

激光与光电子学进展

面向视觉舒适度的全息近眼显示研究综述

常琛亮^{1,2*}, 戴博^{1,2}, 夏军³, 张大伟^{1,2**}, 庄松林^{1,2}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093;

²上海理工大学光电信息与计算机工程学院光学仪器与系统教育部工程中心, 上海 200093;

³东南大学电子科学与工程学院信息显示与可视化国际合作联合实验室, 江苏 南京 210096

摘要 随着元宇宙概念的逐渐火爆,用于虚拟现实和增强现实(VR/AR)的可穿戴近眼显示设备也获得了巨大的关注。一款终极的VR/AR头戴式设备必须将显示器、传感器和处理器集成在一个紧凑的外壳中,人们可以长时间舒适地佩戴,同时提供良好的沉浸式体验和友好的人机交互体验。面向视觉舒适度的设计理念对于下一代VR/AR设备至关重要。在众多可以提供三维视觉效果显示技术中,全息显示技术能够提供包含所有三维观看线索的真实自然的三维显示效果,同时由于其衍射成像的特点在人眼视觉像差矫正及保持紧凑外形尺寸等方面都具有独特的优势,成为了未来近眼显示设备的潜在理想技术方案。在这篇综述中,从视觉舒适度的角度调研和总结了全息近眼显示技术的最新进展。首先在视觉感知的背景下介绍了人眼视觉系统,随后对全息近眼显示在动眼距、视场角、散斑噪声、三维波前计算和全彩色显示等有关视觉舒适度的研究方向进行了全面综述,最后总结和讨论了全息近眼显示技术在未来的潜在应用场景。

关键词 成像系统; 全息显示; 近眼显示; 增强现实; 三维显示

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2011001

Review of Holographic Near-Eye Displays for Visual Comfort

Chang Chenliang^{1,2*}, Dai Bo^{1,2}, Xia Jun³, Zhang Dawei^{1,2**}, Zhuang Songlin^{1,2}

¹Shanghai Key Laboratory of Modern Optics System, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²Engineering Research Center of Optical Instrument and System, Ministry of Education, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for

Science and Technology, Shanghai 200093, China;

³Joint International Research Laboratory of Information Display and Visualization, School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China

Abstract With the concept of metaverse gradually becoming popular, wearable near-eye display devices for virtual and augmented reality (VR/AR) have received considerable attention. An ideal VR/AR headset device must integrate the display, sensor, and processor into a compact form factor, so that people can wear it comfortably for long durations, while providing a good immersive experience and friendly human-computer interaction experience. The design concept of visual comfort is crucial for the next generation VR/AR equipment. Among many display technologies that can provide three-dimensional visual effects, holographic display technology can provide real and natural three-dimensional display effects including all three-dimensional viewing clues. Meanwhile, owing to its diffraction imaging characteristics, holographic display technology has unique advantages in human visual aberration correction and maintaining compact overall dimensions, and it has become a potential ideal technical solution for near-eye display equipment. In this review, the latest developments in the holographic near-eye display technology was investigated and summarized from the perspective of visual comfort. First, the human visual system was introduced in the context of visual perception. Then, the research works of holographic near-eye display in eyebox, field of view, speckle noise, hologram generation algorithms, and full-color display were comprehensively reviewed. Finally, the potential application scenarios of holographic near-eye display technology were summarized and discussed in this study.

Key words imaging systems; holographic display; near-eye display; augmented reality; three-dimensional display

收稿日期: 2022-06-29; 修回日期: 2022-08-10; 录用日期: 2022-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(62075040)、国家重点研发计划(2021YFF0701100)、上海市自然科学基金面上项目(22ZR1473100)

通信作者: *changchenliang@hotmail.com; **dwzhang@usst.edu.cn

1 引言

近眼显示技术是未来实现虚拟现实(VR)和增强现实(AR)体验的重要技术支撑,近年来在工业界和学术界都获得了广泛的关注和快速的发展。在VR/AR显示中,近眼显示技术为人眼提供具有临场感及互动性的虚拟图像,从而为用户提供全新的视觉体验。其中,VR通过佩戴完全遮挡式的目镜设备为人眼提供完全虚拟和沉浸式的视觉效果,而AR则通过结合较为轻便的眼镜式设备及光学透视元件将虚拟图像与人眼观看的真实环境进行虚实的融合,可实现与虚拟信息和现实世界的全方位互动。因此,基于近眼显示技术的VR/AR设备在教育、娱乐、商业、医疗、通信等与人们生活密切相关的领域具有广阔的应用前景。

