

文章编号: 0253-2239(2007)05-0893-5

人眼高阶像差校正和视觉分析系统*

薛丽霞 饶学军 王 成 胡弈云 凌 宁 姜文汉

(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

摘要: 人眼除具有可用眼镜或接触镜校正的低阶像差(离焦、像散)之外,还普遍存在高阶像差。高阶像差的存在影响着屈光系统的成像质量。为研究高阶像差对视觉功能的影响,利用自适应光学技术,建立了具有校正高阶像差和产生高阶像差双重功能的人眼高阶像差校正和视觉分析系统。介绍了系统实现高阶像差校正和视觉分析的工作原理;阐述了波前校正器、哈特曼波前探测系统、控制系统等关键单元技术;列出了系统对泽尼克模式像差的校正效果,绝大多数像差从 0.5λ 降低到 0.2λ 以下;阐明系统功能的实现过程,并给出仿真实验的结果。该系统为进一步研究高阶像差对视觉功能的影响提供了有效的手段。

关键词: 自适应光学; 成像系统; 视觉分析; 高阶像差

中图分类号: TH77; TH74 文献标识码: A

Higher-Order Aberrations Correction and Vision Analysis System for Human Eye

Xue Lixia Rao Xuejun Wang Cheng Hu Yiyun Ling Ning Jiang Wenhan

(Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

Abstract: Besides defocus and astigmatism that can be corrected by wearing spectacles or contact lens, there are also higher-order aberrations in human eye which influence the visual function. By using adaptive optics technology, the system of higher-order aberrations correction and vision analysis for human eye has been developed. The principle of correcting high-order aberrations and vision analysis is presented, and key element technologies, such as wave-front corrector, Hartmann wave-front detector and control system, are explained, correct capability to Zernike modal aberrations are listed, most of aberrations that RMS error equals 0.5λ decreased below 0.2λ , the simulated result is shown to explain how the function of system is realized. It is an effective tool to study the influence of higher-order aberrations to vision function.

Key words: adaptive optics; imaging system; higher-order aberrations; vision analysis

1 引 言

屈光系统是形成视觉的必备条件^[1]。然而,存在着实际人眼与理想屈光状态之间的光学偏差和缺陷。1994年 Liang 等^[2]发现人眼除了离焦、像散等低阶像差之外,还存在着更加复杂的高阶像差如彗差、球差和三叶草等。随后各国研究者对人眼高阶像差进行了评估^[3~5],发现高阶像差普遍存在于人眼中。1997年 Williams 等在实验室利用变形镜技术矫正高阶像差后黄斑处的锥细胞的活体成像的对

比敏感度增加了 6 倍之多^[6],说明高阶像差的存在影响着眼屈光系统的成像质量。由于高阶像差无法用传统的球柱镜进行校正,因此准分子激光校正高阶像差成为近年来的研究热点,但是直到目前为止没有出现振奋人心的效果,很多因素影响校正结果,其中之一就是对高阶像差各组分对视觉功能的影响没有明确的研究结果,校正模式存在缺陷。

