

文章编号 1004-924X(2009)11-2651-06

# 液晶空间光调制器对真实人眼畸变波前的校正

姜宝光<sup>1,2</sup>, 穆全全<sup>1,2</sup>, 曹召良<sup>1</sup>, 李抄<sup>1,2</sup>, 夏明亮<sup>1,2</sup>, 宣丽<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**基于液晶空间光调制器波前调制量大,像素密度高,驱动电压低等优点,用液晶空间光调制器作为校正眼像差的关键元件,研制了用于人眼畸变波前探测和校正的自适应光学系统。介绍了液晶空间光调制器的波前调制原理,利用 ZY-GO 干涉仪测定了位相调制和灰度级的关系曲线。分别用 Hartman-Shack 波前探测器和高分辨率液晶空间光调制器探测和校正人眼的波前畸变,对近视  $5\text{ m}^{-1}$  (500 度) 的人眼进行了自适应校正实验。校正后,系统的波前误差为  $0.086\lambda$  PV 和  $0.013\lambda$  RMS, 达到了系统的衍射极限,并可清晰地分辨眼底原来模糊的细胞。实验结果表明,液晶空间光调制器可以有效校正畸变波前,达到提高成像质量的目的。

**关键词:**自适应光学;波前探测器;液晶空间光调制器(LCSLM)

**中图分类号:** O753.2; TP212.14 **文献标识码:** A

## Correction of aberration in eyes by liquid crystal spatial light modulator

JIANG Bao-guang<sup>1,2</sup>, MU Quan-quan<sup>1,2</sup>, CAO Zhao-liang<sup>1</sup>,  
LI Chao<sup>1,2</sup>, XIA Ming-liang<sup>1,2</sup>, XUAN Li<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** By taking the advantages of a Liquid Crystal Spatial Light Modulator(LCSLM) in large stoke, high density and a lower voltage driver, an adaptive optical(AO) system for correcting the aberration of the human eye was developed by using the LCSLM as a key element. The modulation principle of LCSLM was introduced and the relation curve between the phase modulation and the drive voltage was also measured by a ZY-GO interferometer. Then, the Shack-Hartmann wavefront sensor and LCSLM were used for aberration detection and correction, respectively. For a subject eye with  $5\text{ m}^{-1}$  (5D) mopia, the wavefront error is reduced to  $0.086\lambda$  PV and  $0.013\lambda$  RMS after adaptive optics (AO) correction, which has reached the diffraction limit. Furthermore, the blurred photoreceptor cell on the fundus oculi is clearly imaged on a CCD camera. These results show that the LCSLM based adaptive optical system has the ability of correcting the aberration of the human eye efficiently, and the quality of image is also improved a lot.

**Key words:** adaptive optics; wave-front detector; Liquid Crystal Spatial Light Modulator (LCSLM)

**收稿日期:** 2008-10-22; **修订日期:** 2008-12-22.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No. 60578035; No. 50473040; No. 60736042); 吉林省科学基金资助项目 (No. 20050520; No. 20050321-2)

## 1 引言

人眼是复杂而重要的光学系统,而它的光学特性直到今天还没有被完全表征出来。除了导致近视,远视的离焦和散光的像散之外,其它的像差,如球差、彗差等高阶像差对人眼这个光学系统的性能也有不可忽视的影响。由于人眼内光学介质的像差降低了眼底成像的质量。因此,在对畸变人眼进行病理检查时还不能对活体人眼进行细胞级的检测。利用自适应光学成像系统对活体人眼像差进行探测和校正<sup>[1]</sup>及眼底成像,无论从临床眼底病变观测和将来的眼超视觉的实现等研究均具有极大的意义。

迄今为止,国内外许多研究机构对活体人眼的自适应成像做了大量的研究。自适应成像系统通常所采用的波前校正器为反射式变形镜(Deformable Mirror)或微机械反射式变形镜(MEMS)。反射式变形镜体积较大驱动电压高,且波面重构精度较低;而微机械反射式变形镜虽然具有较高的空间分辨率,但其位相调制量却不能满足人眼自适应系统的要求。

与上述变形镜相比,液晶空间光调制器<sup>[2]</sup>(LCSLM)具有更大的波前调制量,更高的像素密度,且具有体积小,驱动电压低,可以由电脑直接驱动等优点,更加便于设备的装调也具有更高的可操作性。基于液晶空间光调制器的优势,本论文采用液晶空间光调制器作波前校正器,研制了眼底自适应成像系统,并且对该系统的性能进行了检测。