无论是面向消费级用户还是商用型用户,理想的近眼显示设备需要同时具有两个方面的舒适度,即设备的佩戴舒适度和人眼的视觉舒适度,其中人眼的视觉舒适度又可以进一步体现在观看的参数和观看的内容两个方面。设备的佩戴舒适度主要指近眼显示设备需要在设计上尽可能小型化和轻量化,减轻佩戴时的质量和体积,便于实现长时间的佩戴观看。人眼视觉的舒适度则从观看参数和观看内容两个方面来分析其影响,其中参数方面的影响主要包括动眼距和视场角两个观看参数,动眼距是人眼能够观看到完整虚拟图像的空间范围,视场角则是指虚拟图像对人眼的张角跨度。较大的动眼距和视场角能够提供非常好的VR/AR观看体验。观看内容方面对舒适度的影响则主要包括图像清晰度、三维效果及彩色效果这3个与图像重建质量密切相关的因素,这些因素保证了人眼能够观看到足够逼真的虚拟图像,获得极好的视觉体验。通常在VR/AR显示技术中,需要硬件和算法的配合来为人眼提供舒适的观看效果,其中设备佩戴舒适度很大程度上依赖于光学器件的设计水平,例如,目前在设备的轻量化方面,基于全息光学元件(HOE)加工技术的衍射光波导模块可以将很多光学元件的功能(如光束会聚、发散、反射、分光等)集成在平面HOE上^[1],同时还具有光学穿透式观看效果,因而成为了当前实现微型化VR/AR的理想解决方案。而在视觉舒适度方面,则需要借助于硬件和算法的协同优化设计,高空间带宽积的空间光调制设备能够为VR/AR显示同时提供较大的观看动眼距和视场角,而算法则为产生具有临场感和高保真度的重建图像提供了一定的基础条件。目前在各种近眼显示的解决方案中,较为常见的技术路径包括双目立体显示、变焦显示、光场显示和全息显示。

双目立体显示技术是一种发展较为成熟的技术,已初步应用于多种VR/AR产品中,在近眼显示设备中,利用两个屏幕(或单个屏幕的不同部分)分别显示两个视角略有不同的图像,并通过特定设计的光路到

达左右眼,两幅图像通过人脑融合后,可以获得沉浸式三维体验^[2]。此类显示方式最大的缺陷是在观看时人眼的会聚平面与调焦平面不一致,会产生辐辏冲突(VAC),长时间观看后会导致严重的头晕和疲劳现象^[3]。此外,三维再现像是通过大脑将两幅不同视角的图像经过合成处理后的伪三维图像,与人眼观看真实世界时的三维感知方式有较大的不同。

变焦显示是为了解决双目显示中的辐辏冲突而快速发展的一种用于近眼显示的技术方案。在变焦中,通过空间或时间复用的方法创建出多个焦平面图像,形成一种在空间中同时存在的多平面显示模式,不同的平面图像显示三维内容中不同深度上的图像信息,因此也被称为多焦面显示。空间复用方法可以通过特殊的光路将微显示器(如LCD)上的不同区域通过一系列的分束器映射到不同位置的焦平面上形成主动投射式的多焦面显示^[4],也可以设计具有多焦点透镜功能的被动式衍射元件将微显示器上的不同子区域映射到不同的轴向位置^[5]。然而,由于将显示器件进行了多图像区域分割,该显示方式中图像的分辨率受到了极大的限制。在时间复用方法中,通常使用可调谐的变焦透镜来动态改变光学聚焦机制,配合微显示器进行时序控制,在不同的时间单位上将位于不同焦平面上的图像内容进行投影显示,利用时间先后顺序依次显示多个焦平面的图像,当刷新速度足够快时,人眼可以同时观看到多个平面上的内容,这种方法虽然可以保持高分辨率的显示,但是要求器件具有较高的刷新速率。此外无论是空间复用还是时间复用方案,都在进行变焦显示的设计中引入了很多额外的电机元件,这也极大地增加了近眼显示设备的复杂度,阻碍了设备的小型化和轻量化。

光场显示技术通过控制和重建空间中的光线信息(光线的强度和方向)来显示三维图像,是近眼显示技术的一个热门研究方向。在近眼光场显示中,通常使用微透镜阵列作为光线的调控器件^[6],将微显示器的多个像素集合成为一个宏像素整体,在宏像素中,每个具体的像素通过和其正前方的微透镜结合来控制发射的光线强度和方向,因此从微显示器所有像素发出的光线经过微透镜阵列调节后便可以看成是具有不同强度和方向的光线合集,这些光线将在空间中重建组合生成三维可视化图像。光场显示本质上可以看作一种以光线作为载体的较为粗糙和简略的波前调制,可以有效地克服辐辏冲突,为人眼提供精确和逼真的三维观看效果,同时微透镜阵列的使用也可以使整个系统具备更加紧凑的结构。然而在光场显示中,利用微显示器有限的空间带宽积对光线的强度和方向所组成的四维信息进行调节和重建时,将会导致重建图像的分辨率和三维深度效果存在较为严重的相互制约问题,这大大降低了实际的观看体验。尽管基于多层液晶显示器的光场近眼显示技术可以有效地克服这种制约问

