

人眼视网膜成像液晶自适应光学系统的优化设计*

程少园^{1,2}, 曹召良¹, 胡立发¹, 穆全全^{1,2}, 姜宝光^{1,2}, 李鹏飞^{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, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:针对已有的人眼视网膜成像液晶自适应光学系统的不足,提出了新的优化设计方案.新设计的系统能对不同视度下的人眼进行高分辨率成像.新系统还采用了瞳孔监控装置和成像区域快速精确定位装置,并且采用了改进的消杂散光方法,能够使探测准确度和定位准确度得到保证.研究证明,该系统新的设计方案操作方便、灵活,便于推广使用.

关键词:自适应光学;视网膜成像;液晶;空间光调制器

中图分类号:TH74

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2009)12-3150-4

0 引言

人眼视网膜的高分辨率成像可以用于诊断视网膜相关疾病,比如跟年纪相关的视网膜退化,色素视网膜炎,糖尿病视网膜病变等^[1].然而,由于人眼角膜、晶状体的不完善和眼内液体的扰动等因素的影响,人眼成为一个动态变化的、不完善的光学系统,类似于大气湍流^[2-3].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(离焦和象散),对动态变化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^[4].这就要借助于已经在地基天文望远镜上成功使用的自适应光学技术.

近年来,自适应光学已经成功用于人眼视网膜高分辨率成像^[4-7].然而,目前自适应人眼视网膜成像系统仅停留在眼科学研究中,尚未在临床医疗上得到广泛使用.主要是因为自适应光学系统价格昂贵、操作复杂等.为此,本文采用价格相对较便宜的液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC SLM)^[8-9]代替目前通用的变形镜(Deformable Mirror, DM).除此之外,液晶空间光调制器还有空间分辨率高,驱动电压低,体积小等优点^[10].

液晶空间光调制器也存在一些缺点,比如,只能对线偏振光进行位相调制、响应速度慢、调制幅度小、有色散等问题.不过,这些问题已经逐步得到解决.比如,加偏振片来产生线偏振光,采用反射式硅基板上的液晶器件(Liquid Crystal on Silicon,

LCOS)解决了响应速度慢问题,采用位相 2π 取模法解决了调制幅度小问题^[11],采用单波长(或窄波段)成像避免了色散问题等.

本课题组曾设计了一套人眼视网膜成像液晶自适应光学系统,并进行了初步实验,得到的人视网膜的高分辨率图像^[12-13].然而原先的系统仍存在不够方便灵活、成像对比度不够理想等问题,为此,本文将原系统进行优化设计.

1 原系统的不足

原系统要求人眼盯在有限距离处(人眼前 250 mm).这样可以使大多数人眼通过自动调焦尽可能的减小离焦的影响,但是对于高度近视和远视,仍会有较大离焦.原系统用共焦小孔滤杂光方法可以将外围杂光滤掉,但是中间的部分杂光仍未滤掉,所以图像的对比度不够清晰.原系统视网膜成像区域定位和瞳孔定位效果不好,对探测成像也会带来一些不利的影 响.因此,系统不够灵活、方便,需要进一步优化设计.

2 新系统设计

图 1 是新系统的原理光路图.由于 808 nm 对人眼的刺激小,而且该波段视网膜的反射率较高,吸收率较低,便于成像,所以该系统选用 808 nm 光源来探测和成像.为了保证足够的光强,该系统采用的光源是 808 nm 的激光二极管(Laser Diode, LD).由于激光的散斑对成像和探测都会带来一些不利的影 响,因而需要用 一个快速旋转的漫散屏(diffuser)来消除散斑的影响.为了确定成像区域,需要一个定位目标(target),所发出的光应是可见光;同时,光强应该很弱,以避免引入过多的杂散光,或使得瞳孔变小.为了保证照明光源能够对视网膜指定区域良好

