

doi: 10.3788/lop47.021101

开环双波段人眼视网膜成像液晶自适应光学系统设计

程少园^{1,2} 曹召良¹ 胡立发¹ 穆全全¹ 李鹏飞^{1,2} 刘超^{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 设计了一套基于开环双波段模式的人眼视网膜成像液晶自适应光学系统。该光学系统分别采用夏克-哈特曼波前传感器和液晶空间光调制器来探测和校正波前畸变。探测波段采用 830 nm 近红外光, 成像波段采用 790 nm 近红外光。采用开环模式以提高光能利用率和系统的稳定性, 采用双波段模式以增大视场。新加入了瞳孔监控子系统和响应矩阵测量子系统, 使系统更加灵活方便。介绍了系统的关键参数, 并通过 ZEMAX 软件对光学系统进行模拟分析, 认为系统可以达到接近衍射极限的效果。传递函数 MTF@50 lp/mm 达到 0.25(对应视网膜上 3 μ m), 满足设计要求。

关键词 自适应光学; 视网膜成像; 液晶空间调制器; 近红外

中图分类号 TH74 OCIS 110.1080 160.3710 文献标识码 A

Design of LC Adaptive Optics System for Human Retinal Imaging Operated on Open-Loop and Two-Wavelength Mode

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

¹State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract An adaptive optics (AO) retinal imaging system based on liquid crystal spatial light modulator was presented, which was operated on open-loop and two-wavelength mode. The system adopted a Shark-Hartmann wavefront sensor (SHWS) and a liquid crystal spatial light modulator to detect and correct wavefront aberrations respectively. 830 nm near infrared light was used for the wavefront detection, and 790 nm near infrared light was used for retinal imaging. The open-loop mode can enhance the light efficiency and improve the system stabilization; the two-wavelength mode can enlarge the view field. The subsystems of pupil monitoring and respond matrix measuring were introduced to make the system more convenient. Some key parameters were introduced, and the optical system was simulated and analyzed with ZEMAX. It shows that the optical system can reach the diffraction limitation, and MTF@50 lp/mm of 0.25 (3 μ m at retina), which satisfies the design requirements.

Key words adaptive optics; retinal imaging; liquid crystal spatial light modulator; near infrared

1 引言

人眼视网膜的高分辨率成像对高血压、糖尿病等疾病的早期诊断、治疗, 对眼科学的发展等都具有重要意义^[1]。可是, 人眼的各种像差却限制了人眼视网膜的高分辨率成像。配戴眼镜虽然可以校正一些低阶

收稿日期: 2009-06-12; 收到修改稿日期: 2009-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(50703039)和国家重点基金(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: csycf@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

像差,如离焦和像散,但人眼依然会存在一些高阶像差,如彗差、球差、三角叶等,它们也会很大程度上限制着人眼视网膜高分辨成像的实现,尤其是当瞳孔较大时^[2,3]。而且,这些高阶像差是动态变化的,所以传统方法难以将它们校正^[4]。令人欣慰的是,近年来在地基天文望远镜上已经得到成功应用的自适应光学技术开始应用于眼科学领域,尤其是在超视觉和视网膜高分辨率成像方面^[5]。1994年,梁俊忠等^[6]用夏克-哈特曼探测器成功探测到人眼的高阶像差,后来又将自适应光学技术应用于人眼视网膜成像,并获得清晰的活体人眼视觉细胞图案^[7]。随后,国内外许多研究机构开始研究自适应光学在眼科学中的应用,并取得了较好的结果^[8]。

目前,用于人眼视网膜成像的波前校正器多为变形镜,它存在成本高、驱动电压高、校正能力小、体积大和空间分辨率不够等问题。而液晶空间光调制器则具有体积小、成本低、功耗小、校正能力大、无机械运动以及空间分辨率高等优点,在活体人眼视网膜高分辨率成像上具有很大的发展潜力^[9-12]。

