

引用格式: LIU Hongwei, LOU Yimin, HU Juanmei, et al. 3D Retina Projection Display Using Doublet Holographic Optical Elements[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(6):0611002

刘鸿伟,楼益民,胡娟梅,等.基于双全息光学元件的3D视网膜投影显示器[J].光子学报,2023,52(6):0611002

基于双全息光学元件的3D视网膜投影显示器

刘鸿伟,楼益民,胡娟梅,吴锋民

(浙江理工大学物理系 浙江省光场调控技术重点实验室,杭州 310018)

摘 要:为克服非相干光源照明条件下基于全息光学元件的视网膜投影显示系统存在的色散、出瞳小、无法获得单眼调焦深度信息等局限,提出了一种基于双全息光学元件的3D视网膜投影显示器。用全息光学元件取代玻璃透镜,用发光二极管取代激光。用反射型体全息光栅和反射型体全息透镜构成的光学结构对系统的色散进行补偿,获得了清晰的图像,系统分辨率达到11.6 lp/mm。结合双全息光学元件结构,利用时分复用技术和角度复用技术实现了具有密集视点的3D视网膜投影显示。该结构可有效扩展系统的出瞳,解决视网膜投影显示系统出瞳小的问题。同时在0.45~2.0 m的深度范围内,实现具有单眼调焦深度信息的真3D显示,显示范围覆盖人眼的辐辏调焦响应敏感范围,可有效缓解辐辏调焦矛盾引起的眩晕和视觉疲劳问题。该系统结构紧凑、价格便宜且避免了散斑噪音和安全隐患,具有良好的应用前景。

关键词:视网膜投影;近眼显示;时分复用;全息光学元件;色散

中图分类号:O436

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235206.0611002

0 引言

视网膜投影显示技术具有景深大、视角宽、结构简单等优势,在通讯、医疗、教育等领域都有广泛应用^[1-4]。视网膜投影显示技术通过直接在人眼的视网膜上投影清晰的图像来避免调焦模糊,可以缓解由辐辏调焦矛盾(Vergence Accommodation Conflict, VAC)引起的视觉疲劳^[5-8]。传统的视网膜投影显示系统需要利用玻璃透镜组将加载有图像信息的光线汇聚在人眼的瞳孔位置附近。这种系统存在体积大、出瞳面积小、无法获得单眼调焦深度信息等问题^[9-11]。为解决上述问题,人们提出了多种基于全息光学元件(Holographic Optical Element, HOE)的视网膜投影显示技术,这类技术利用HOE轻薄、高效和灵活的特点改进了视网投影显示系统的性能^[12-17]。

2018年,韩国学者KIM S B等结合多焦点HOE与波导技术扩展了视网膜投影显示系统的出瞳^[18]。韩国的LEE B课题组利用离轴透镜阵列HOE和微机电系统反射镜实现了出瞳位置的动态控制^[19]。2020年该课题组利用偏振复用光栅和HOE进一步简化了动态出瞳视网膜投影显示系统,从而提升了用户的观察体验^[20]。同年,美国学者的LIN T等利用基于液晶的HOE的多级衍射效应对出瞳进行复制,从而扩展了出瞳面积^[21]。但是,上述系统无法获得单眼调焦深度信息,无法实现单眼调焦和双眼辐辏的闭环响应,所以仍会存在一定程度的视觉疲劳。

为了获得单眼调焦深度信息,2017年韩国学者JANG C等利用HOE结合瞳孔跟踪光场技术实现了3D视网膜投影显示,但是系统的结构复杂而且景深受限^[22]。2019年该课题组的YOO C等利用偏振响应的双焦点HOE实现了具有两个深度平面的视网膜投影显示,一定程度上缓解了VAC问题^[23]。2022年,合肥工业大学的ZHANG Xu等利用编码有多个二次相位因子的全息图扩展了视网膜投影显示系统的出瞳,并获得

基金项目:浙江省自然科学基金联合基金(Nos. ZY23F050002, LTY22F020002),浙江理工大学科研业务费专项资金(No. 22062309-Y)

第一作者:刘鸿伟,liuhongwei_optics@163.com

通讯作者:楼益民,davislou@163.com;吴锋民,wfm@zstu.edu.cn

收稿日期:2022-11-24;录用日期:2022-12-28

<http://www.photon.ac.cn>

了单眼调焦深度信息^[24]。

上述基于HOE的视网膜投影显示技术在很大程度上提升了近眼显示系统的性能,但是由于HOE是基于衍射原理的光学元件,所以这类系统通常需要采用激光作为光源。激光光源价格昂贵,存在散斑问题,而且对眼睛有安全隐患。为此本文提出了一种基于非相干光源的双HOE 3D视网膜投影显示系统。系统包括一种基于发光二极管(Light Emitting Diode, LED)阵列的时序指向性照明光源、高速数字微镜器件(Digital Micro Mirror Device, DMD)显示器、基于离轴双HOE结构的图像合成器和控制系统。该系统利用由反射型体全息光栅和体全息透镜构成的双HOE结构补偿了由于LED光源的弱相干性而引入的色散问题,并利用时分复用和角度复用技术实现了密集视网膜投影显示,获得了具有单眼调焦响应的3D视觉效果,同时增加了系统的出瞳面积。

