

用 SVGA1 薄膜晶体管液晶显示器矫正人眼波像差*

全 薇^{1,2} 王肇圻¹ 宋贵才² 凌 宁³ 傅汝廉¹

(1 南开大学、天津大学联合研究院,南开大学现代光学研究所,天津 300071)

(2 长春理工大学,长春 130022)

(3 中国科学院成都光电技术研究所,成都 610209)

摘 要 在研究了 SVGA1 薄膜晶体管液晶显示器(TFT LCD)的位相调制特性的基础上,用它作为眼波像差的矫正器件,在用哈特曼-夏克波前传感器的眼波像差测量系统对眼波像差进行了成功的矫正.对于 5.2 mm 的瞳孔,矫正后人眼波像差的 PV 值降低了 3 倍多,并接近瑞利判据的像差容限.对系统的光学传递函数(MTF)的分析说明,经波像差矫正后眼的空间分辨率由 17 c/deg 提高到 38 c/deg.

关键词 液晶显示器;人眼波像差;自适应光学波前矫正

中图分类号 O435.2 **文献标识码** A

0 引言

1997 年,罗杰斯特大学的 Liang 等人发展了用哈特曼-夏克波前传感器测量人眼波像差的技术,并将自适应光学应用于人眼高级像差的矫正,改善了人眼的光学传递函数(MTF),将人眼的对比灵敏度提高了 6 倍之多,获得了超视觉^[1].此后矫正人眼高级像差,使之达到或接近裸眼极限视力的研究成为视光学领域的研究热点^[2-4].在自适应光学系统中,波前矫正通常采用变形镜,然而变形镜昂贵的价格使其应用受到局限.近年来,人们开始尝试用液晶空间光调制器(LC SLM)作为波前矫正器件^[2-5].LC SLM 具有低成本、可靠性好、体积小、低能耗、易于控制等优点,很有希望成为变形镜的替代品.

采用 LC SLM 作为像差补偿器件,是利用液晶显示器(LCD)的位相调制特性.1995 年 Dou 和 Giles 在自适应光学系统中应用 LCTV 作为位相延迟器矫正像差^[6].1997 年 Love 采用型号为 HEX69 的六边形像素扭曲向列的 LC SLM 作为波前矫正和波像差输入器件^[7].1998 年 Vargas-Martin 等人分析了 HEX69 矫正人眼波像差的局限性^[8],指出 HEX69 LC SLM 的空间分辨率低(仅有 69 个驱动器)和人眼像差的测量误差是影响矫正效果的主要因素.因此,采用高准确人眼像差测量技术以及高空间分辨率的 LCD 进行人眼波像差矫正的研究具有现实意义.

随着光电子和微电子工业的发展,高性能的薄膜晶体管液晶显示器(TFT LCD)日新月异地发展起

来.英国 CRL 公司生产的型号为 SVGA1 的 TFT LCD 空间分辨率达 800 × 600.另外,应用哈特曼-夏克波前传感器使人眼波像差的测量技术得到很大改进,其测量准确的 rms 值可达 $\lambda/12$.基于上述考虑,本文研究了 SVGA1 TFT LCD 的位相调制特性,并把它用于基于哈特曼-夏克波前传感器的眼波像差测量和矫正系统中,实现了人眼波像差的矫正.

1 SVGA1 TFT LC 的位相调制特性

SVGA1 TFT LCD 主要用作光学信息处理系统的振幅输入设备,以及头盔显示和投影显示的微型显示器.表 1 给出它的主要参数.可以看出,它有较高的分辨率和优良的光学质量.

表 1 SVGA1 TFT LCD 主要特性参数

分辨率(pixels)	800 × 600
单元尺寸(μm)	33
显示区域(mm × mm)	28.5 × 20.2
表面质量	$\leq \lambda/4$
透过率	90%
电压(V)	12