## 2 基本理论分析及实验工作

### 2.1 液晶空间光调制器的波前调制原理

向列相液晶分子呈长棒状,其极化率和折射率都具有各向异性,相当于单轴晶体,具有非寻常光折射率  $n_e$  和寻常光折射率  $n_o$ 。在折射率  $n_e$  方向传播的光相对于  $n_o$  方向的光会产生位相延迟。液晶既具有液体的流动性还具备晶体的各向异性,是一个连续弹性体,根据连续弹性体理论,液晶分子的自由能可表示为<sup>[3]</sup>:

$$F = \frac{1}{2} \int_V \{ K_{11} (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + K_{22} [\mathbf{n} \cdot (\nabla \times \mathbf{n})]^2 + K_{33} [\mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{n})]^2 - \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} \} dV. \quad (1)$$

其中  $K_{11}, K_{22}, K_{33}$  分别是液晶分子的展曲弹性常数、扭曲弹性常数和弯曲弹性常数,  $\mathbf{n}$  是液晶分子的指向矢,  $\mathbf{D}, \mathbf{E}$  分别是电位移矢量和电场强度。

如果液晶校正器为摩擦取向(强锚定)且液晶分子平行排列,则液晶分子自由能公式可写为<sup>[4]</sup>:

$$F = \frac{1}{2} \int_0^d (K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta) \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 dz - \frac{1}{2\epsilon_0} \int_0^d \frac{\mathbf{D}_z^2}{\epsilon_{\perp} \cos^2 \theta + \epsilon_{\parallel} \sin^2 \theta} dz, \quad (2)$$

其中,  $\epsilon_0$  是真空介电常数,  $\epsilon_{\perp}, \epsilon_{\parallel}$  分别是垂直和平行方向的介电常数,  $\mathbf{D}_z$  是  $z$  方向的电位移矢量,  $d$  为液晶层厚度,  $\theta$  是液晶分子的倾角。

可以把式(2)的积分方程变成微分方程:

$$\left( \frac{dz}{d\theta} \right)^2 = \frac{K_{11} (1 + K \sin^2 \theta)}{G - \frac{\mathbf{D}_z^2}{\epsilon_0 \epsilon_{\perp} (1 + \beta \sin^2 \theta)}}, \quad (3)$$

$K = (K_{33} - K_{11})/K_{11}, \beta = (\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp})/\epsilon_{\perp}, G = \mathbf{D}_z^2 / [\epsilon_0 \epsilon_{\perp} (1 + r \sin^2 \theta_n)], \theta_n$  是液晶分子的最大倾角。结合液晶盒上下层边界条件解方程(3),即可得到在一定电压下液晶分子倾角的分布。

由于液晶具有晶体的双折射特性,因此可根据晶体的折射率椭球公式得到液晶盒内非寻常光的折射率分布<sup>[5]</sup>。

$$n_e(\theta_z) = \frac{n_o n_e}{(n_o^2 \cos^2 \theta_z + n_e^2 \sin^2 \theta_z)^{1/2}}, \quad (4)$$

式中  $\theta_z$  是液晶分子倾角,进而可得到液晶屏产生的位相延迟为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d [n_e(z) - n_o] dz. \quad (5)$$

由式(3)可知,液晶分子在电场的作用下发生偏转,即不同的电场对应于不同的液晶分子倾角。根据式(4),液晶分子倾角的变化引起液晶的非寻常光折射率  $n_e$  的变化,进而引起光束在液晶中位相延迟的变化。因此,可以通过控制液晶校正器的电压来调制光的位相。

### 2.2 液晶空间光调制器的调制量的线性化处理

利用 ZYGO 干涉仪测定位相调制和灰度级的关系曲线,测试光路如图 1 所示。从 ZYGO 干涉仪发出的平行光经过晶体偏振片后变为线性偏振光,该偏振光经 LCOS 的反射后再次进入干涉

仪,和干涉仪的参考平面形成干涉条纹,从而测量 LCOS 对光的位相调制。通过相息图的方式实现大畸变量的校正<sup>[6]</sup>。测得的位相调制量与灰度级曲线经过 gamma 校正后使得选出的 256 个灰度级和位相调制呈线性变化关系,调制量与灰度曲线见图 2。

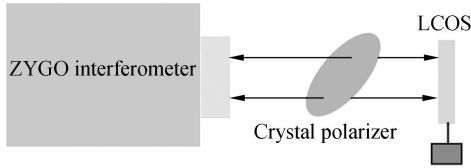
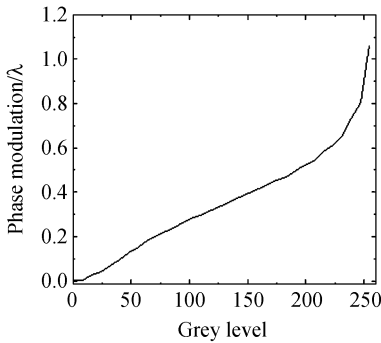