1 基本原理

1.1 系统结构

为实现真三维近眼显示,所提出的系统利用时分复用和角度复用技术为观察者构造了具有密集视点的视网膜投影系统,并为每个视点注入了与之匹配的视差图像信息。当视点间隔小于人眼瞳孔直径时,同一个3D像点会有多条光线进入瞳孔并被眼睛聚焦,观察者即可获得3D像点的单眼调焦深度信息,从而实现真3D视网膜投影显示。图1是使用双HOE的3D视网膜投影显示系统的结构示意图。系统包括由LED阵列和准直透镜构成的时序指向性照明光源、高刷新率DMD显示器、全内反射(Total Internal Reflection, TIR)棱镜、由离轴双HOE构成的图像合成器和控制系统。其中LED阵列中的LED单元按照指定时序依次发光,光线通过透镜准直后形成照明方向按时序变换的指向性光源。某一时刻光源发出的具有特定指向的光线经过TIR棱镜后照明DMD, DMD上加载有对应的视差图像,光线经过DMD调制后穿过TIR棱镜,进入图像合成器,通过图像合成器中反射型体全息光栅的反射型体全息透镜的聚焦后在眼睛瞳孔附近产生一个视点。根据相同的过程,不同的LED单元将通过角度复用在瞳孔附近产生不同的视点。所述控制器协调LED阵列的照明时序和DMD的显示时序,使两者同步。当控制时序的频率足够高时,利用人眼的视觉暂留效应即可在眼睛瞳孔附近形成密集视点的观察窗口。这种系统可在扩展出瞳面积的同时,为视网膜投影显示系统注入真三维信息。

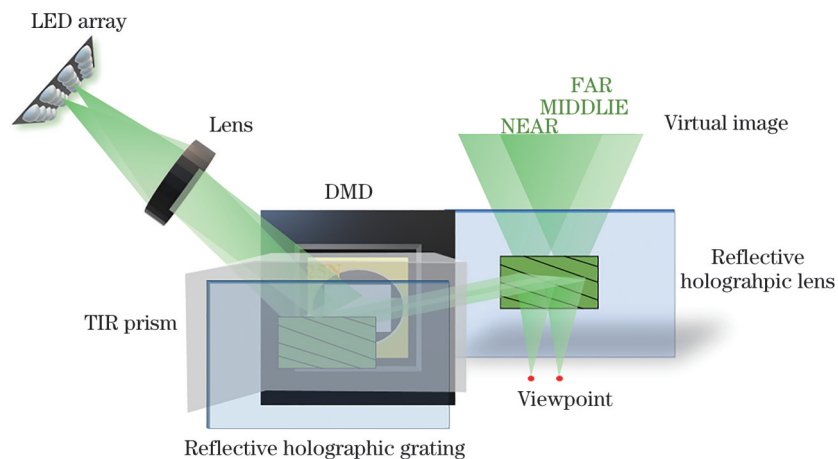


图1 3D视网膜投影显示系统的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of 3D Retina projection display system

1.2 基于双HOE结构的图像合成器与色散补偿原理

区别于传统视网膜投影技术,所提出的系统用HOE取代玻璃透镜组,用LED取代激光,在简化系统的同时,更容易实现虚拟和现实信息的融合。但是在宽带光源照明条件下,HOE的色散会引起图像模糊。为此利用离轴双HOE结构对色散进行补偿,减少了模糊。图2所示的是离轴双HOE结构及其记录和再现光