目前已经证实人眼像差各组分对于视锐度和对比敏感度的影响并不相同^[7],而且人眼像差各组分

* 国家重点自然科学基金(60438030)资助课题。

作者简介: 薛丽霞(1978—),女,山东聊城人,助研,硕士,主要从事自适应光学在眼科学方面的应用研究。

E-mail: xuelixia321@163.com

收稿日期: 2006-06-07; 收到修改稿日期: 2006-11-10

之间存在着相互作用。

中科院光电技术研究所 1997 年开始在国内首先开展了活体人眼视网膜高分辨力成像自适应光学技术的研究工作,突破了微小变形镜原理及制造^[8]、人眼像差波前传感器原理与人眼像差测量和重构关键技术^[9]。并于 2000 年在国内首次建立了一套基于 19 单元整体集成式微小变形镜的轻小型人眼视网膜成像自适应光学试验系统,获得接近人眼衍射极限(1.3 倍)的高分辨力视网膜像^[10],亦获得视网膜细胞高分辨力图像以及视网膜中毛细血管图像。之后于 2002 年研制成功具有更大像差校正能力 37 单元活体人眼视网膜自适应光学成像系统^[11],实验中获得更高分辨力的相对于黄斑中心凹不同区域、不同层面的视网膜细胞图像,以及更高分辨力的眼底视网膜毛细血管图像^[12]。2005 年,对人眼视网膜成像自适应光学成像系统进行改进,建立起具有校正高阶像差和产生高阶像差双重功能的人眼高阶像差校正与视觉分析系统。本文对此系统的结构原理进行报道,对人眼实际的实验结果将另文介绍。

2 人眼高阶像差校正和视觉分析系统

2.1 工作原理

人眼高阶像差校正和视觉分析系统主要有人眼像差测量系统(信标发射装置、哈特曼波前测量装置)、人眼像差校正系统(变形反射镜、口径匹配系统)、视标观察系统、控制系统等。系统布局如图 1。

由半导体激光器发出的激光经过空间滤波、准直后(信标发射系统)经分光镜入射到人眼内,经人眼会聚后在眼底形成一个光斑。此光斑可视为视网膜的一个点光源,其后向散射光经过眼睛的屈光系

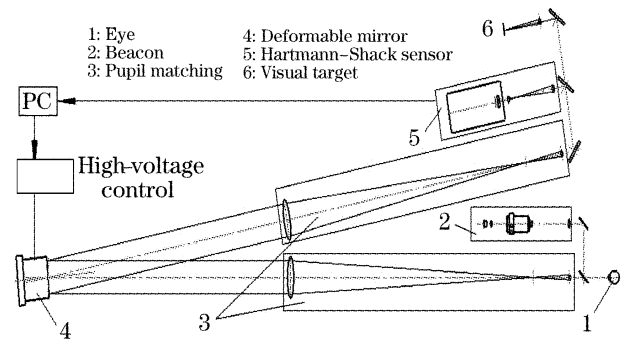


图 1 人眼高阶像差校正和视觉分析系统装置示意图
Fig. 1 Setup of higher-order aberrations correction and vision analysis system for human eye

统后从瞳孔射出,经过变形镜,口径匹配系统,成像在哈特曼波前传感器上。由此传感器测量波前像差,控制系统据此像差数据引导、控制变形反射镜校正人眼波前像差,同时根据不同类型像差或特定像差在波前传感器上的反映给定不同的波前斜率由变形镜构造像差,模拟了人眼具备不同像差的情况。人眼通过观察不同大小不同对比度的视标,来进行人眼视锐度、对比敏感度等特性的测量,从而可以实现具备不同像差的人眼屈光系统的视功能评价,或人眼在高阶像差校正后的视力评价。

2.2 关键技术

采用的波前校正器是 37 单元的微小型变形反射镜[图 2(a)所示]。中心驱动器变形量 $\pm 1.5 \mu\text{m}$,图 2(b)是变形反射镜的原始面形,PV 值为 $0.095 \mu\text{m}$,RMS 值为 $0.015 \mu\text{m}$ 。图 2(c)是变形反射镜的驱动器排布图。驱动器上施加的电压与产生面形变化的关系是变形反射镜的重要性能,它决定变形反射镜对波前误差的校正能力,一般用影响函数来描述。图 3 是中心驱动器的影响函数。

