

用于自适应光学视网膜成像系统的双压电片 变形反射镜

周 虹^{1,2,3} 官春林^{1,2} 戴 云^{1,2}

¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209
² 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209
³ 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了解决自适应光学视网膜成像系统结构庞大和像差校正幅值有限的问题, 采取了用双压电片变形镜代替分立式变形镜的方法。设计和制造了针对自适应光学视网膜成像系统的双压电片变形反射镜, 并进行了一系列的性能分析, 在实际系统中获得了人眼视网膜血管和视细胞层的成像结果。实验结果表明其能够同时实现大幅值和高精度的像差校正, 是一种较好的波前校正器。

关键词 自适应光学; 双压电片变形反射镜; 泽尼克像差; 视网膜成像

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0211001

Bimorph Deformable Mirrors for Adaptive Optics of Human Retinal Imaging System

Zhou Hong^{1,2,3} Guan Chunlin^{1,2} Dai Yun^{1,2}

¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
² Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to solve the existing problems of voluminosity in structure and limited deformation in adaptive optical human retinal imaging system, bimorph deformable mirror is adopted as a better substitute to the segmented deformable mirror in such system due to its small dimension and great deformation amplitude. A pair of bimorph deformable mirrors are designed and fabricated for dual-deformable mirror human retinal imaging system. The practical images of vessels and cells indicate that they satisfy the requirement of imaging system, which are better for adaptive human retinal imaging system than conventional segmented deformable mirror.

Key words adaptive optics; bimorph deformable mirror; Zernike polynomial; retinal imaging

OCIS codes 110.1080; 230.4040; 330.7325

1 引 言

人眼视网膜自适应光学成像系统是自适应光学民用化的成功范例。利用自适应光学来校正人眼像差能实现对活体人眼视网膜的接近衍射极限的高分辨力观察, 从而实现对某些疾病(如糖尿病等)的早期诊断。美国的 Rochester 大学最早开始这方面的研究工作并取得了突破性的成就^[1,2]; 国内中国科学

院光电技术研究所于 1997 年起相继研制成功 19 单元和 37 单元活体人眼视网膜自适应光学成像系统^[3~5], 也研制成了基于反射型液晶显示板的人眼像差校正实验系统^[6]; 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所建立了基于液晶光调制器的视网膜成像系统, 并获得了较好的成像结果^[7~10]。就系统所使用的各种波前校正器来看, 传统的分立式变形反

收稿日期: 2012-09-20; **收到修改稿日期:** 2012-10-12

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目(y2010028)资助课题。

作者简介: 周 虹(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: hong_zhou@yahoo.com

导师简介: 官春林(1965—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事能动光学器件方面的研究。E-mail: clguan@ioe.ac.cn

射镜(SAM)技术成熟,但是它的结构特点导致在满足一定校正能力的情况下需要比较大的通光口径,从而使得系统的光路结构趋向庞大,不利于设备的小型化。微机电系统(MEMS)变形镜校正精度高但是校正的幅值却比较小(小于 $2\ \mu\text{m}$),对人眼像差中占绝大部分的离焦和像散的校正幅值不足^[11,12] [主要针对有近视的患者,3D(D为屈光度,即 m^{-1}) 近视量就需要约 $20\ \mu\text{m}$ 的校正量^[8,9]]。液晶空间光调制器具有很高的校正精度,而且校正幅值大,是一种比较合适的人眼像差校正器^[13]。

中国科学院光电技术研究所之前已经成功研制出了双压电片变形反射镜的样镜^[14],所以也希望考察此种变形镜在视网膜成像系统中的适应性,本文在此基础上介绍了为人眼视网膜自适应光学成像系统研制的个性化双压电片变形反射镜的相关工作。