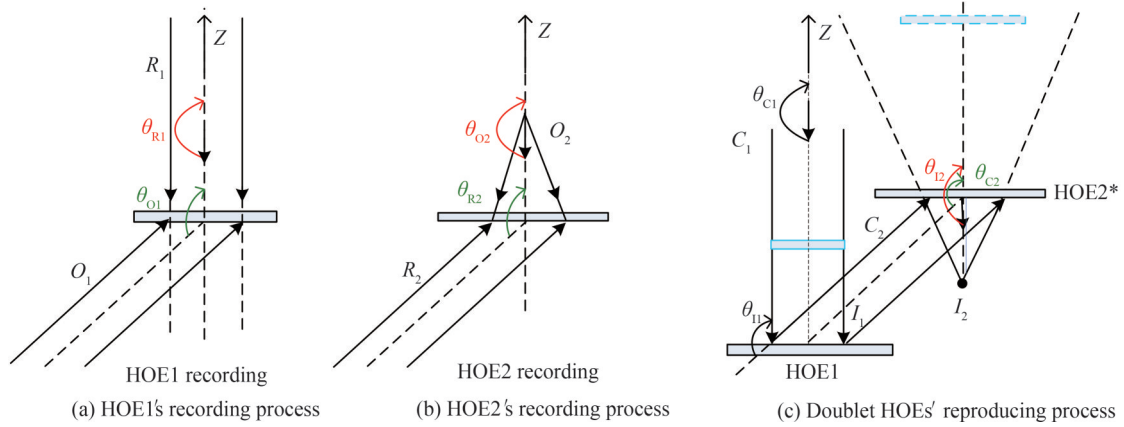


图2 离轴双HOE结构及其记录和再现光路

Fig.2 The structure of off-axis doublet HOEs with the recording and reproducing optical path

路。离轴双HOE结构由一个离轴反射型体全息光栅HOE1和一个离轴反射型体全息透镜HOE2构成。图2(a)和(b)分别为HOE1和HOE2的全息记录光路。其中HOE1由平面波 O_1 和 R_1 干涉而成,HOE2由球面波 O_2 和平面波 R_2 干涉而成。图2(c)为双HOE的衍射成像过程,来自DMD的反射光线作为HOE1的重建光 C_1 照明HOE1,HOE1的衍射再现光 I_1 线作为HOE2的重建光 C_2 照明HOE2,HOE2的衍射再现光在瞳孔附近形成视点 I_2 ,并在视点前方形成DMD的虚像。根据光栅方程可得

$$\sin \theta_{I_2} = \sin \theta_{C_2} + \mu (\sin \theta_{O_2} - \sin \theta_{R_2}) \quad (1)$$

$$\sin \theta_{I_1} = \sin \theta_{C_1} + \mu (\sin \theta_{O_1} - \sin \theta_{R_1}) \quad (2)$$

式中, θ 为角度,下标O、R、C、I分别表示物光、参考光、重建光和再现光,下标1、2分别对应HOE1和HOE2, $\mu = \lambda_c / \lambda_0$, λ_c 和 λ_0 分别为重建和记录光的波长。令 $\theta_{O_1} = \theta_{R_2}$, $\theta_{R_1} = \theta_{O_2}$,由式(1)、(2)可得

$$\sin \theta_{I_2} = \sin \theta_{C_1} \quad (3)$$

式(3)与重建光的波长无关。即当HOE1的物光夹角等于HOE2的参考光夹角,HOE1的参考光夹角等于HOE2的物光中心光束的夹角时,HOE2再现光的中心光束的出射角等于HOE1的重建光束的入射角,而且与波长无关。所以利用双HOE结构可以实现色散补偿。

1.3 基于双HOE的3D视网膜投影成像原理

图3为视网膜投影系统3D成像过程的示意图。为便于说明,将DMD的反射光路拉直成透射光路。准

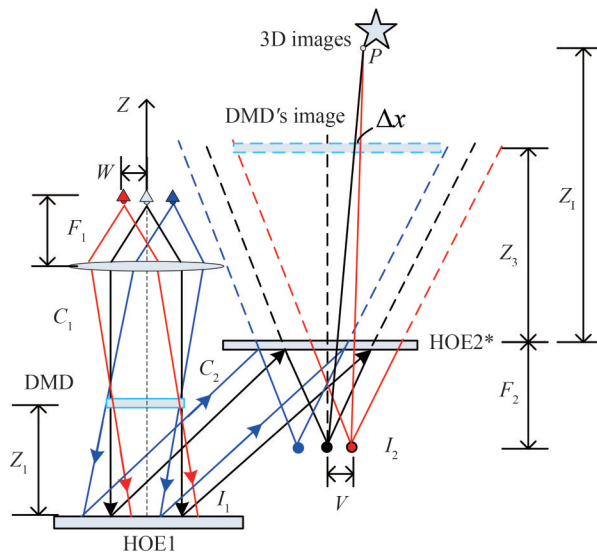


图3 视网膜投影系统的3D成像过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of 3D imaging process of the retinal projection system

