

液晶自适应光学扫描激光检眼镜的光学系统设计

程少园^{1,2}, 曹召良¹, 胡立发¹, 穆全全¹, 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: 设计了一套液晶自适应光学扫描激光检眼镜, 采用 790 nm 近红外光进行波前探测、视网膜成像以增加受试者的舒适度; 采用离轴反射式结构以避免透镜表面的杂散光对探测和成像的不利影响; 采用开环校正模式以提高系统稳定性和能量利用率(比闭环高约 1 倍)。利用 ZEMAX 软件对成像系统进行模拟分析, 证明系统自身可以达到接近衍射极限水平, $MTF@33 \text{ cycles/mm}=0.38$ (对应视网膜上 $4 \mu\text{m}$), $MTF@44 \text{ cycles/mm}=0.2$ (对应视网膜上 $3 \mu\text{m}$), 轴向分辨率约 $80 \mu\text{m}$, 满足设计要求。

关键词: 自适应光学; 扫描激光检眼镜; 液晶空间调制器; 开环

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2011)02-0253-05

Design of scanning laser ophthalmoscope system with LC adaptive optics

Cheng Shaoyuan^{1,2}, Cao Zhaoliang¹, Hu Lifa¹, Mu Quanquan¹, 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 School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A scanning laser ophthalmoscope (SLO) system with liquid crystal (LC) adaptive optics (AO) was designed. It adopted 790 nm near-infrared for wavefront detection and retinal imaging to increase the comfort for subjects; adopted off-axis parabolic mirror (OPM) to avoid the impact of unwanted ghost reflections for wavefront detection and retinal imaging; adopted the open loop mode correction to enhance the stability and light efficiency. The optical system was analyzed with ZEMAX, and proved to be almost diffraction-limited, $MTF@33 \text{ cycles/mm}=0.38$ (corresponding to be retina $4 \mu\text{m}$), $MTF@44 \text{ cycles/mm}=0.2$ (corresponding to be retina $3 \mu\text{m}$), and the axial resolution is about $80 \mu\text{m}$. So the system satisfies design requirements.

Key words: adaptive optics; scanning laser ophthalmoscope; liquid crystal spatial light modulator; open loop

收稿日期: 2010-05-10; 修订日期: 2010-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50703039); 国家重点基金资助项目(60736042, 60578035)

作者简介: 程少园(1982-), 男, 博士, 主要从事光学系统设计、视觉光学和自适应光学等方面的研究。Email: csycf@163.com

导师简介: 宣丽(1957-), 女, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事液晶材料及液晶光学等方面的研究。Email: xuanli@ciomp.ac.cn

0 引言

1980 年, Webb 等人^[1]发明了飞点电视检眼镜, 后来改称为扫描激光检眼镜(SLO)^[2]。现今, 扫描激光检眼镜已经广泛地用于眼科检查和视觉研究。与传统检眼镜相比, 扫描激光检眼镜具有光收集效率高和实时成像的优点, 尤其是采用了扫描光点和共焦小孔, 可以大大提高成像的对比度, 并具有对视网膜分层成像的潜力^[3]。然而, 受到人眼像差的限制, 扫描激光检眼镜的横向分辨率和轴向分辨率分别为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $300\text{ }\mu\text{m}$ 左右^[4], 而人眼的锥状视觉细胞一般为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 左右(通常离中心小凹越近, 直径越小, 中心小凹处约为 $2\text{ }\mu\text{m}$), 人眼视网膜的厚度一般小于 $300\text{ }\mu\text{m}$ ^[5]。因此, 扫描激光检眼镜的横向分辨和轴向分辨的潜力受到限制。

近年来, 以梁俊忠等为代表的许多科研组将自适应光学(AO)技术成功用于传统的检眼镜, 将人眼动态变化的高低阶像差校正掉, 获得了较为清晰的活体人眼视网膜图片^[6-8]。然而, 人眼视网膜是多层膜, 加上人眼各光学单元的散射效应, 使得视网膜成像的对比度不够理想, 难以分层成像。而将自适应光学技术与扫描激光检眼镜结合起来可以使扫描激光检眼镜的横向分辨率和轴向分辨率分别达到 $2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $70\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 成像对比度显著提高, 并具有对视网膜分层成像的能力^[9]。

