除偏振分光镜内部反射噪声的前提下, 该方法可使信噪比提高到 11:1; 其次, 采用离轴入射法进行实验研究, 可以获得 200:1 的信噪比。

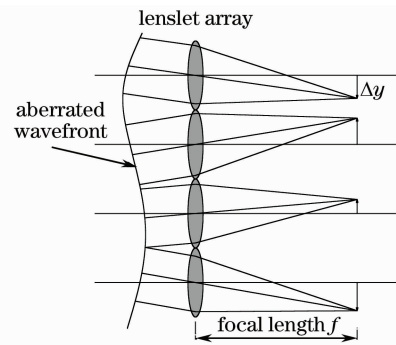


图 4 畸变波前进入 HS 传感器示意图

Fig. 4 Sketch map of aberrated wavefront enter into HS sensor

另外,也可以用图像灰度的均方根值与噪声均方根值之比来表示信噪比^[19]。理论分析表明,两个子图像的相关函数峰值位置的亚像元插值误差等于其各离散频率成分的相关函数峰值位置插值误差的加权平均;相同功率下,低频成分的加权系数较小,而高频成分的加权系数与亚像元偏移量有关。一维窄带图像的统计仿真表明,无噪声时,低频成分和接近奈奎斯特频率成分的误差较大,中频成分的误差较小;有噪声时,噪声对高频成分的影响低于低频成分。对典型频谱的 32×32 图像仿真表明,图像起伏信噪比为 2:1 时,子图像平移量计算误差约 0.03~0.11 像元,与无噪声时相比增加不大。

4.5 波前传感器精度与准确度数值分析

波前传感器的精度和准确度是两个不同的概念,其精度与准确度的大小主要与阵列透镜和其焦平面上的 CCD 组合的几何结构有关。精度在某种程度上反映的是传感器的重复性,也就是说对于给定不变的入射波前,精度就是指在测量结果中的变化量(通常用均方根值表示)。精度往往受到探测器有限的像素、探测器的信噪比、CCD 的输出噪声、阻塞线路或视频帧抖动,以及其他的随机因素的影响。传感器的准确度是指传感器测量已知的波前像差的能力。准确度也会受到有限的像素、透镜阵列的串扰、背景光、曝光时的点扩散、CCD 输出信号以及其他因素的影响。

4.5.1 质心估计误差

弄清楚 HS 传感器的精度及准确度的不确定度的来源也是非常重要的^[20~22]。常用质心估算的方法来计算测量传感器的重复性,一般可由记录大量的测量数据,然后分析质心位置来计算获得其值。比如,对 N 次的测量结果, K 个透镜阵列的传感器有

$$v^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\frac{1}{K} \sum_{K=1}^K (x_K - \bar{x}_K)^2 + (y_K - \bar{y}_K)^2 \right], \quad (3)$$

该计算结果即为质心的标准偏差。(3)式假设 x 和 y 为质心坐标,并且每一次测量的结果都是相互独立的。

4.5.2 质心像素化误差

质心像素化误差^[22,23]产生的原因并不取决于每个子透镜的信噪比,而是主要取决于焦斑的采样信号。对于 HS 传感器来说,质心像素化误差通常会对传感器的准确度有影响。为了评估这个误差的影响程度,需要对焦斑的实际测量得到的位置与理想位置做比较,分析影响程度。图 5 为光学原理结构图。每个子透镜都对应一定区域的 CCD 成像区域,为了评估这个误差可以假设为:

1) 阵列透镜的衍射光斑的强度扩散可以看成是一个二维的高斯随机矢量,具有独立的表达形式

$$I = (2\pi\sigma^2) \exp[-(x^2 + y^2)/(2\sigma^2)];$$

2) HS 传感器的整个 CCD 光敏面分成 $D \times D$ 个点,每个点的大小被看成 $N \times N$ 个像素组成(整个探测器有 $M \times M$ 个像素),每个像素的大小被定义为 $d = D/N$,同时也定义 $D = 2R, \rho = R/\sigma, \mu = d/\sigma$;

3) 每个阵列透镜的中心垂直于光敏面的线就是每个子孔径(子透镜)的光轴;

4) 每个像素的信号强度就是这个像素所在区域的光强的叠加。

根据假设,可以定义 CCD 阵列的第 (n, m) 单元的信号

$$F_{nm} = T \int_{-R+(n-1)d}^{-R+nd} \int_{-R+(m-1)d}^{-R+md} I(x, y) dx dy = T \int_{-R+(n-1)d}^{-R+nd} I(x) dx \int_{-R+(m-1)d}^{-R+md} I(y) dy, \quad (4)$$

