

文章编号 1004-924X(2013)02-0301-07

# 大视场液晶自适应视网膜成像系统

刘丽丽\*, 黄涛, 蔡敏, 高明, 封文江

(沈阳师范大学物理科学与技术学院, 辽宁沈阳 110034)

**摘要:** 设计了大视场眼底自适应成像系统, 用于扩大现有视网膜自适应成像系统的视场。对人眼等晕角视场下的自适应像差校正成像进行分析, 确定了波前探测与成像校正两个过程对视场的不同要求。在共光源像差探测及成像光学系统中, 采用切变视场光阑的方式先后在波前探测和自适应校正成像过程中进行小-大视场切换, 避免了大视场中眼波像差探测失真问题, 使成像区域由  $200\ \mu\text{m}$  扩展到  $500\ \mu\text{m}$ 。利用人眼等晕角大视场使眼底液晶自适应成像系统在不降低成像质量的前提下将成像区域扩展了 2.5 倍, 大幅提升了该自适应成像系统在临床上应用的可行性。

**关键词:** 自适应光学; 视网膜成像系统; 夏克哈特曼波前传感器; 大视场

**中图分类号:** O439; TP212.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132102.0301

## Retinal imaging system with large field of view based on liquid crystal adaptive optics

LIU Li-li\*, HUANG Tao, CAI Min, GAO Ming, FENG Wen-jiang

(College of Physics Science and Technology, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China)

\* Corresponding author, E-mail: liull03@126.com

**Abstract:** A retinal imaging Adaptive Optical(AO) system with a large Field of View(FOV) was designed to expand the FOV of the retinal image of liquid crystal AO system. Based on analysis of the AO retinal imaging system under an isoplanatic angle, it pointed out that the FOV for wave-front detection should be smaller than a half isoplanatic angle for precise wave-front detection and the half FOV should not be larger than the isoplanatic angle in imaging. A coaxial wave-front detection and optical imaging system was fabricated, meanwhile, an adjustable pupil was used to switch the different FOVs for wave-front detection and imaging, respectively. After adaptive optical wave front correction, the wave-front error is significantly reduced and the FOV for imaging is enlarged from a diameter of  $200\ \mu\text{m}$  to  $500\ \mu\text{m}$  without any harmful effect on imaging quality. By utilizing an adjustable pupil in the system based on the isoplanatic angle, the retinal image FOV has increased by 2.5 times as compared with that of existing AO system. The applicability of the system on clinical practice is increased a lot by this research.

**Key words:** adaptive optics; retinal imaging system; Shack-Hartmann wave-front detector; Field of View (FOV)

收稿日期: 2012-11-29; 修订日期: 2013-01-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 11204299)

## 1 引言

随着老年性黄斑变性、视网膜锥、杆细胞缺失及糖尿病视网膜病变等眼底疾病的广泛发生,活体人眼细胞尺度的高分辨率成像成为视网膜微观病理学研究领域的热点。因此,人们开始探讨自适应光学在视网膜成像中的应用问题<sup>[1]</sup>。

液晶波前校正器<sup>[2-3]</sup>有着调制量大,空间分辨率高等优点,近年来被广泛应用于眼底视网膜自适应成像<sup>[4-5]</sup>。本文所讨论的液晶自适应光学视网膜成像系统,通过对人眼及光学系统本身像差的实时补偿可以获得接近衍射极限的成像分辨率,能够清晰识别眼底  $3\ \mu\text{m}$  的视觉细胞。但根据波前探测器对光斑尺寸的要求,成像视场即单次成像所能观察的范围不到  $200\ \mu\text{m}$ ,还不到人眼等晕角所允许范围的  $1/2$ ,如此小的视场对临床诊断非常不便。因此,在达到最高分辨率的条件下,有必要进一步扩大单次成像的视场。本文对各种限制成像视场的因素,如哈特曼波前探测的要求、人眼等晕角的限制等进行了分析,寻找改进方法并确定最大可允许的成像视场;在此基础上,采用快速切换视场光阑的方法扩大了成像视场。