题^[7],但是却以额外增加系统的复杂度为代价。此外,微透镜阵列的高成本也成为了阻碍近眼光场显示技术走向实用化的一个因素。

上述近眼显示技术有一个共同点:基于几何光学成像原理来实现三维图像的重建和显示。然而光的本质是电磁波,在自由空间及光学系统中以波的形式传播,受到系统孔径的限制会发生衍射及干涉等现象。传统的几何光学成像原理以光线作为基本模型,是对于波长远远小于系统特征尺寸条件下的近似分析,因此无法产生更准确和自然的光波调控能力,从而无法为人眼提供更加精确和自然的三维观看体验。与这些技术相比,全息显示通过干涉和衍射方式可将三维物体或场景发射的全部光波前信息进行精确和完整的记录及再现,并且通过人工波前调控还可以灵活地对波前进行额外的像差校正以便于满足不同视力人群的观看,是目前最理想的能够为人眼提供观看所需的所有三维视觉线索的技术^[8-9],因此被认为是下一代真三维近眼显示的终极解决方案。目前全息显示的实现过程如下:先在计算机中对三维物体到全息图平面的完整物理波前传播过程进行模拟计算,生成一张能够包含三维物体完整衍射波前的二维衍射图案,称为计算全息图(CGH),随后将这张计算全息图显示在光学衍射元件上并根据全息图的内容对入射的照明光束进行(振幅或相位的)像素级别的调制,调制后的衍射光束将按照原三维物体发射光波的传播方式进行一个“逆向波前重构”,将原三维物体的完整光波信息进行虚拟再现,此时人眼进行观看时就等同于是在观看原三维物体,因此可以获得所有的三维观看线索,实现具有临场感的真三维显示效果。与双目显示、变焦显示和光场显示相比,全息显示技术不仅在三维波前重建方面具有高精度度,同时由于衍射和干涉成像的原理,使全息显示可以在原理上不需要使用任何透镜等额外的光束偏折元件便可以在自由空间中进行三维图像再现、像差校正及面向不同视觉障碍的观看等多种功能,这对于近眼显示设备的小型化和轻量化具有很大的优势。因此从这两个优势因素来说,基于全息技术的近眼显示设备无论在佩戴舒适度还是在视觉舒适度方面都比其他的显示技术更具潜力。

本文主要从视觉舒适度方面对全息近眼显示技术的研究进展进行了调研和综述。首先简要介绍人眼视觉系统的基本知识,从而更好地了解与全息近眼显示设计相关的视觉感知方面的行为,然后分别从观看参数(动眼距和视场角)及观看内容(图像清晰度、三维波前重建、彩色效果)这两个影响视觉舒适度的角度回顾了国内外主要科研团队的研究成果,最后对全息近眼显示技术在未来的潜在应用前景方面所面临的问题和挑战进行了分析和总结。

2 人眼视觉系统

人眼视觉系统本质上可以描述为一个迭代感知的过程^[10-11],如图1所示。该过程从人的左右眼分别接收到周围环境中光信号的刺激开始,双眼接收到不同视角范围内的光信号刺激,并经过眼球的光学系统后分别聚焦到视网膜(“传感器”)上。随后再将视网膜接收到的信号传输到专门处理视觉信息的大脑皮层中,对所看到的信息内容进行认知、识别和理解,让我们最终了解所看到的内容,并进一步指导具体的行为来对眼前看到的环境进行作用,以此带来下一时刻的视觉刺激。

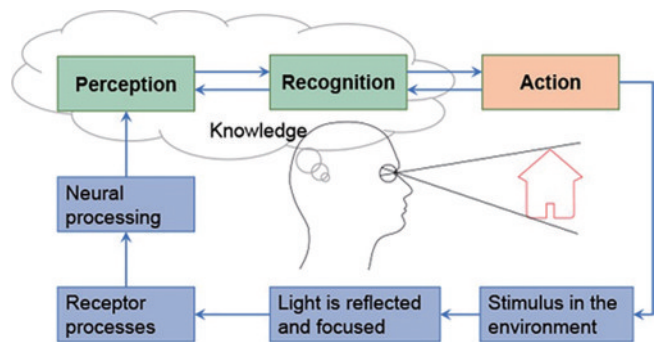


图1 人眼视觉系统迭代感知过程^[11]

Fig. 1 Iterative perceptual process of human visual system^[11]

人类约70%的信息是通过眼睛来获取的。人们所生活的现实物理世界是三维的,而人眼视觉系统主要通过心理线索和生理线索这两方面来感知三维信息。心理线索主要包括在日常生活中观察到的一些较为常见的视觉效果,包括阴影、透视、照明和遮挡等。这些心理线索可以通过显示一些经过计算机特殊设计和渲染后的二维图像来“欺骗”大脑,从而获得某些程度的三维视觉效果。生理线索则主要包含由单眼和双眼观看时产生的会聚、调焦、运动视差和双目视差这4个方面^[8]。在观看位于人眼正前方的三维场景或目标时,双眼的眼球将会进行不同角度的转动,使双眼的视线集中于所观看目标的一点上,这就是人眼视觉系统里的会聚。与此同时,人眼又可以随意调节眼球晶状体的肌肉,改变眼球对光线的聚焦能力,使人眼可以自由聚焦在不同距离的目标点上。一些传统技术不具备同时实现会聚和调焦一致的能力,例如,双目立体显示技术由于显示画面的位置固定,在观看时双眼需要将会聚位置锁定在显示画面上,而双目图像产生的三维内容又需要人眼不断改变眼球对焦位置进行三维深度信息的感知,这样便产生了会聚和调焦的冲突,从而导致了观看时的视觉疲劳,长时间的观看将会严重危害健康。因此,对于近眼显示设备来说,能够提供会聚和调焦一致的真三维显示画面是非常重要的。