目前, 用于自适应光学扫描激光检眼镜的校正器多为变形镜(DM)或微机电系统变形镜(MEMS-DM)^[10], 而采用液晶空间光调制器(LC-SLM)的尚未见报道。与前两者相比, LC-SLM 具有低成本、低功耗、高空间分辨率和高保真等优点^[11], 但也存在响应速度慢和色散等问题。然而, 由于人眼像差的变化频率主要集中在 4 Hz 左右, 其响应速度已经足够; 由于采用较窄的波段(半值全宽约 30 nm)成像, 其色散效应可以忽略。因此, LC-SLM 在自适应光学扫描激光检眼镜上具有重要的应用潜力。

文中设计了一套基于 LC-SLM 和夏克-哈特曼波前探测器(SHWS)^[12]的自适应光学扫描激光检眼镜, 并进行具体分析, 该系统具有较好的成像效果和较大的应用价值。

1 系统设计

图 1 是自适应光学扫描激光检眼镜的光路图(利

用 ZEMAX 软件模拟)。该系统采用 7 个离轴抛物面(OPM)代替透镜系统(在超发光二极管和光电倍增管前选用两个透镜以便于调焦), 可以消除透镜表面反射的杂散光对波前探测和成像的影响, 缩小系统的体积^[13-14]。由于人眼视网膜的反射率很低, 再加上瞳孔的光线切割作用, 反射出来的光只有入射光的 10^{-4} , 所以应尽量避免杂散光的影响, 尤其是对于扫描激光检眼镜这样的双向通光光学系统更容易引入杂散光^[15]; 同时, 应尽量提高人眼反射出来的光的能量利用率。为了提高成像光的能量利用率, 分束镜(BS)的透射率为 95%, 反射率为 5%。许多人患有低度近视, 即其眼底反射的光不是平行光, 如果按平行光设计会引入较大的离焦。因此, 该系统是按人眼的视度为 -4 D 来设计的, 即眼底反射的光汇聚于人眼前 250 mm 处(明视距离), 这样, 正常人眼和低度近视人眼都能做到, 且不会引入较大离焦项, 有效地节省了系统的波前探测

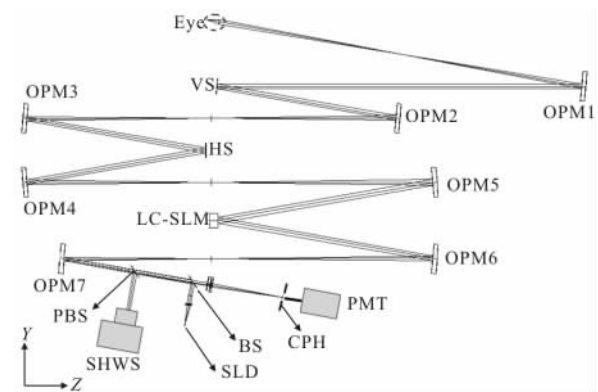


图 1 自适应光学扫描激光检眼镜系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the AO-SLO optical system

能力和波前校正能力。对于高度近视(远视)或散光的人眼, 可以在人眼前加补偿镜, 将较大的离焦和像散项补偿掉。

该自适应光学扫描激光检眼镜主要由 7 个部分组成: 眼底照明、光栅扫描、波前探测、波前校正、共焦滤波、图像采集, 另外, 还有人眼定位系统等辅助系统, 文中从略。

(1) 眼底照明 波长选择近红外(790 nm)是因为该波段人眼视网膜的反射率较高、对人眼的刺激较小、无需进行散瞳处理等。将 790 nm 超发光二极管(SLD)耦合到一个单芯光纤中, 光的出头相当于一个点光源, 发出球面波, 经过透镜和各个反射镜后照射到

人眼眼底。在透镜后面人眼瞳孔共轭处放置一个环形光阑,用来控制瞳孔处照射光束的孔径大小,其产生的环形照明效果可以较好地消除角膜前表面中心反射的杂散光^[16]。照明光经过校正器,可以消除人眼像差的不利影响,在视网膜上形成一个接近衍射极限的小光点。人眼可承受的最大安全光强有限,为了保证绝对安全,人眼瞳孔处照明光的功率应为安全标准的1/20,即30 μW 左右。