## 2 限制成像视场因素分析

### 2.1 人眼等晕角

“等晕角”(isoplanatic angle)是大气自适应光学中的术语<sup>[6-8]</sup>。如图 1 所示,用望远镜对无穷远处的物体成像时,可将传播中的光束看成是平行光。由于大气湍流导致的光波前畸变使成像分辨率急剧下降,需要对湍流波前进行高速、实时的探测和校正,以免校正的延迟产生较大的新畸变,从而提高望远镜的成像分辨率。波前探测和成像校正应该针对同一物体,但在待测星亮度很低的情况下,可用待测星周围等晕角之内的某颗亮星(或激光导星)作为无穷远处的参考点光源来探测其光波前通过大气层后产生的波前畸变,并以此作为被观测星的波前补偿依据进行自适应波前校正成像。等晕角为参考点光源波前相对被观测星波前的变化的均方根 RMS 值为  $1\ \text{rad}$  时二者的

空间角距离,见公式(1):

$$RMS_{\Delta\theta} = RMS(W(\theta_{\text{ref}}) - W(\theta_{\text{obj}})) = 1\ \text{rad}, \quad (1)$$

其中: $W(\theta_{\text{ref}})$ 和 $W(\theta_{\text{obj}})$ 分别代表参考点光源的波前和被观测星的波前。这也说明,自适应波前校正后被观测星的残余波前畸变 RMS 值为  $1\ \text{rad}$  时能得到很好的成像,对应的斯特列尔比(Strehl ratio)为  $0.38$ 。

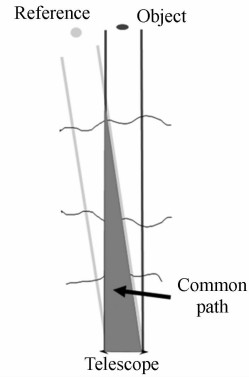


图 1 等晕角原理图

Fig. 1 Scheme of isoplanatic angle of star

人眼眼底成像的自适应光学系统如图 2 所示。在眼底自适应光学成像时,像差探测和成像校正取自照明眼底后反射出来的同一束光,因此探测和成像具有相同的视场范围。但是,根据“等晕角”的概念,成像视场可以比探测视场大。因为像差探测要求波前是同一个发光点发出的,那么只能对眼底约  $100\ \mu\text{m}$  直径的小区域进行照明,并以此作为一个点光源发光来探测眼波像差;但成像校正没有这个限制,只要在等晕角之内就可以使用约  $100\ \mu\text{m}$  直径的照明对探测到的眼波像差进行波前补偿,然后在等晕角对应的较大区域内成像,所以只完美地对中心测量区域进行了波前补偿,而对偏离中心的其它区域的像差是一种非完全补偿。人眼校正与大气湍流校正的不同在于,大气湍流校正的成像目标通常是一个点,而在人眼成像中,成像目标为一个圆形区域,测量点位于中心处;所以,人眼等晕角的定义与大气等晕角稍有不同,人眼等晕角为相对波前残差为  $1\ \text{rad}$  的空间角距离的 2 倍,因此在理想校正条件下,成像视场中心区域的斯特列尔比约为  $0.8$ ,边缘处的斯特列尔比约为  $0.38$ 。