2 双压电片变形反射镜的研制

基于对人眼系统像差的分析,系统采用两个变形镜联合校正的方案:其中一个用来校正大幅值的离焦和像散;另一个用来校正其他高阶像差。具体的结构如图 1 所示,信标光源 1 发出的激光束进入人眼 8 再反射到哈特曼-夏克(H-S)波前传感器 18,传感器根据探测信号通过控制机 19 和高压放大器(HV)20 控制变形镜 11、12 进行补偿校正;当校正进行到一定程度后,LD 光源 4 闪光,照射人眼,同时成像电荷耦合器件(CCD)相机 16 记录图像。

系统的体积很大程度上取决于缩扩束系统大小,而缩扩束系统的大小又取决于变形反射镜的口径大小。例如现有的 19 单元系统采用的变形镜口径为 $20\ \text{mm}$,整个系统的外形尺寸为 $81\ \text{cm} \times 47.5\ \text{cm} \times 18.3\ \text{cm}$,而 37 单元系统为了提高对高阶像差的校正

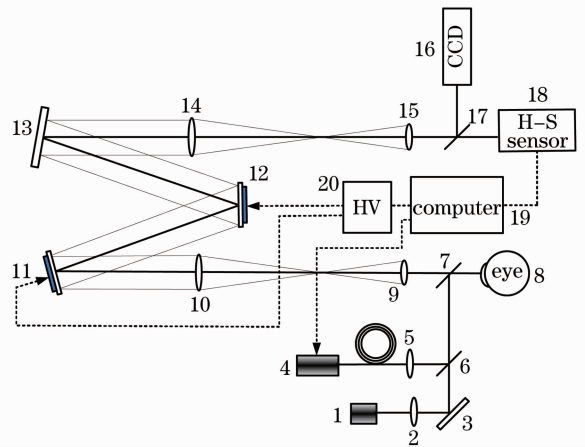


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 System configuration

能力采用口径为 $40\ \text{mm}$ 的变形镜,但系统体积就达到了 $120\ \text{cm} \times 57\ \text{cm} \times 31\ \text{cm}$,几乎是 19 单元系统的 3 倍^[4]。系统校正能力提高的代价是臃肿的体积,可见采用小口径的波前校正器是十分必要的。系统设计的通光口径为 $20\ \text{mm}$,目的是要保证将体积控制在原有 19 单元系统的规模;变形镜对离焦和像散要有至少 $10\ \mu\text{m}$ 以上的校正能力并且要能校正前 20 项泽尼克像差。根据这个要求,同时为了充分发挥双压电片变形镜校正量大的优点,确定了双变形镜联合校正的系统方案,系统结构如图 1 所示。其中变形镜 11 专门用来校正离焦和像散像差,而剩余的像差由变形镜 12 来校正。

根据两个变形镜各自的校正对象进行差异化的结构设计,第一个变形镜只针对离焦和像散像差,所以要求变形量要大。设计时确定单元数相对较低,采用 9 个电极的结构就已经足够,这块变形镜也简称为 Bimorph9,具体的电极分布如图 2(a)所示。所有电极都施加相同的电压则会产生离焦的形状,而