SVGA1 TFT LCD 是 TFT 型扭曲向列液晶显示器.它前后表面的液晶分子的排列方向相互垂直.液晶分子的扭曲向列效应使内部的液晶分子的排列随外加电场的变化而变化,导致不同的位相调制.我们用哈特曼-夏克波前传感器测量了 SVGA1 TFT LCD 的位相调制特性,测量结果如图 1 的位相-灰度曲线所示.从图 1 可以看出,当灰度从 0 到 255 变化时,SVGA1 TFT LCD 的位相调制范围为 0.92λ .然而相移量随灰度的变化是非线性的:当灰度在 0 ~ 75 之间变化时,曲线上升得比较平缓,位相调制较小,仅在 0.13λ 以下;当灰度在 75 ~ 155 之间变化时,曲线急剧上升,位相调制由 0.13λ 上升到 0.83λ ;当灰度

*教育部南开大学、天津大学科技合作基金资助以及天津市科技攻关重点项目资助

Tel:0431-5313170 Email:nkquanwei@eyou.com

收稿日期:2003-09-02

在 155 ~ 255 之间变化时,曲线又变得平缓,相位调制仅为 0.09λ . 根据这条曲线,可以实现动态范围小于 0.92λ 的相位调制.

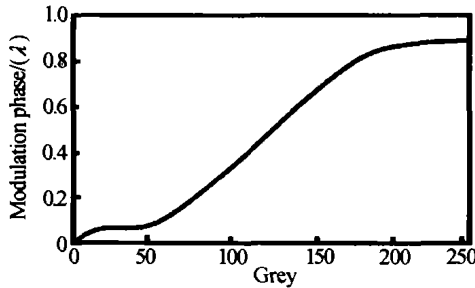


图1 SVGA1 TFT-LCD 的位相调制特性曲线
Fig. 1 The phase modulation property of the SVGA1 TFT-LCD

2 人眼波像差的测量和矫正

哈特曼-夏克波前传感器的人眼波像差测量系统如图 2. 从激光器发出的激光经中性滤波器和空间滤波器后被透镜 L_1 准直,再经偏振分光棱镜 PBS 入射到人眼. 眼睛的光学系统把入射光束会聚到视网膜上. 从视网膜反射的光经眼睛的光学系统,再经透镜 L_2 和 L_3 变换后入射到微透镜阵列上. 微透镜阵列和其后的 CCD 探测器构成哈特曼-夏克波前传感器,探测入射光束波前的相位分布. 实验中用图 2 的光学系统测量了 qw 右眼的 5.2 mm 瞳孔的波像差^[11]. qw, 37 岁,女性,右眼的屈光度为 -1.5 D. 图 3 给出了测得的眼波像差的波前地形图,其中不包括

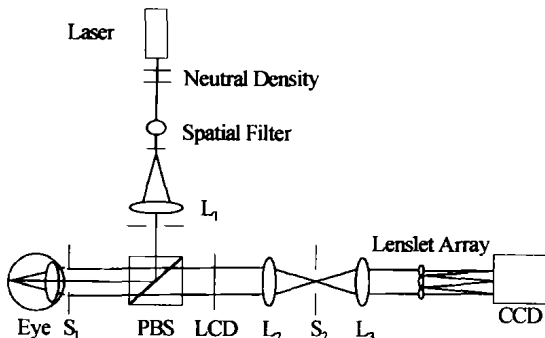


图2 哈特曼-夏克波前传感器入眼波像差测量系统
Fig. 2 The optical system based on the Hartmann-Shack wave-front sensor for the measurements of the wave aberrations in human eyes

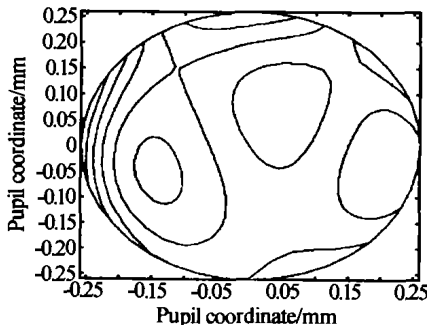


图3 波像差矫正前 qw 眼的波前地形图
Fig. 3 The contour plot of qw eye's wavefront aberrations before correction

波像差中的低阶离焦和像散. 低阶离焦和像散通常采用传统的球-柱屈光镜进行矫正. 图 3 的地形图中轮廓线间距为 0.16λ , PV 值为 0.82λ . 可以看出此眼波像差在 SVGA1 TFT LCD 的位相调制的动态范围之内,因而可以用该器件进行矫正.

