

文章编号:1007-2780(2022)05-0639-08

视网膜投影显示技术研究进展

张旭¹, 王梓^{1,2*}, 屠科锋¹, 陈涛¹, 庞煜剑¹, 吕国强¹, 冯奇斌²

- (1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;
2. 合肥工业大学 特种显示国家工程实验室, 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 近眼显示器可将数字世界与物理世界无缝融合, 有望成为下一代增强现实显示终端。视网膜投影显示(Retinal projection displays, RPD)技术因其具有无辐辏-聚焦冲突、高光效、大视场等优点, 是近眼显示领域的研究热点之一。本文回顾了 RPD 技术的发展, 阐述了 RPD 的基本工作原理, 综述了 RPD 及其出瞳拓展方面的最新进展, 并对其未来的前景进行了展望。未来通过结合全息波前调控与全息光学元件(HOE)的优点, 有望实现大出瞳、高系统自由度的轻薄化 RPD 近眼显示。

关键词: 近眼显示; 增强现实; 视网膜投影; 出瞳拓展

中图分类号: TN27 文献标识码: A doi:10.37188/CJLCD.2022-0040

Research progress of retinal projection displays

ZHANG Xu¹, WANG Zi^{1,2*}, TU Ke-feng¹, CHEN Tao¹, PANG Yu-jian¹,
LYU Guo-qiang¹, FENG Qi-bin²

- (1. School of Instrumentation and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, China;
2. National Engineering Laboratory of Special Display Technology, Academy of Photoelectric Technology,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Near-eye displays, which seamlessly integrate the digital and physical worlds, are expected to become the next generation of augmented reality display terminals. Retinal projection displays (RPD) technology is one of the research hotspots in the field of near-eye display due to its advantages of convergence-conflict free, high light efficiency and large field of view. In this paper, the development of RPD technology is reviewed, the basic working principle of RPD is described, the latest progresses of RPD and its eyebox expansion are reviewed, and the future prospect of RPD is forecasted. In the future, by combining the advantages of holographic wavefront control and holographic optical element (HOE), it is expected to realize a lightweight RPD near eye display with large eyebox and high system freedom.

Key words: near eye displays; virtual reality; augmented reality; retinal projection displays; eyebox expansion

收稿日期: 2022-01-30; 修订日期: 2022-02-21.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61805065)

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

*通信联系人, E-mail: wangzi@hfut.edu.cn

1 引言

近眼显示器(Near eye display, NED)或头戴显示器(Head mounted display, HMD)^[1-3]作为实现虚拟现实(Virtual reality, VR)^[4]和增强现实(Augmented Reality, AR)^[5-6]并提供沉浸式和交互式体验的基本设备,受到了研究者的广泛关注。目前,NED面临的一个关键问题是辐辏-聚焦冲突,用户长时间观看会导致眼睛疲劳和不适^[7]。视网膜投影显示(Retinal projection displays, RPD)技术具有全景聚焦(Always in focus)的图像特征,自然化解了辐辏-聚焦冲突,是近眼显示领域的研究热点之一。

RPD这一概念最早出现在1860年物理学家麦克斯韦所做的一个实验中^[8]。他将光源通过透镜直接成像在瞳孔中,由此观察到透镜被光线均匀地照明。这种将光源成像在瞳孔中的方法被称为麦克斯韦观察法(Maxwellian viewing)。1980年,Webb等人设计了一种扫描激光检眼镜,将二维扫描激光束通过瞳孔直接投射到视网膜上,并探测返回的光强来检查眼底的情况^[9]。这种技术已经被广泛运用在眼科检查中。在此基础上,Koellin等人加入图像源,开发了第一款RPD显示器原型^[10]。随后,RPD技术开始受到企业界的关注。

2010年,日本Brother公司在世博会上展示了一款RPD眼镜终端AirScouter^[11],能够提供单目AR显示,视场角为 $20^{\circ}(H) \times 11.4^{\circ}(V)$ 。2014年,Avegant公司发布一款具有立体影像视觉的双目RPD VR观影设备Glyph^[12]。2018年,加拿大创业公司North发布一款基于激光光束扫描(Laser beam scanning, LBS)的RPD AR眼镜Focals,该眼镜可以在约 15° 的视场范围内提供 300×300 分辨率的图像。微软则在2017年展示了视场角高达 80° 的RPD AR眼镜样机^[13]。