Phillip Bedggood 等人用哈特曼波前探测器

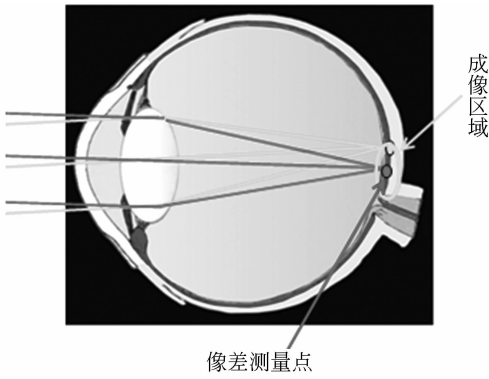
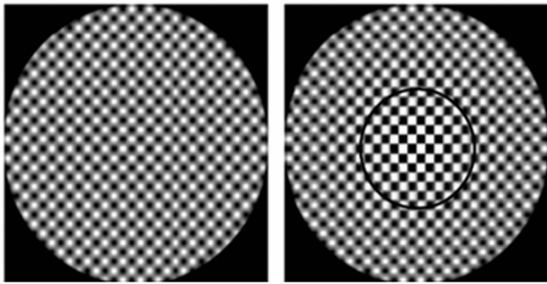


图 2 人眼等晕角

Fig. 2 Scheme of isoplanatic angle of an eye

测量了瞳孔为 6 mm 条件下人眼不同视场的像差,并根据测得的人眼像差计算了斯特列尔比与视场角的关系<sup>[9]</sup>,得出人眼像差的平均等晕角为 0.8°,模拟结果如图 3 所示。



(a) 校正前 (b) 校正后等晕角黑圈内的像质改善

(a) Before correction (b) Improvement in isoplanatic angle range after correction

图 3 像差校正前后等晕角内的成像效果

Fig. 3 Simulation of imaging quality in asoplanatic angle range

图 3 直观地说明了等晕角在自适应波前校正成像中对视场的限定作用,左图是像差导致的模糊图像,右图是以中心点为参考进行理想像差校正后的图像,图 3(b)中黑色圆圈区域为等晕角范围。由此可见,在等晕角内校正后的像质明显改善,而超过等晕角范围的像质没有变化。因此,自适应校正成像视场应控制在 1.5°角直径的等晕角范围内,对应的眼底照明区域直径约为 500 μm。

## 2.2 波前探测器的探测精度

夏克-哈特曼波前探测器(Shack-Hartmann Wave-front Sensor, SHWS)<sup>[10]</sup>主要由微透镜阵

列和 CCD 或者 CMOS 相机组成,如图 4 所示。

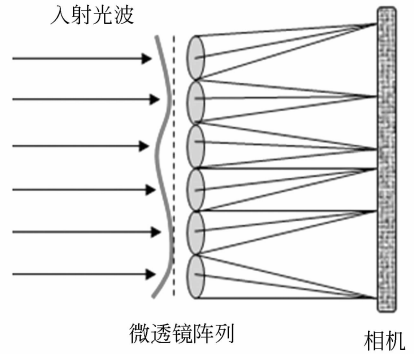


图 4 夏克-哈特曼的基本组成结构

Fig. 4 Scheme of Shack-Hartmann wave-front sensor

入射光波被微透镜阵列分割并聚焦到相机上,每个微透镜称为一个子孔径。如果入射光波为理想平面波,每个子孔径内的光斑将恰好汇聚在相机子孔径的中心上;如果入射光波前有畸变,则光斑位置将偏移,偏移量与子波前的斜率成正比,由此可以根据每个子孔径内的光斑偏离量计算入射子波前的斜率,进而由子波前的斜率矩阵计算出波前。子波前斜率可按下式计算:

$$k_{xi} = \frac{x'_i - x_i^0}{f}, k_{yi} = \frac{y'_i - y_i^0}{f}, \quad (2)$$

式中: $i$  为子孔径序号; $k_{xi}, k_{yi}$  分别代表子波前在  $x$  轴和  $y$  轴上的斜率; $x_i^0, y_i^0$  代表第  $i$  个子孔径光斑质心的标准位置; $x'_i, y'_i$  代表实时测量的第  $i$  个子孔径光斑的质心位置; $f$  为微透镜阵列的焦距。

子孔径内光斑质心的计算精度除了与噪声有关外,还与光斑在相机像素面板中的分布有关。当光斑尺寸过小、覆盖像素数过少时,光斑质心的计算精度急剧下降,会产生很大的离散采样误差<sup>[11-12]</sup>;反之,光斑过大会很容易产生相邻子孔径内的光斑交联,导致光斑质心计算出错,超出波前探测器的动态范围。