式中 $T = [Q(-\rho) - Q(\rho)]^{-2}$ 是归一化因子, $Q(x)$ 通过高斯误差函数(erfc)来定义

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2}\right) d\alpha, \quad (5)$$

信号进一步描述为

$$F_{nm} = T \{Q[(n-1)\mu - \rho] - Q(n\mu - \rho)\} \{Q[(m-1)\mu - \rho] - Q(m\mu - \rho)\}, \quad (6)$$

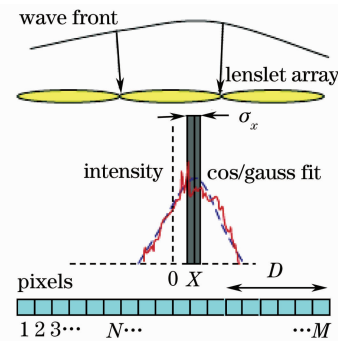


图 5 光学原理结构图

Fig. 5 Optical principle chart

这里由于 $I(x, y)$ 具有可分离性, F_{mn} 也具有可分离性。应用离散的能量分布计算质心的实际位置。测量位置定义为 \hat{x} , 被测量的像素位置标记为 (n, m) , 并且实际(连续的)位置定义为 x 。可写出期望值 $E[\hat{x}] = d\langle(n, m)\rangle = d\langle(N/2, N/2)\rangle$, 这里 $\langle(n, m)\rangle$ 是像素单元的位置矢量的平均。因此, $\langle(n, m)\rangle = (\sum_n \sum_m nF_{mn}, \sum_n \sum_m mF_{mn})$, 其和就是 CCD 阵列的全部像素的信号。在不考虑传播损失的情况下, 继续描述下一时刻的信号, 根据对称性, 假设 $\langle m^2 \rangle = \langle n^2 \rangle$, 则有

$$\begin{aligned} \langle n^2 \rangle &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N n^2 F_{mn} = T \sum_{m=1}^N \{Q[(m-1)\mu - \rho] - Q(m\mu - \rho)\} \sum_{n=1}^N n^2 \{Q[(n-1)\mu - \rho] - Q(n\mu - \rho)\} = \\ &T[Q(-\rho) - Q(\rho)] \left\{ \sum_{n=2}^N (2n-1)Q[(n-1)\mu - \rho] + Q(-\rho) - N^2 Q(\rho) \right\} = \\ &[Q(-\rho) - Q(\rho)]^{-1} \left\{ \sum_{n=1}^N (2n-1)Q[(n-1)\mu - \rho] - N^2 Q(\rho) \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

然后求解像素化产生的误差, 该误差可以定义为连续质心与离散质心之间的距离, 即

$$\sigma_x^2 = E[\|\hat{x} - d(N/2, N/2)\|^2] = 2d^2(E[n^2] - N^2/4), \quad (8)$$

(7)式代入(8)式有

$$\sigma_{\text{hat } x}^2 = 2\sigma^2 \mu^2 \frac{\sum_{n=1}^N (2n-1)Q[(n-1)\mu - \rho] - N^2 Q(\rho)}{Q(-\rho) - Q(\rho)} - 2\sigma^2 \rho^2. \quad (9)$$

4.6 模式复原误差

对 HS 传感器的泽尼克模式波前复原误差的研究也是很重要的。HS 传感器中, 通过模式复原出的波前与待测的原始波前间的误差可以描述为^[24]

$$\sigma^2(q) = \int dr \left\langle \left[\sum_{i=1}^p a_i(t) z_i(r) - \sum_{j=1}^q a'_j(t) z_j(r) \right]^2 \right\rangle, \quad (10)$$

式中 $\langle \rangle$ 表示信号的时间平均, $z_i(r), z_j(r)$ 是多项式的第 i, j 项, 或称为第 i, j 阶泽尼克模式, $a(t)$ 是模式系数, 表示斜率测量方向的单位向量, 通常其定义在 x, y 两个正交方向上, t 是时间序列, p 和 q 是波前像差的泽尼克模式阶数。

在对 HS 波前传感器的最优模式复原进行研究时, 为了减少波前探测斜率噪声对泽尼克复原模式的影响, 采用对波前复原矩阵斜率噪声影响的相关分析和线性解耦变换的方法, 得到一组基于 HS 传感器斜率探测噪声的泽尼克最优复原模式, 通过合理剔除波前模式复原中易受噪声影响的模式组合, 来减少波前测量噪声引起的波前模式复原误差; 其次, 采用蒙特卡罗随机试验法, 验证子孔径成方形排布的波前传感器对于波前斜率噪声的受影响程度, 结果显示, 复原模式系数误差由 0.0212λ 下降为 0.0048λ 。研究结果表明, 最优复原模式统计优化对于滤除波前斜率探测噪声有一定的作用, 能够提高波前探测器的探测精度和复原能力^[25]。