视网膜上的感光层负责对进入人眼并投射到视网

膜上的光信号进行感知,该层由两种类型的光感受器组成:视锥细胞和视杆细胞^[10]。视杆细胞仅由一种光敏色素组成,通过提供单色光信号的反馈负责在弱光条件下的亮度感觉(暗视觉)。视锥细胞则针对不同的光波长分为 3 种类型,负责在明亮条件下感知颜色和细节(明视觉)。视杆细胞和视锥细胞在视网膜上具有不同的密度,完全由视锥细胞组成的视网膜中央区域被称为中心凹(foveal)区域(围绕眼球成像系统的中央光轴大约 5.2° 的区域),而更远的区域称为周边视觉(peripheral)区域。眼睛的视觉分辨率在中心凹达到最高,能够在此处生成十分清晰的图像,之后在区域之外的视觉分辨率便明显下降。近眼显示设备可以根据此特点来设计和优化所显示图像的分辨率,例如,在图像的中央区域设计高分辨率的显示图像以满足人眼在中心凹区域的观看清晰度和舒适度,而在周视区域可以适当减小图像的显示分辨率从而提高和优化数据的处理效率,避免显示冗余的视觉信息。

人眼是双目视觉系统,双眼的协同工作除了可以更好地感知三维立体信息外,还可以带来更加广泛的观看视角范围,双眼视觉可以在平视状态下提供接近 220° 的水平观看视场角(FOV)^[12]。图 2 显示了人眼双目视觉系统在不同水平角度区域内的感知情况。尽管整个观看视场角可以跨越 220° 的范围,但在大多数情况下,有效的双目观看范围仅局限于 120° 左右。因此,设计适应于人眼自然观看视野的近眼显示技术能够充分保证观看时的沉浸式体验。对于 VR 显示,人眼所看到的内容全部来自于设备的显示再现,因此需要为人眼提供约 100° 水平视场角的显示画面来满足人眼观看真实物理世界时的视野条件,从而获得良好的沉浸式观看体验。而对于 AR 设备来说,由于在最终显示效果中有真实环境内容的叠加,可以将设备所显示画面的最低水平视场角降至约 20° 便可在一定程度上保证虚实融合的沉浸式观看体验^[13]。

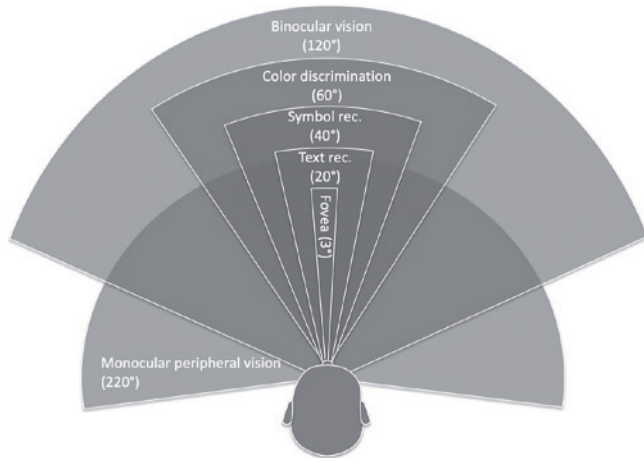


图 2 人眼视觉系统在不同视场角的内容感知^[12]

Fig. 2 Content perception of human visual system at different field angles^[12]

近眼显示不同于传统的屏幕式(如电视、电脑、手机屏幕等)显示方式,其显示设备在提供光学图像时的出瞳面需要与人眼的瞳孔进行有效衔接,以保证人眼能够接收到虚拟图像发射的全部光波信号,同时由于人眼瞳孔的位置被限定在很小的范围内,因此人眼只需要在一个较小的范围内实现对显示图像的观看,这个可以移动的观看范围被称为动眼眶(eyebow)。对于单眼来说,动眼眶一般是由于眼球的转动而使瞳孔可以移动覆盖的范围,在水平和垂直方向上均为 12 mm 左右,因此近眼显示系统的出瞳平面通常需要大于这一尺寸。对于任意光学显示系统来说,动眼眶与视场角的乘积通常为一个正比于系统空间带宽积的常数,这就意味着当显示系统固定后,动眼眶与视场角之间存在一个此消彼长、互相制约的关系。增加显示的动眼眶就意味着降低观看的视场角,反之亦然。因此,在近眼显示设备空间带宽积受限的情况下,需要针对这两个参数进行优化和取舍以保证观看体验,同时也需要不断努力突破光学系统空间带宽积的限制。