直透镜的焦距为 F_1 , HOE2的焦距为 F_2 。LED阵列通过准直透镜和双HOE在系统出瞳附近形成密集的视点阵列。DMD位于HOE2的一倍焦距以内,通过HOE2在距离HOE2为 Z_3 的位置处形成虚像。DMD上显示视差图像序列,其时序与照明光源的方位和时序匹配。对于特定的三维像点 P ,其深度 Z_1 坐标为

$$Z_1 = \frac{\Delta x}{V - \Delta x} (Z_3 + F_2) + Z_3 \quad (4)$$

式中, Δx 为视差值, V 为视点间隔。当系统给定时, DMD通过HOE2所成像的位置是确定的,即 Z_3 是确定的。视点间隔 V 和焦距 F_2 也是确定的,根据式(4)可以通过调制视差值 Δx 来渲染不同深度的物点,从而实现真三维视网膜投影成像。

2 实验

2.1 实验系统

为验证所提出的系统的有效性,搭建了一套基于双HOE的视网膜投影显示实验系统,并进行了实验验证。图4所示的是显示系统的实验配置。系统的LED阵列由 4×4 个间距 $W = 3.0$ mm 的绿色LED组成,LED的中心波长是 532 nm,谱宽是 32 nm,每个LED的发光面积为 1.5 mm²。准直透镜的焦距为 $F_1 = 130$ mm。HOE1和HOE2的记录光路如图2,其中 $\theta_{O1} = \theta_{R2} = 120^\circ$, $\theta_{R1} = \theta_{O2} = 180^\circ$, HOE2的焦距 $F_2 = 90$ mm。DMD的帧速率设定为 $F_{\text{DMD}} = 1\ 600$ Hz,分辨率为 $1\ 920 \times 1\ 080$,像素大小为 10.8 μm 。DMD的虚像和HOE2的距离为 $Z_3 = 450$ mm。视点的间隔为 $V = 2.0$ mm。出瞳面积为 7 mm \times 7 mm。由于系统通过时分复用输出 16 个视点的信息,所以当DMD帧频设置为 1 600 Hz时,合成 3D 图像的帧速率为 100 Hz。

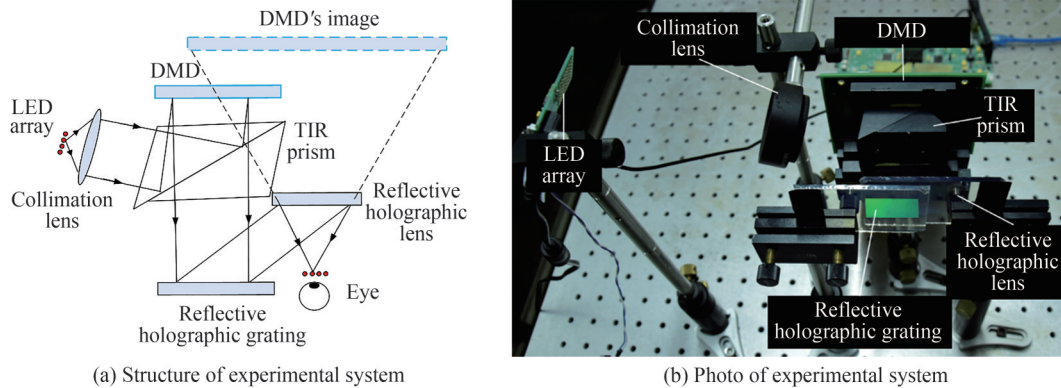


图4 实验系统配置

Fig. 4 Configuration of experimental system

2.2 HOE的制备

HOE的记录光路如图5所示,光路由 532 nm 激光器、电子快门、分束器、反射镜、半波片、偏振片、空间滤波器和准直透镜等器件组成。激光发出的光束经过电子快门后被分束器分为物光和参考光。物光通过反射镜1和反射镜2后进入半波片和偏振片,再通过空间滤波器1和准直透镜1形成宽口径的平行光,平行光透过耦合棱镜后照明全息干板。参考光经过反射镜3后进入空间滤波器2和准直透镜2形成宽口径的平行光,该平行光通过耦合棱镜后照明全息干板。物光和参考光在全息干板表面干涉,形成HOE1。在物光光路中加上透镜,形成球面波照明全息干板,并与平行参考光干涉即可形成HOE2。在HOE的记录过程中,物光和参考光的功率都为 0.6 mW/cm²,曝光时间为 0.5 s。曝光后对全息干板进行显影和漂白处理即可获得HOE。HOE1和HOE2的口径均为 30 mm \times 45 mm, HOE2的焦距为 90 mm。HOE1和HOE2的衍射效率分别为 61% 和 58%。两者的中心波长为 532 nm,满足波长选择性的光谱范围约为 40 nm。