由于RPD无辐辏-聚焦冲突、高光效、大视场等优点,国内外学者近年来开展了大量的研究,并且出现了采用全息波前调控的新型RPD显示方法。本文将从原理、分类等方面对其研究进展进行概述,并对RPD技术的发展进行了展望。

2 RPD原理

图1为传统RPD的基本原理图。在图1(a)中,点光源经透镜准直后,平行照射空间光调制器(Spatial light modulator, SLM)加载数字图像信息,经目镜在人眼瞳孔处汇聚成光点,直接投射到人眼视网膜上成像,而不受人眼调焦的影响。平行光源在瞳孔处的成像产生了小于瞳孔直径的出瞳孔径,大幅增加了近眼显示系统的景深,且可以通过添加光阑进一步增加系统景深。人眼成像景深范围 Δl ^[14]:

$$\Delta l = \frac{2\delta f d l^2}{f^2 d^2 - l^2 \delta^2}, \quad (1)$$

其中 δ 为视网膜最小分辨尺寸, f 为人眼等效焦距, l 为人眼聚焦面深度, d 为瞳孔处的系统出瞳孔径大小。可见,RPD的大景深特征来源于小出瞳孔径。

图1(b)是另一种采用LBS方式的RPD显示原理^[15]。微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)扫描镜对激光束做二维方向的扫描偏转,同时对激光束的强度进行同步调制,加载图像信息,实现激光束扫描投影。再通过目镜在人眼瞳孔处汇聚成光点,实现视网膜投影显示。LBS方式利用激光的高准直性实现小出瞳孔径,与图1(a)中的被动式光机相比,是一种主动式的显示方法。

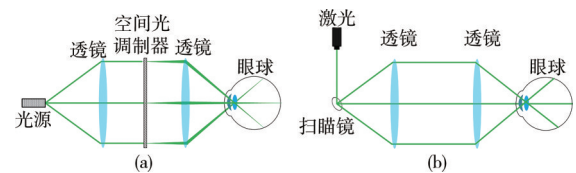


图1 视网膜投影原理。(a)基于SLM的视网膜投影显示;(b)基于LBS的视网膜投影显示。

Fig. 1 Principle of RPD. (a) RPD based on SLM; (b) RPD based on LBS.

与传统直视式显示相比,RPD将图像源直接成像到人眼瞳孔中的独特原理造就了诸多优势。第一,RPD将近乎所有的光都汇聚到人眼中,因此系统光效很高,特别适合于户外使用。第二,通过增加目镜的数值孔径可以直接获得大视场的近眼显示。第三,RPD的全景聚焦特征自然化解了近

眼显示存在的辐辏-聚焦冲突,可以实现无视疲劳的AR近眼显示。在某些AR应用如车辆辅助驾驶上,驾驶员双眼对焦在车外不同距离处时均可看清虚拟图像,避免了在车外路况与虚拟图像之间来回对焦引发的风险,增加了驾驶安全性。

RPD的景深与SLM像素间距及图像频谱相关。如图1(a)所示,SLM放置于目镜的前焦面上,则瞳孔位于SLM的频谱面上。假设某一像素处的图像空间频率为 ν ,则其光束发散角为 $2\sin^{-1}(\lambda\nu)$,在瞳孔处所产生的光束宽度为 $2f\sin^{-1}(\lambda\nu)$, f 为目镜焦距。可见当SLM像素间距越小,图像高频成分越丰富,则产生的光束宽度越大,RPD的景深则越小。通常可以在人眼瞳孔处(即频谱面)添加小孔或增加单独的滤波系统来限制光束宽度,增加景深,但是同时会滤除图像高频信息,造成图像质量下降。因此RPD存在景深-图像质量之间的权衡问题。