为了矫正眼的波像差,须在上面的波像差测量系统中中和微透镜阵列共轭的平面上插入波前补偿器件 SVGA1 TFT LCD,图 2 中用 LCD 表示. 根据图 1 的位相调制特性曲线,对 SVGA1 TFT LCD 输入与图 3 反相的调制位相. 哈特曼-夏克波前传感器测量经过 SVGA1 TFT LCD 补偿的人眼波像差,图 4 给出测量结果. 图 4 的地形图中轮廓线间距为 0.052λ , PV 值为 0.26λ . 可以看出,与矫正前相比眼波像差的 PV 值降低了 3 倍多,并接近瑞利判据的像差容限. 用 SVGA1 TFT LCD 对人眼波前像差补偿后,仍有 0.26λ 的残余像差,造成残余像差的原因,首先是人眼的波前像差是连续的,而 SVGA1 TFT LCD 对人眼波前像差的矫正是分立的. 另外, SVGA1 TFT LCD 的不均匀性 ($\leq \lambda/4$) 也是造成残余像差的原因.

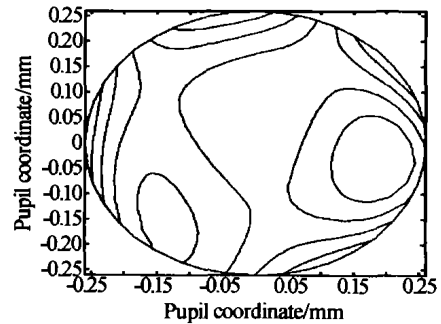


图4 矫正后 qw 眼的波前地形图
Fig. 4 The contour plot of qw eye's wave aberrations after the correction

为进一步说明经波像差补偿后人眼视力的提高,图 5 给出了 qw 眼的光学传递函数 (MTF) 的径向平均值. 图中实线表示衍射极限条件下的 MTF; 实心圆点表示波像差矫正前的 MTF; 星号点表示波像差矫正后的 MTF. 从图中可以看出,在所有空间频率上,矫正后的 MTF 远高于矫正前的 MTF,并且很接近衍射极限的 MTF. 人眼对物体的识别需要一定的 MTF 值. 物体的空间频率越高,所需的 MTF 越

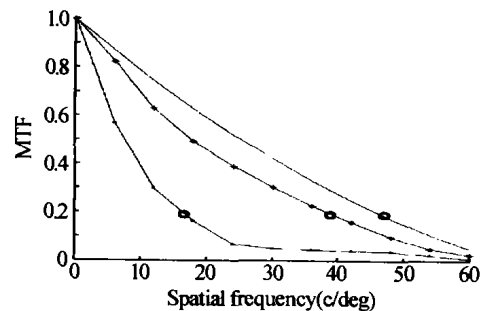


图5 qw 眼的径向平均光学传递函数 MTF
Fig. 5 The mean of the radially averaged MTF of qw's eye

大. 通常人眼识别较高空间频率的物体需要 0.2 的 MTF^[12], 它的位置用空心圆在图 5 中标出. 从图中可以看出, 在衍射极限情况下 q_w 的最高空间分辨为 46 c/deg. 像差矫正前的最高空间分辨为 17 c/deg. 像差矫正后的最高空间分辨为 38 c/deg, 远大于矫正前的分辨极限.

3 结论

SVGA1 TFT LCD 被用于人眼波像差的矫正. 当所要矫正的人眼波像差在该器件的位相调制范围内时, 矫正十分成功, 矫正后的剩余像差接近瑞利四分之一波长判据的像差容限. 对矫正前后人眼的光学系统的 MTF 的分析说明, 用 SVGA1 TFT LCD 矫正人眼波像差可以获得远超过矫正前的空间分辨. 因此, SVGA1 TFT LCD 是一个非常希望替代变形镜的新器件, 在闭合的眼波像差自适应补偿的系统中实现超视觉和视网膜高分辨率成像.

现行的 SVGA1 TFT LCD 用于人眼波像差的矫正, 有位相调制范围较小的局限性. 当人眼波像差超出 SVGA1 TFT LCD 的位相调制范围时, 其矫正受到限制. 然而, 随着光电子、微电子技术的发展, 研制出具有较高位相调制范围的器件不会太遥远. 例如 HEX69 LC SLM 除其驱动器数目少的缺点外, 其位相调制范围可达到 1.5λ .