另外, P. M. Prieto 等^[5]对 HS 传感器在人眼像差测量上的性能做了深入研究, 通过实验与计算机仿真分析了 HS 传感器的性能, 结论表明影响传感器性能的主要因素有: 统计精确度大小, 波前重构的选择模式, 以及微透镜的尺寸和曝光时间。

Daniel R. Neal 等^[20]也对 HS 传感器的精度与准确度进行了研究。采用质心估算误差的方法, 建立了评价 HS 传感器的重复性、准确度、精度及不确定度的标准。

5 总结与展望

随着人眼波前像差测量理论及技术的不断发展, 各种新型的波前像差仪不断出现, 对人眼波前像差的检测精度也会不断提高, 但仍有许多问题尚需解决。如像差仪对同一个人不同情况下测量的精确性和可重复性, 视锥细胞与像差的方向性选择问题等。另外, 文献[26~32]表明现阶段大量的测试仪器及其所用的测试方法中 HS 传感器对整个仪器的误差的影响分析较少, 比如采用不同焦距的阵列透镜, HS 传感器的透镜阵列的衍射效应对测量结果的影响; 其次, 测试使用不同景深的光学系统也不相同, 对测量结果的影响; 以及相干光源与非相干光源对测量结果的影响, 相干光源测试时并不能反映人眼真正的波前像差; 另外在人眼瞳孔调节变化的过程

中,测试仪器并不能实时地反映像差的变化。以上诸多问题需要继续研究,在深入研究清楚这些问题后,研发出更适合测量人眼波前像差的测量仪器,具有重要的现实意义^[33~35]。

参 考 文 献

- 1 B. Howland, H. Howland. Subjective measurement of high-order aberrations of the eye[J]. *Science*, 1976, **193**(4253): 580~582
- 2 H. Howland, B. Howland. A subjective method for the measurement of monochromatic aberrations of the eye[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(11): 1508~1518
- 3 P. Artal, S. Marcos, R. Navarro *et al.*. Odd aberrations and double-pass measurements of retinal image quality[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **12**(2): 195~201
- 4 J. C. He, S. Marcos. Measurement of the wave-front aberration of the eye by a fast psychophysical procedure[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(9): 2449~2455
- 5 P. M. Prieto, F. Vargas-Martin. Analysis of the performance of the Hartmann-Shack sensor in the human eye[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(8): 1388~1398
- 6 W. H. Southwell. Wave-front estimation from wave-front slope measurements[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1980, **70**(8): 998~1006
- 7 H. Hofer, P. Artal, B. Singer *et al.*. Dynamics of the eye's wave aberration [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, **18**(3): 497~506
- 8 J. Liang, B. Grimm, S. Goelz *et al.*. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with use Hartmann-Shack wave-front sensor[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(7): 1949~1957
- 9 Zhang Peiming. Study on the subjective and objective measurement for the ocular wavefront aberration[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2009. 13~14
张培茗. 主客观人眼波前像差测量的研究[D]. 上海:上海理工大学, 2009. 13~14
- 10 Zhou Mingli, Shen Jianxing. A review of wavefront aberrations and their corrections[J]. *Chinese J. Optometry & Ophthalmology*, 2006, **8**(5): 334~337
周铭丽, 沈建新. 波前像差的矫正原理及工作流程研究进展[J]. 眼视光学杂志, 2006, **8**(5): 334~337
- 11 Junzhong Liang, David R. Williams. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(11): 2873~2883
- 12 Quan Wei, Ling Ning, Wang Zhaoqi *et al.*. Property study for hartmann sensor used in measuring wave aberration of human eye[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(3): 1~5
全 薇, 凌 宁, 王肇圻 等. 哈特曼传感器测量人眼波像差的特性研究[J]. 光电工程, 2003, **30**(3): 1~5
- 13 Cao Zhenglin, Liao Wenhe, Shen Jianxin. A new algorithm for human eye's wavefront aberration fitting with Zernike polynomial [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(2): 308~314
曹正林, 廖文和, 沈建新. 泽尼克多项式拟合人眼波前像差的一种新算法[J]. 光学精密工程, 2006, **14**(2): 308~314
- 14 Ma Junshan, Ma Hong, Chen Jiabi *et al.*. The development of measurements of aberrations of the human eye[J]. *Optical Instrument*, 2004, **26**(12): 64~71
马军山, 马 宏, 陈家璧 等. 人眼像差测量技术研究进展[J]. 光学仪器, 2004, **26**(12): 64~71
- 15 Ye Hongwei, Xian Hao, Zhang Yudong *et al.*. Study on translation error of Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(2): 1~4
叶红卫, 鲜 浩, 张雨东 等. 对 Hartmann-Shack 波前传感器平移误差的研究[J]. 光电工程, 2003, **30**(2): 1~4
- 16 Chen Jiabi, Su Xianyu. Optical Information Technology Principle and Application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. 16~21
陈家璧, 苏显渝. 光学信息技术原理及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 16~21
- 17 Chen Zhihui, Lin Ning, Rao Xuejun *et al.*. A test of repeatability of human eye aberration measuring instrument with Hartmann sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(6): 5~8
陈志辉, 凌 宁, 饶学军 等. 人眼像差哈特曼测量仪的重复性测试[J]. 光电工程, 2004, **31**(6): 5~8
- 18 Gao Weihua, Wang Zhaoxin, Mu Guoguang. Experimental study of wavefront sensors for increasing signal-to-noise ratios[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(1): 58~61
高卫华, 王肇圻, 母国光. 提高人眼波前传感器信噪比的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2005, **34**(1): 58~61
- 19 Hu Xinqi, Yu Xin, Zhao Dazhun. Influence of scene structure and noise on precision of correlating hartmann-shack wavefront sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1414~1418
胡新奇, 俞 信, 赵达尊. 目标图像结构和噪声对相关哈特曼夏克波前传感精度的影响[J]. 光学学报, 2007, **27**(8): 1414~1418