由于光线被汇聚至一点,过小的出瞳(Eyebbox)尺寸使得人眼瞳孔必须正好位于光点上时才能接收到图像,而微小的偏移将导致图像消失。近眼显示中,理想的出瞳大小约为 $8\sim 15\text{ mm}$ ^[16-17],因此出瞳拓展是RPD所要解决的关键问题。围绕该问题,国内外学者给出了形式多样的解决方案,主要分为几何光学与衍射光学两大类。

3 基于几何光学的RPD

基于几何光学的RPD通过透镜等几何光学元件,将光束汇聚到人眼瞳孔中,向视网膜直接投射图像。Yang等人设计了基于硅基液晶(Liquid crystal on silicon, LCOS)的RPD系统,利用准直激光束照射LCOS后,由透镜汇聚到人眼瞳孔中^[18-19]。Lin等人采用透镜将LBS系统的扫描光束汇聚到人眼瞳孔中,实现 $30^\circ \times 22^\circ$ 视场角的RPD显示^[20]。Zhang等人在此基础上实现 31.5° 视场角的RPD与光场显示的结合^[21]。Hyeongkyu等人利用针孔限制微显示器的成像光束宽度,并利用回反射膜与分光镜将光束汇聚到瞳孔中^[22]。除了传统二维图像源,利用全息生成三维图像源并由透镜汇聚到人眼中,可以实现具有深度感的RPD近眼显示^[23-25]。

由于光线被透镜汇聚至一点,出瞳拓展显得

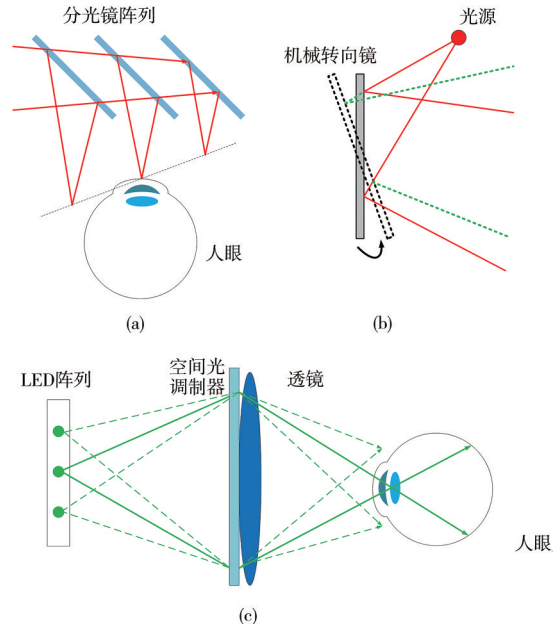


图2 视网膜投影出瞳拓展。(a)分光镜阵列;(b)机械转向镜(c)LED阵列。

Fig. 2 Eyebbox expansion of RPD using beam splitter array (a), steering mirror (b) and LED array (c), respectively.

尤为关键。RPD的出瞳拓展方法可分为视点复制和视点转向。视点复制通过产生多个视点,以覆盖较大的眼动范围。如图2(a)所示,Shrestha等人提出分光镜阵列方法,使光路多次透反射后形成 3×3 个间距为 4 mm 的视点阵列来拓展出瞳^[26]。这种视点复制方法简单有效,但需要格外注意视点间距与瞳孔直径之间的匹配。如图3所示,视点间距小于瞳孔直径时会导致视点间串扰,视点间距大于瞳孔直径时会导致图像丢失。考虑到人眼瞳孔直径随环境光强的变化而改变,

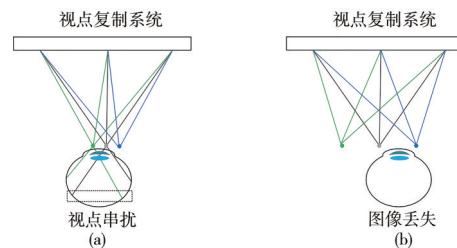


图3 (a)视点间距过小导致串扰;(b)视点间距过大导致图像丢失。

Fig. 3 Crosstalk problem with a narrow viewpoint spacing (a) and blank image problem with wide viewpoint spacing (b) in the RPD with multiple viewpoints.