(2) 光栅扫描 对于扫描激光检眼镜,如果不进行光栅扫描,在视网膜上照明的仅仅是一个小光点,即仅能对一点成像,没有实际意义。为了能够对视网膜上的一块区域进行成像,就必须进行光栅扫描。水平方向扫描器(HS)采用10 kHz左右的共振扫描器,垂直方向扫描器(VS)采用10/n kHz的检流计扫描器(n 表示每帧的线数)。通过光栅扫描,照明光点在视网膜上直径约为600 μm 的区域快速移动(约为 2° 左右,与人眼的等晕角相当)。为了减小人眼视网膜不断移动对成像的不利影响,应提高扫描速度,进而提高帧频。为了保证光栅扫描时不改变人眼瞳孔处的光束位置,应使两个扫描器反射平面与人眼瞳孔共轭,转轴位于光束中心。根据光路可逆性,两次经过扫描器后的反射光束依然和未经过扫描器前的入射光束共轴。因此,SHWS和共焦小孔(CPH)处的光束位置不会随扫描状态而改变。

(3) 波前探测 采用SHWS进行波前探测。其子孔径数为 17×17 ,子孔径直径300 μm ,微透镜焦距4 mm。为了保证探测精度,SHWS的微透镜阵列应该与人眼瞳孔共轭。790 nm照明光在眼底照亮一个小光点,其被眼底反射的光被同时用于波前探测和成像。当进行光栅扫描时,虽然在视网膜上的小光点快速移动,形成一个较大的照明区域,但是在波前探测器上的光点并未扫描,仍然是很小的光点,因此,它的效动态范围并没改变。但是,由于视网膜上的光点进行快速扫描,其频率高于波前探测的采集频率和校正器的刷新频率,所以探测的波前像差是全视场的平均值。

(4) 波前校正 波前校正器采用LC-SLM,其像素数为 512×512 ,像素尺寸为15 μm 。为了保证校正效果,LC-SLM应该同时与人眼瞳孔和SHWS的微透镜阵列共轭,校正照明光和人眼眼底反射的光(成像光)。这样可以保证视网膜上和共焦小孔处的光点足够小,以提高成像效果。而LC-SLM只能对线偏振光

进行位相调制,为了提高光能利用率及系统的稳定性,该系统采用开环校正模式^[17]。对于开环校正模式,波前探测和校正成像分别采用偏振方向相互垂直的线偏振光;对于闭环校正模式,共用某一偏振方向的线偏振光,而与之垂直的线偏振光则被浪费掉了。所以,与闭环校正模式相比,开环校正模式的光能利用率提高了近1倍。对于开环校正模式,SHWS探测到的是人眼和光学系统的总像差,而LC-SLM将总像差一次性校正掉;对于闭环校正模式,SHWS探测到的是校正后的残余像差,并进行多次反馈校正。所以,与闭环校正模式相比,开环校正模式的稳定性更好。为了实现开环校正,在光路中放置一块偏振分光镜(PBS),将照明光和成像光都转变成线偏振光。需要注意的是,人眼具有消偏振作用,可以使照明人眼的线偏振光转变成自然光。对于变形镜而言,开环校正的效果往往不够理想,而对于LC-SLM,凭借其高空间分辨率、高精度、高保真度等特点,可以实现良好的开环校正效果^[18]。

(5) 共焦滤波 共焦小孔(CPH)置于视网膜某焦面的共轭面处,焦面上反射的光绝大多数都能通过它到达光子探测器上,而焦面前后面反射的杂光将会被不同程度地屏蔽掉。一般来说,杂光反射面距离物面越远,共焦小孔越小,杂光屏蔽效果越好。但考虑到成像光的收集效率及可能的装调误差,应使共焦小孔略大于成像光点的艾利斑(系统采用2倍艾利斑大小,即75 μm)。采用共焦滤波提高了信噪比和对比度,使系统具有对视网膜分层成像的能力。系统的轴向分辨率与相对孔径成正比,与共焦小孔直径成反比。计算通过共焦小孔光强的轴向扩散函数的半值全宽(FWHM)可确定共焦系统的轴向分辨率约为80 μm (当系统接近衍射极限时),可适当缩小共焦小孔直径以提高轴向分辨率,但可能会降低光的收集效率,增加装调难度。

(6) 图像采集 由于扫描激光检眼镜每一瞬间只对一点成像,因而光信号的探测可采用高灵敏度、低噪声的光电倍增管(PMT)。采用光栅扫描后,光电倍增管将先后采集视网膜上许多光点的信号。通过特殊的算法,可以将这些光点展开为一幅幅视网膜图片。

2 系统性能分析

表1给出了7个抛物面的主要参数(7个面都是凹面镜,正负号是将坐标变换考虑在内)。一方面要保

证系统的瞳孔共轭关系和孔径匹配关系,另一方面要保证两束光以接近平行光入射到 SHWS 的微透镜阵列和 LC-SLM 的液晶面板上。同时,还要为各种仪器留下足够的摆放空间,尤其是实物体积较大的 SHWS 和 LC-SLM。