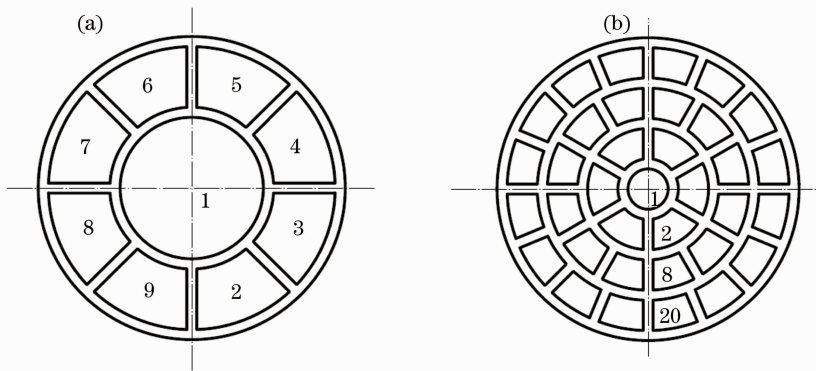


图 2 驱动电极分布。(a) Bimorph9; (b) bimorph35

Fig. 2 Driven electrodes pattern. (a) Bimorph9; (b) bimorph35

在扇形电极上加不同的电压则可以产生像散像差。8块扇形电极的布局兼顾了 0° 和 45° 方向的像散,从而保证了对任意方向的像散都有校正能力。第二个变形镜用来校正除离焦像散外的高阶像差,所以电极的空间分布要密集一些,采用如图2(b)所示的35个电极的布局,所以这个变形镜也简称为Bimorph35。制造方面延续了之前20单元实验样镜的相关工艺^[14],但是为了达到更大的变形量而采用了更薄的镜面和压电陶瓷(PZT)层结构。另外由于系统工作在可见光波段并且光强较弱,所以采用玻璃镜面材料镀制铝反射膜的工艺。

3 双压电片变形反射镜的性能测试

实际变形镜制造完成后需要对性能进行一系列的测试分析,包括影响函数、响应频率等,以确定它是否能够满足系统应用的需求。

3.1 原始面形

变形镜自身的原始面形也会带来一部分系统像

差,一般要求这个面形不能太差。Bimorph9原始面形的峰谷值(PV)和均方根(RMS)值分别为 $0.486\ \mu\text{m}$ 和 $0.092\ \mu\text{m}$,如图3(a)所示,Bimorph35原始面形的PV和RMS值分别为 $0.604\ \mu\text{m}$ 和 $0.146\ \mu\text{m}$,如图3(c)所示。这样的结果比分立式变形镜的稍差,原因主要是Bimorph的镜面属于薄型光学元件,加工难度较大。而得益于Bimorph变形镜可以产生大变形的优点,可以利用其自身的校正能力来补偿这个原始像差。Bimorph9自补偿后的PV和RMS值分别为 $0.160\ \mu\text{m}$ 和 $0.025\ \mu\text{m}$,如图3(b)所示;Bimorph35自补偿后的PV和RMS值分别为 $0.079\ \mu\text{m}$ 和 $0.014\ \mu\text{m}$,如图3(d)所示。而面形自补偿所加载的电压都没有超过 $\pm 20\ \text{V}$,只有可加载电压($\pm 300\ \text{V}$)的6.7%,所以初始面形误差能够得到较好的补偿而且不会对校正能力有大的影响。由于Bimorph35的单元数多于Bimorph9,其自补偿后的面形明显好于后者。