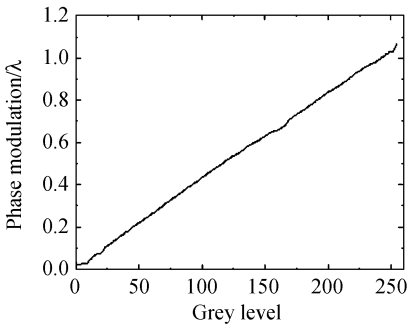
图 1 位相调制测试光路

Fig. 1 Optical layout for phase modulation test



(a) Gamma 校正前

(a) Before Gamma correction



(b) Gamma 校正后

(b) After Gamma correction

图 2 位相调制量与灰度曲线

Fig. 2 Wavefront modulation and voltage curve

### 2.3 人眼的像差探测

实验中采用了 Shark-Hartman 波前探测器探测人眼的畸变波前,波前探测器主要由微透镜阵列和 CCD 阵列组成。当入射到微透镜阵列上的是标准的平面波时,在 CCD 的像面上会出现等

间隔的光斑阵列,而且每个光斑都会位于相应的微透镜子像素阵列的中心;而畸变波前入射到微透镜阵列上,CCD 阵列上的光斑质心将偏离相应的微透镜中心,通过对每个微透镜后光斑质心偏移量的计算就可以解算出整个畸变波面的形状。对液晶空间光调制器施加对应畸变波前的补偿波面即可实现畸变波前的补偿。有关于人眼像差及 Shark-Hartman 波前探测器的详细分析请参考文献<sup>[9-13]</sup>。

### 2.4 实验方法

实验原理图如图 3 所示。

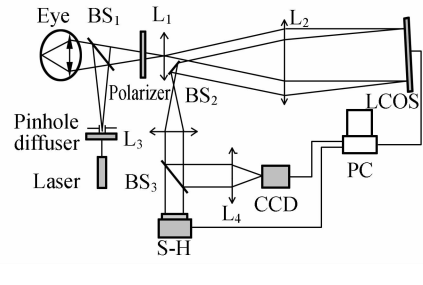


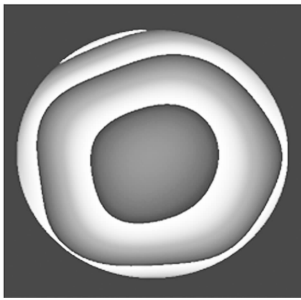
图 3 实验原理光路图

Fig. 3 Schematic diagram of the adaptive optics system

0.808 nm 激光经过消散斑装置和小孔后被半反半透反射后入射到人眼。经人眼光学系统后携带畸变波前的光后向反射经过透镜 L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> 准直照射在和瞳孔共轭的反射式液晶空间光调制器(LCSLM)上。被 LCSLM 反射后的光由 BS<sub>2</sub> 折轴后被 L<sub>3</sub> 准直。一部分光入射到和瞳孔共轭的 Shack-Hartmann 波前传感器进行波面探测,另一部分在成像 CCD 上成像。Shack-Hartmann 波前传感器将探测到的波前斜率数据传回电脑,经过电脑处理,将对应补偿波面的灰度分布图发送给 LCSLM 进行波面补偿,然后由 Shack-Hartmann 探测器进行下一次探测,形成了畸变波前的闭环自适应校正。成像 CCD 在整个自适应过程中用来监测像质的变化。

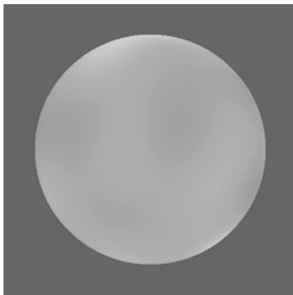
### 3 结果与讨论

校正前后的人眼波面图如图 4 所示。从图中可以看出,人眼的畸变波前已被很好的校正。图 5 给出闭环自适应过程中波前误差随时间变换的峰谷值(PV)和均方根误差(RMS)。RMS 值从校正前的 0.65λ 到校正后的 0.013λ, PV 值从 2.86λ