*国家自然科学基金(50703039)和国家重点基金(60736042)资助

† Tel: 0431-86176016

Email: csycf@163.com

收稿日期: 2008-11-24

修回日期: 2008-12-12

照明,又不至于照射在瞳孔外面产生杂散光,需要保证照明光路中的小孔 H1 和环形光阑(Annular Diaphragm,AD)分别与人眼视网膜和瞳孔共轭.人眼视网膜的反射率很低,加上瞳孔对反射光束的切割,最终反射出人眼的光能大约只有入射光能的 10^{-4} ^[14].因此要很好地消除来自视网膜表面,透镜表面以及周围环境的杂散光.该系统用三个小孔 H₂、H₃、H₄,来消除大多数杂散光;另外环形光阑对消杂光也有特殊作用,将在后面进一步阐述.为了保证获得良好的探测和校正效果,需要自适应光学系统中的两个核心部件,夏克-哈特曼波前传感器(Shack-Hartmann Wavefront Sensor,SHWS)和基于硅基板上的液晶 LCOS 空间光调制器的孔径应该互相共轭,并且和人眼的瞳孔(pupils)相共轭.液晶空间光调制器只能对偏振方向和液晶分子平行的线偏振进行位相调制,需要用偏振片使人眼反射出来的光变成线偏振光^[15].

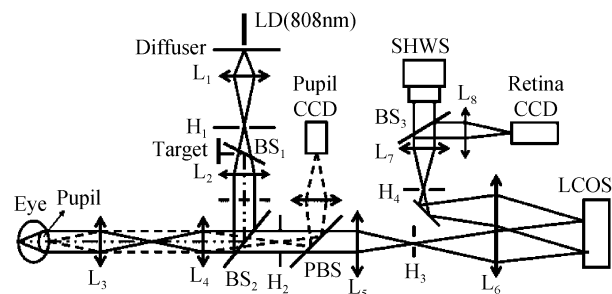


图1 系统光路图
Fig.1 Schematic diagram of the system

原系统设计时,让人眼自动调节于眼前 250 mm,对于正常人眼和轻度近视眼都能做到这一点以减小离焦的影响,但是对于高度近视或远视眼,仍会有较大的离焦,进而会影响探测和校正效果.该系统在原来的基础上加入了自动调焦机制,如图 2.保持人眼与正透镜 L₃ 的距离不变,恒等于 L₃ 的焦距 f_{L_3} ,将人眼和 L₃ 一起移动,来进行调焦,以适应不同视度的人眼.值得注意的是,调焦过程中不能破坏人眼瞳孔和波前传感器以及波前校正器的共轭关系.

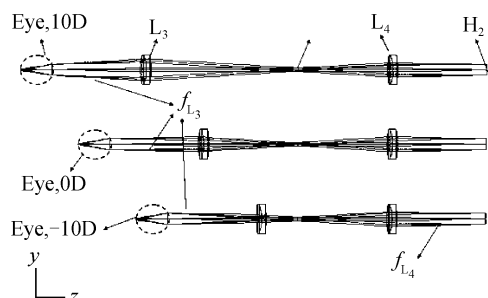


图2 视度调节方法
Fig.2 Adjusting method for accommodation

为了对人眼瞳孔进行精确定位,该系统增加了

一个瞳孔相机 pupils CCD.用偏振分光棱镜 PBS 将眼底反射出的光分成两束偏振方向垂直的线偏振光,一束用于探测,校正和成像,另一束用于瞳孔成像定位.小孔 H₂ 和人眼瞳孔共轭,它们应同时成像于瞳孔相机.先将 H₂ 调小,以便于对瞳孔相机调焦,并标定中心参考位置;然后将 H₂ 适当调大,略大于人眼瞳孔在此处的实像;当瞳孔和 H₂ 同心,并且同时清晰成像时,表明瞳孔已经合理定位.

原来的定位目标用的是可移动的点光源或发光二极管(Light Emitting Diode,LED)阵列,不但准确度不高,还不易控制.该系统将采用一块小液晶屏作为定位目标,通过编程,可以很好的控制光点的大小、位置和亮度.另外,可以将光点变成容易引起人眼注意或者便于观察的图案.