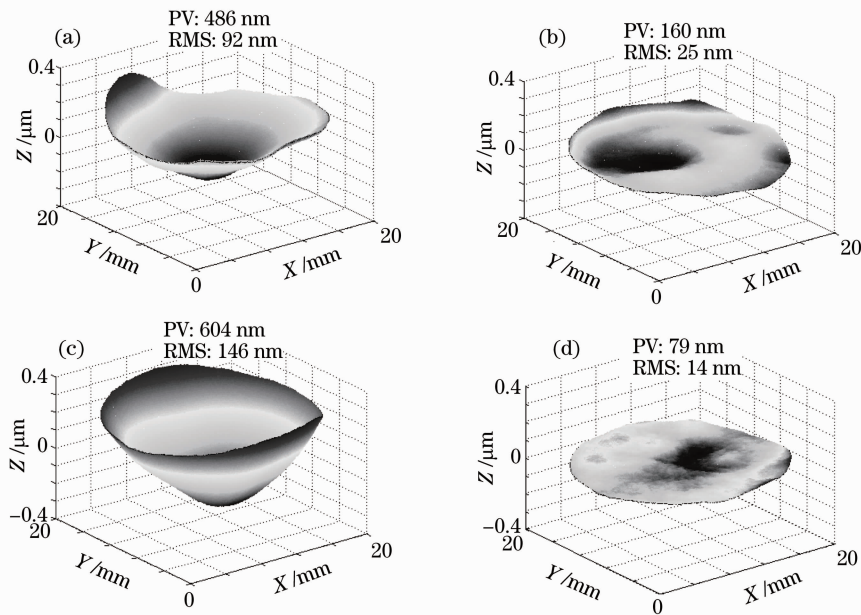


图3 两个校正器的原始及自补偿后的面形

Fig. 3 Surface map before and after correction

3.2 影响函数







影响函数是决定变形镜性能的最主要的参数,仿真分析和实际的系统控制都是基于变形镜的影响函数来进行的。利用Veeco数字波面干涉仪分别测量了两个变形镜的所有电极的影响函数。典型电极的测量结果如表1所示,其中相应的电极编号对

应图2,由于干涉仪量程的影响,Bimorph35加载 $300\ \text{V}$ 电压,Bimorph9加载 $100\ \text{V}$ 电压。

由于Bimorph9的单电极面积要比Bimorph35的大得多,所以实测的影响函数的变形量也要大很多。同时,径向位置相同的电极的影响函数的一致性也很好。

表 1 典型电极的影响函数测量结果

Table 1 Measured influence functions of typical electrodes

Loaded electrode	Pattern	PV/ μm	RMS/ μm
Bimorph9_1		4.513	1.346
Bimorph9_2		1.597	0.286
Bimorph35_1		2.653	0.607
Bimorph35_2		2.245	0.437
Bimorph35_8		1.732	0.293
Bimorph35_20		1.246	0.173

3.3 响应频率

变形镜具有较高的响应频率是自适应系统能够实时校正快速变化的人眼像差的基本保证。用 TD1250 频响分析仪和 Keyence 微位移传感器结合测量了两个双压电片变形镜的响应频率,结果都在 2 kHz 以上,图 4 列出了实测 Bimorph35 的幅频和相频曲线,谐振频率为 2.85 kHz。按实际系统工作的需要,变形镜的谐振频率在几百赫兹就足以保证对人眼像差的实时校正。所以尽管双压电片变形镜的响应频率远低于传统的分立式变形反射镜,但也足够满足系统的应用需求。而其谐振频率较低也是其本身结构特点所导致的。

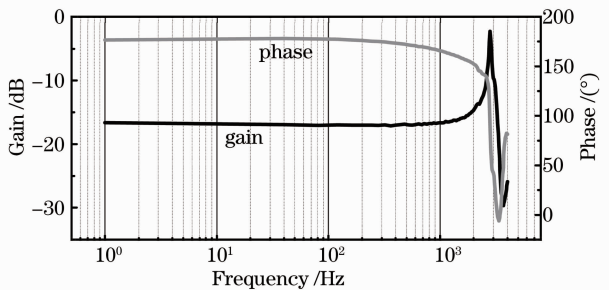


图 4 Bimorph35 的频率响应曲线

Fig. 4 Frequency response curves of Bimorph35

3.4 非线性

用 Keyence 位移传感器结合基于 Matlab 的迟滞曲线测量软件测量了两个变形镜的实际的工作迟

滞曲线,得到的迟滞曲线都相似,图 5 是 Bimorph35 的迟滞曲线。线性拟合的结果说明最大迟滞为 0.495 μm ,这与一般分立式变形反射镜的迟滞相当。其线性度是可以接受的,在闭环系统中这样的非线性不会对校正精度有多大的影响。

