

文章编号: 0258-7025(2009)10-2524-04

液晶自适应光学在人眼眼底高分辨率成像中的应用

程少园^{1,2} 胡立发¹ 曹召良¹ 穆全全¹ 李鹏飞^{1,2} 李抄^{1,2} 宣丽¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 为了获得人眼眼底高分辨率图像,将液晶自适应光学(AO)技术引入到传统检眼镜中。采用基于夏克-哈特曼波前探测器(SHWS)和硅基液晶空间光调制器(LCOS-SLM)的自适应光学系统来校正人眼的高低阶像差,获得了细胞量级的高分辨眼底图像,为眼科疾病及其相关疾病的早期诊断提供了有力工具。采用闭环和开环两种校正模式,都获得了清晰的眼底图片,认为液晶自适应光学系统在活体人眼眼底高分辨率成像上具有巨大潜力。

关键词 自适应光学;眼底成像;液晶空间调制器;夏克-哈特曼波前探测器

中图分类号 TH74;TP273⁺.2 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093610.2524

Application of Liquid Crystal Adaptive Optics System on Human Eye Fundus Imaging with High Spatial Resolution

Cheng Shaoyuan^{1,2} Hu Lifa¹ Cao Zhaoliang¹ Mu Quanquan¹ Li Pengfei^{1,2}
Li Chao^{1,2} Xuan Li¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, 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 In order to obtain human eye fundus images with high spatial resolution, the liquid crystal (LC) adaptive optics (AO) systems was introduced to the traditional ophthalmoscopes. The AO system based on Shack-Hartmann wavefront sensor (SHWS) and liquid-crystal-on-silicon spatial light modulator(LCOS-SLM) could detect and correct the low and high orders eye's aberrations, and obtain the human eye fundus images with high spatial resolution. It is a useful tool for early diagnosing the eye diseases and diseases interrelated to the eye. The open-loop and closed-loop mode were both adopted. They could both obtain human eye fundus images with high spatial resolution. The LC-AO system possesses a great potential in human eye fundus imaging with high spatial resolution.

Key words adaptive optics; retinal imaging; liquid crystal spatial light modulator; Shack-Hartmann wavefront sensor

1 引言

人眼眼底的高分辨率成像对眼科疾病及其相关疾病(比如高血压、糖尿病等)的早期诊断和治疗都具有重要意义^[1,2]。然而,由于人眼是一个动态变化的、不完善的光学系统,这点类似于大气湍

流^[3,4]。因此,用传统的手段(球面镜或柱面镜等)只能校正人眼的低阶像差(离焦和像散),对动态变化的像差和不规则的高阶像差无能为力,因而不能获得人眼高分辨率视网膜图像^[5]。近年来,已经在地基天文望远镜上得到成功使用的自适应光学

收稿日期: 2009-04-23; 收到修改稿日期: 2009-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(50703039)和国家自然科学基金重点项目(60736042,60578035)资助课题。

作者简介: 程少园(1982—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计、眼视光学和自适应光学等方面的研究。

E-mail: csyef@163.com

导师简介: 宣丽(1957—),女,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

(AO)技术开始应用到眼科学领域,主要是眼底高分辨率成像和超视觉方面的研究^[6-8]。

然而目前在自适应光学中广泛使用的变形镜(Deformable mirror, DM)具有成本高、体积大、空间分辨率低、功耗大等问题,在民用领域,尤其是眼科学领域受到较大限制。而液晶空间光调制器却能弥补变形镜的上述不足^[9-12]。虽然液晶空间光调制器具有色散和响应速度较慢的缺点,但是在眼科学领域,不是什么大问题。比如,可以采用单色光照明来避免色散效应;人眼的像差变化频率较低,一般只有几赫兹,所以响应速度也不是问题。用于眼底高分辨成像的液晶自适应光学系统面临的主要问题是能量的利用率和杂散光的消除等问题^[13]。本文将对该自适应光学系统的光路原理进行分析说明,介绍一些关键问题的解决方法,并对比分析闭环和开环两种校正模式的液晶自适应光学系统的性能。