- 20 Daniel R. Neal, James Copland, David Neal. Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy[C]. *SPIE*, 2002, **4779**: 148~160
- 21 W. Jiang, H. Xian, F. Shen. Detecting error of Shack-Hartmann wavefront sensor[C]. *SPIE*, 1997, **3126**: 534~544
- 22 H. Suzuki, J. Suzuki, T. Matshushita *et al.*. Error analysis of a Shack-Hartmann wavefront sensor[C]. *SPIE*, 1995, **2443**: 798~805
- 23 Naftali Zon, Orr Srour, Erez N. Ribak. Hartmann-Shack analysis errors[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**: 635~643
- 24 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Zernike modal wavefront reconstruction error of hartmann-shack wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1236~1240
李新阳, 姜文汉. 哈特曼夏克传感器的泽尼克模式波前复原误差[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1236~1240
- 25 Tong Gui, Liao Wenhe, Liang Chun. The optimal model reconstruction of Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(4): 292~295
童 桂, 廖文和, 梁 春. 哈特曼-夏克波前传感器的最优模式复原[J]. *激光技术*, 2008, **32**(4): 292~295
- 26 P. Artal, L. Chen, E. J. Fernández *et al.*. Neural compensation for the eye's optical aberrations[J]. *J. Vision.*, 2004, **4**(4): 281~287
- 27 X. Cheng, L. N. Thibos, A. Bradley. Estimating visual quality from wavefront aberration measurements[J]. *J. Refract. Surg.*, 2003, **19**(5): S579~S584
- 28 J. D. Marsack, L. N. Thibos, R. A. Applegata. Metrics of optical quality derived from wave aberrations predict visual performance [J]. *J. Vision.*, 2004, **4**(4): 322~328
- 29 David A. Atchison. Recent advances in measurement of monochromatic aberrations of human eyes[J]. *Clinical and Experimental Optometry*, 2005, **88**(1): 5~27
- 30 R. G. Lane, M. Tallon. Wavefront reconstruction using a Shack-Hartmann sensor[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(32): 6902~6908
- 31 P. D. Pulaski, J. P. Roller, D. R. Neal *et al.*. Measurement of aberrations in microlenses using a Shack-Hartmann wavefront sensor [C]. *SPIE*, 2002, **4767**:
- 32 L. V. Carvalho, J. C. Castro. Measuring higher order optical aberrations of the human eye techniques and applications[J]. *Braz. J. Med. Biol. Res.*, 2002, **35**(11): 1395~1406
- 33 Li Qi, Ren Qiushi, Li Wanrong *et al.*. Application of wavefront error and corneal tomography in customized corneal ablation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(1): 28~33
李 琪, 任秋实, 李万荣. 波面像差和角膜地形图在个性化角膜切削中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(1): 28~33
- 34 Zhou Chuanqing, Ren Qiushi. Research and application of ocular wavefront aberration and supernormal vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(4): 26~34
周传清, 任秋实. 人眼波面像差与超视力的研究与应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(4): 26~34
- 35 Zhang Peiming, Chen Jiabi, Wang Cheng *et al.*. Progress of high spatial resolution retinal imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(1): 30~36
张培茗, 陈家璧, 王 成 等. 高分辨率视网膜成像技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(1): 30~36