此前,我们已经设计一套基于闭环单波段模式(波前探测和成像观察共用一个波段)的人眼视网膜成像液晶自适应光学系统,并获得了较为清晰的人眼视网膜高分辨率图片^[13,14]。然而,液晶空间光调制器只能对线偏振光进行相位调制的特点使得闭环模式光能利用率比较低,而且闭环模式的多次累加校正还会由于人眼的眨动而出现不稳定现象。单波段模式由于波前探测和成像观察共用照明光,视网膜上的照明面积过大会降低夏克-哈特曼探测器的动态范围和探测精度,限制单次成像面积,因此只能让照明面积很小。本文采用开环双波段(探测波段和成像波段采用不同的波段)的设计方案,不仅提高了能量利用率和系统稳定性,还扩大了单次成像区域,具有较高的实用价值。

2 主要设计参数的选择

2.1 波长的选择

由于之前设计的单波段模式视网膜成像自适应光学系统的诸多缺点,我们采用双波段模式,即探测和成像采用不同波段,可以使探测光在视网膜上照明一个很小的区域,作为信标,而成像光可以在视网膜上照明一个较大的区域,进而扩大了视场。考虑到人眼、光学镜头以及液晶空间光调制器都存在一定色差,为了减小色差对波前探测和校正成像的影响,探测光和成像光这两个波段应该离得较近,应不大于 100 nm,它们各自的光谱宽度应小于 30 nm。综上考虑,探测和成像的波段选在 800 nm 附近的近红外光,一方面是为了使受试者的眼睛更舒适,另一方面考虑到在该波段人眼视网膜的反射率比较高^[15],便于探测和成像。选择 830 nm 近红外光波进行前探测,790 nm 近红外光进行校正成像。

2.2 开环与闭环的选择

采用开环模式,可将视网膜反射出来的自然光分成偏振方向相互垂直的两束线偏振光,一束用于探测,另一束用于成像(而闭环模式只能用其中一束偏振光),因而提高了光能利用率。具体地说,探测光可以不经过液晶空间光调制器直接进入波前探测器,使探测光增强 2 倍以上,提高了探测精度。同时,经过液晶空间光调制器校正后的光可以全部用来成像(而闭环模式要分出一大部分给波前探测器),提高了成像的对比度。开环模式采用单次,不同于闭环的累加校正,可有效避免眨眼等对校正的影响,使系统更稳定。因此,该系统选择开环模式比较理想。

2.3 视场大小的选择

自适应光学系统只能对近轴小区域成像,成像面积过大会使校正成像效果大大降低,成像面积过小,会浪费有效的校正能力,不利于观察。自适应光学系统可以在等晕角的范围内获得较好的校正效果,而人眼等晕角为 2° 左右,对应于视网膜上的照明区域直径 600 μm 。这对应于该系统在视网膜上单次成像大小,即视场。为了保证波前探测器的探测精度和动态范围,同时也考虑到光点与波前探测器的 CCD 像素匹配关系,探测光在视网膜上的照明区域直径选择 50 μm 左右。

2.4 光强的控制

人眼的有效反射率(从人眼反射出的光能和相应的射入人眼的光能之比)很低^[15], 大约为 10^{-4} 。为了提高信噪比以保证波前探测精度和成像效果, 应适度增大照明光强。然而, 人眼不能承受过强的光照(这和波长、照明面积等都有一定关系)。根据美国国家安全标准 ANSI Z136.1-2000, 对于波长范围在 $0.7\sim 1.05\ \mu\text{m}$ 的照明光, 照明时间为 $(10\sim 3)\times 10^4\ \text{s}$, 人眼的安全光强为

$$I = C_E C_A \times 10^{-3}, \quad (1)$$

$$C_A = 10^{2(\lambda - 0.700)}, \quad (2)$$

$$C_E = \begin{cases} 1 & \alpha < \alpha_{\min} \\ \alpha/\alpha_{\min} & \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \\ = \alpha^2/(\alpha_{\min} \alpha_{\max}) & \alpha > \alpha_{\max} \end{cases} . \quad (3)$$

α_{\min} 和 α_{\max} 是给定值, 式中 I 为人眼瞳孔处(直径约 $7\ \text{mm}$)安全照明光强(单位为 $\text{W} \cdot \text{cm}^2$), C_A 和 C_E 分别为波长和照明面积的修正参数, α , α_{\min} 和 α_{\max} 分别表示照明面积对瞳孔张角的实际值和两个分界值, $\alpha_{\min} = 1.5\ \text{mrad}$, $\alpha_{\max} = 100\ \text{mrad}$ 。