视点间距的设计面临挑战。此外,视点复制得越多,每一视点图像亮度也随之降低。

相比之下,如图 2(b)所示,视点转向方法会根据瞳孔的位置动态地改变视点的位置。Jang 等人采用高速机械转向镜改变光线传播方向,从而改变汇聚视点位置^[27]。视点转向方法的图像亮度更高,且无需考虑视点间距与瞳孔直径的匹配,但是额外的瞳孔追踪与光线转向设备也增加了 RPD 系统的复杂性。

如图 2(c)所示,Hedili 等人提出一种发光二极管(Light-emitting diode, LED)光源阵列方案来实现视点转向。根据瞳孔追踪的信息动态控制不同位置 LED 发光,以生成瞳孔面不同位置的视点,从而获得一个 14 mm×10 mm 大小的出瞳^[28]。

另一方面,LED 光源阵列方案亦可实现视点复制。Ueno 等人提出一种 LED 阵列配合高速 SLM 生成 2D 视点阵列的方案^[29]。通过高速切换 LED 光源,并同步刷新 SLM 上加载的图像,可以实现视点复制。该方法的特别之处在于使相邻视点加载视差图像并一同进入瞳孔,实现附加单目深度线索的超多视点显示。

4 基于衍射光学的 RPD

采用几何透镜不利于光学系统的减薄,而透镜全息光学元件(HOE)作为离轴的光学组合器,可以较好地解决轻薄化问题^[30-32]。如图 4 所示,经过光学干涉制备的透镜 HOE,作为平面光学元件,同时具备了聚焦与反射的光学效果。同时由于布拉格光栅的波长选择性,透镜 HOE 对环境光的透过率接近 100%。利用透镜 HOE 对

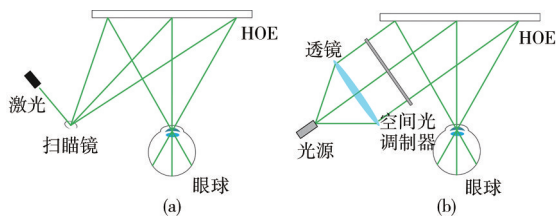


图 4 基于 HOE 的 RPD。(a)透镜 HOE 对 LBS 图像源光束汇聚;(b)透镜 HOE 对 SLM 图像源光束汇聚。

Fig. 4 RPD based on HOE. (a) LBS image source beam converged by lens HOE; (b) SLM image source beam converged by lens HOE.

LBS^[33]、LCOS^[34]等图像源光束进行汇聚,可以实现结构紧凑、高光效的 RPD 系统。

Maimone 等人利用全息方法生成三维图像源,并开发了基于 HOE 的 AR 眼镜样机,视场角达到 80°^[13]。Lee 等人利用可调焦液体透镜配合透镜 HOE,实现了 RPD 与直视式显示的切换^[35]。

与前述几何透镜 RPD 的出瞳拓展类似,在基于 HOE 的 RPD 中,如图 5(a)所示,采用透镜阵列 HOE 产生点光源阵列^[36],或采用机械偏转镜偏转视点^[37]是常见的出瞳拓展方法。此外,如图 5(b)所示,HOE 的角度复用特性提供了另一种可能的解决方案,Kim 等人提出将多个汇聚光束记录到同一个 HOE 中,从而将信号光汇聚到出瞳为 9 mm×3 mm 的 3 个不同视点^[38]。

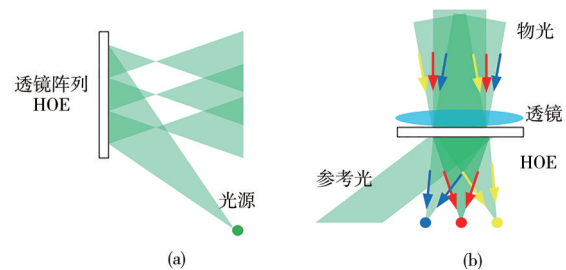


图 5 (a)透镜阵列 HOE 产生的点光源阵列;(b)多个汇聚光束记录到同一个 HOE。

Fig. 5 (a) Point light array produced by lens array HOE; (b) Multiple converging beams are recorded to a single HOE.