(a)校正前

(a) before correction



(b)校正后

(b) after correction

图 4 人眼波面图

Fig. 4 Wavefront map

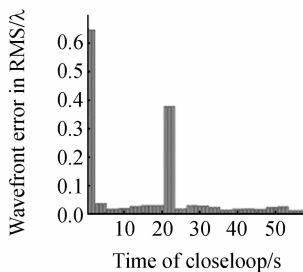
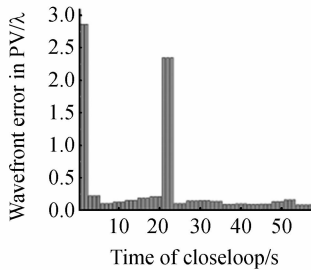


图 5 波面误差值

Fig. 5 Wavefront error in PV and RMS

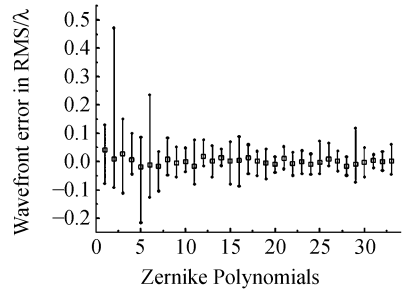


图 6 Zernike 项每项对应的波面误差

Fig. 6 Wavefront error for Zernike in RMS

的峰值是由于校正过程中眨眼所导致的。

校正过程中的 3 到 36 项 Zernike 项对波面 RMS 值的贡献如图 6 所示。校正之后每一项 Zernike 系数对应的波面均方根误差都被控制在  $0.05\lambda$  以内。

校正前后系统调制传递函数(MTF)如图 7 所示,空间分辨率从  $46 \text{ circles}/(^{\circ})$  提高到  $110 \text{ circles}/(^{\circ})$ 。图 8 给出了校正前后视网膜细胞成像质量的对比。

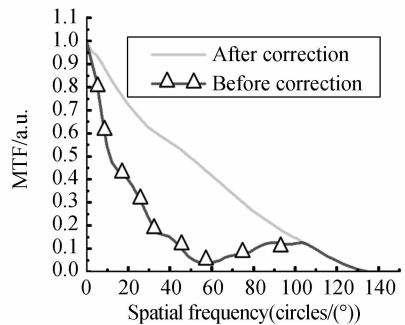


图 7 校正前后调制传递函数对比

Fig. 7 MTF curves

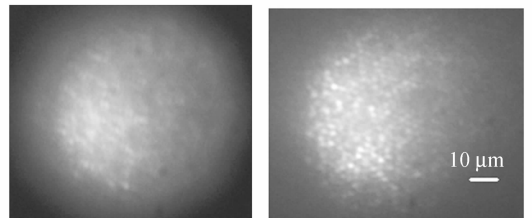


图 8 校正前后成像质量对比

Fig. 8 Images of retina before and after correction

### 4 结 论

本文介绍并研究了一个利用高空间分辨率的

到  $0.086\lambda$ , 采点间隔为 1 s。图中 20~23 s 出现

液晶空间光调制器来校正人眼波前畸变的自适应光学成像系统。经过校正后,系统的波前误差为  $0.086\lambda$  PV 和  $0.013\lambda$  RMS,达到了系统的衍射极限;而系统的空间分辨率从  $46 \text{ circles}/(^{\circ})$  提高到  $110 \text{ circles}/(^{\circ})$ 。

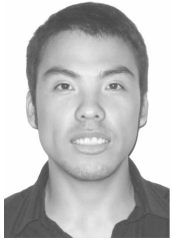
研究表明,基于液晶空间光调制器的眼底自适应成像系统可以有效地对畸变人眼像差进行探

测、校正。经过自适应校正之后原本模糊不清的眼底视网膜感光细胞可以清晰成像在 CCD 相机上。基于液晶空间光调制器的自适应成像系统有望成为未来的眼科医学的观测手段,使所有患者,包括  $5 \text{ m}^{-1}$  (500 度)以上屈光不正患者的视觉疾病都能在微米尺度视网膜组织上进行观测与诊断,进而对眼科医学发展起到极大的推动作用。

