

文章编号:1007-2780(2024)07-0901-08

深度线索增强的全息视网膜投影显示

屠科锋¹, 孙菲^{2*}, 王梓^{1*}, 吕国强¹, 冯奇斌¹

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009;

2. 安徽省高新技术发展中心(安徽省基础研究管理中心), 安徽 合肥 230088)

摘要:全息视网膜投影显示(retinal projection display, RPD)具有大景深的特征,是能够缓解辐辏聚焦冲突(vergence accommodation conflict, VAC)的近眼显示技术之一。但是,景深过大会导致聚焦模糊的深度线索丢失。因此,提出了一种基于带限随机相位的RPD全息图计算方法,其通过在目标图像面引入带限随机相位控制进入瞳孔的光束宽度,从而达到控制景深范围并增强深度线索的目的。计算全息图并再现过程可分为3步:首先,根据目标图像所在深度及进入瞳孔时限制的光束宽度计算得到带限随机相位。第二步,目标图像乘以球面波相位及带限随机相位后通过一步菲涅尔衍射获得全息图。最后,准直的激光光源照射于加载全息图的空间光调制器,再现的物光汇聚于人眼瞳孔处实现深度线索增强的全息RPD。实验结果表明,基于带限随机相位的全息RPD不仅具有低散斑、高再现质量等优势,而且能够灵活控制目标图像的景深,为观察者提供聚焦模糊的深度线索。

关键词:3D显示;全息显示;视网膜投影显示;带限随机相位

中图分类号:TN27 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2023-0242

Holographic retinal projection near-eye display with enhanced depth cues

TU Kefeng¹, SUN Fei^{2*}, WANG Zi^{1*}, LÜ Guoqiang¹, FENG Qibin¹

(1. Academy of Opto-Electric Technology, School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui High-Tech Development Center (Anhui Basic Research Management Center), Hefei 230088, China)

Abstract: Holographic retinal projection display (RPD) is one of the near eye displays that can alleviate vergence accommodation conflict (VAC) due to its large depth of field. However, an excessive depth of field (DOF) will cause a loss of depth cues whose image clarity does not vary with depth. To solve this problem, a band-limited random phase based holographic RPD is proposed by using the band-limited random phase to control the light beam width into the viewer's pupil. And the depth of field will be limited by the controlled beam width. Thus, the depth cue of defocus can be enhanced. The process of the band-limited random phase based RPD can be divided into three steps: Firstly, the band-limited random phase is calculated by the light beam width into the pupil and the depth of the target image. Secondly, the target

收稿日期:2023-08-09;修订日期:2023-08-22.

基金项目:国家自然科学基金(No. 62275071, No. 61805065)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 62275071, No. 61805065)

*通信联系人, E-mail: 502976779@qq.com; wangzi@hfut.edu.cn

image is multiplied by the spherical wave phase and the band-limited random phase. The hologram is obtained by a one-step Fresnel diffraction from the processed complex amplitude distribution in the target image plane. Lastly, the spatial light modulator loaded with the hologram is illuminated by the collimated laser light source. And the reconstructed object light converges on the pupil which achieves the depth cue enhanced RPD. The experiment verifies that the band-limited random phase based holographic RPD has the advantages of low scattering and high reproduction quality. And it can flexibly control the DOF of the target image and provide the observer with depth cues of focus blur.

Key words: 3D display; holographic display; retinal projection display; band-limited random phase

1 引言

近眼显示器(near eye display, NED)或头戴显示器(head mounted display, HMD)是能够实现虚拟现实(virtual reality, VR)和增强现实(augmented reality, AR)的基本设备之一^[1-4],近几年受到了越来越多研究者的关注。其中,双目视差是近眼显示中最常用的3D显示技术。然而基于双目视差的近眼3D显示存在辐辏聚焦冲突(VAC),长时间观看会导致眼睛疲劳和不适^[5]。研究者们围绕这一问题展开工作并提出了一些缓解VAC的3D显示技术,如光场显示^[6-9]、多平面显示^[10-12]、全息显示^[13-22]。这几种技术均能够再现真实物体的光场信息并实现高质量的3D显示。然而,实现光场再现的3D数据过于庞大,不利于视频等资源的获取和计算。除以上3种技术外,全息视网膜投影显示(RPD)技术也是一种热门的近眼显示技术,其可通过双目视差实现3D显示。由于RPD中每一像素的成像光束极细且均通过人眼晶状体光心,人眼调焦对光束成像影响很小,因此再现图像的景深很大,能够有效地缓解VAC问题^[23-33]。另外,RPD不需要庞大的3D数据,仅通过视差图像即可实现3D显示,具有视差资源易获取、计算快的优势。