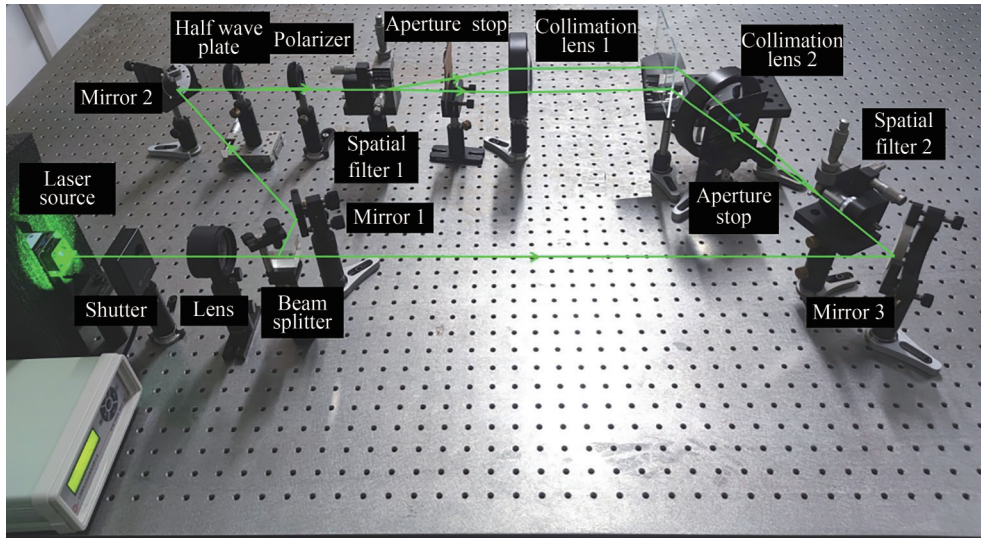
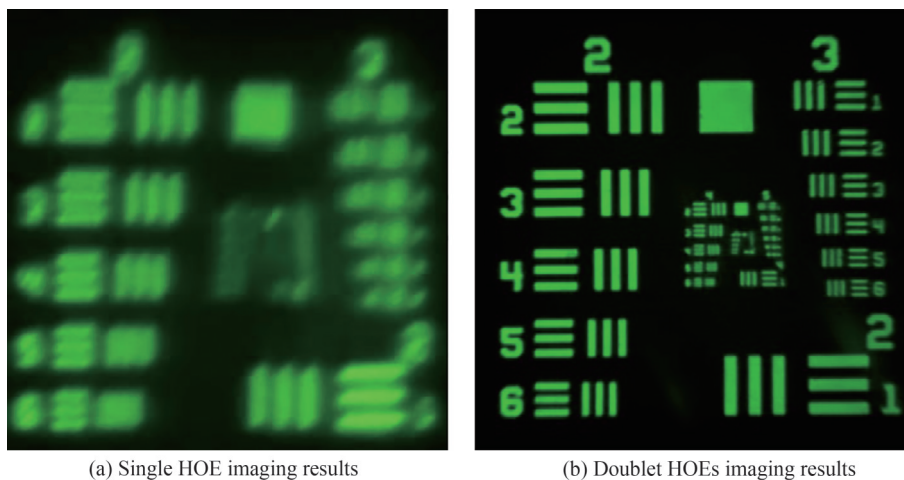


图5 HOE的记录光路

Fig. 5 The recording optical path of HOE

2.3 色散补偿对比实验

首先验证双HOE结构对色散的补偿效果,对比单HOE和双HOE系统的成像性能。实验中只需将图3中的HOE1用反射镜替换即可形成单HOE成像系统。测试图片采用USAF 1951分辨率测试表,对其进行多视角编码,使其成像在与HOE2距离为 $Z_1=720\text{ mm}$ 处。图6(a)和(b)分别为单HOE和双HOE结构的成像效果。对比可知,单HOE所成的图像由于LED的各个光谱成分所成的像相互错位重叠而发生严重的模糊。双HOE结构成功地对这种色散引起的模糊进行了补偿,获得了相对清晰的图像。根据视觉评估可分辨的鉴别率图像区域可得:色散补偿后系统的水平方向的分辨率从 2.6 lp/mm 增加到 11.6 lp/mm ,垂直方向的分辨率从 2.06 lp/mm 增加到 11.6 lp/mm 。实验结果表明双HOE结构对宽带光源带来的色散进行了有效的补偿。利用这种结构可以拓展HOE在非相干光源照明近眼显示系统中的应用。