表 1 结构参数

Tab.1 Configuration parameters

Surface	Radius/mm	Decenter Y/mm
Paraboloid 1	-500	-44.1
Paraboloid 2	-500	44.1
Paraboloid 3	500	-44.1
Paraboloid 4	500	44.1
Paraboloid 5	-600	-52.9
Paraboloid 6	-600	52.9
Paraboloid 7	400	-35

利用 ZEMAX 软件对系统的性能进行分析。在黑暗处,人眼的瞳孔在未经散瞳处理情况下的直径可达到 6.5 mm 以上,这里暂选用 6.5 mm。系统的横向放大率约为-7.5 倍。用焦距为 16.01 mm 的理想透镜代替光调焦后的-4D 人眼有效焦距,当物距为 17.1 mm (未调焦时的人眼焦距)时,像距为 250 mm(人眼明视距离)。选择理想透镜是为了在不计人眼像差的情况下评价系统自身的像差,而人眼像差可以通过自适应光学系统校正掉。当进行扫描时,视网膜上的光点迅速移动,而波前探测器、波前校正器和光电倍增管处的光束并未改变位置。为方便起见,将扫描器始终置于未扫描状态,然后分析各视场的像质情况。由图 2 可以看到系统在全视场都达到了衍射极限的水平。人眼视网膜的锥状视觉细胞一般为 4 μm 左右,其对应的像方调制传递函数 $\text{MTF}@33 \text{ cycles/mm}=0.38$,视网膜中心小凹处的锥状细胞非常小($<2 \mu\text{m}$),受瞳孔衍射极限的限制而难以观察。为了使系统能够观察尽可能小的细胞(尽管图像可能不够清晰),设计的视网膜上的分辨率接近衍射极限,约为 3 μm ,其对应的像方调制传递函数 $\text{MTF}@44 \text{ cycles/mm}=0.2$ (如图 3 所示)。扫描激光检眼镜采用双向通光光路和共焦滤波技术,可以使系统的横向分辨率提高约 25%。另外,通过使工作室变暗或药物散瞳处理,可以使人眼瞳孔进一步放大,横向分辨率进一步提高,以观察更细小的视网膜组织。加工装调误差引入的像差、人眼像差以

及光学系统自身的像差都可以被自适应光学系统校正掉,使整个系统达到或接近衍射极限的水平。

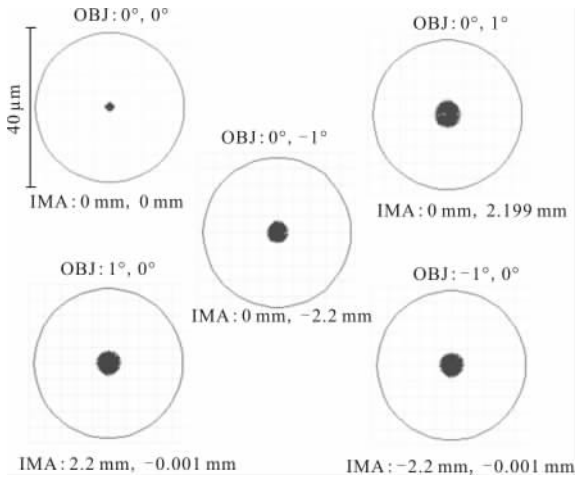


图 2 成像系统点列图

Fig.2 Spot diagram of the imaging system

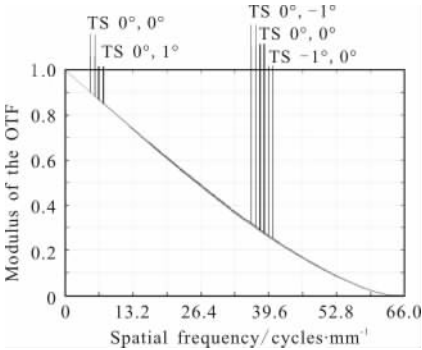


图 3 成像系统传递函数

Fig.3 MTF of the imaging system

为了更好地了解各个公差参数对成像质量的影响,同时为加工和装调提供参考,对成像系统进行了公差分析,主要公差参数见表 2。

表 2 主要公差参数

Tab.2 Main tolerance parameters

Type	Tilt X/(°)	Tilt Y/(°)	Decenter X/mm	Decenter Y/mm	Thickness /mm	Radius /fringe
Value	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2