在RPD中,除了双目视差信息能够为观察者提供深度线索外,聚焦模糊也能为观察者提供深度感知^[34-35]。虽然RPD的大景深特征能够缓解VAC问题,但景深过大会导致聚焦模糊的深度线索丢失。在RPD中,进入瞳孔的光束宽度影响了图像的景深。因此,本文提出了一种带限随机相位的方法来控制全息RPD中光束进入瞳孔时的宽度,从而达到可控景深的目的。带限随机相位可通过所需进入瞳孔的光束宽度和对应

目标图像所处深度计算得到。该方法计算简单且无须增加额外的光学部件,能够灵活调节各个深度图像的景深范围,为观察者提供聚焦模糊的单目深度线索。

2 全息 RPD 原理

基于波前调制的全息视网膜投影显示直接通过空间光调制器(spatial light modulator, SLM)波前调制实现视网膜投影,其原理如图1所示。SLM中加载的全息图主要通过3个步骤获得。首先,目标图像面的输入图像振幅乘以汇聚至瞳孔的球面波相位获得复振幅 $U_1(x, y)$:

$$U_1(x, y) = A(x_1, y_1) \cdot \exp \left\{ \frac{-jk[(x-x_m)^2 + (y-y_n)^2]}{z_1 + z_2} \right\}, \quad (1)$$

其中: k 为波数, $A(x_1, y_1)$ 为目标图像振幅, (x_m, y_n) 为瞳孔所在位置。第二步,全息面的复振幅 $U_2(x, y)$ 由目标图像面复振幅 $U_1(x, y)$ 进行菲涅尔衍射获得:

$$U_2(x_2, y_2) = U_1(x_1, y_1) \cdot \exp \left\{ \frac{jk[(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2]}{2z_1} \right\} dx_1 dy_1. \quad (2)$$

最后,全息面的复振幅 $U_2(x, y)$ 与参考光干涉并记录为振幅型全息图:

$$H(x_2, y_2) = 2\text{Re}[U_2(x_2, y_2)] + C, \quad (3)$$

其中: $\text{Re}[\]$ 为取实部; C 为一个常数,使振幅分布为非负值。在再现过程中,平行光源照射于加载全息图的SLM中,经SLM调制后汇聚至观察者瞳孔并在视网膜上成像。

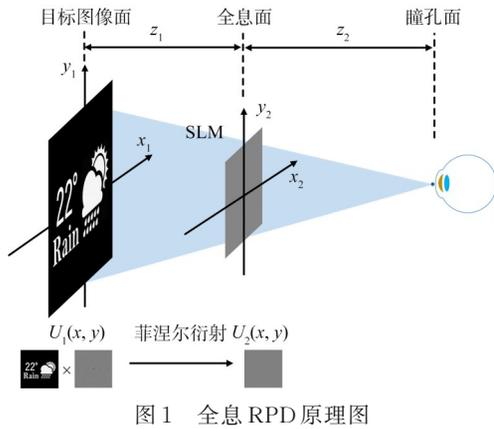


Fig. 1 Principle of holographic retina projection display

为了实现具有深度线索的3D显示,利用全息图的复用特性将多个深度的图像平面波前传播到全息图平面上,叠加后编码为单张全息图,从而为人眼提供聚焦模糊的深度线索,如公式(4)所示:

$$H(x_2, y_2) = 2\text{Re} \left\{ \sum_n \text{prop}_{z_n} \left\{ A_n(x_1, y_1) \cdot \exp \left[\frac{-jk[(x-x_m)^2 + (y-y_n)^2]}{L_n} \right] \right\} \right\} + C, \quad (4)$$