对于人眼眼底成像的自适应光学系统,SHWS 中每个子孔径内的光斑直径为:

$$L = \frac{\omega n D \cdot f}{D'} + 2.5 \frac{\lambda f}{d}, \quad (3)$$

其中: $L$  是子孔径内的光斑直径; $\omega, n$  分别是系统入瞳处的视场角和折射率; $D$  是入瞳直径; $D'$  为系统出瞳(哈特曼处)直径, $d$  为 SHWS 的子孔

径,  $f$  为微透镜焦距,  $\lambda$  为入射光波长。一般要求光斑小于子孔径直径的  $2/3$ , 否则当波前存在高阶畸变时, 光斑直径的增大会导致相邻子孔径光斑交联。由此可得波前探测时, 眼底照明区域对应的视场角条件为:

$$L < \frac{2d}{3} \Rightarrow \omega < \frac{(0.67d^2 - 2.5\lambda f)D'}{nDfd} \quad (4)$$

设系统入瞳(即眼睛出瞳)直径为 6 mm, 系统所使用的 SHWS 的有效口径约为 4 mm, 子孔径为  $300 \mu\text{m}$ , 微透镜焦距为 6 mm。由此算得, 对应光波长 808 nm 的最大眼底照明视场角为 13 mrad, 相当于  $220 \mu\text{m}$  的直径区域。

根据上述计算分析, SHWS 的探测视场远小于等晕角约束的成像视场。因此, 本论文采用视场光阑的方式分别对自适应成像和波前探测时的视场进行约束。但是, 如果视场光阑不是直接约束眼底照明区域的尺寸, 而是单独缩小 SHWS 的视场将导致波前探测严重出错。验证实验如图 5

所示, 采用光纤束点光源模拟“眼底被照明的光斑”, 其发射的光束通过第一透镜后成为放大的实像, 在此实像面上以光轴为中心放置可调视场光阑, 之后是准直透镜使光束成为与 SHWS “WFS” 口径匹配的平行光束进入探测器; 视场光阑处的实像是“眼底被照明的光斑”与所经系统在视场光阑处点扩散函数的卷积, 是物与系统信息的综合, 同样也包含像差信息。因此, 当视场光阑孔径足够大, 令实像光束全部通过时, SHWS 获得的光斑阵列如图 6(a) 所示, 处理后的波前像差见图 6(c), 波前存在  $4\lambda$  左右的离焦; 缩小视场光阑到实像大小的  $1/4$  左右, 此时 SHWS 采集到的光斑图非常规则, 如图 6(b) 所示, 得到的波前接近于平面波如图 6(d), 与实际波前相差甚远, 丢失了  $4\lambda$  左右的离焦信息。因此, 中途遮挡减小波前探测的光斑尺寸会丢失遮挡部分的波前信息, 必然导致波前探测严重出错。