为了保证受试者的绝对安全, 一般要使光强控制在人眼安全光强的 $1/20$ 。因此, 探测光在人眼瞳孔处的入射光功率应为 $60\ \mu\text{W}$ 左右, 成像光在人眼瞳孔处的入射光功率应为 $700\ \mu\text{W}$ 左右。

2.5 波前探测器的参数选择

为了很好地探测人眼波前像差, 尤其是高频的不规则像差, 需要保证足够的微透镜个数。实验表明, 15×15 的微透镜阵列基本满足要求。但是微透镜也不能过多, 否则会影响探测的频率, 降低信噪比, 进而影响探测精度。为了留出适当余量, 同时保证探测精度, 本系统采用 17×17 的微透镜阵列。为了保证空间分辨率, 且与 CCD 面板匹配, 微透镜的口径选为 $300\ \mu\text{m}$ 。微透镜的焦距跟波前探测器的灵敏度成正比, 跟波前探测器的动态范围成反比, 为了兼顾灵敏度与动态范围, 本系统微透镜焦距选为 $4\ \text{mm}$ 。

3 光学系统的设计与分析

3.1 系统的光路结构

该系统主要分为 5 个组成部分: 照明子系统、瞳孔监控系统、人眼定位系统、探测与校正成像子系统以及响应矩阵测量子系统, 如图 1 所示。

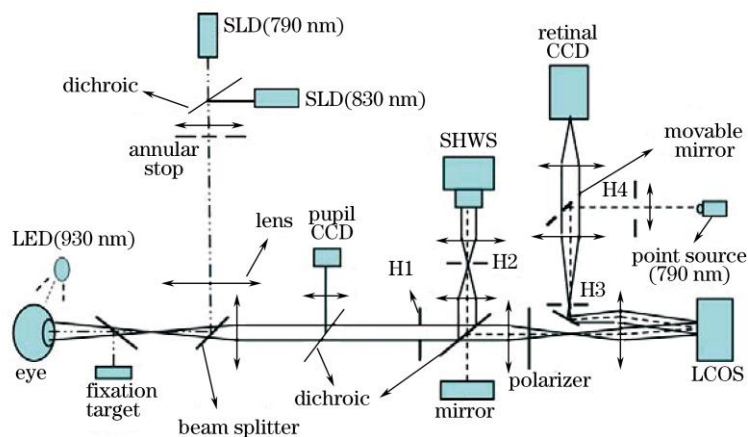


图 1 系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of the system

在照明子系统中, 两个超发光二极管都成像于人眼的视网膜上, 为了消除角膜前表面中心的杂散光, 同时也为了控制人眼瞳孔处入射光的光束口径, 将一个环形光阑置于人眼的共轭面内^[16]。为了提高视网膜

上照明的均匀度, 照明光路应采用柯勒照明。在两个超发光二极管前面分别有一个可变光阑, 以控制探测光和成像光在视网膜上的照明面积。为了减少从眼里反射出来的光的能量损失, 应采用高透过率低反射率的薄膜分束片(透过率约为 96%, 反射率约为 4%)。

在瞳孔监控子系统中, 采用 930 nm 的发光二极管 LED 侧向照明人眼瞳孔。瞳孔经过分色片反射后成像于瞳孔相机上, 用来监控瞳孔的位置。当瞳孔清晰成像于瞳孔相机上, 并且与标定点同心时, 表示瞳孔在合适位置, 就可以进行波前探测和校正成像。

人眼定位系统是为了使人眼调焦于合适位置, 以减小离焦对波前探测和校正的不利影响, 同时为了确定视网膜上的成像区域。本定位系统的定位目标采用一块小液晶屏, 使液晶屏上的小光点或其他便于观察的图案根据要求精确移动, 人眼盯着小光点, 并随着它转动, 进而精确控制成像区域。要注意的是, 定位目标发出的是可见光, 而探测和成像光为近红外光, 人眼会产生较大色差, 装调光路应予以补偿。