其中:prop{}为菲涅尔衍射, $A_n(x_1, y_1)$ 为对应深度 L_n 处图像的振幅分布, z_n 为深度 L_n 处图像与全息图平面之间的距离。我们对基于多平面图像的3D-RPD进行了仿真和实验,其深度设置如图2(a)所示。实验选用“天气”和“图标”作为处在两个深度的图像1和图像2来计算获得全息图。图像1在距离人眼0.64 m的深度处,图像2在距离人眼1.14 m的深度处,分辨率均为 4096×2160 ,像素间距分别为0.0176 mm和0.0352 mm。实验设置如图2(b)所示,经SLM调制后,偏振光被PBS反射并进入瞳孔。仿真和实验选取振幅型LCOS作为SLM,其分辨率为 4096×2160 ,像素间距为 $3.6 \mu\text{m}$ 。所使用的激光器波长 λ 为532 nm。

图3展示了全息视网膜投影在不同聚焦深度的仿真及实验结果。在距离人眼0.64 m和1.14 m的再现深度处,图像1和图像2的再现图像散斑少且再现质量高,但聚焦模糊的现象不够明显。全息RPD大景深的特点虽然能够缓解VAC问题,然而也减少了单目聚焦模糊的深度线索。因而,RPD中再现的图像景深需要得到限制从而为

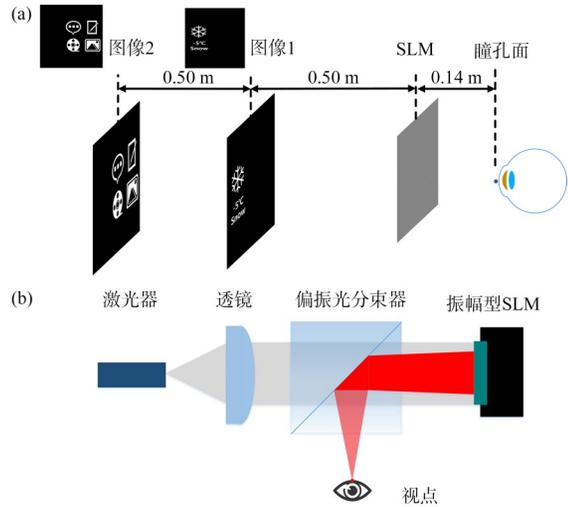


图2 实验设置。(a) 图像、SLM及人眼的深度距离;(b) 实验设置。

Fig. 2 Experimental setup. (a) Distance of the image, SLM and eye in the depth direction; (b) Experimental setup.



图3 全息RPD在不同聚焦深度的仿真及实验再现图像
Fig. 3 Simulation and experimental reconstruction images of holographic RPD at different depths

观察者提供深度线索。

3 基于带限随机相位的全息RPD

为了解决全息RPD中景深过大导致图像深度线索不明显的问题,需要对RPD的景深进行限制。我们首先分析RPD的景深范围。再现图像的景深可由公式(5)及(6)所表达^[36]:

$$\frac{1}{l_n} = \frac{1}{l} - \frac{\delta}{f_e \cdot e}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{l_f} = \frac{1}{l} + \frac{\delta}{f_e \cdot e}, \quad (6)$$

其中： l_n 和 l_f 分别为瞳孔面到景深(depth of field, DOF)范围的近端和远端距离， l 为瞳孔面到虚像成像面距离， f_e 为眼球的焦距， δ 为视网膜上可清晰分辨的最大像素尺寸， e 为进入瞳孔的光束宽度。从公式(5)~(6)可得，通过控制进入瞳孔的光束宽度 e 能够调节再现图像的景深。如图4所示，进入瞳孔的光束宽度 e 可近似为物光的扩散角 θ 和目标图像与瞳孔面距离 L 的乘积。通过拓展物光的扩散角可以扩大光束宽度 e ，从而控制再现图像的景深。