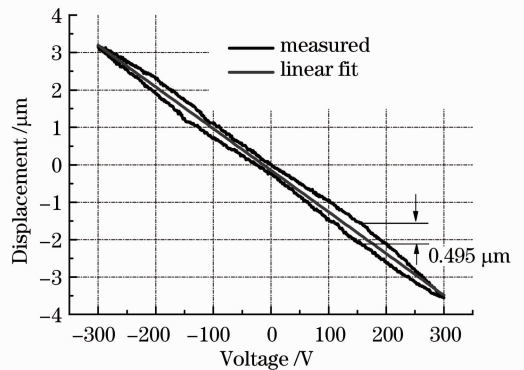


图 5 Bimorph35 的迟滞曲线

Fig. 5 Hysteretic curves of Bimorph35

3.5 泽尼克像差拟合

本部分主要目的是实际检验变形镜对给定像差的拟合能力。由于人眼像差常用泽尼克多项式来表征,所以拟合的对象也采用各项泽尼克像差。根据实测的影响函数,以各项泽尼克像差为待拟合波面,用最小二乘法计算所需的拟合电压然后加载到变形镜,再用干涉仪测量。此外,在对各个泽尼克像差进行拟合之前要考虑原始面形,也就是说对每一项泽

尼克像差拟合计算时都同时进行原始波面的补偿。

由于 Bimorph9 只用来校正离焦和像散,所以拟合能力的分析也是只针对这三项,主要目的是考察其能校正的最大幅值。

实际的测试过程同样考虑到干涉仪的有效测量范

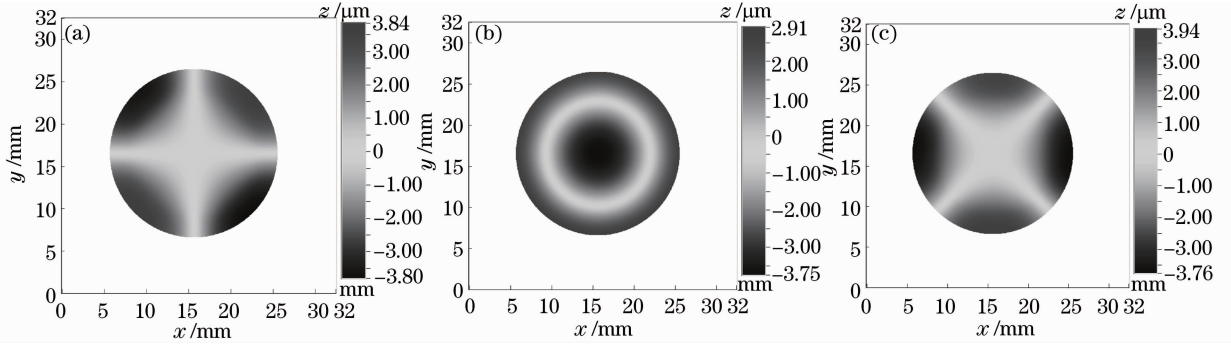


图 6 Bimorph9 拟合的离焦和像散图。(a) 0° 像散; (b) 离焦; (c) 45° 像散

Fig. 6 Fitting for defocus and astigmatism of Bimorph9. (a) Astigmatism at 0° ; (b) defocus; (c) astigmatism at 45°

而对于 Bimorph35 则分析了它对第 6 至 35 项的相对高阶的泽尼克像差的拟合精度,方法是计算残差均方根值与相应的标准泽尼克像差均方根值的比值,这个值越低表明拟合精度越高,结果如图 7 和图 8 所示。图 7(a)为标准的泽尼克像差图,图 7(b)

围,在对 Bimorph9 进行变形实验时没有加载最大的电压,而只是拟合了单位泽尼克像差,图 6 所列的测量结果便是如此。然后由此来计算电压达到 ± 300 V 时所能得到的最大校正量,结果表明,对单纯离焦的校正量为 $14 \mu\text{m}$,对单纯像散的校正量有 $12 \mu\text{m}$ 。

为 Bimorph35 拟合的波面;图 8 是 Bimorph35 与原有系统的 37 单元分立式变形镜(SAM37)的拟合精度的对比,可见除了第 31、32、33 项之外 Bimorph35 都有一定的校正能力;特别是对于前 20 项泽尼克像差 Bimorph35 的校正精度要稍优于 SAM37。