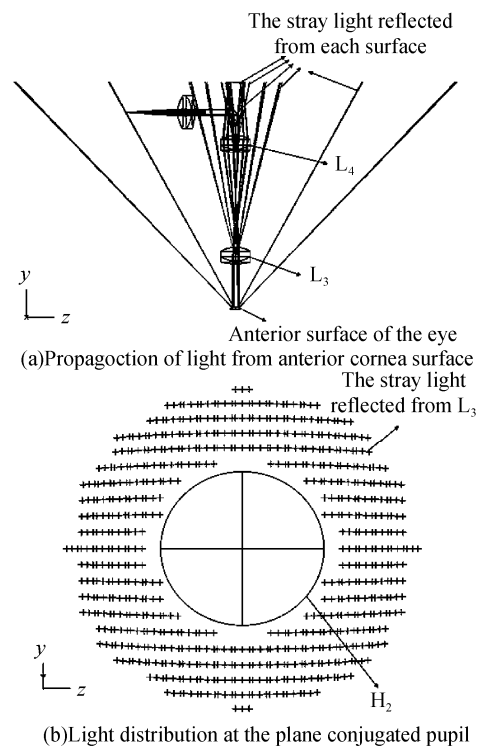


图3 消杂光方法
Fig.3 Method for rejecting stray light

为了更好地消除人眼前表面以及透镜表面反射的杂散光,该系统在照明光路中采用了环形光阑(Annular Diaphragm,AD).原系统用共焦小孔滤波的方法能将外围的杂光屏蔽掉,但是中心的杂光未能消除掉.新照明光路中采用的环形光阑能很好的消除中心处残留的杂光,如图 3,因而能使波前探测准确度,校正效果以及成像对比度得到提高.通过图 3(a)可以看出,人眼角膜前表面由于曲率半径很小(约为 7.8 mm),它反射的杂散光发散得比较强烈,很容易滤掉;而透镜 L₃ 靠近人眼表面的球面所反射的杂散光发散程度最小(注意这和透镜的结构有关系),因而可以通过分析它的杂散光来判断总体杂散

光的消除情况.如图3(b),当环形光阑的小半径为1 mm,大半径为3 mm时,杂光可以完全滤掉(注意大半径在瞳孔处所成的像应略小于瞳孔半径,以免照到人眼虹膜产生杂散光).

用ZEMAX光学设计软件对该系统进行了模拟分析,结果表明该系统自身的像差很小,传递函数接近衍射极限,如图4.而该系统自动调焦机制可以将人眼像差中比重最大的离焦像差变得很小.这样,根据以往的实验^[16],剩余的动态的不规则的像差可以通过自适应光学系统校正过来,进而达到衍射极限的成像效果.

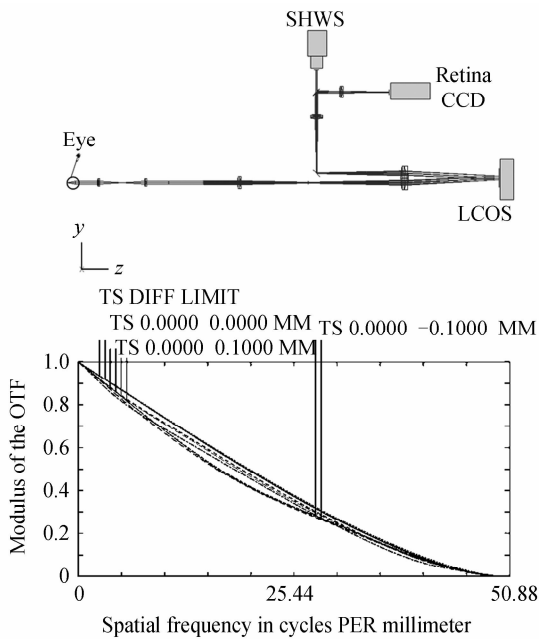


图4 ZEMAX软件分析图

Fig. 4 Analyzing diagram by ZEMAX

3 结论

本文所介绍的新系统,加入了视度调节机制,可以对不同视度下的人眼进行高分辨率成像;采用了瞳孔监控系统和成像区域快速精确定位装置,能够使探测准确度和定位准确度得到保证;并且利用了改进的消杂散光方法,可以使成像对比度得到提高.因此,该系统设计方案和我们原先的系统相比,操作更方便,更灵活,便于推广使用.