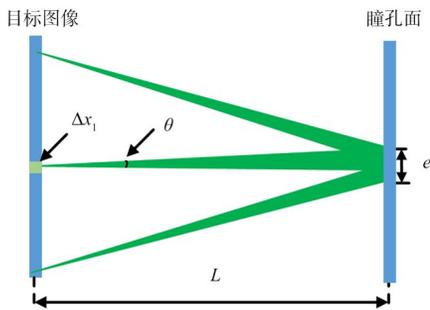


图4 物光扩散角和瞳孔面光束宽度几何关系

Fig. 4 Relationship between diffusion angle and beam width in the pupil plane

物体光的扩散角角度与 $\sin^{-1}(\lambda\nu)$ 成正比，其中 λ 和 ν 为波长和空间频率^[37]。高频部分的扩散角较大，而低频部分的扩散角较小。由于正常图像通常具有大量的低频分量和少量的高频分量，所以物体光的扩散角相对较小。引入随机相位能够使目标图像的频谱近似于均匀分布，从而拓展了频谱带宽，扩大了物光的发散角，如图5所示。

通过对随机相位的频谱带宽限制，可实现对发散角的控制，从而调节进入瞳孔的光束宽度 e 。带限随机相位与其频谱满足傅里叶变化关系，如图6所示。设物面为带限随机相位分布，焦距为 f ，物面像素间距 Δx_1 与频谱面像素间距 Δx 满足采样定理：

$$\Delta x = \frac{\lambda f}{N \Delta x_1}, \quad (7)$$

其中： N 为物面像素数， λ 为光波波长。同时，频谱滤波孔径 p 满足：

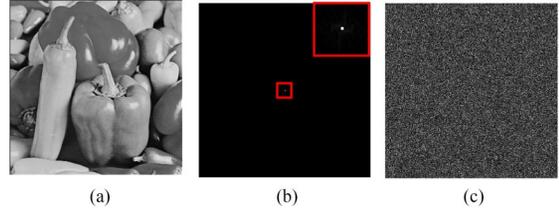


图5 无随机相位和添加随机相位下目标图像的频谱。(a) 目标图像；(b) 目标图像的频谱；(c) 目标图像×随机相位后的频谱。

Fig. 5 Spectrum of target image without random phase and with random phase. (a) Target image; (b) Spectrum of target image; (c) Spectrum of target image × random phase.

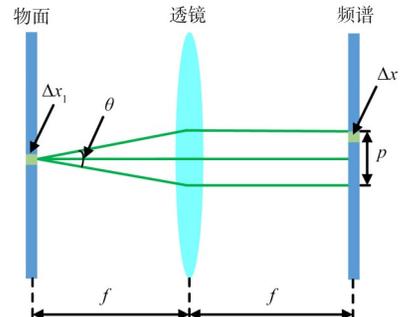


图6 带限随机相位与频谱的关系

Fig. 6 Relationship between band-limited random phase and spectrum

$$p = N_f \cdot \Delta x \approx \theta \cdot f, \quad (8)$$

其中， N_f 为滤波孔径的像素数。将公式(8)代入公式(7)得到公式(9)：

$$N_f = \frac{\theta N \Delta x_1}{\lambda} \approx \frac{e N \Delta x_1}{\lambda L}, \quad (9)$$

由公式(9)所知， N_f 可以根据目标图像所在深度 L 及要求的瞳孔面光束宽度 e 计算得到。当 N_f 确定时，带限随机相位由3步得到：首先对完全随机相位进行二维傅里叶变化得到其频谱分布，其次对其频谱分布进行直径为 N_f 的孔径滤波，最后对滤波后的相位频谱进行二维逆傅里叶变化得到带限随机相位 $h(x, y)$ ，其过程如公式(10)~(11)所示：

$$H(u, v) = \mathcal{F}\{2\pi \cdot \text{random}[N, N]\}, \quad (10)$$

$$h(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{H(u, v) \cdot \text{circ}[N_f]\}, \quad (11)$$