以上关于人眼视觉系统的描述内容可帮助更充分地了解人眼系统的工作原理及对三维世界的感知特点,从而为近眼显示设备的设计和 optimization 提供理论基础和指导。为了使设备提供最优的观看舒适度和沉浸式观看体验,需要设计最大化符合人眼视觉系统的全息近眼显示设备。

3 全息近眼显示:观看参数

3.1 动眼眶(eyebow)

尽管和普通的屏幕显示方式相比,近眼显示由于其佩戴和观看方式的特殊性已经将观看图像的动眼眶窗口限定在了以眼球转动为指标的微小范围内(毫米尺度范围),但由于当前全息显示系统有限的空间带宽积导致的动眼眶和视场角的互相取舍之间的矛盾,在毫米级尺度的动眼眶内来观看全息三维再现图像仍然是一个非常具有挑战性的任务。图 3(a)为基于傅里叶全息近眼显示系统,在该系统中全息三维图像重建于无穷远处,因此在空间光调制器之后使用傅里叶透镜将重建图像聚焦于傅里叶面前后的空间中,随后再使用作为目镜(eyepiece)的透镜对重建图像进行放大并将其重投影至无穷远处后进行三维观看。此时动眼眶的尺寸将根据傅里叶透镜和目镜的焦距比例对空间光调制器的面积进行缩放后得到。图 3(b)为基于菲涅耳全息的近眼显示系统。由于在菲涅耳全息图的生成算法中对全息图波前施加了等价于透镜功能的二次相位因子,该光路中全息图像通过自由衍射传播直接重建于空间光调制器之后一定距离的空间中而不需要使用任何透镜元件,之后同样使用目镜对全息图像进行放大和重投影后实现三维观看。此时动眼眶的尺寸与目镜的焦距(或目镜到眼球的距离)成固定的比例。考虑到近眼显示系统的轻量化和紧凑化的要求,

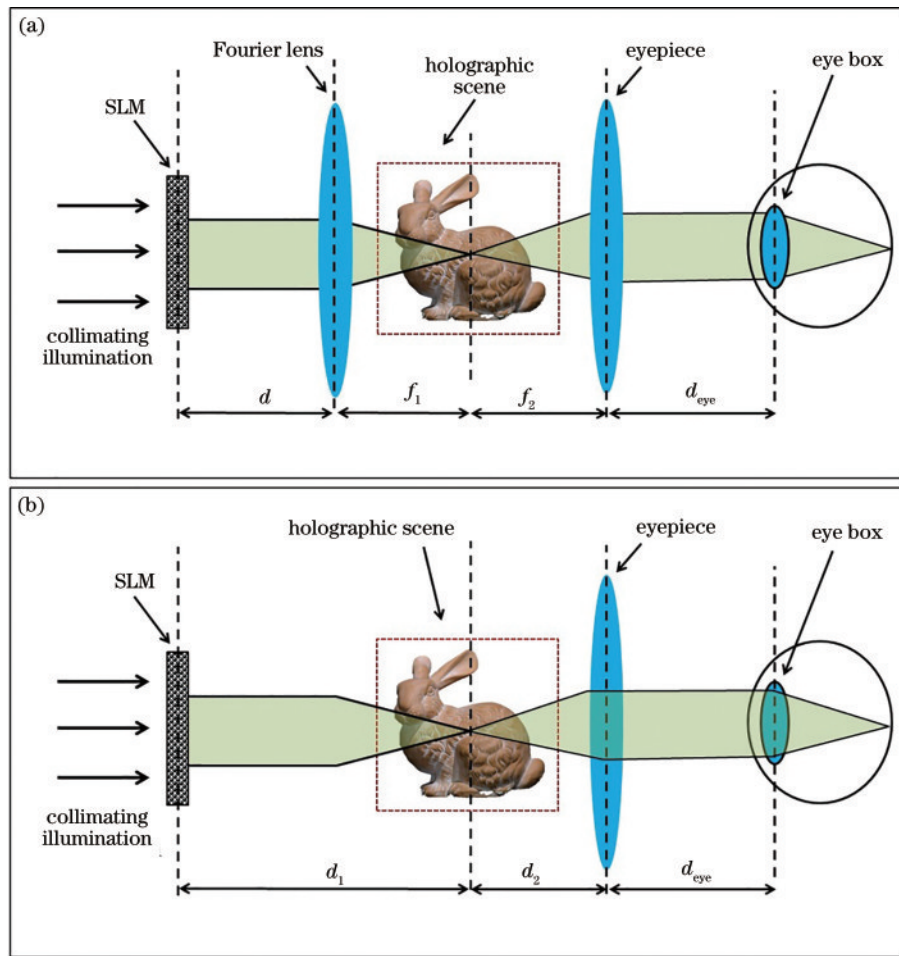


图3 基于傅里叶全息和非涅耳全息光路的全息近眼显示系统及其对应的动眼眶示意图。(a)基于傅里叶全息的近眼显示系统；(b)基于非涅耳全息的近眼显示系统

Fig. 3 Holographic near-eye display based on Fourier and Fresnel holography and their corresponded eyebox illustration.