为了消除可能出现的视点间串扰,Jo 等人设计了多片 HOE 结构,使每片 HOE 产生分离的视点,这样即使多个视点同时进入人眼也不会产生串扰^[39]。

Choi 等人采用基于二维针镜阵列 HOE 的薄波导系统,在对 RPD 进行出瞳拓展的同时,保证了结构的紧凑型^[40]。

Wang 等人将周期相同、相位相反的光栅曝光到几何相位光学元件(Pancharatnam-Berry optical element)不同区域,用于将空间光调制器出射的信号光分离成 3 束不同方向的光束,3 束光经透镜汇聚后被 HOE 反射,同时进入人眼,实现超多视点视网膜投影显示^[41]。

近年来,具备偏振特性的体光栅器件(PVG)或液晶 HOE(LCHOE)也被用于实现 RPD 的出瞳

拓展^[42],如图6所示。与传统HOE记录干涉光束的强度不同,由于液晶固有的各向异性特性,PVG对信号光的偏振态非常敏感。该特性结合液晶器件的偏振调制能力,为RPD系统出瞳拓展提供新的可能。

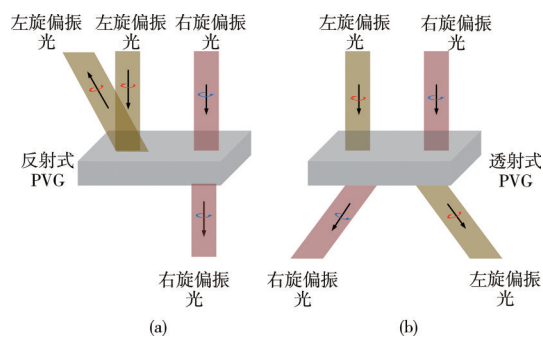


图6 (a)反射式PVG;(b)透射式PVG。

Fig. 6 (a) Reflective PVG; (b) Transmissive PVG.

Xiong等人利用反射式液晶全息光学元件(LCHOs)的偏振选择特性^[43],通过控制偏振转换器(PC)动态切换入射光偏振态可以使得左手性LCHOE与右手性LCHOE分别发挥作用,从而实现RPD视点位置的动态切换。

同样基于偏振选择性,Yoo等人利用透射式偏振光栅(PG)器件与偏振转换器动态切换光束方向,配合HOE产生两组可切换的视点,以缓解传统HOE复制视点可能出现的视点串扰及图像丢失^[44]。Shi等人则通过调整两块PG间距来改变视点间距,以适应人眼瞳孔大小的变化^[45]。另外,为实现出瞳在二维方向的拓展,Lin等人采用两片几何相位偏转器(Pancharatnam-Berry deflectors)分别对水平和垂直两个方向进行出瞳拓展^[46]。He等人通过优化液晶达曼光栅衍射级次,获取 3×3 的高均匀度彩色视点阵列^[47]。

视点间距与瞳孔直径匹配,以及眼球的转动要求对视点三维坐标、数量、间距等参数实现自由、精准的操控,采用全息波前调制的方法可以很好地完成这一目标。2018年,Takaki等人提出一种全新的无透镜波前调控全息RPD方法^[14],将目标图像作为振幅,乘以汇聚球面波相位,再通过菲涅尔衍射并引入参考光干涉,得到最终的振幅全息图,如图7(a)所示。这种方法摒弃了透镜的使用,直接通过SLM波前调制实现视网膜投影。结合人眼追踪,视点三维坐标可以通过编

码球面波相位进行自由精准的操控,具有无透镜像差、高系统自由度等优点。全息RPD的全息图计算过程十分简单,对计算资源的需求较低。此外,由于使用球面波相位替代了传统随机相位,散斑噪声得到了较好的抑制。