其中： $\text{random}[N, N]$ 为生成0~1的随机数 $N \times N$ 矩阵， $\text{circ}[N_f]$ 为生成以 N_f 为直径的孔径滤波函数。在计算全息图的过程中，基于带限随机相位

的全息 RPD 在第一步时,目标图像面的输入图像振幅乘以汇聚至瞳孔的球面波相位后再乘以带限随机相位 $h(x,y)$ 得到复振幅 $U_1(x,y)$,其余步骤与传统全息 RPD 保持一致。

根据传统全息 RPD 景深仿真和实验的条件参数,我们对基于带限随机相位的全息 RPD 方案在不同聚焦深度的仿真及实验结果进行对比。实验中,进入瞳孔的光束宽度设置为 1.5 mm。图像 1 面的像素间距为 $18 \mu\text{m}$,随机相位的滤波孔径像素宽度为 326。图像 2 面的像素间距为 $36 \mu\text{m}$,对应随机相位的滤波孔径像素宽度为 365。实验采用相机孔径约为 1.5 mm 的手机摄像头进行拍摄,以贴近人眼观察的真实结果。图 7 展示了在距离人眼 0.64 m 和 1.14 m 深度处的再现图像。与传统全息 RPD 的结果相比,带限随机相位的全息 RPD 有明显的聚焦模糊现象,为观察者提供了更多的深度信息。



图 7 基于带限随机相位的全息 RPD 在不同聚焦深度的仿真及实验再现图像
Fig. 7 Simulation and experimental reconstruction images of holographic RPD based on band-limited random phase at different depths

另外,为了体现基于带限随机相位的全息 RPD 中球面波相位和带限随机相位相结合的优势,在不引入球面波相位的情况下,将目标图像乘以带限随机相位后再衍射获得的全息图与目标图像乘以完全随机相位后衍射获得的全息图分别加载于 SLM 中,与带限随机相位的全息 RPD 的再现结果进行比较。图 8 展示了两种全息图的再现结果。仅完全随机相位的全息显示

存在明显的聚焦模糊深度线索,然而受随机相位影响,再现图像存在明显的散斑。而仅带限随机相位的全息显示因图像信息没有充分扩散,只有少量物体信息才能进入瞳孔,从而无法观察到再现图像。因此,基于带限随机相位的全息 RPD 具有低散斑、高再现质量的优点。

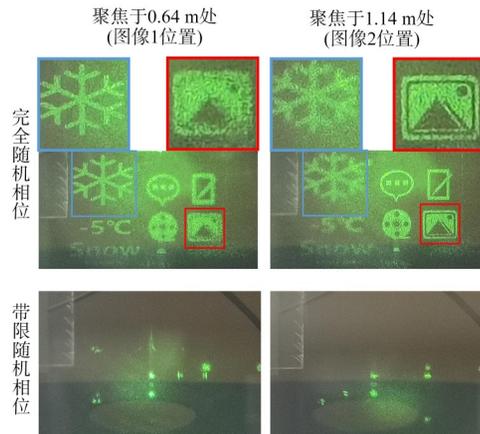


图 8 无球面波情况下,完全随机相位和带限随机相位的全息图的再现结果。
Fig. 8 Reconstruction results of holograms with and without random phase in the case of no spherical waves

最后,图 9 展示了仿真中对应不同设置光束宽度时带限随机相位 RPD 在瞳孔面的振幅分布,其验证了带限随机相位能够灵活控制进入人眼的光束宽度。本文光学实验均为单视点的全息 RPD,采用多球面波相位代替单个球面波相位可以实现视点复制,从而拓展 eyebox 范围^[38]。

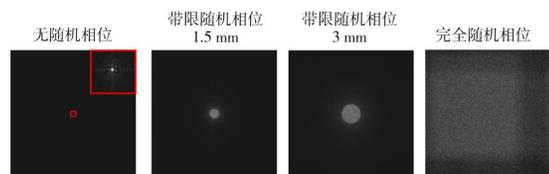


图 9 不同随机相位下瞳孔面的光束振幅分布情况
Fig. 9 Amplitude distribution of light beam in the pupil plane in different random phases