(a) Holographic near-eye display based on Fourier; (b) holographic near-eye display based on Fresnel holography

基于非涅耳全息的光路系统通常会作为主要的全息近眼显示技术方案。

由于系统的空间带宽积受限,为了能够提供一定视角的观看画面,就需要相应地牺牲一部分动眼眶的尺寸,因此在全息近眼显示系统中动眼眶的尺寸通常无法满足人眼的观看舒适度,需要采用额外的手段来实现观看窗口的扩展,较为直接的思路是将原始系统中动眼眶的有效波前区域进行重复性的拼接从而实现动眼眶面积的成倍拓展,常见的拼接方法包括空间拼接法和时序拼接法。空间拼接法通常在系统中添加额外的分束元件(例如可以对入射光束进行特殊波前调制的全息光学元件HOE),将原光路中的光束进行分束后便可实现动眼眶波前光束的复制^[14-15],同时在空间中形成新的“动眼眶阵列”,将原始的动眼眶尺寸进行成倍的扩展。Park等^[16]使用此方法通过添加特殊设计的薄膜光栅将动眼眶在水平方向上实现了3倍面积的复制。随后该团队又结合空间光调制器的高阶衍射光束将动眼眶尺寸在垂直方向上扩展了3倍,最终实现了9倍(3×3)于初始动眼眶的观看面积,如

图4(a)所示^[17]。与之相比,时序拼接法则将位于不同位置的动眼眶波前先后在时间顺序上依次显示,如图4(b)所示,配合上同步多角度照明光路,可以在不同的时间使用不同角度的照明光束将全息图在波前横截面内平移到不同的位置上^[18],也可以将全息图施加不同的载频相位来实现全息图在波前横截面内的移动,在不同的时间上显示具有不同载频相位的全息图使其出现在相应的位置上。结合瞳孔追踪技术,可以根据不同时刻瞳孔所处的位置进行快速实时的照明光束或全息图的变换和显示,使位于不同位置的动眼眶在不同的时间节点上进行拼接,实现动态的动眼眶扩展效果,如图4(c)所示^[19]。从上述两种技术的分析中可以看出:空间拼接法通过特殊的光学分束元件直接在空间上形成大面积的动眼眶,该方法可以实现固定的大尺寸动眼眶,然而动眼眶面积的扩展能力受限于分束元件在空间带宽上的设计和制造;而时序拼接法则在理论上可以实现更大范围的扩展,但是却牺牲了系统的时间带宽,对空间光调制器件、照明光束的角度变换装置及瞳孔追踪装置的帧率都有非常高的要求。