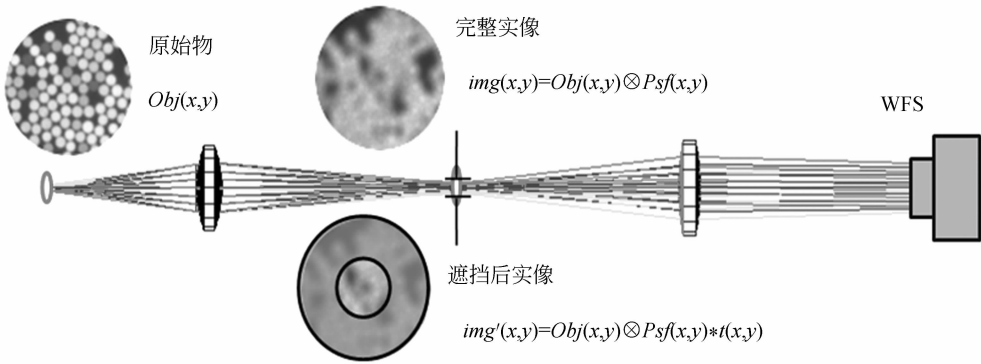
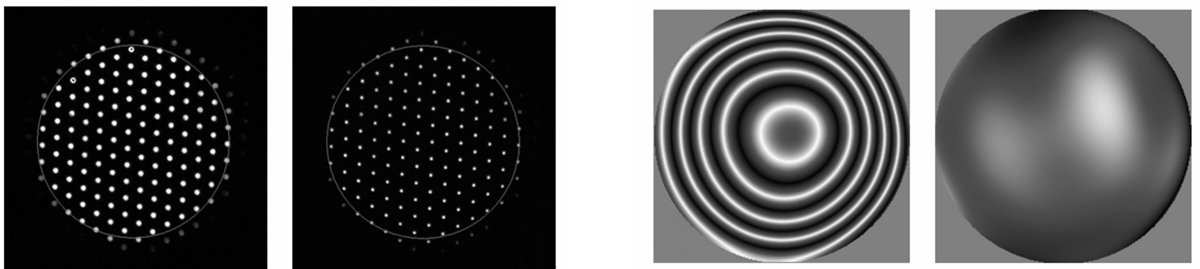


图 5 缩小波前探测的光斑尺寸导致波前信息丢失

Fig. 5 Information loss by decreasing spot diameter of wave-front detection



(a) 视场缩小前的光斑图 (b) 视场缩小后的光斑图 (c) 正确测得的波前图 (d) 测得的波前丢失像差  
 (a) Spot image before reducing FOV (b) Spot image after reducing FOV (c) Normal wavefront image (d) Wave-front error

图 6 缩小视场光阑导致的波前探测失真

Fig. 6 Wave-front error by reducing FOV of detector with stop

### 3 自适应光学成像系统设计

基于以上分析,本文提出了在光束入眼之前使用可变视场光阑来获得大视场自适应成像的方法。光路设计如图7所示,点光源经一对放大成像透镜组在 $P_1$ 处成实像,以该实像为次生光源,次生光源在眼底的照明区域约为 $500\ \mu\text{m}$ ,即视场角为 $1.5^\circ$ 。在次生光源处放置一孔径可切变的视场光阑,通过视场光阑控制眼底照明区域的大小,大光阑直径比光源在 $P_1$ 处实像略大。大光阑状态下,光源光束不被遮挡,保证成像时 $500\ \mu\text{m}$ 的大视场要求;而小光阑直径为 $P_1$ 处实像大小的 $1/5\sim 1/10$ ,当SHWS进行波前采集时,可变光阑处于小光阑状态,眼底被照明区域只有 $50\sim 100\ \mu\text{m}$ ,满足SHWS的探测精度要求。光路中的BS-2是分束镜,LCOS是液晶波前校正器,PBS是偏振分束棱镜,它将液晶波前校正器校正过的偏振光S反射进入相机成像,而将未校正的偏振光P透射进入SHWS进行波前像差探测。

眼底自适应光学成像的控制程序为:首先将小光阑切入光路,SHWS曝光完成准确的波前采集后停止工作,进行探测数据处理,按照解出的像差驱动液晶波前校正器进行校正,同时迅速将光

阑切换到小孔状态,相机曝光实现等晕角下的 $500\ \mu\text{m}$ 大视场成像。这一过程的持续时间不得超过 $50\ \text{ms}$ ,以保证眼波像差不变化。