4 结 论

针对全息 RPD 中过大景深导致观察者难以获取聚焦模糊的深度信息的问题,本文提出了一种基于带限随机相位的全息 RPD 方案。该方法

用频谱带宽受限的随机相位来控制全息 RPD 的物光进入瞳孔时的宽度,从而达到控制再现图像景深的效果。该方法计算过程简单,无须复杂系统结构,能够灵活调节进入瞳孔时的光束宽度,

且具有高再现质量及高光效的优势。实验结果表明,该全息 RPD 方案在 3D 显示中不仅具有低散斑、高重建质量的优势,且能够为观察者提供明显的聚焦模糊深度信息。

参 考 文 献:

- [1] LEE Y H, ZHAN T, WU S T. Prospects and challenges in augmented reality displays [J]. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 2019, 1(1): 10-20.
- [2] XIONG J H, HSIANG E L, HE Z Q, *et al.* Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 216.
- [3] CHANG C L, 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.
- [4] CHEN C P, CUI Y P, CHEN Y, *et al.* Near-eye display with a triple-channel waveguide for metaverse [J]. *Optics Express*, 2022, 30(17): 31256-31266.
- [5] ZHOU Y, ZHANG J F, FANG F Z. Vergence-accommodation conflict in optical see-through display: review and prospect [J]. *Results in Optics*, 2021, 5: 100160.
- [6] 张汉乐,邢妍,胡晓帅,等. 面向元宇宙的集成成像 3D 显示技术进展[J]. 指挥与控制学报, 2022, 8(3): 239-248.
ZHANG H L, XING Y, HU X S, *et al.* Metaverse-oriented integral imaging 3D display technology [J]. *Journal of Command and Control*, 2022, 8(3): 239-248. (in Chinese)
- [7] LANMAN D, LUEBKE D. Near-eye light field displays [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(6): 220.
- [8] HUANG H K, HUA H. High-performance integral-imaging-based light field augmented reality display using free-form optics [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 17578-17590.
- [9] LI Q, HE W, DENG H, *et al.* High-performance reflection-type augmented reality 3D display using a reflective polarizer [J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 9446-9453.
- [10] SONODA T, YAMAMOTO H, SUYAMA S. A new volumetric 3D display using multi-varifocal lens and high-speed 2D display [C]//*Proceedings of SPIE 7863, Stereoscopic Displays and Applications XXII*. San Francisco, USA: SPIE, 2011: 669-677.
- [11] AKŞIT K, LOPES W, KIM J, *et al.* Near-eye varifocal augmented reality display using see-through screens [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(6): 189.
- [12] SHI X G, XUE Z H, MA S N, *et al.* Design of a dual focal-plane near-eye display using diffractive waveguides and multiple lenses [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(20): 5844-5849.
- [13] PENG Y F, CHOI S, KIM J, *et al.* Speckle-free holography with partially coherent light sources and camera-in-the-loop calibration [J]. *Science Advances*, 2021, 7(46): eabg5040.
- [14] WANG D, LI Z S, ZHENG Y W, *et al.* High-quality holographic 3D display system based on virtual splicing of spatial light modulator [J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(7): 2297-2307.
- [15] 何泽浩,隋晓萌,赵燕,等. 基于全息光学的虚拟现实与增强现实技术进展[J]. 科技导报, 2018, 36(9): 8-17.
HE Z H, SUI X M, ZHAO Y, *et al.* The development trend of virtual reality and augmented reality technology based on holographic optics [J]. *Science & Technology Review*, 2018, 36(9): 8-17. (in Chinese)
- [16] LI Y L, LI N N, WANG D, *et al.* Tunable liquid crystal grating based holographic 3D display system with wide viewing angle and large size [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 188.
- [17] WANG D, LIU C, SHEN C, *et al.* Holographic capture and projection system of real object based on tunable zoom lens [J]. *Photonix*, 2020, 1(1): 6.