参考文献

- Liang J, Williams D R, Miller D T. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics. *J Opt Soc Am*, 1997, **A14** (11): 2884 ~ 2892
- Prieto P M, Vargas-Martin F. Analysis of the performance of the Hartmann-Shack sensor in the human eye. *J Opt Soc Am*, 2000, **A17**(8): 388 ~ 1398
- Moreno-Barriuso E, Navarro R. Laser ray tracing versus Hartmann-Shack sensor for measuring optical aberrations in the human eye. *J Opt Soc Am*, 2000, **A7** (6): 1 ~ 14
- Guirao A. Effect of rotation and translation on the expected benefit of an ideal method to correct the eye higher-order aberrations. *J Opt Soc Am*, 2001, **A18**(5): 1003 ~ 1015
- 赵秋玲, 王肇圻, 张春书. 非球面和梯度折射率在眼光学成像中的作用. *光子学报*, 2002, **31**(11): 1409 ~ 1412
Zhao Q L, Wang Z Q, Zhang C S. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(11): 1409 ~ 1412
- 赵秋玲, 王肇圻, 全薇, 等. 用于复色哈特曼人眼波像差测量的折/衍混合调焦系统. *光子学报*, 2004, **33**(3): 342 ~ 345
Zhao Q L, Wang Z Q, Quan W, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 342 ~ 345
- Kirsch J C, Gregory D A, Thie M W, et al. Modulation characteristics of the Epson liquid crystal television. *Opt Eng*, 1992, **31**(5): 963 ~ 970
- Dou R, Giles M K. Closed-loop adaptive-optics system with a liquid-crystal television as a phase retarder. *Opt Lett*, 1995, **20**(14): 1583 ~ 1585
- Love G D. Wave-front correction and production of Zernike modes with a liquid-crystal spatial light modulator. *Appl Opt*, 1997, **36**(7): 1517 ~ 1524
- Vargas-Martin F, Prieto P M, Artal P. Correction of the aberrations in the human eye with a liquid-crystal spatial light modulator: limits to performance. *J Opt Soc Am*, 1998, **A15**(9): 2552 ~ 2561
- Quan W, Ling N, Wang Z Q, et al. The measurement of high-order aberrations of human eyes and it's influence on retinal image quality. ISTM/2003 5th International Symposium on Test and Measurement, 2003, 3: 2075 ~ 2078
- Mouroulis P. *Visual Instrumentation: Optical Design and Engineering Principles*. New York: McGraw-Hill, 1999, 278 ~ 280

The Application of SVAG1 Thin-film Transistor Liquid-crystal Display to Correction of Aberrations in Human Eyes

Quan Wei¹, Wang Zhaoqi¹, Song Guicai², Ling Ning³, Fu Rulian¹

¹ *United Academy of Nankai University and Tianjin University; Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*

² *Changchun University of Sciences and Technology, Changchun 130022*

³ *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209*

Received date: 2003-09-02

Abstract SVAG1 thin-film transistor liquid-crystal display (TFT-LCD) is successfully applied to the eyes' wave aberration measurement system using Hartmann-Shack sensor to correct the eye's aberrations based on the evaluation of the phase modulation properties of the device. By the correction, the peak-to-valley wave-front errors of the eye across 5.2 mm pupil are reduced by a factor of approximate three and close to the Rayleigh quarter-wave criterion. It is shown with the modulation transfer function (MTF) analysis that the ultimate spatial resolution of the eye increases from 17 c/deg to 38 c/deg by the correction. The achieved spatial resolution is not only far higher than that before the correction but also higher than the optimum spatial resolution of the normal eyes (approximate 30 c/deg). Therefore the SVAG1 TFT-LCD is a promising device in the closed-loop adaptive optics system to achieve supernormal vision and high-resolution retinal imaging.

Keywords Liquid crystal display; Eye's aberrations; Adaptive optics wave-front correction



Quan Wei was born in 1964, received her M. S. degree from Changchun University of Sciences and Technology in 1990. At present, she is a Ph. D. candidate in the Institute of Modern Optics, Nankai University and Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu. Her research interest includes wave-front aberrations in human eyes.