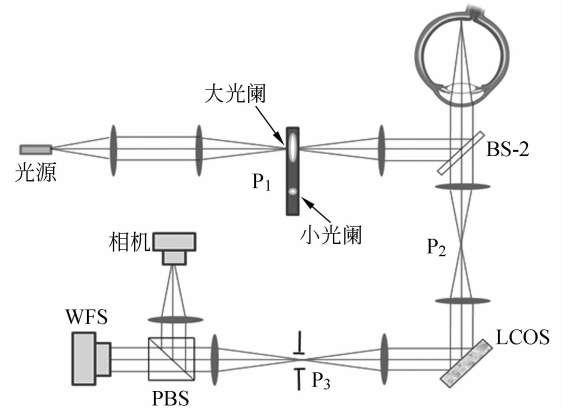


图7 可变视场光阑的眼底自适应成像光路示意图  
Fig. 7 Scheme of adaptive liquid crystal retinal imaging system based on adjustable FOV stop

本文利用图7所示的光路系统对3名受试者进行了 $500\ \mu\text{m}$ 大视场自适应像差校正成像,均得到了清晰的 $3\ \mu\text{m}$ 直径视觉细胞图像。其中3名被测者的校正结果如图8所示,(a)被测者LC屈光度为(S) $-5.00\text{D}$ , (b)被测者LDY屈光度为(S) $-2.50\text{D}$ , (c)被测者XML屈光度为(S) $-4.00\text{D}$ , (C) $-2.50\text{D}$ 。

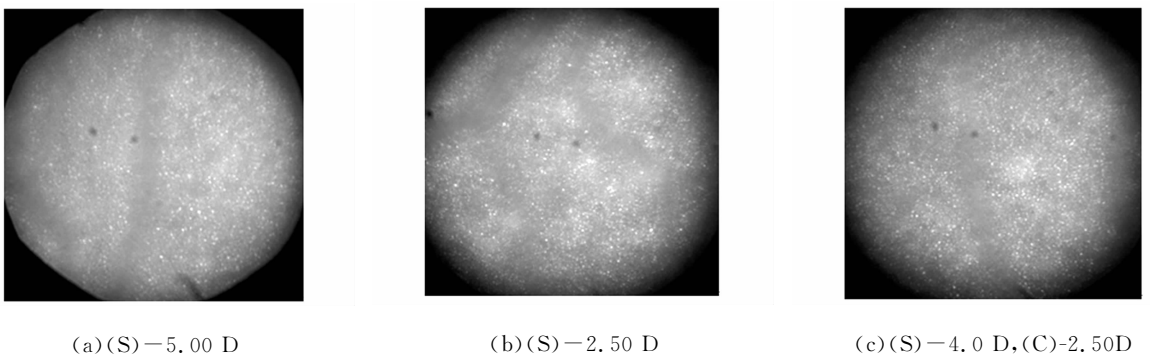


图8 3名受试者的 $500\ \mu\text{m}$ 大视场视觉细胞自适应成像  
Fig. 8 Adaptive images of three testers at  $500\ \mu\text{m}$  FOV

### 4 结论

本文研究了基于液晶自适应系统的大视场眼底成像方法。首先确定了人眼等晕角约为 $1.5^\circ$ ,

在人眼等晕角范围之内,可以满足高分辨率眼底成像要求;然后,分析了SHWS的视场及其控制方法,设计了像差探测视场与校正成像视场高速切换的自适应成像光路,并配备了与人眼像差变

化频率相匹配的控制程序;最后,通过实验获得了 500  $\mu\text{m}$  视场的活体人眼视觉细胞高分辨成像。

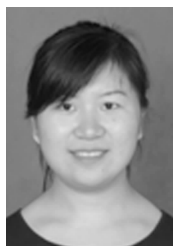
### 参考文献:

- [1] LIANG J, WILLIAMS D R. Aberrations and retina image quality of the normal human eye [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, 14: 2873-2883.
- [2] HU L F, LI X, LIU Y J, *et al.*. Phase-only liquid-crystal spatial light modulator for wave-front correction with high precision [J]. *Optics Express*, 2004, 12:6403-6409.
- [3] 曹召良, 李小平, 宣丽, 等. 液晶自适应光学的研究进展[J]. *中国光学*, 2012, 5(1):12-19.  
CAO ZH L, LI X P, XUAN L, *et al.*. Recent progress in liquid crystal adaptive optical techniques [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1):12-19. (in Chinese)
- [4] LI CH, XIA M L, LI D Y, *et al.*. High-precision open-loop adaptive optics system based on LC-SLM [J]. *Optics Express*, 2009, 17: 10774-10781.
- [5] VARGAS-MARTIN F, PRIETO P, ARTAL P. Correction of the aberrations in the human eye with liquid crystal spatial light modulators: limits to the performance [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1998, 15: 2552-2562.
- [6] FUSCO T, CONAN J M, MICHAU V, *et al.*. Isoplanatic angle and optimal guide star separation for multiconjugate adaptive optics [J]. *SPIE* 2000, 4007:1044.
- [7] 陈浩, 宣丽, 胡立发, 等. 望远镜的紧凑型闭环液晶自适应光学系统设计[J]. *液晶与显示*, 2010, 25(3):379-385.  
CHEN H, XUAN L, HU L F, *et al.*. Design on compact type closed-loop liquid crystal adaptive optical system for telescope [J]. *Chinese Journal of*

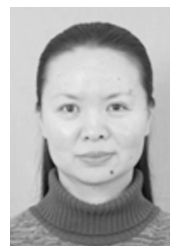
该系统有助于液晶自适应眼底成像系统的临床实用性研究。

- Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(3):379-385. (in Chinese)
- [8] 周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论. [M]. 第一版. 北京:北京理工大学出版社, 1996:109-115.  
ZHOU R ZH, YAN J X. *Theory of Adaptive Optics* [M]. 1st Ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996:109-115. (in Chinese)
- [9] BEDGGOOD P, DAABOUL M, *et al.*. Characteristics of the human isoplanatic patch and implications for adaptive optics retinal imaging [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2008, 13:024008.
- [10] 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)
- [11] 钮赛赛, 沈建新, 等. 人眼像差探测哈特曼波前传感器的质心优化[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12):316-324.  
NIU S S, SHEN J X, *et al.*. Centroid optimization of Hartmann-Shack wave-front sensor for human eye aberration detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):316-324. (in Chinese)
- [12] 程少园, 曹召良, 等. 用夏克-哈特曼探测器测量人眼波前像差[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(5):1060-1067.  
CHENG SH Y, CAO ZH L, *et al.*. Measurement of wavefront aberrations of human eyes with Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5):1060-1067. (in Chinese)

### 作者简介:



刘丽丽(1980—),女,吉林舒兰人,硕士,讲师,2006年于东北师范大学获得硕士学位,主要从事光学传感器及自适应光学方面的研究。E-mail: liull03@126.com



黄涛(1962—),女,辽宁沈阳人,博士,教授,2006年于东北大学获得博士学位,主要从事人工智能方面的研究。E-mail: sysdht@sina.com



**蔡敏**(1955—),女,辽宁沈阳人,学士,教授,1982年于东北大学获得学士学位,主要从事近代物理方面的研究。  
E-mail: shst312422@yahoo. com. cn



**封文江**(1974—),男,河北石家庄人,博士,副教授,2006年于中国科学院金属所获得博士学位,主要从事机器视觉方面的研究。E-mail: wjfeng @ soho. com. cn



**高明**(1964—),男,黑龙江伊春人,博士,教授,2002年于中国科学院金属所获得博士学位,主要从事光学传感方面的研究。E-mail: synugm @ yahoo. com. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)

## 向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》以材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域中最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶和各类显示材料及制备方法、材料物理和化学;液晶光学与光子学、生物液晶;液晶显示、有机电致发光显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地址:长春市东南湖大路3888号

《液晶与显示》编辑部

邮编:130033

电话:(0431) 86176059

E-mail: yjyxs@126. com

国内统一刊号: CN 22-1259/O4

国际标准刊号: ISSN 1007-2780

国内邮发代号:12-203

国内定价:40元/期

网址: www. yjyxs. com