- [18] PI D P, LIU J, WANG Y T. Review of computer-generated hologram algorithms for color dynamic holographic three-dimensional display [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 231.
- [19] ZHAO Y, CAO L C, ZHANG H, *et al.* Accurate calculation of computer-generated holograms using angular-spectrum layer-oriented method [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25440-25449.
- [20] LIU K X, WU J C, HE Z H, *et al.* 4K-DMDNet: diffraction model-driven network for 4K computer-generated holography [J]. *Opto-Electronic Advances* 2023, 6(5): 220135.
- [21] LIN S F, ZHANG S H, ZHAO J, *et al.* Binocular full-color holographic three-dimensional near eye display using a single SLM [J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 2552-2565.
- [22] WANG J, ZHOU J, WU Y, *et al.* Expansion of a vertical effective viewing zone for an optical 360° holographic display [J]. *Optics Express*, 2022, 30(24): 43037-43052.
- [23] TAKAKI Y, FUJIMOTO N. Flexible retinal image formation by holographic Maxwellian-view display [J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 22985-22999.
- [24] CHANG C L, CUI W, PARK J, *et al.* Computational holographic Maxwellian near-eye display with an expanded eyebox [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 18749.
- [25] MI L T, CHEN C P, LU Y F, *et al.* Design of lensless retinal scanning display with diffractive optical element [J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20493-20507.
- [26] WANG Z, TU K, PANG Y, *et al.* Enlarging the FOV of lensless holographic retinal projection display with two-step Fresnel diffraction [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 121(8): 081103.
- [27] ZHANG S J, ZHANG Z Q, LIU J. Adjustable and continuous eyebox replication for a holographic Maxwellian near-eye display [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(3): 445-448.
- [28] WANG Z, TU K F, PANG Y J, *et al.* Lensless phase-only holographic retinal projection display based on the error diffusion algorithm [J]. *Optics Express*, 2022, 30(26): 46450-46459.
- [29] 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.
- [30] WANG Z, ZHANG X, TU K F, *et al.* Lensless full-color holographic Maxwellian near-eye display with a horizontal eyebox expansion [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(17): 4112-4115.
- [31] 张旭,王梓,屠科锋,等. 视网膜投影显示技术研究进展[J]. *液晶与显示*, 2022, 37(5): 639-646.
ZHANG X, WANG Z, TU K F, *et al.* Research progress of retinal projection displays [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(5): 639-646. (in Chinese)
- [32] WANG Z, ZHANG X, LV G Q, *et al.* Hybrid holographic Maxwellian near-eye display based on spherical wave and plane wave reconstruction for augmented reality display [J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 4927-4935.
- [33] WANG Z, TU K F, LV G Q, *et al.* Cross talk-free retinal projection display based on a holographic complementary viewpoint array [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(9): 2437-2440.
- [34] UENO T, TAKAKI Y. Super multi-view near-eye display to solve vergence-accommodation conflict [J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 30703-30715.
- [35] ZHANG X, PANG Y J, CHEN T, *et al.* Holographic super multi-view Maxwellian near-eye display with eyebox expansion [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(10): 2530-2533.
- [36] GREEN D G, POWERS M K, BANKS M S. Depth of focus, eye size and visual acuity [J]. *Vision Research*, 1980, 20(10): 827-835.
- [37] SHIMOBABA T, ITO T. Random phase-free computer-generated hologram [J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 9549-9554.
- [38] 屠科锋,庞煜剑,陈涛,等. 纯相位编码的无透镜全息视网膜投影近眼显示[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(20): 2011009.
TU K F, PANG Y J, CHEN T, *et al.* Lensless holographic retinal projection near-eye display based on phase-only holograms [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(20): 2011009. (in Chinese)

作者简介:



屠科锋,男,硕士,2023年于合肥工业大学获得硕士学位,主要从事全息显示的算法研究。E-mail:kefengtul@gmail.com



王梓,男,博士,副研究员,2017年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事3D显示方面的研究。E-mail:wangzi@hfut.edu.cn



孙菲,女,硕士,副研究员,2012年于江苏科技大学获得硕士学位,主要从事新型显示、近眼显示等方面的技术情报分析及研究工作。E-mail:502976779@qq.com