探测与校正成像子系统是该系统的核心部分。本系统采用开环光路, 波前探测和校正成像是两个支路。人眼眼底反射出来的两束光(830 nm 和 790 nm)通过分色片分别到达夏克-哈特曼波前探测器(SHWS)和硅基板反射式液晶空间光调制器(LCOS)。需要保证 SHWS 的微透镜阵列面和 LCOS 同时与人眼瞳孔共轭。通过调整透镜焦距来使三者孔径匹配。光束应以准平行光入射到 SHWS 和 LCOS 上, 以保证探测精度和校正效果。考虑到许多人患有近视, 该系统让人眼盯着位于人眼前 200 mm 附近处的定位目标, 以减小离焦对波前探测和校正成像的不利影响。对于高度近视、远视或散光的人眼, 可以在人眼前加补偿镜来补偿较大的离焦和像散。液晶空间光调制器只能对线偏振光进行相位调制, 因而需要在 LCOS 前放置一个偏振片以产生和液晶分子方向平行的线偏振光^[17]。由于探测和成像光存在一定的位置色差, 装调光路时应予以补偿; 而高阶色差非常小, 可以忽略不计。开环光路中, 探测和成像是两个分支, 可能存在所谓的非共路像差, 影响成像效果。在装调光路和测量响应矩阵时, 应注意补偿这部分像差。在自适应校正过程中, 波前探测器 SHWS 把探测到的波前畸变信息发给控制器(计算机), 控制器经过运算处理后, 将相应控制信号发给 LCOS 来校正波前畸变, 校正好的光波经透镜会聚后, 在高灵敏度成像 CCD(图 1 中的 retinal CCD)上获得清晰的视网膜图像。

响应矩阵测量子系统是为了测量开环光路中两个支路中的 SHWS 和 LCOS 之间的响应关系。790 nm 点光源作为响应矩阵测量时的信标, 它的发光光强比较强, 使其发出的 790 nm 光经过可移动反射镜、LCOS、分色片和反射镜的反射后, 仍能有足够的光强透过分色片(尽管透射率很低), 到达 SHWS。小孔 H4 要同时跟 LCOS 和 SHWS 共轭, 并且孔径匹配。光束应以平行光入射到 LCOS 和 SHWS 上。我们采用模式法(泽尔尼克多项式拟合)进行波前复原, 所以测量响应矩阵时, 要将泽尔尼克各项系数逐项地发到 LCOS 上, 同时用 SHWS 记录各项所引入的波前畸变量^[18,19]。这样就将 LCOS 和 SHWS 的对应关系建立起来, 并用于自适应校正成像。

3.2 光学系统的性能分析

人眼视网膜成像自适应光学系统(不考虑人眼像差)是一个小视场、小孔径的光学系统, 比较容易实现衍射极限的效果。然而, 人眼的像差是因人而异的, 而且是动态变化的, 这会大大降低视网膜的成像质量。对于传统眼底相机, 这点是难以避免的。而自适应光学技术恰恰可以实时校正这些动态变化的像差, 包括各项高、低阶像差, 使系统达到接近衍射极限的成像效果, 获得清晰的视网膜图片。所以, 在该光学系统进行分析时, 可以认为人眼是理想透镜(让自适应光学系统来校正人眼的像差), 可以用一个焦距为 15.75 mm 的理想透镜来代替人眼(正常的未调焦的人眼焦距约为 17.1 mm), 此时, 视网膜成像于眼前 200 mm 处。对于高度近视(远视)或高度散光的人眼, 其较大的离焦或像散项可能会超出校正器的校正能力或波前探测器的探测能力, 此时需要在受试者眼前加入补偿镜, 以消除这些过大的静态低阶像差。