(a) Single HOE imaging results

(b) Doublet HOEs imaging results

图6 单HOE和双HOE系统的成像性能对比

Fig.6 Imaging performance comparison between single and doublet HOE systems

需要指出的是式(3)仅对中心光线成立。因为色散的大小与衍射元件的空间频率成正比。离轴全息透镜HOE2上各点的空间频率不同,所以各点的色散大小不同。但是,HOE2上各点的空间频率的平均值等于中心光线处的空间频率。在现有结构的基础上,为最大程度地补偿色散,利用式(3)对离轴全息透镜的平均空间频率对应的色散进行了补偿,获得了良好的效果。在将来的工作中,可以进一步优化HOE的结构,实现离轴光线的色散补偿。

2.4 3D视网膜投影成像实验

为实现3D成像效果,设计了一个由三个不同深度平面构成的3D场景,每个深度平面由一个文字和分辨率板组成,它们分别为位于 $Z_1=450\text{ mm}$ 、 $Z_1=924\text{ mm}$ 、 $Z_1=1\ 950\text{ mm}$ 处标有字母NEAR、MIDDLE和FAR的平面上。根据式(4)渲染该场景的 4×4 个视角的图像,然后输入系统进行显示。图7(a)显示的是相机聚焦在NEAR平面处的图像。此时,显示系统输出的NEAR平面上的字母NEAR和分辨率板以及实物打印的字母NEAR和附近的黄色小车同时清晰,而MIDDLE、FAR平面以及对应的实物因离焦而模糊。图7(b)显示的是相机聚焦在字母MIDDLE平面处的图像。此时,显示系统输出的字母MIDDLE和分辨率板以及实物打印的字母MIDDLE和附近的红色小车同时清晰,而NEAR平面和对应的实物变模糊,FAR平面和对应的实物相对于图7(a)变得清晰,但是仍未聚焦。图7(c)显示的是相机聚焦在字母FAR平面处的图像,此时显示系统输出的字母FAR和分辨率板以及实物字母FAR和绿色小车同时清晰,字母NEAR和对应的实物变得更加模糊,字母MIDDLE和对应的实物相对于图7(b)因为离焦变得模糊。实验结果表明所提出的方法能够提供单眼调焦深度线索。

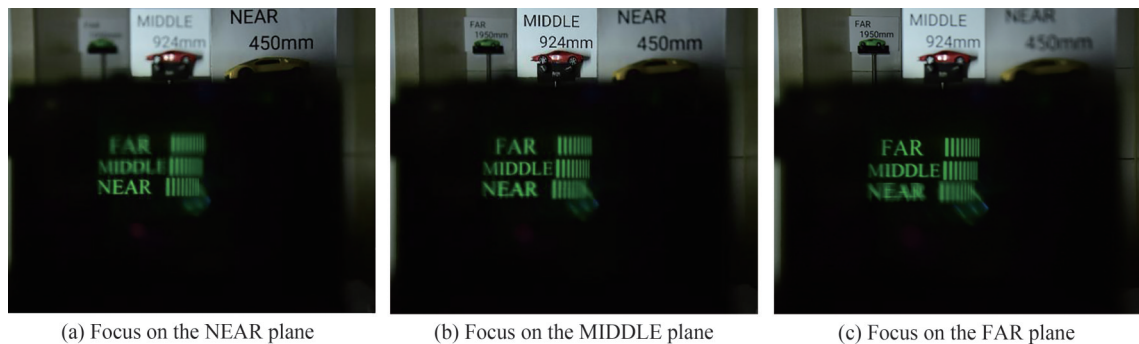


图7 视网膜投影成像系统的3D显示结果

Fig.7 3D display results of the retinal projection imaging system

为了定量地评估系统的3D成像效果,计算了图7中不同深度位置处的分辨率板的对比度,以定量地表征聚焦离焦效果,结果如表1所示。当相机聚焦在NEAR平面上时,NEAR、MIDDLE和FAR平面上空间频率为 0.52 lp/mm 的图像的对比度分别为0.58、0.25和0.13,此时NEAR平面上图像的对比度最高,文字清晰,其它平面上的图像对比度低,文字模糊。当相机聚焦在MIDDLE平面上时,NEAR、MIDDLE和FAR平面的图像对比度分别为0.29、0.59、0.47,此时MIDDLE平面上图像的对比度最高。当相机聚焦在FAR平面时,NEAR、MIDDLE和FAR平面的图像对比度分别为0.18、0.50、0.58,此时FAR平面的图像对比度最高。通过对比度的变化可以证明上述图像位于3D空间中不同深度的平面上,从而证明了所提出的系统能够实现真3D视网膜投影显示。其显示范围覆盖了人眼辐辏调焦矛盾的敏感范围 $0.5\sim 2\text{ m}$,能够有效缓解辐辏调焦矛盾引起的视觉疲劳。