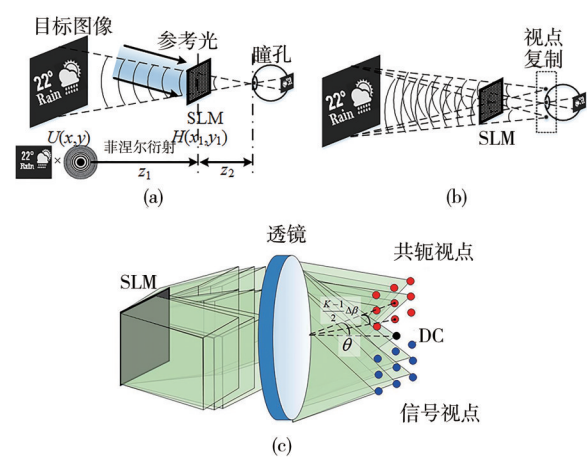


图7 (a)全息RPD原理;(b)采用多球面波编码的全息视网膜投影出瞳拓展;(c)共轭光项编码实现全息视网膜投影出瞳拓展。

Fig. 7 (a) Principle of holographic RPD; (b) Eyebox expansion of holographic RPD using multiple spherical wave encoding method; (c) Eyebox expansion of holographic RPD using conjugate wavefront encoding method.

Wang等人理论分析了该球面波前方法中存在的景深-图像质量权衡问题,并提出一种具有不同聚焦特性的平面波前方法^[48]。通过将球面波方法和平面波方法有效地结合,在保证图像质量的同时拓展了景深。

全息RPD的灵活波前调控特性可以更为简单地实现视点复制。如图7(b)所示,Chang等人利用乘上不同方向闪耀光栅的多个球面波相位将光线汇聚到多个视点^[49]。Zhang等人为相位全息图添加不同平面载波,并由透镜汇聚到不同视点位置^[50]。同时,通过对准相邻视点的投射图像位置,实现了无缝的视点切换。Wang等人利用振幅全息图的共轭光来拓展全息RPD的出瞳^[51]。如图7(c)所示,通过将共轭光项编码成平面波相位与目标图像的乘积,结合多平面波编码,将传统无用的共轭光干扰转化成视点阵列,实现了双倍的视点复制。此外,通过在单张全息

图中编码三色 RPD 波前信息,并利用数值低通滤波器消除颜色串扰,可以实现低散斑噪声的彩色动态全息 RPD 显示及横向出瞳拓展^[52]。与传统复制视点方法不同,全息 RPD 利用波前编码实现光束汇聚、偏转及复制,可以对视点三维坐标、数量及间距灵活调控,以完美匹配瞳孔位置及大小的变化,有效解决视点串扰及图像丢失问题。

5 结 论

RPD 近眼显示具有高光效、大视场等特点,

其全景聚焦特征自然化解了辐辏-聚焦冲突,可以实现无视疲劳的 AR 近眼显示。针对出瞳拓展问题,几何光学方法常采用点光源阵列与机械偏转镜等手段实现视点的复制或偏转,但具备一定的复杂性。HOE 独特的角度和偏振复用特性有助于实现大视场、大出瞳的轻薄化 RPD 系统。全息 RPD 直接通过 SLM 波前调制实现视网膜投影,可以实现对视点的自由、精准的操控。但全息 RPD 系统的出瞳与视场角仍受到 SLM 器件的限制。未来,通过结合全息波前调控与 HOE 的优点,有望实现大视场、大出瞳、高系统自由度的轻薄化 RPD 近眼显示。

参 考 文 献:

- [1] CHENG D W, WANG Q W, LIU Y, *et al.* Design and manufacture AR head-mounted displays: a review and outlook [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(3): 350-369.
- [2] HE Z H, SUI X M, JIN G F, *et al.* Progress in virtual reality and augmented reality based on holographic display [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): A74-A81.
- [3] 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)
- [4] WANG Y Q, LIU W Q, MENG X X, *et al.* Development of an immersive virtual reality head-mounted display with high performance [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(25): 6969-6977.
- [5] 史晓刚,薛正辉,李会会,等. 增强现实显示技术综述[J]. *中国光学*, 2021, 14(5): 1146-1161.
SHI X G, XUE Z H, LI H H, *et al.* Review of augmented reality display technology [J]. *China Optics*, 2021, 14(5): 1146-1161. (in Chinese)
- [6] CHEN Y Q, WANG Q, CHEN H, *et al.* An overview of augmented reality technology [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1237(2): 022082.
- [7] 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): 33.
- [8] WESTHEIMER G. The maxwellian view [J]. *Vision Research*, 1966, 6(11/12): 669-682.
- [9] WEBB R H, HUGHES G W, POMERANTZEFF O. Flying spot TV ophthalmoscope [J]. *Applied Optics*, 1980, 19(17): 2991-2997.
- [10] KOLLIN J S. A retinal display for virtual-environment applications [C]//*Proceedings of Society for Information Display*. 1993: 827.
- [11] WATANABE M, TAKAYAMA H, ASAIN, *et al.* A retinal scanning display with a wavefront curvature modulator [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2003, 11(3): 511-515.
- [12] DEWALD D S, EVANS A T, WELCH N, *et al.* The avegant glyph: optical design considerations and approach to near-eye display [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 69-71.
- [13] MAIMONE A, GEORGIU A, KOLLIN J S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(4): 85.
- [14] TAKAKI Y, FUJIMOTO N. Flexible retinal image formation by holographic Maxwellian-view display [J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 22985-22999.
- [15] 丁意桐,高震宇,彭旭,等. 激光扫描头戴式增强现实系统中带斑抑制与中继光路设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 130801.

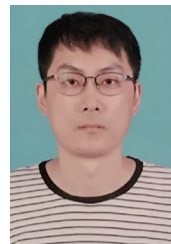
- DING Y T, GAO Z Y, PENG X, *et al.* Banding suppression and relay optical path design for laser scanning head-mounted augmented reality system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 130801. (in Chinese)
- [16] 呼新荣,刘英,王健,等. 基于视网膜扫描的头戴显示器研究现状[J]. 红外与激光工程,2014,43(3):871-878.
HU X R, LIU Y, WANG J, *et al.* Current progress in head-mounted display based on retinal scanning [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 871-878. (in Chinese)
- [17] 孙路通,王灵杰,王蔚松,等. 基于单图像生成单元的双焦面头盔显示光学系统设计[J]. 光学学报,2020,40(13):1322004.
SUN L T, WANG L J, WANG W S, *et al.* Design of dual-focal-plane helmet mounted display based on single picture generation unit [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1322004. (in Chinese)
- [18] 杨敏娜,郭忠达,阳志强. 基于视网膜投影显示的头盔显示器设计[J]. 应用光学,2012,33(2):370-373.
YANG M N, GUO Z D, YANG Z Q. Helmet-mounted displays based on retinal projection display [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(2): 370-373. (in Chinese)
- [19] 杨震,郭忠达,阳志强. 视网膜投影显示系统设计[J]. 应用光学,2011,32(2):222-225.
YANG Z, GUO Z D, YANG Z Q. Design of retinal projection display system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(2): 222-225. (in Chinese)
- [20] 林俊国,丛强,许晨,等. MEMS激光扫描视网膜投影显示系统设计[J]. 光学学报,2017,37(12):1222001.
LIN J G, CONG Q, XU C, *et al.* Design of MEMS laser scanning retinal projection display system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1222001. (in Chinese)
- [21] ZHANG Q, SONG W, LIU Y, *et al.* Design and implementation of an optical see-through near-eye display combining Maxwellian-view and light-field methods [J]. *Optics Communications*, 2022, 510: 127833.
- [22] DO H, KIM Y M, MIN S W. Focus-free head-mounted display based on Maxwellian view using retroreflector film [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(11): 2882-2889.
- [23] XIA J, ZHU W L, HEYNDERICKX I. Three-dimensional electro-holographic retinal display [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 591-594.
- [24] SONG W T, LI X, ZHENG Y J, *et al.* Full-color retinal-projection near-eye display using a multiplexing-encoding holographic method [J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8098-8107.
- [25] 祁怡君,张秀敏,闫晓密,等. 基于复振幅调制的全息视网膜显示[J]. 光电子技术,2018,38(1):19-22. 2018.01.003.
QI Y J, ZHANG X M, YAN X M, *et al.* Electro-holographic retina display based on complex modulation [J]. *Optoelectronic Technology*, 2018, 38(1): 19-22. (in Chinese)
- [26] SHRESTHA P K, PRYN M J, JIA J, *et al.* Accommodation-free head mounted display with comfortable 3D perception and an enlarged eye-box [J]. *Research*, 2019, 2019: 9273723.
- [27] 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): 190.
- [28] HEDILI M K, SONER B, ULUSOY E, *et al.* Light-efficient augmented reality display with steerable eyebox [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12572-12581.
- [29] UENO T, TAKAKI Y. Super multi-view near-eye display to solve vergence - accommodation conflict [J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 30703-30715.
- [30] JANG C, LEE C K, JEONG J, *et al.* Recent progress in see-through three-dimensional displays using holographic optical elements [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): A71-A85.
- [31] XIA X X, GUAN Y Q, YANG F R, *et al.* Eyeglasses-style Maxwellian-view near-eye display with lens-array-based holographic optical element [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52(1): 394-397.
- [32] 王靖,曹良才,张浩,等. 基于体全息的三维显示方法[J]. 中国激光,2015,42(9):0909003.
WANG Z, CAO L C, ZHANG H, *et al.* Three-dimensional display based on volume holography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0909003. (in Chinese)
- [33] 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.
- [34] ZHOU P C, LI Y, LIU S X, *et al.* Compact design for optical-see-through holographic displays employing