2 光路原理分析

照明光路如图 1 所示,用一个 808 nm 的激光二极管(LD)来照明眼底,照明区域既是信标(beacon),同时又是成像物体。匀光器(diffuser)的作用是减小激光散斑效应对波前探测和成像的不利影响^[14]。小孔 H_1 和眼底共轭,来控制照明区域的大小。环形光阑(annular stop)和人眼瞳孔共轭,用来限制瞳孔处的照明光束的孔径,同时产生环形照明以利于消除角膜前表面反射的杂散光^[15]。定位目标(target)有一个可移动的小光点发出微弱的可见光,用来固定人眼,同时用来控制眼底照明和成像区域。值得注意的是,定位目标和照明光源的波段不同,存在色差,因而可能引入额外的离焦项,在装调光路时,应该予以补偿。由于人眼眼底的有效反射率很低^[16],约为 10^{-4} ,而且人眼安全光强很小,所

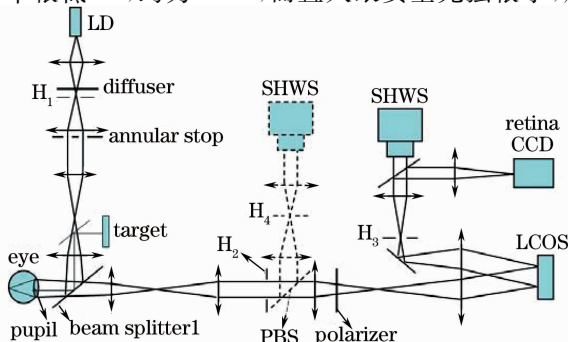


图 1 自适应成像光学系统的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the adaptive optics imaging system

以需要充分利用眼底反射出来的光,以提高信噪比。因此,分束镜 1 (beam splitter 1) 应该具有较高的透过率(90%以上)。

在探测成像光路中,关键是要保证人眼的瞳孔与夏克-哈特曼波前探测器(Shack-Hartmann wavefront sensor, SHWS)的微透镜阵列、硅基液晶空间光调制器(liquid-crystal-on-silicon spatial light modulator, LCOS-SLM)的液晶面板相共轭,并且共轴。一般应使 SHWS 的微透镜阵列和 LCOS-SLM 的液晶面板略大于相应的人眼瞳孔像。由于 LCOS-SLM 只能对偏振方向和液晶分子平行的线偏振光进行相位调制,所以需在光路中加入一个偏振片^[17,18]。小孔 H_2 与人眼瞳孔共轭,小孔 H_3, H_1 与人眼眼底共轭。它们用来消除人眼前表面杂散光以及周围环境的杂散光。从图 1 可以看到 SHWS 有两个位置,当 SHWS 在实线所表示的位置时,是闭环光路;当 SHWS 在虚线所表示的位置时,是开环光路。开环光路中用一个偏振分光镜(polarizing beam splitter, PBS)将眼底反射的光分成两束线偏振光,一束给 SHWS 来探测波前畸变,一束给 LCOS-SLM 来校正波前畸变,从而提高了光能利用率。

3 眼底成像实验与分析

用一个-4D 的活体人眼进行了闭环和开环两种模式的自适应校正成像试验。其中,照明波长为 808 nm 近红外光,照明区域约为 $150 \mu\text{m}$; LCOS-SLM (PFP512, BNS) 的尺寸为 $7.68 \text{ mm} \times 7.68 \text{ mm}$,分辨率为 512×512 ,像素尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$; SHWS 是委托莫斯科国立大学制作的,其子孔径数为 17×17 ,SHWS 刷新频率 100 Hz;人眼瞳孔直径为 6.5 mm,人眼瞳孔处的入射光强约为 $200 \mu\text{W}$ (约为最大安全光强的 1/20,要注意最大安全光强跟照明面积、照明波长和照明时间有关)。结果表明开环和闭环模式都能获得较为清晰的高分辨率眼底图像。图 2 是

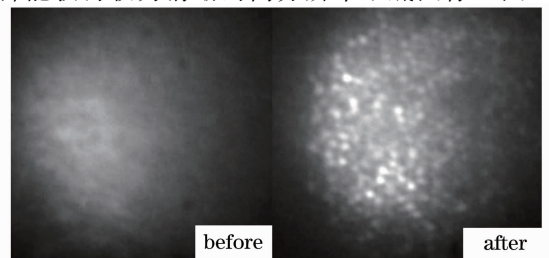


图 2 闭环校正前后的眼底照片

Fig. 2 Images of the eye fundus before and after closed-loop AO correction

闭环模式校正前后的眼底图像;图3是开环模式校正前后的眼底图像。通过对比,可以看到闭环模式校正后成像对比度要好于开环模式。这是因为闭环模式中 SHWS 探测到的是校正后残余的波前像差,可以多次反馈校正;而开环模式中 SHWS 探测到的是校正前总的波前像差,只可以进行单次校正,如果响应矩阵测量得不够精确的话,校正效果会受到一定的影响^[19,20]。