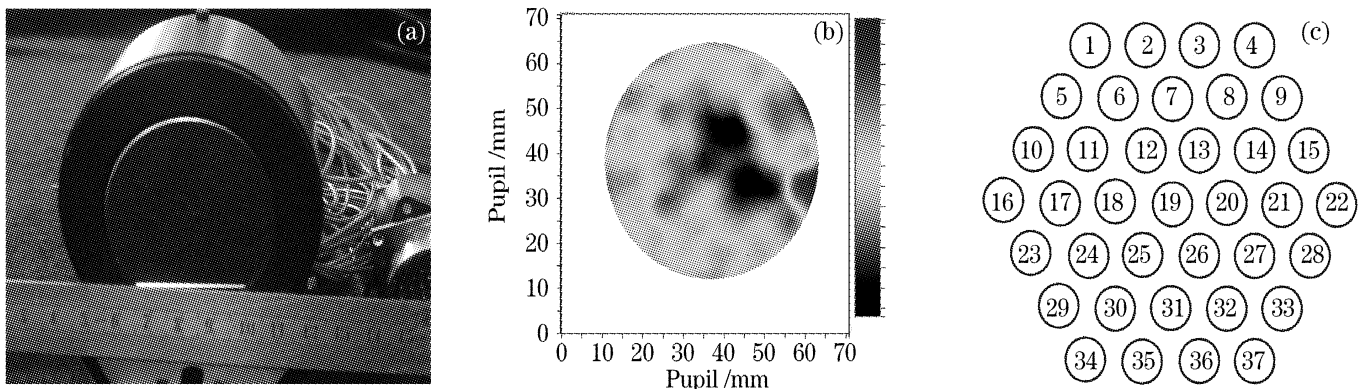


图 2 37 单元变形反射镜实物(a),原始面形(b),点排布图(c)

Fig. 2 Deformable mirror (a), original surface (b), arrangement (c) of 37 actuators