表1 聚焦在不同平面时的图像对比度

Table 1 Contrast of the image when focusing on different planes

	Image contrast of NEAR plane	Image contrast of MIDDLE plane	Image contrast of FAR plane
Focus on NEAR plane	0.58	0.25	0.13
Focus on MIDDLE plane	0.29	0.59	0.47
Focus on FAR plane	0.18	0.50	0.58

3 结论

本文提出并搭建了一种基于双HOE结构的3D视网膜投影显示器。利用双HOE结构解决了非相干光源照明条件下由HOE引入的色散问题。拓展了HOE的使用范围,规避了激光光源的在近眼显示系统中的散斑噪音和安全隐患问题。利用时分复用技术和角度复用技术实现了密集视点的视网膜投影显示。有效

扩展了系统的出瞳,系统出瞳面积达到了 $7\text{ mm}\times 7\text{ mm}$ 。同时实现了具有单眼调焦深度线索的真三维显示,3D刷新率为100 Hz,有效缓解了VAC问题,提升了近眼显示系统的视觉体验。这种显示系统用HOE取代玻璃透镜,用LED取代激光光源,结构紧凑,成本可控,可集成度高,具有良好的应用前景。在后续的工作中,将考虑采用优化的多层HOE结构实现红绿蓝三通道的彩色3D视网膜投影显示,进一步提升系统的显示效果,并实现系统结构的小型化和集成化。

参考文献

- [1] CHANG C, BANG K, WETZSTEIN G, et al. Toward the next-generation VR/AR optics: a review of holographic near-eye displays from a human-centric perspective[J]. *Optica*, 2020, 7(11): 1563-1578.
- [2] KIM J, JEONG Y, STENGEL M, et al. Foveated AR: dynamically-foveated augmented reality display [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2019, 38(4): 1-15.
- [3] ZHAN T, YIN K, XIONG J, et al. Augmented reality and virtual reality displays: perspectives and challenges [J]. *Iscience*, 2020, 23(8): 101397.
- [4] CARMIGNIANI J, FURHT B, ANISETTI M, et al. Augmented reality technologies, systems and applications [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2011, 51(1): 341-377.
- [5] HOFFMAN D M, GIRSHICK A R, AKELEY K, et al. Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue[J]. *Journal of Vision*, 2008, 8(3): 1-30.
- [6] UREY H. Optical advantages in retinal scanning displays[C]. *SPIE*, 2000, 4021: 20-26.
- [7] WESTHEIMER G. The maxwellian view[J]. *Vision Research*, 1966, 6(11-12): 669-682.
- [8] WEI Zichao, LOU Yimin, HU Juanmei, et al. Partition and time division multiplexing retinal projection display based on human visual characteristics [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(5): 0511001.
韦子超, 楼益民, 胡娟梅, 等. 基于人眼特性的分区时分复用3D视网膜投影显示[J]. *光子学报*, 2022, 51(5): 0511001.
- [9] LIN J, CHENG D, YAO C, et al. Retinal projection head-mounted display[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2017, 10(1): 1-8.
- [10] TAKAHASHI H, HIROOKA S. Stereoscopic see-through retinal projection head-mounted display[C]. *SPIE*, 2008, 6803: 559-566.
- [11] UENO T, TAKAKI Y. Super multi-view near-eye display to solve vergence-accommodation conflict [J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 30703-30715.
- [12] CHOI M H, SHIN K S, JANG J, et al. Waveguide-type Maxwellian near-eye display using a pin-mirror holographic optical element array[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(2): 405-408.
- [13] JO Y, YOO C, BANG K, et al. Eye-box extended retinal projection type near-eye display with multiple independent viewpoints[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(4): 268-276.
- [14] TAKATSUKA Y, YOSHIMOTO K, TAKAHASHI H. Retinal projection type 3D head-mounted display using an HOE lens array[J]. *Electronic Imaging*, 2016, 2016(5): 1-6.
- [15] LEE J S, KIM Y K, LEE M Y, et al. Enhanced see-through near-eye display using time-division multiplexing of a Maxwellian-view and holographic display[J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 689-701.
- [16] LIU Yujie, DING Quanxin, LI Wenqiang, et al. Design of waveguide holographic configuration for display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(3): 0309003.
刘玉杰, 丁全心, 李文强, 等. 全息波导显示构型设计[J]. *光子学报*, 2015, 44(3): 0309003.
- [17] LIU Qifa, ZHU Lihui, XU Xu, et al. Study on properties of fully etched Bragg grating waveguide filters [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 1105001.
刘启发, 朱莉辉, 徐许, 等. 全刻蚀型布拉格波导光栅滤波性能研究[J]. *光子学报*, 2021, 50(11): 1105001.
- [18] KIM S B, PARK J H. Optical see-through Maxwellian near-to-eye display with an enlarged eyebox[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 767-770.
- [19] JANG C, BANG K, LI G, et al. Holographic near-eye display with expanded eye-box [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2018, 37(6): 1-14.
- [20] YOO C, CHAE M, MOON S, et al. Retinal projection type lightguide-based near-eye display with switchable viewpoints [J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 3116-3135.
- [21] LIN T, ZHAN T, ZOU J, et al. Maxwellian near-eye display with an expanded eyebox[J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 38616-38625.
- [22] JANG C, BANG K, MOON S, et al. Retinal 3D: augmented reality near-eye display via pupil-tracked light field projection on retina[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(6): 1-13.
- [23] YOO C, BANG K, JANG C, et al. Dual-focal waveguide see-through near-eye display with polarization-dependent lenses[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(8): 1920-1923.
- [24] ZHANG X, PANG Y, CHEN T, et al. Holographic super multi-view Maxwellian near-eye display with eyebox expansion[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(10): 2530-2533.