采用灵敏度的模式进行公差分析,标准选均方根波前差(λ)。数据表明:抛物面 4 和 5 绕 X 轴倾斜,对像质的影响较大,在装调时应特别注意。统计结果表明:在该公差容限下,系统的均方根波前差 90% $\leq 0.03287\lambda$; 50% $\leq 0.02490\lambda$ 。均方根波前误差设计值

为 0.01304λ , 最差值为 0.03433λ , 平均值为 0.02464λ , 说明系统在该公差条件下可以获得接近衍射极限的成像质量。该公差条件比较宽松, 加工和装调比较容易实现。

3 结 论

文中设计的液晶自适应光学扫描激光检眼镜, 采用 790 nm 近红外光进行波前探测, 减小了照明光对人眼的刺激, 无需药物散瞳处理, 增加了受试者的舒适度; 采用离轴反射式结构, 避免了透镜表面的杂散光对探测和成像的不利影响, 缩小了系统体积; 采用开环模式使系统更稳定, 能量利用率更高(比闭环高约 1 倍)。利用 ZEMAX 软件对成像系统进行模拟分析, 证明系统自身可以达到接近衍射极限水平, $\text{MTF}@33\text{ cycles/mm}=0.38$ (对应视网膜上 $4\text{ }\mu\text{m}$), $\text{MTF}@44\text{ cycles/mm}=0.2$ (对应视网膜上 $3\text{ }\mu\text{m}$), 轴向分辨率约为 $80\text{ }\mu\text{m}$, 满足设计要求, 而且公差条件比较宽松, 加工和装调比较容易实现。

参考文献:

- [1] Webb R H, Hughes G W, Pomerantzeff O. Flying spot TV ophthalmoscope [J]. *Appl Opt*, 1980, 19: 2991–2997.
- [2] Webb R H, Hughes G W. Scanning laser ophthalmoscope [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1981, 28: 488–492.
- [3] Webb R H, Hughes G W, Delori F C. Confocal scanning laser ophthalmoscope [J]. *Appl Opt*, 1987, 26: 1492–1499.
- [4] Donnelly W J, Roorda A. Optimal pupil size in the human eye for axial resolution [J]. *J Opt Soc Am A*, 2003, 20: 2010–2015.
- [5] Shi Guohua, Dai Yun, Wang Ling, et al. Adaptive optics optical coherence tomography for retina imaging [J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(6): 424–425. (in chinese)
- [6] Liang Junzhong, Williams D R, Miller D T. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics [J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(11): 2884–2892.
- [7] 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.
- [8] Ling Ning, Zhang Yudong, Rao Xuejun, et al. Small table-top adaptive optical systems for human retinal imaging [C]//SPIE, 2002, 4825: 99–108.
- [9] Roorda A, Romero-Borja F, Donnelly W J, et al. Adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy [J]. *Opt Express*, 2002, 10: 405–412.
- [10] Zhang Peiming, Chen Jiabi, Wang Cheng, et al. Progress of high spatial resolution retinal imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(1): 30–36. (in chinese)
- [11] Zhang Jian, Wu Liying, Liu Bohan. Liquid crystal spatial light modulator and real-time transform of interferential light wavefront [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (1): 124–127. (in chinese)
- [12] Li Huaqiang, Song Helun, Rao Changhui, et al. Extrapolation method to extend dynamic range of Shack-Hartmann wave-front sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16 (7): 1203–1207. (in Chinese)
- [13] Ding Xuezhuang, Wang Xin, Lan Weihua, et al. Design of four-mirror reflective anastigmat optic system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (2): 319–321. (in Chinese)
- [14] Zhong Xing, Zhang Lei, Jin Guang. Stray light removing of reflective optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (2): 316–318. (in Chinese)
- [15] Van Norren D, Tiemeijer L F. Spectral reflectance of the human eye [J]. *Vision Res*, 1986, 26: 313–320.
- [16] Wang Zhaoqi, Xu Yan. Design of digital retina camera based on eye model [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(9): 1567–1571. (in Chinese)
- [17] Cheng Shaoyuan, Cao Zhaoliang, Hu Lifa, et al. Design of reflective off-axis adaptive optics system for human retinal imaging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 609–615. (in chinese)
- [18] Cheng Shaoyuan, Hu Lifa, Cao Zhaoliang, et al. Application of LC adaptive optics system on human eye fundus imaging with high spatial resolution [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(10): 2524–2527. (in chinese)