采用哈特曼传感器技术测量人眼波像差,如图 4 所示。

哈特曼传感器采用孔径分割和聚焦光学器件将被测孔径分割成若干子孔径并聚焦到 CCD 探测器

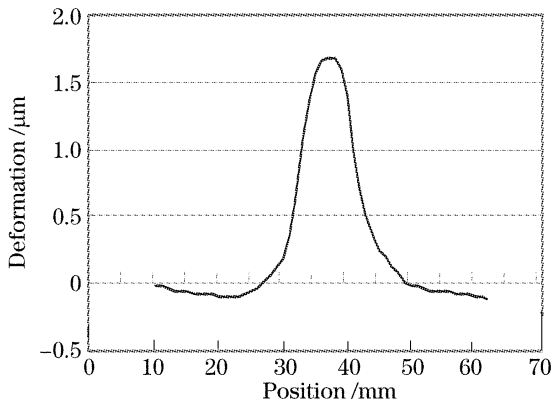


图 3 中心驱动器影响函数

Fig. 3 Influence function of center actuator

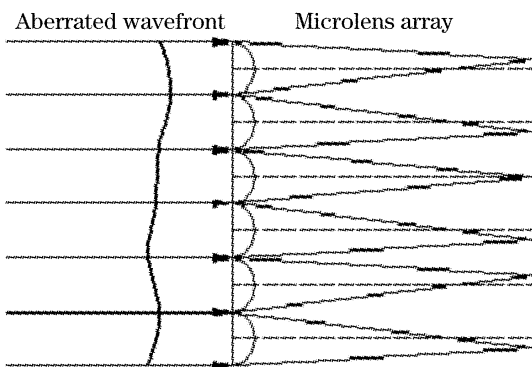


图 4 哈特曼波前传感器原理

Fig. 4 Principle of Hartmann-Shack sensor

上,通过 CCD 视频信号的处理计算出聚焦光斑的重心位置,得到相对于标定的基准位置的位移 Δx ,则子孔径内入射波前的波前斜率为

$$G_x = 2\pi\Delta x/(\lambda f), \quad (1)$$

λ 为测量波长, f 为微透镜焦距。

波前斜率通过一定的复原算法就可得到波前像差,通过波前像差又可以进行点扩散函数、调制传递函数、环围能量等光学评价函数的计算。

哈特曼传感器的测量精度为 $\lambda/20$ (RMS), 动态范围: $\pm 2\lambda/\phi$ (式中 ϕ 为子孔径)。

进行波前控制计算,得到变形镜的控制信号,控制变形镜产生需要的波前变化。整个系统构成一个闭环反馈控制系统,其信号流程如图 5 所示。

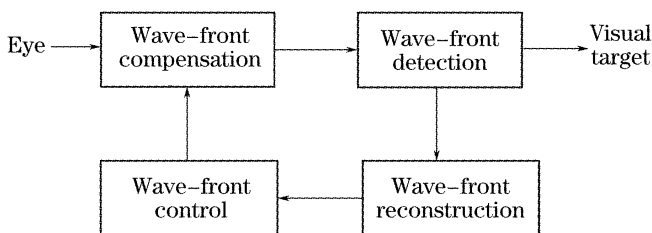


图 5 自适应光学系统的信号流程图

Fig. 5 Signal diagram of adaptive optical system

计算机控制算法影响整个自适应光学系统的动

态响应特性,必须能够有效校正人眼系统的光学静态像差,同时还要有效抑制人眼肌肉的快速运动和 CCD 相机噪声等带来的不利因素。合适的控制算法可以使系统稳定、校正精度高。根据控制理论,比例积分 (PI) 控制器对静态像差的拟合误差为零,同时对动态像差的跟踪能力也比较好。而且其算法形式非常简单,可以方便地在系统上实现。我们在系统中采用了较简单的比例积分控制算法。

为了抑制系统中的高频扰动,利用哈特曼传感器多幅图像的平均进行控制计算。图 6 是系统闭环后,驱动器残余电压信号的时间变化曲线。从图可见系统闭环后,经过大约 20 次的控制,反映子孔径斜率的残余电压就很快达到零附近,没有出现大的超调和振荡现象,并在以后保持这种状态。这意味着控制算法的收敛性和稳定性比较好,控制参数的调整是合适的。

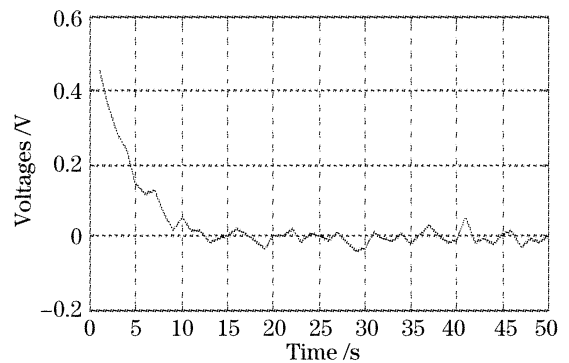


图 6 驱动器残余电压随时间的变化

Fig. 6 Variation of actuators residual voltage with time

3 系统校正能力及试验结果

3.1 系统校正能力探测

对于不同项的泽尼克 (Zernike) 多项式的波像差 (RMS=0.5 λ) 的校正效果进行实验和理论仿真计算,校正后的残余波像差的 RMS 值如图 7 所示。

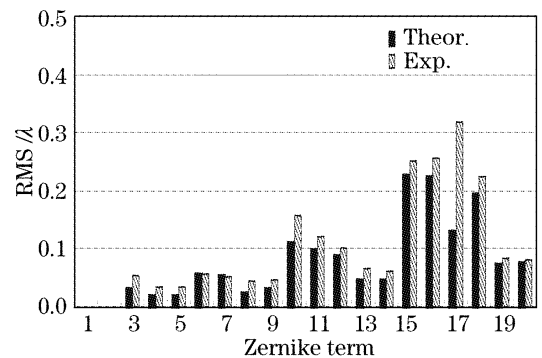


图 7 37 单元变形镜校正像差的理论计算和试验数据的比对

Fig. 7 Experimental result of correction capability of deformable mirror compared with theoretical value

可以看出,该系统对前 20 项人眼高低阶像差均有明显校正效果,绝大多数像差从 0.5λ 降低到 0.2λ 以下。根据很多研究机构对人群像差的统计表明^[3~5],在自然状态下,对人眼像差的描述采用到 5 阶 20 项 就可以了。