- holographic optical elements [J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 22866-22876.
- [35] LEE J S, KIM Y K, WON Y H. See-through display combined with holographic display and Maxwellian display using switchable holographic optical element based on liquid lens [J]. *Optics Express*, 2018, 26(15): 19341-19355.
- [36] JANG C, BANG K, LI G, *et al.* Holographic near-eye display with expanded eye-box [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2018, 37(6): 195.
- [37] KIM J, JEONG Y, STENGEL M, *et al.* Foveated AR: dynamically-foveated augmented reality display [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2019, 38(4): 99.
- [38] 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.
- [39] 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): A268-A276.
- [40] 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.
- [41] WANG L, LI Y, LIU S X, *et al.* Maxwellian-viewing-super-multi-view near eye display using a Pancharatnam-Berry optical element [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52(S2): 533-536.
- [42] XIONG J H, WU S T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications [J]. *eLight*, 2021, 1(1): 3.
- [43] XIONG J H, LI Y N Q, LI K, *et al.* Aberration-free pupil steerable Maxwellian display for augmented reality with cholesteric liquid crystal holographic lenses [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(7): 1760-1763.
- [44] 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.
- [45] SHI X L, LIU J, ZHANG Z Q, *et al.* Extending eyebox with tunable viewpoints for see-through near-eye display [J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 11613-11626.
- [46] LIN T G, ZHAN T, ZOU J Y, *et al.* Maxwellian near-eye display with an expanded eyebox [J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 38616-38625.
- [47] HE Z Q, YIN K, FAN-CHIANG K H, *et al.* Enlarging the eyebox of Maxwellian displays with a customized liquid crystal Damman grating [J]. *Crystals*, 2021, 11(2): 195.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] WANG Z, ZHANG X, LV G Q, *et al.* Conjugate wavefront encoding: an efficient eyebox extension approach for holographic Maxwellian near-eye display [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(22): 5623-5626.
- [52] 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.

作者简介:



张旭(1995—),男,安徽亳州人,博士研究生,2016年于电子科技大学获得学士学位,主要从事3D显示、全息显示、近眼增强现实显示、抬头显示等方面的研究。E-mail: zhangxu831@mail.hfut.edu.cn



王梓(1991—),男,安徽合肥人,博士,副研究员,2017年于中国科技大学获得博士学位,主要从事全息3D显示、增强现实近眼显示等方面的研究。E-mail: wangzi@hfut.edu.cn