我们用 ZEMAX 软件对成像和探测光路进行了分析。图 2 给出了用 ZEMAX 模拟的波前探测与校正成像系统的光路图。

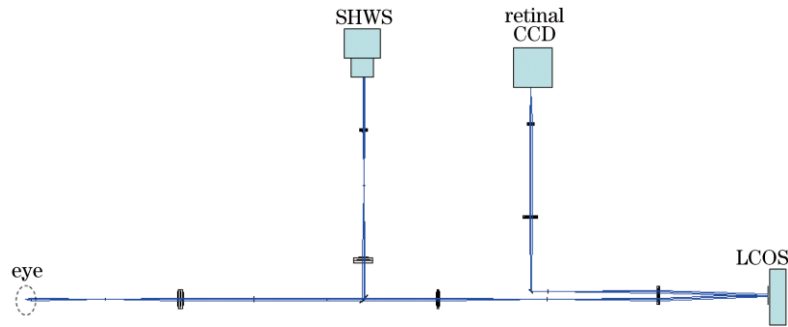


图 2 波前探测与校正成像系统光路图

Fig.2 Layout of the optical system for wavefront detecting and imaging

主要参数为：全视场(视网膜上)0.5 mm；入瞳直径(人眼瞳孔)：7 mm；探测波长：830 nm；成像波长：790 nm；视网膜上分辨率： $\sim 3 \mu\text{m}$ ；横向放大率：7 倍；retinal CCD(用于视网膜成像的 CCD)像素大小： $10.8 \mu\text{m}$ 。

图 3 和图 4 是成像光路的传递函数和点列图。可以看出，系统各视场都达到或接近衍射极限的效果。成像 CCD 的像素尺寸为 $10.8 \mu\text{m}$ ，根据奈奎斯特定理，该 CCD 的分辨率约为 50 lp/mm 。为了充分利用 CCD 的分辨能力，同时尽可能分辨人眼视网膜视觉细胞(直径一般为 $3\sim 6 \mu\text{m}$)，系统的放大率应为 7 倍左右(为了使细胞图像更圆滑，也可适当增大放大率，但放大率过大会降低信噪比和图像对比度)，这样人眼视网膜细胞成像在 CCD 面板上的直径约为 $21\sim 42 \mu\text{m}$ 。由于经过自适应校正后，系统能达到接近衍射极限的效果，故在 50 lp/mm 像素分辨率处，系统传递函数可达到 0.25 以上。人眼视网膜的锥状细胞和毛细血管一般大于 $3 \mu\text{m}$ ，所以系统满足成像要求(注意：由于杆状细胞和中心小凹处的锥状细胞太小，高于衍射极限分辨率，仍难以观察到)。

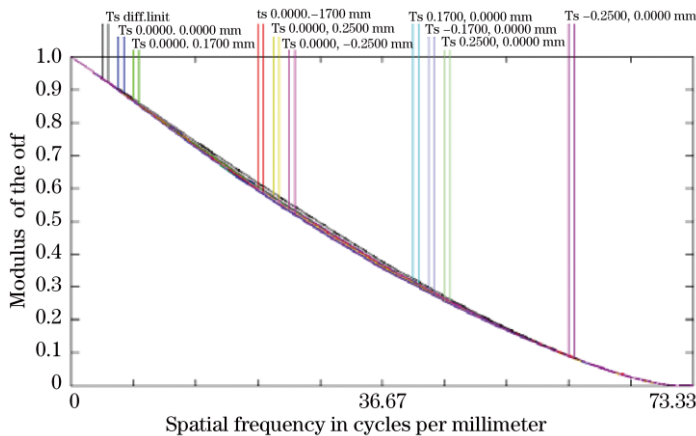


图 3 成像系统的传递函数

Fig.3 MTF of the imaging system

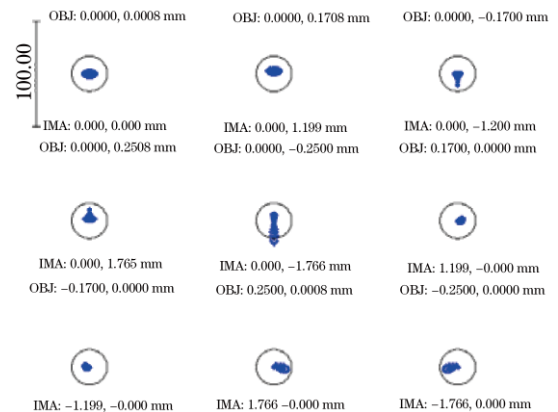


图 4 成像系统的点列图

Fig.4 Spot diagram of the imaging system

图 5 给出了校正成像光路(a)和波前探测光路(b)的波前图。它们的波前峰谷(PV)值都小于 0.07 个波长，远小于瑞利准则中 0.25 个波长的标准。所以探测和成像之间的波前误差，即所谓的非共路像差，在可接受的范围之内，不会对校正成像产生影响。综上分析，认为该系统经过自适应校正后，可以获得清晰的视网膜图像。