3D Retina Projection Display Using Doublet Holographic Optical Elements

LIU Hongwei, LOU Yimin, HU Juanmei, WU Fengmin

(Key Laboratory of Optical Field Manipulation of Zhejiang Province, Department of Physics, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Near-Eye Displays (NEDs) are considered as a next-generation display platform. They have shown great application potential in communication, education, healthcare, and so on. As an important NED technique, retinal projection display has attracted much attention for its advantages of large depth of field, wide viewing angle, and simple structure. Traditional retinal projection display can alleviate the Vergence-Accommodation Conflict (VAC) problem to a certain extent. But, this kind of system has problems such as bulky, limited exit pupil area, and inability to evoke monocular accommodation information. For this reason, a variety of retinal projection display technologies based on Holographic Optical Elements (HOE) have been proposed. However, the HOE is an optical element based on diffraction, such systems usually need to use a laser as the light source. Lasers are expensive, have speckle problems, and have potential safety hazards to the eyes.

To address these issues, a 3D retinal projection display based on doublet HOEs has been proposed in this paper. The performance of traditional retinal projection display system is improved by using a cheap and safe LED light source and HOEs. A retinal projection display system based on doublet HOEs is made. The display experiments prove the effectiveness of the system.

The doublet HOEs are used to compensate for the chromatic dispersion of HOE, which reduces the image blur, and increases the display sharpness. The doublet HOEs compose of a reflective holographic grating and a reflective holographic lens. The reflective holographic grating is made by the interference exposure of two parallel beams. The reflective holographic lens is made by the interference exposure of a parallel beam and a divergent spherical wave. The aperture of the holographic grating and holographic lens is both 30 mm×45 mm. The focal length of the holographic lens is 90 mm. The diffraction efficiencies of the holographic grating and lens are 61% and 58% respectively. The display effects of single HOE and doublet HOEs system are tested by using USAF1951 resolution plate as display target. The results show that the horizontal resolution of the system increases from 2.6 lp/mm to 11.6 lp/mm, and the vertical resolution increases from 2.06 lp/mm to 11.6 lp/mm. These indicate that the doublet HOEs can effectively compensate for the dispersion caused by the diffraction of HOE illuminated by a broadband light source. The doublet HOEs structure can be used to expand the application of HOE in the near eye display system illuminated by incoherent light sources.

Combined with the doublet HOEs, LED array, and high performance digital micro-mirror device, a 3D retinal projection display system with full parallax and dense viewpoints is realized by using time division multiplexing and angular multiplexing technology. The LED array is used to generate a viewpoint array corresponding to different viewing angle. By injecting corresponding parallax images for each viewpoint in time sequence, the proposed experimental system realizes the true 3D display with monocular focusing depth cues within the depth range of 0.45 m to 2 m. The display range can cover the sensitive range of human eye with VAC which is from 0.5 m to 2 m. It can alleviate the visual fatigue caused by the VAC problem effectively. The pupil area of the system is expanded from one viewpoint to 7 mm×7 mm, solved the limitation of small exit pupil of retinal projection system. The imaging experiments of 3D scene with three different depth planes are designed to quantitatively characterize the focusing and defocusing effect of images by evaluating the image contrast in different planes. The results further prove the 3D imaging effects of the proposed retinal projection display system.

The proposed system uses HOEs to replace the bulky glass lenses, which makes the system structure simple and compact. It also uses the incoherent LED array to replace the laser as the lighting source, which avoids speckle noise and potential safety hazards, and has good application prospects.

Key words: Retinal projection; Near-eye display; Time division multiplexing; Holographic optical element; Dispersion

OCIS Codes: 110.3010; 110.6880; 050.7330; 090.2870; 230.2035