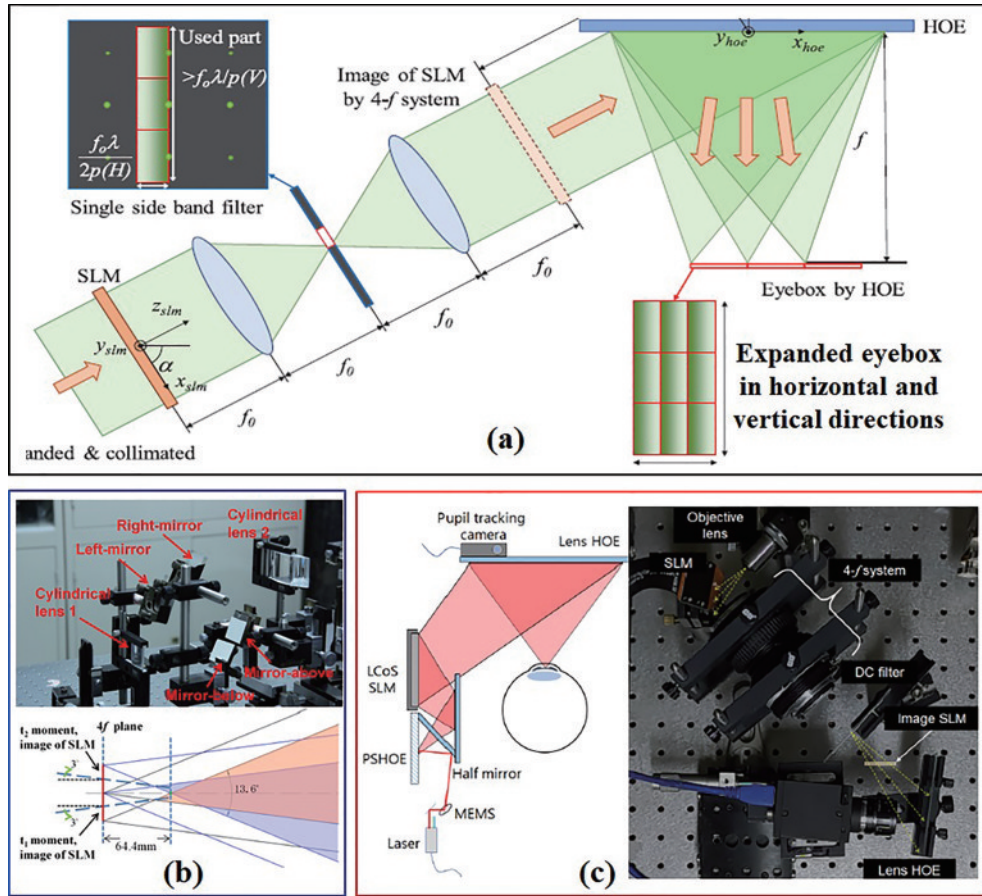


图4 动眼扩展方法。(a)空间复用方法^[17]；(b)基于不同角度照明拼接的时间复用方法^[18]；
(c)基于载频相位和眼瞳追踪技术的时间复用方法^[19]

Fig. 4 Eyebox expansion. (a) Spatial multiplexing^[17]; (b) temporal multiplexing based on multiple illumination and spatial tiling^[18];
(c) temporal multiplexing based on phase shifting and pupil tracking^[19]

因此,对于动眼扩展技术来说,本质上还是要追求具有更高的空间或时间带宽的全息显示器件来实现足够大的全息图像观看窗口。

3.2 视场角

在全息近眼显示中,视场角(θ_{FOV})通常被定义为所显示的图像对人眼的张角,大的观看视场角对于保证良好的沉浸式观看体验是非常重要的。然而与动眼扩展的情况相似,光学显示系统在空间带宽积上的局限性同样极大地限制了视场角的范围。在全息显示系统中,用于显示全息图的空间光调制器件的衍射角直接决定了整个系统的观看视场角。在平面波照明条件下,空间光调制器件的衍射角的表达式为

$$\theta_{diff} = \arcsin(\lambda/2p) \approx \lambda/2p, \quad (1)$$

式(1): λ 代表照射光波的波长; p 代表空间光调制器的像素尺寸。目前常用的商业化型空间光调制器的像素尺寸大约在 $3.5 \sim 12 \mu\text{m}$ 左右,因此在直接以衍射角作为观看视场角的情况下可计算出全息重建图像的视场角通常不超过 10° (视场角约为衍射角的2倍)。例如,对于像素尺寸为 $3.5 \mu\text{m}$ 、分辨率为1080p的空间光调制器来说,在 532 nm 的绿色激光照明显示下,其水平

方向的观看视场角可通过衍射角公式计算: $\theta_{FOV} = 2\theta_{diff} \approx \lambda/p \approx 8.7^\circ$ 。这样的角度范围对于达到高舒适度观看的要求还相差甚远。从衍射角的计算公式可以看出,将空间光调制器的显示面积进行光学缩放后来减小像素的尺寸是增大视场角的一种有效方法,如图5(a)所示,若通过共轭成像光学将空间光调制器所在的平面以0.5的缩放因子共轭成像于4f系统的出瞳面上,得到像素尺寸 $p = 3.5/2 \mu\text{m}$ 的虚拟全息图平面,新的视场角则根据衍射公式重新计算: $\theta_{FOV} \approx \lambda/p \approx 17.4^\circ$,由此可以将观看视场角扩大一倍。然而,由于受到显示系统空间带宽积的限制,视场角的增加往往会以牺牲动眼扩展为代价,因此为了保证足够的动眼扩展尺寸来观看全息图像,视场角也还无法增大到能满足合格观看舒适度的程度。

全息近眼显示系统的视场角通常与衍射角直接相关,因此一个有效增加视场角的方法是引入一定角度的照明光束来取代平面波照明,这样便可以通过增加入射光束的角度来增加系统的衍射角。在使用发散或会聚光束照明的情况下,衍射角的计算公式可重写为

$$\theta_{diff} = \arcsin(\lambda/2p) + \theta_{in} \approx \lambda/2p + \theta_{in}, \quad (2)$$

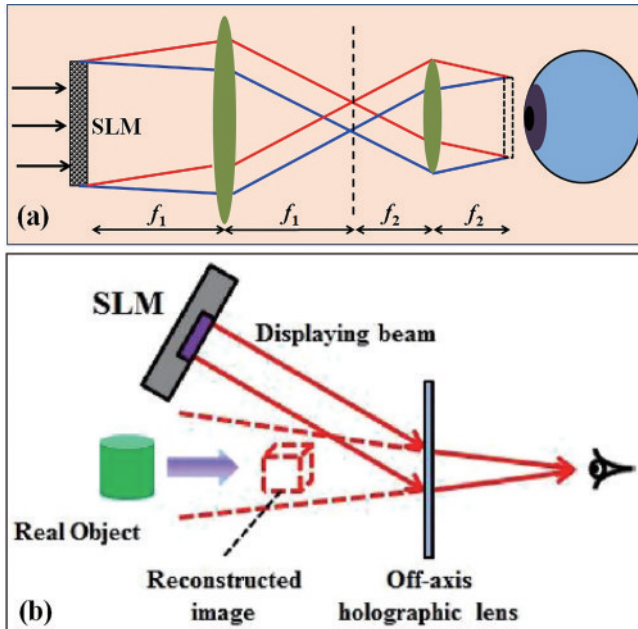


图5 视场角扩展。(a)通过共轭成像来增大视场角；(b)通过离轴全息透镜来增大视场角^[20]