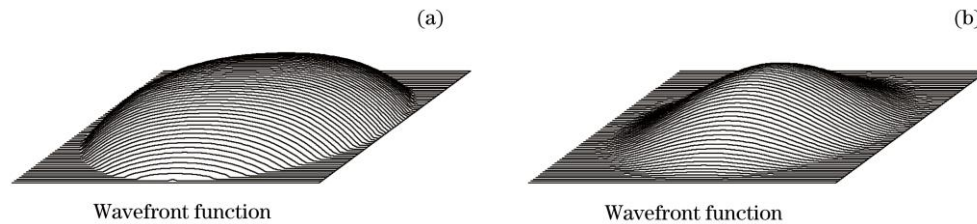


图 5 光路波前图。(a)成像光路；(b)探测光路

Fig.5 Wavefront of the imaging channel (a) and detecting channel (b)

4 结 论

开环双波段模式人眼视网膜成像液晶自适应光学系统，探测波段采用 830 nm 近红外光，成像的波段采用的 790 nm 近红外光。跟原来的闭环单波段模式(波前探测和成像观察共用一个波段)的人眼视网膜成像液晶自适应光学系统相比，提高了光能利用率和系统的稳定性；采用双波段模式，增大了视场。新加入了瞳孔监控子系统和响应矩阵测量子系统，使系统更加灵活方便。通过软件 ZEMAX 对光学系统进行模拟分析，认为设计方案合理可行。

参 考 文 献

- 1 G Nikita, Iroshnikov, V. Andrey. Larichev adaptive optics in ophthalmology [C]. *SPIE*, 2006, **6284**: 62840B
- 2 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
- 3 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
- 4 Zhou Chuanqing, Ren Qiushi. Research and application of ocular wavefront aberration and supernormal vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(4): 26~34
周传清, 任秋实. 人眼波面像差与超视力的研究与应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(4): 26~34
- 5 E. J. Fernandez, I. Iglesias, P. Artal. Closed-loop adaptive optics in the human eye[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(10): 746~748
- 6 Junzhong Liang, B. Grimm, S. Goelz *et al.*. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of Hartmann-Shack wave-front sensor[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(7): 1949~1957
- 7 Junzhong Liang, 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
- 8 Zhang Peiming, Chen Jiabi, Wang Cheng *et al.*. Progress of high spatial resolution retinal imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(1): 30~36
张培茗, 陈家璧, 王 成 等. 高分辨率视网膜成像技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(1): 30~36
- 9 Q. Mu, Z. Cao, D. Li *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
- 10 Lifa Hu, Li Xuan, Yongjun Liu *et al.*. Phase-only liquid crystal spatial light modulator for wave-front correction with high precision[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(26): 6403~6409
- 11 Wang Kangjun. Liquid crystal spatial light modulator and its application[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(6): 65~67
王康俊. 液晶空间光调制器及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(6): 65~67
- 12 P. M. Prieto, E. J. Fernandez, S. Manzanera *et al.*. Adaptive optics with a programmable phase modulator: applications in the human eye[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(17): 4059~4071
- 13 Jiang Baoguang, Cao Zhaoliang, Mu Quanquan *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. 激光为光源的液晶自适应眼底成像系统[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(10): 1805~1809
- 14 Cheng Shaoyuan, Hu Lifa, Cao Zhaoliang *et al.*. Primary experiment and improvement 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, **38**(6): 1491~1493
- 15 D. Van Norren, L. F. Tiemeijer. Spectral reflectance of the human eye[J]. *Vision Res.*, 1986, **26**(2): 313~320
- 16 Wang Zhaoqi, 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
- 17 G. D. love. Liquid-crystal phase modulator for unpolarized light[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(13): 2222~2223
- 18 Li Jun, Chen Haiqing, Ren Wenxin *et al.*. Improvement of the robustness of Hartmann wavefront sensor by using Zernike moment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1033~1037
李 俊, 陈海清, 任温馨 等. Zernike矩提高哈特曼波前传感器的鲁棒性[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1033~1037
- 19 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测量范围的方法[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(7): 1203~1207