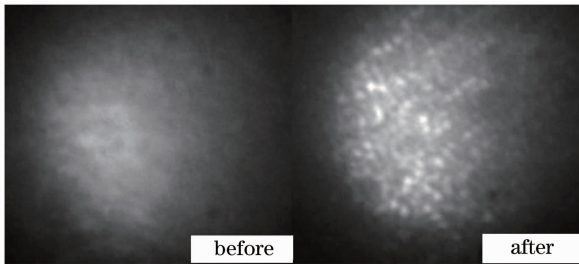


图3 开环校正前后的眼底照片

Fig. 3 Images of the eye fundus before and after open-loop AO correction

然而开环模式也有它的优点:一方面可以提高光能利用率;另一方面可以使系统更稳定。闭环模式采用多次累加校正,可能因为眨眼或瞳孔偏移而出现错误,往往不能长时间校正成像;而开环受到这些干扰的影响较小,往往可以长时间校正成像。图4是闭环模式校正时 SHWS(图1中实线所画位置)探测到的波前像差峰谷值(PV)和均方根(RMS)值,它是闭环校正后的残余像差;图5(a)是开环模式校正时 SHWS(图1中虚线所画位置)探测到的波前像差 PV 和 RMS 值,它是系统(包括人眼)的全部像差;图5(b)是开环模式校正时,在 LCOS-SLM 后所新增的 SHWS(图1中实线所画位置)探测到的波前像差 PV 和 RMS 值,用来评价开环校正后的残余像差。为了便于比较校正前后的波前像差,图4,5中,前3s表示校正前的波前像差 PV 与 RMS 值;3s左右校正器开始工作,波前像差开始减小。通过对比分析,可以看到,闭环模式校正,系统的残余像差更小一些,但是校正一段时间后(跟受试者的眼睛的稳定能力有关,一般会稳定20s左右,采用散瞳和麻醉处理后虽然可以延长稳定时间,但是会大大影响受试者舒适度),可能由于人眼眨动或瞳孔偏移而出错,即由于波前探测出错,使控制器向校正器发送了不合适的控制信号,校正器产生了错误的相位调制,又使波前探测进一步出错,这样错误累加后,便使校正效果变坏,甚至人眼恢复后也不能校正好了(注意,即使闭环校正频率较高,也无法避

免,因为波前探测就出错了,所以波前校正难免出错);开环校正时,SHWS 探测的是系统校正前的所有像差,因而要评价它开环模式校正后的残余像差,需在 LCOS-SLM 后再放置一个可移动的 SHWS,其探测结果表明,开环模式校正后,系统的残余像差略大一些,但是比较稳定,一般不会出现校正错误的问题。