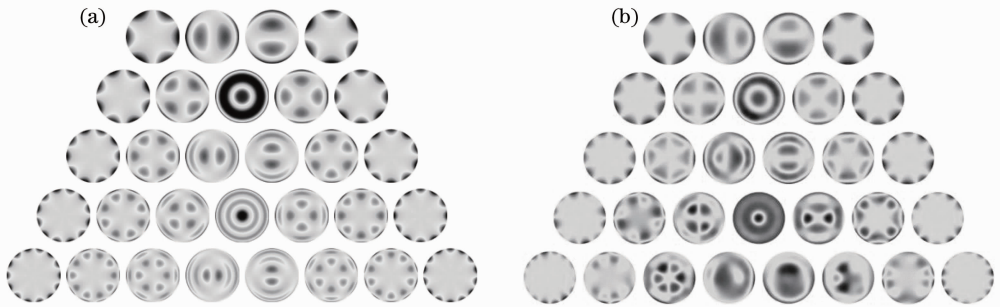


图 7 Bimorph35 拟合第 6 至 35 项的泽尼克像差图

Fig. 7 Fitting for 6th to 35th Zernike aberration of Bimorph35

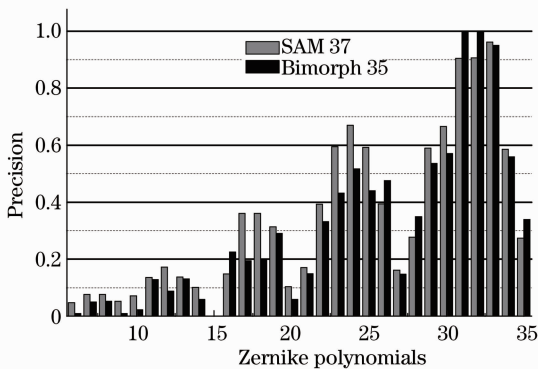


图 8 泽尼克像差的拟合精度对比

Fig. 8 Comparison of fitting precision for Zernike aberrations

4 实验结果

实际系统采用功率为 $5 \mu\text{W}$ 、波长为 905 nm 的光源作为信标,成像用 $500 \mu\text{W}$ 、波长 550 nm 的 LED 光源,成像分辨率经标定为 1.2 倍衍射极限,成像视场为 1° 。对一具有 1.5D 近视的实验对象的成像效果如图 9 所示。

自适应系统未工作前系统的成像结果如图 9(a)所示,自适应系统工作后的视网膜成像如图 9(b)(血管)和图 9(c)(视细胞)。同时,图 9 中还列出了文献[3]中采用 SAM37 变形镜的系统的视细胞成像结果[图 9(d)]以及文献[9]中液晶空间光调制器的视网膜成像系统的视细胞成像结果