## 参考文献:

- [1] 曹正林, 廖文和, 沈建新. Zernike 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.  
CAO ZH L, LIAO W H, SHEN J X. A new algorithm for human eye's wave-front aberration fitting with Zernike polynomial[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):308-314. (in Chinese)
- [2] 刘伯晗, 张健, 吴丽莹. 液晶空间光调制器的纯相位调制特性研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 213-217.  
LIU B H, ZHANG J, WU L Y. Research of the phase-only modulation characterization of a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):213-217. (in Chinese)
- [3] THURSTON R N, BERREMAN D W. Equilibrium and stability of liquid-crystal configurations in an electric field [J]. *J. Appl. Phys.*, 1981, 52: 508-509.
- [4] WANG X, DANIEL W, RICHARD M, *et al.*. Liquid-crystal blazed-grating beam deflector [J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39:6545-6555.
- [5] TANG SH T. *Polarization optics of liquid crystal and its applications*[D]. Hongkong: Hongkong University of Science and Technology, 2001.
- [6] CAO ZH L, XUAN L, HU L F, *et al.*. Investigation of optical testing with a phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Opt. Express*, 2005, 13(4):1059-1065.
- [7] 魏永毅, 李海峰, 刘旭. 液晶投影机自动 Gamma 校正系统[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(11): 1727-1729.  
WEI Y Y, LI H F, LIU X. Automatic Gamma correction system for liquid crystal projector[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2005, 39(11):1727-1729. (in Chinese)
- [8] 彭国福, 林正浩. LCD Gamma 校正的硬件实现 [J]. 桂林电子工业学院学报, 2006, 26(1):45-49.  
PENG G F, LIN ZH H. Hardware design for implementation of LCD Gamma correction[J]. *Journal of Guilin University of Electronic Technology*, 2006, 26(1):45-49. (in Chinese)
- [9] 张强, 姜文汉. 光子计数型 Shack-Hartmann 波前探测器研究[J]. 光学精密工程, 1996, 4(5):90-94.  
ZHANG Q, JIANG W H. The research of Shack-Hartmann wave-front sensor in photo counting condition[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(5):90-94. (in Chinese)
- [10] LIANG J ZH, BERNHARD G, STEFAN G, *et al.*. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, 11:1945-1957.
- [11] MANUEL P C, VIDAL F C. Statistical description of wave-front aberration in the human eye [J]. *Optics Letters*, 2002, 27:37-39.
- [12] JASON P, ANTONIO G, IAN G C, *et al.*. Monochromatic aberrations of the human eye in a large population [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, 18: 1793-1803.
- [13] PRIETO P M, MARTIN F V, GOELZ S, *et al.*. Analysis of the performance of the Hartmann - Shack sensor in the human eye [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, 17:1388-1398.

## 作者简介:



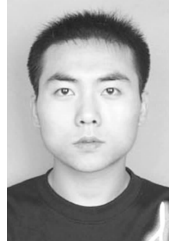
姜宝光(1982—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事人眼波前探测,人眼眼底成像等方面的研究。E-mail: jiangbg04@sina.com



李抄(1982—),男,河北保定人,博士研究生,主要从事人眼波前探测,人眼眼底成像等方面的研究。E-mail: nklich@hotmail.com



穆全全(1980—),男,山西吕梁人,博士研究生,主要从事大气波前探测及像差自适应校正方面的研究。E-mail: muquanquan@ciomp.ac.cn



夏明亮(1982—),男,甘肃庆阳人,博士研究生,主要从事人眼波前探测,人眼眼底成像等方面的研究。E-mail: mingliangxia@hotmail.com



曹召良(1974—),男,河南济源人,博士研究生,主要从事液晶自适应光学,衍射光学方面的研究。E-mail: caozhaoliang@ciomp.ac.cn

## 导师简介:



宣丽(1957—),女,吉林长春人,工学博士,研究员,博士生导师,主要从事液晶材料及液晶光学等方面的研究。E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn

## ● 下期预告

## 不同本底真空度对 SiC/Mg 极紫外多层膜性能的影响

朱京涛<sup>1</sup>,黄秋实<sup>1</sup>,白亮<sup>1</sup>,蒋晖<sup>1</sup>,徐敬<sup>1</sup>,

王晓强<sup>1</sup>,周洪军<sup>2</sup>,霍同林<sup>2</sup>,王占山<sup>1</sup>,陈玲燕<sup>1</sup>

(1. 同济大学精密光学工程技术研究所物理系,上海 200092;

2. 中国科技大学国家同步辐射实验室,安徽合肥 230029)

为研究 SiC/Mg 极紫外多层膜光学性能随制作时不同本底真空度的变化,利用直流磁控溅射方法在不同本底真空条件下制备了峰值反射波长在 30.4 nm 的 SiC/Mg 周期膜。X 射线掠入射反射测试结果表明不同本底真空度条件下制备的 SiC/Mg 周期多层膜膜层质量有明显差异。用同步辐射测试了 SiC/Mg 多层膜在工作波长处的反射率,本底真空度为  $6.0 \times 10^{-5}$  Pa 时的 SiC/Mg 周期膜反射率为 43%,而本底真空度在  $5.0 \times 10^{-4}$  Pa 时的 SiC/Mg 多层膜反射率仅为 30%。同步辐射反射曲线拟合结果表明:反射率随着本底真空度降低的原因是由于多层膜 Mg 膜层中 Mg 的氧化物含量增多造成的。