参考文献

- [1] WANG Zhao-qi, XU Yan. Design of digital retina camera based on eye model[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.
- [2] WANG Wei, WANG Zhao-qi, WANG Yan, et al. The acquisition of the aerial image modulation with the wave-front aberrations of human eye[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 133-137. 王伟, 王肇圻, 王雁, 等. 基于波前像差的视网膜空间像调制度测定[J]. *光子学报*, 2007, **36**(1): 133-137.
- [3] QUAN Wei, SONG Gui-cai, WANG Zhao-qi, et al. Aberrations of the human eye as in the horizontal visual field[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1102-1105. 全薇, 宋贵才, 王肇圻, 等. 人眼大视场波前像差特性研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 1102-110.
- [4] JIANG Bao-guang, CAO Zhao-liang, MU Quan-quan, et al. Liquid crystal based retina adaptive optical imaging system with laser source[J]. *Opt Precision Eng*, 2008, **16**(10): 1805-1809. 姜宝光, 曹召良, 穆全全, 等. 激光为光源液晶自适应眼底成像系统[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(10): 1805-1809.
- [5] ZHANG Yu-dong, LING Ning, RAO Xue-jun, et al. A small adaptive optical system on table for human retina imaging[C]. Presented at the second International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine, Albuquerque, July 2001.
- [6] CARROLL J, GRAY D C, ROORDA A, et al. Recent advances in retinal imaging with adaptive optics [J]. *Opt Photonics News*, 2005, **16**(1): 36-42.
- [7] LING Ning, ZHANG Yu-dong, RAO Xue-jun, et al. Small table-top adaptive optical systems for human retinal imaging [C]. *SPIE*, 2002, **4825**: 99-108.
- [8] HU Li-fa, XUAN Li, LIU Yong-jun, et al. Phase-only liquid crystal spatial light modulator for wave-front correction with high precision[J]. *Opt Express*, 2004, **12**(26): 6403~6409.
- [9] LI Da-yu, MU Quan-quan, HU Li-fa, et al. The investigation of phase dispersive characteristics about phase-only liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1065-1067. 李大禹, 穆全全, 胡立发, 等. 液晶空间光调制器相位调制的色散特性研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 1065-1067.
- [10] MU Quan-quan, CAO Zhao-liang, LI Da-yu, et al. Adaptive optics imaging system based on a high-resolution liquid crystal on silicon device[J]. *Opt Express*, 2006, **14**(18): 8013-8018.
- [11] CAO Zhao-liang, MU Quan-quan, HU Li-fa, et al. Reflective liquid crystal wavefront corrector used with tilt incidence[J]. *Appl Opt*, 2008, **47**(11): 1785-1789.
- [12] CHENG Shao-yuan, XUAN Li, HU Li-fa, 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.
- [13] CHENG Shao-yuan, HU Li-fa, CAO Zhao-liang, et al. Primary experiment and improvement design of adaptive optics system for human retinal imaging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1491-1493. 程少园, 胡立发, 曹召良, 等. 人眼视网膜成像自适应光学系统的初步试验和改进设计[J]. *光子学报*, 2009, **39**(6): 1491-1493.
- [14] VAN N D, TIEMEIJER L F. Spectral reflectance of the human eye[J]. *Vision Res*, 1986, **26**(2): 313-320.
- [15] LIU Yong-jun, XUAN Li, HU Li-fa, et al. The wavefront modulation characteristics of the parallel aligned liquid crystal device[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 65-68. 刘永军, 宣丽, 胡立发, 等. 平行排列液晶器件的波前调制特性

[J]. 光子学报,2006,**35**(1):65-68.
[16] MU Quan-quan, CAO Zhao-liang, LI Da-yu, *et al.* Liquid crystal based adaptive optics system to compensate both low

and high order aberrations in a model eye[J]. *Opt Express*, 2007,**15**(4):1946-1953.

Optimal Design of LC Adaptive Optics System for Human Retinal Imaging

CHENG Shao-yuan^{1,2}, CAO Zhao-liang^{1,2}, HU Li-fa¹, MU Quan-quan^{1,2},
JIANG Bao-guang^{1,2}, LI Peng-fei^{1,2}, XUAN Li¹

(1 *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Aiming at some weakness of the old LC adaptive optics system for human retinal imaging, a new design scheme is presented. The new system can obtain high-spatial-resolution retinal image for eye under different diopters. The pupil-monitoring system, imaging-orientation system are adopted to avoid stray light, which can make sure the precision of orientation and detection. The research results show that the new system is more convenient, more flexible and suitable for widely application and extension.

Key words: Adaptive optics; Retinal imaging; Liquid crystal; Spatial light modulator



CHENG Shao-yuan was born in 1982. At present, he is a Ph. D. degree candidate at State Key Laboratory of Applied Optics, CIOMP. His research interests focus on adaptive optics and optical design.