[图 9(e)]. 对比可见,采用本文设计的系统其成像效果已经和之前采用 SAM37 变形镜和采用液晶空

间光调制器的成像系统的分辨率相当,能够满足临床应用的需求。

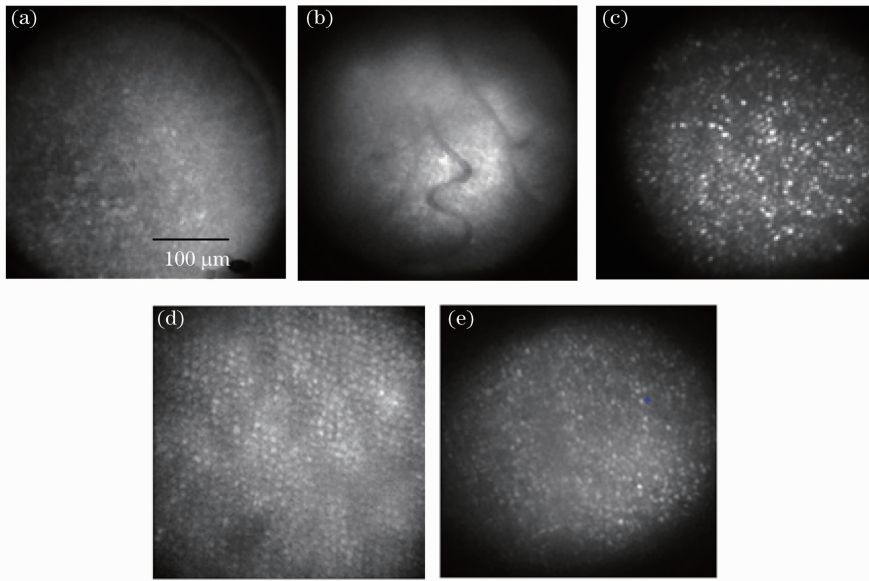


图 9 视网膜成像结果

Fig. 9 Retinal images

5 结 论

人眼视网膜自适应光学成像系统研制的两块小口径双压电片变形反射镜实现了大幅值校正的目标,而且也可能实现校正量的进一步增大。根据实测影响函数对泽尼克像差进行拟合发现,其用于系统闭环工作时能够达到比较高的拟合精度,实验结果也证实了此结论。所以双压电变形反射镜是用于人眼视网膜自适应光学成像系统较为理想的波前校正器之一,但还需进一步增大校正的行程才能满足实际工作需要。

参 考 文 献

- 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
- Nathan Doble, Geunyoung Yoon, Li Chen *et al.*. Use of a micro electromechanical mirror for adaptive optics in the human eye [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(17): 1537~1539
- Ning Ling, Yudong Zhang, Xuejun Rao *et al.*. Small table-top adaptive optical systems for human retinal imaging [C]. *SPIE*, 2002, **4825**: 99~108
- 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
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
- Ning Ling, Yudong Zhang, Xuejun Rao *et al.*. High resolution mosaic image of capillaries of human retina by adaptive optics [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(4): 225~226
- Cai Dongmei, Seow Hwang Eng, Ling Ning *et al.*. Using reflective LCOS display panel to compensate human eye aberrations [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(7):

992~995

蔡冬梅, Seow Hwang Eng, 凌 宁 等. 反射型 LCOS 显示板用于人眼波前像差校正的研究 [J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(7): 992~995

- Jiang Baoguang, Cao Zhaoliang, Mu Quanquan *et al.*. Liquid crystal based retina adaptive optical imaging system with laser source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(10): 1805~1809

姜宝光, 曹召良, 穆全全 等. 激光为光源的液晶自适应眼底成像系统 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(10): 1805~1809

- Cheng Shaoyuan, Cao Zhaoliang, Hu Lifa *et al.*. Design of LC adaptive optics system for human retinal imaging operated on open-loop and two-wavelength mode [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(2): 021101

程少园, 曹召良, 胡立发 等. 开环双波段人眼视网膜成像液晶自适应光学系统设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(2): 021101

- Chao Li, Mingliang Xia. High-resolution retinal imaging through open-loop adaptive optics [J]. *J. Biomed. Opt.*, 2010, **15**(4): 046009

- Kong Ningning, Li Dayu, Xia Mingliang *et al.*. Liquid crystal adaptive optics system for human retinal imaging operated on open-loop and double-pulse mode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0111002

孔宁宁, 李大禹, 夏明亮 等. 开环双脉冲液晶自适应光学视网膜成像系统 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0111002

- Enrique J. Fernandez, Ignacieg Tglesias, Pablo Artal. Closed loop adaptive optics in the human eye [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(10): 746~748

- J. W. Evans, R. J. Zawadzki, S. Jones *et al.*. Performance of a MEMS based AO-OCT system [C]. *SPIE*, 2008, **6888**: 68880G

- Chao Li, Mingliang Xia, Baoguang Jiang *et al.*. Retina imaging system with adaptive optics for the eye with or without myopia [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(7): 1496~1500

- Zhou Hong, Ning Yu, Guan Chunlin *et al.*. Design and fabrication of prototype for bimorph deformable mirrors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1437~1442

周 虹, 宁 禹, 官春林 等. 双压电片变形反射镜样镜的设计与研制 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1437~1442

栏目编辑: 王晓球