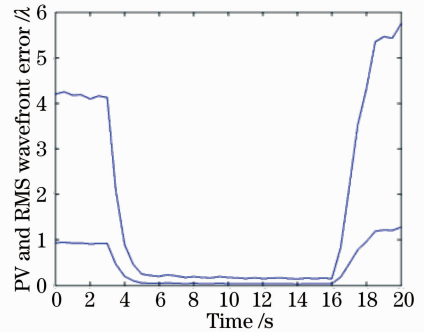


图4 闭环校正时的波前像差 PV 值和 RMS 值随时间的变化关系

Fig. 4 PV and RMS wavefront error with closed-loop AO correction

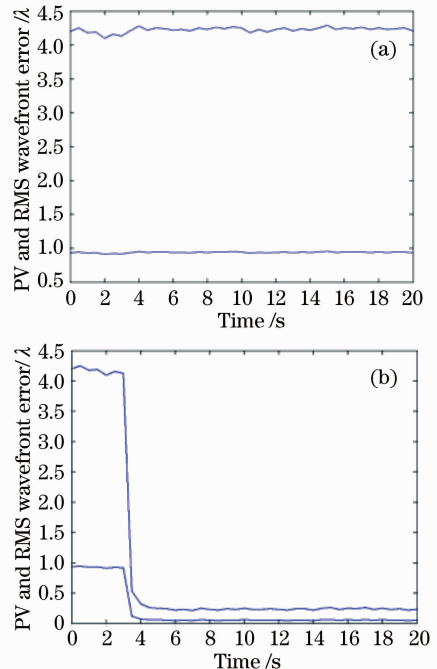


图5 开环校正时的波前像差 PV 值和 RMS 值随时间变化关系

Fig. 5 PV and RMS wavefront error with open-loop AO correction

4 结 论

将液晶自适应光学技术应用于活体人眼眼底高分辨率成像,获得了细胞量级的高分辨率眼底图像,

可以为眼底相关疾病的早期诊断提供有效工具。分别采用开环和闭环两种校正模式成功获得高分辨率眼底图像,并对两种模式进行了比较分析,认为闭环模式精度较高,但不够稳定;开环模式能量利用率较高,较稳定,但精度略低,需要提高响应矩阵的测量精度等。总之,液晶自适应光学系统凭借成本低、体积小、空间分辨率高、功耗低等优点,在活体人眼眼底高分辨率成像领域具有巨大应用潜力。

参 考 文 献

- Nikita G. Iroshnikov, Andrey V. Larichev Adaptive optics in ophthalmology. [C]. *SPIE*, 2006, **6284**: 62840B
- Xue Lixia, Rao Xuejun, Wang Cheng *et al.*. Higher-order aberrations correction and vision analysis system for human eye [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 893~897
薛丽霞,饶学军,王 成等. 人眼高阶像差校正和视觉分析系统 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 893~897
- Liang Junzhong, D. R. Williams. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1997, **14**: 2873~2883
- Wang Yang, Wang Zhaoqi, Guo Huanqing *et al.*. Impact of higher-order wavefront aberrations of human eyes on vision performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1519~1525
王 杨,王肇圻,郭欢庆等. 人眼的高级像差对视功能的影响 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1519~1525
- 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
- Liang Junzhong, 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. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(7): 1949~1957
- Liang Junzhong, D. R. Williams, D. T. Miller. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(11): 2884~2892
- 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
- Ye Biqing, Chen Jun, Norihiro Fukuchi *et al.*. Characteristics of liquid crystal spatial light modulator at oblique incidence[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2007, **34**(3): 374~378
叶必卿,陈 军,福智昇央等. 液晶空间光调制器的斜入射特性 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 374~378
- Hu Lifa, Xuan Li, Liu Yongjun *et al.*. Phase-only liquid crystal spatial light modulator for wave-front correction with high precision[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(26): 6403~6409
- Liu Yongjun, Hu Lifa, Cao Zhaoliang *et al.*. A novel liquid crystal phase modulator for the optical imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 527~530
刘永军,胡立发,曹召良等. 一种用于光学成像系统的新型液晶相位调制器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 527~530
- Cai Dongmei, Yao Jun, Jiang Wenhan. Performance of liquid-crystal spatial light modulator using for wave-front correction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 285~291
蔡冬梅,姚 军,姜文汉. 液晶空间光调制器用于波前校正的性能[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 285~291
- Cheng Shaoyuan, Xuan Li, Hu Lifa *et al.*. Design of adaptive optics system for human retinal imaging [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1132~1135
程少园,宣 丽,胡立发等. 人眼视网膜成像的自适应光学系统设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1132~1135
- Li Chao, Jiang Baoguang, Xia Mingliang *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
- Wang Zhaoqi, Xu Yan. Design of digital retina camera based on eye mode[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, **16**(9): 1567~1571
王肇圻,许 妍. 基于眼模型的数字眼底相机设计[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(9): 1567~1571
- N. D. Van, L. F. Tiemeijer. Spectral reflectance of the human eye[J]. *Vision Res.*, 1986, **26**: 313~320
- G. D. Love. Wave-front correction and production of Zernike modes with a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(7): 1517~1524
- Liang Chun, Liao Wenhe, Shen Jianxin *et al.*. An adaptive detecting centroid method for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 430~434
梁 春,廖文和,沈建新等. Hartmann-Shack 波前传感器的自适应质心探测方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 430~434
- Yang Ping, Ao Mingwu, Liu Yuan *et al.*. Adaptive optics genetic algorithm based on Zernike mode coefficients [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 367~372
杨 平,敖明武,刘 渊等. 基于泽尼克模式系数的自适应光学遗传算法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 367~372
- Li Huaqiang, Song Helun, Rao Changhui *et al.*. Extrapolation method to extend dynamic range of shack-hartmann wave front sensor[J]. *Opt. Precision. Eng.*, 2008, **16**(7): 1203~1207
李华强,宋贺伦,饶长辉等. 增大夏克-哈特曼波前传感器动态范围的方法[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(7): 1203~1207