曾对小样本进行过像差的测量和统计,年龄 21~30 岁间,屈光在 $-1D\sim-6D$,瞳孔 6 mm,其统计结果数据如图 8 所示。图中前三项分别是离焦和像散,去除离焦、像散后的高阶像差分布如插入的小图所示。针对高阶像差,通过本系统来拟合产生所需的高阶像差(图 9),图中左面一列是根据统计数据理论构造的波面平面图及立体图,中间一列是系统根据统计的像差数据拟合的像差波面平面图及立体图,右边一列是两者相减后的波面残差。图 9 中 PV 指峰谷值(Peak to valley)。

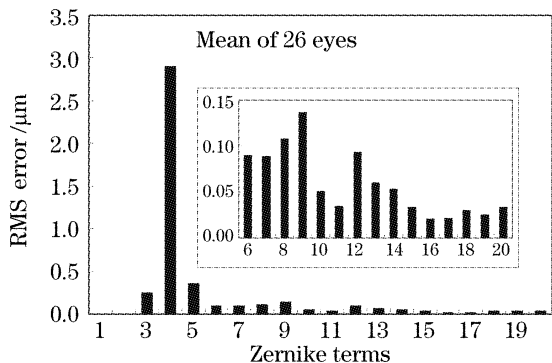


图 8 小样本人群像差统计结果

Fig. 8 Statistic result of eye aberrations

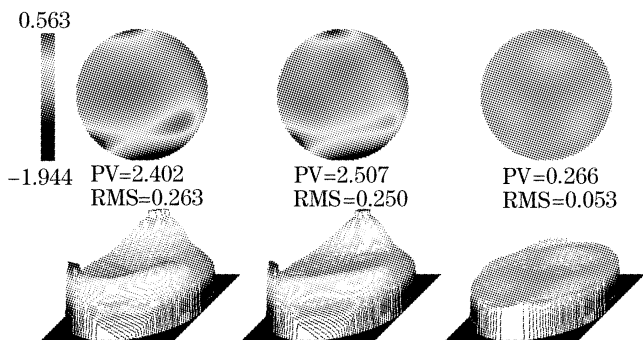


图 9 拟合波面

Fig. 9 Fit wave front

3.2 系统的功能实现

在视标观察光路中给定一个 0.8 的视标,在眼睛的摆放位置放置 CCD 来记录系统模拟的在不同像差下的视标图像,来验证系统的拟合效果。

系统闭环时校正了系统本身光路中的像差,残余像差 $RMS < \lambda/10$ 。根据马雷夏尔判据,在 CCD 上观察到一个近似理想状态下的视标,如图 10 所示。然后,系统产生一个 $RMS = 0.5\lambda$ 的彗差,其远场点扩展函数如图 11 所示,在 CCD 上接受的图像

就是带有彗差的视标,如图 12 所示。通过不同的像差叠加,可以进行不同像差对视功能影响的测试和分析研究。

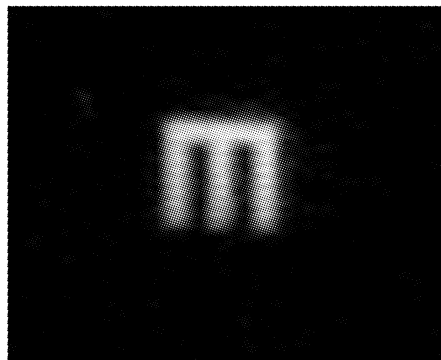


图 10 理想视标

Fig. 10 Ideal visual target

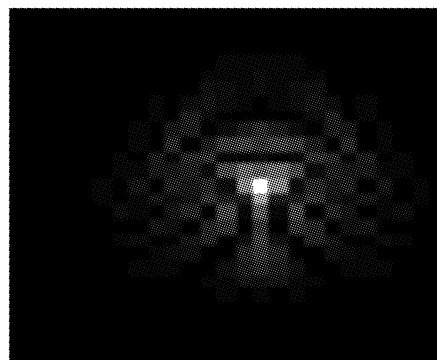


图 11 彗差的远场点扩展函数

Fig. 11 Point spread function of coma

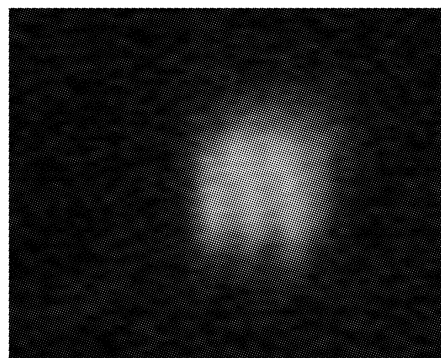


图 12 带有彗差的视标

Fig. 12 Visual target with coma

4 结 论

人眼像差对人眼屈光系统的 optical 质量有着重要的影响,利用自适应光学技术建立了具备校正高阶像差和产生高阶像差双重功能的人眼高阶像差校正和视觉分析系统,为视光学研究提供了新的手段。我们将利用这一系统探索高阶像差对于视功能特别是视锐度和对比敏感度的影响、人眼光学系统各组成参数与人眼波前像差的定量关系、建立提高视锐度和对比

敏感度的人眼光学校正方案等一系列研究。

参 考 文 献

- 1 Xu Guangdi. *Ophthalmologic Refraction* [M]. Beijing: Publishing House of Medicine-Martial Science, 2001. 3, the second ed. (in Chinese)
徐广第. 眼科屈光学[M]. 第2版. 北京: 军事医学科学出版社 2001. 3
- 2 Junzhong Liang, Bernhard Grimm, Stefan Goelz *et al.*. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor[J]. *J. Optical Society of America A*, 1994, **11**(7): 1949~1957
- 3 Ling Ning, Zhang Yudong, Rao Xuejun *et al.*. Measurement and correction in time of high order aberrations [C]. *Optics and Optical Engineering—Procoessing of Congratulation for Wang Daheng Academician's 90 Birthday*, Beijing: Science Press, 2005. 73~89 (in Chinese)
凌 宁,张雨东,饶学军 等. 人眼高阶像差的测量和实时校正 [C]. 光学与光学工程——庆祝王大珩院士诞辰 90 周年学术论文集, 北京: 科学出版社, 2005. 73~89
- 4 Jason Porter, Antonio Guirao, Lan G. Cox *et al.*. Monochromatic aberrations of the human eye in a large population [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, **18**(8): 1793~1803
- 5 José Francisco Castejón-Monchón, Norberto López-Gil, Antonio Benito *et al.*. Ocular wave-front statistics in a normal young population[J]. *Vision Research*, 2002, **42**: 1611~1617
- 6 Junzhong Liang, David R. Williams, Donald T. Miller. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(11): 2884~2892
- 7 Raymond A. Applegate, Ediwin J. Sarver, Vic Khemsara. Are all aberrations equal? [J] *Refract Surg.*, 2002, **18**(5): S556~S562
- 8 Ning Ling, Xuejun Rao, Lan Wang *et al.*. Characteristic of a novel small PZT deformable mirror[C]. *The 2nd International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine*, 1999. 129~135
- 9 Ning Ling, Xuejun Rao, Zheping Yang *et al.*. Wave front sensor for measurement of vivid human eye[C]. *The 3rd International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine*, 2001. 85~90
- 10 Yudong Zhang, Ning Ling, Xuejun Rao *et al.*. A small adaptive optical system on table for human retinal imaging[C]. *The 3rd International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine*, 2001. 97~104
- 11 Ling Ning, Zhang Yudong, Rao Xuejun *et al.*. A small adaptive optical imaging system for cells of living human retina[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1153~1158 (in Chinese)
凌 宁,张雨东,饶学军 等. 用于活体人眼视网膜观察的自适应光学成像系统[J]. 光学学报, 2004, **24**(9): 1153~1158 (in Chinese)
- 12 Ning Ling, Yudong Zhang, Xuejun Rao *et al.*. High resolution mosaic image of capllaries of human retina by adaptive optics[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(4): 225~226