Fig. 5 FOV expansion. (a) FOV enlargement through conjugate imaging; (b) FOV enlargement through off-axis holographic lens^[20]

式中： θ_{in} 是照明光束的入射角。从式(2)可以看出，增加照明光束的入射角将提高最终系统的衍射角，因此与平面波照明相比，使用球面波光束进行照明将拥有更大的观看视场角^[21]。值得注意的是，在这种情况下整个系统的空间带宽积仍然是固定的，因此使用球面波照明的方式来增加观看视场角本质上也是以牺牲动眼眶为代价。以会聚球面波照明为例，此时系统的出瞳也已不再是空间光调制器的有效面积，而是会聚球面波在其聚焦平面上的有效衍射光斑，该焦平面的波前与空间光调制器平面的波前则互为傅里叶变换的关系，因此可以将动眼眶看作是位于空间光调制器的傅里叶频谱面上。

除了使用球面波照明光束增加衍射角外，还可以在全息近眼显示系统中引入额外的光学衍射元件来对波前进行调制，从而改善和提升观看性能。在图5(b)中，来自苏州大学的研究人员在空间光调制器之后放置了一个离轴全息衍射透镜对衍射光束进行会聚，利用离轴全息透镜替代传统目镜进行视角扩大。同时该全息透镜还具有波长选择性，可以实现穿透式的观看，将全息重建图像与人眼前方的环境光进行叠加实现增强现实的观看效果^[20]。

如果要在不牺牲动眼眶的情况下扩大视场角，增加系统的空间带宽积就成为了一个十分必要的艰巨任务。根据之前的分析可知，系统的空间带宽积直接正比于所使用的空间光调制器的像素数目，因此提高空间带宽积的最直接思路就是增加可以对波前进行调制的像素数目。传统的空间带宽积扩展方法包括空间复

用法和时间复用两种。空间复用采用多个空间光调制器进行空间上的拼接来实现具有大像素数量的全息波前调制^[22-27]，这种方法虽然可以提升整个系统的空间带宽积，但其庞大的调制器数量、质量、体积及高昂的成本对于近眼显示设备来说不太现实。与之相比，时间复用利用空间光调制器的不同帧在时间上先后显示图像的不同内容进行拼接来实现视场角的扩展^[28-34]，该方法对调制器的帧频要求较高，同时为了将不同帧显示的内容在不同位置上进行拼接，还需要配合不同角度的照明光束。因此传统的空间带宽积扩展方法都面临不同程度的挑战。

区别于传统的空间复用或时间复用方法，新兴的空间带宽积扩展方法则直接使用新型的波前调制元件来扩大全息图微显示器件的像素数目或调制自由度。基于亚波长微纳结构的超表面材料可以实现比普通液晶空间光调制器更小(约300 nm)的像素化波前调制单元，因此在同样的显示面积上可以设计更多的像素数目，极大地扩展了空间带宽积，也可以将视场角大幅度提高(约60°)，同时由于超表面全息图轻薄的二维尺度结构也使其在未来近眼显示设备的轻量化设计上极具潜力^[35-37]。然而目前超表面全息图的缺点是无法实现高动态的全息波前调制，同时制备成本较高、制备时间较长。与直接制备超高像素密度的空间光调制器件相比，另一个极具潜力的方法是在系统中添加额外的非周期波前调制元件，通过对光束的非周期性衍射或散射来打破原阵列像素化空间光调制器的周期性衍射规律，从而进一步增加衍射光束的空间频率带宽来增加衍射角，与动态空间光调制器一起组合后实现高带宽和高自由度的新型“组合波前调制”方式^[38-41]。

图6(a)展示了来自韩国KAIST机构的研究人员于2017年首先报道的使用全息散射介质来扩大光波衍射角度的方法^[40]，在数字微镜(DM)调制器后添加全息散射元件，将原DM调制器件的衍射角提高了约2600倍，这是一个十分可观的提高量。然而基于随机散射介质的波前重建需要对系统进行十分复杂的矫正过程，并且波前调制的精度低下。随后该课题组在2019年对该方法进行了改进，将全息散射介质换成了非周期光子筛器件，并直接紧贴于LCD微显示屏的后方^[41]，如图6(b)所示，非周期光子筛是由一系列位置随机分布的微小孔径组成的，每个孔径与LCD的像素一一对应，其作用是破坏原本周期性排列的LCD像素结构，使像素的位置进行非周期性的伪随机排列分布，这样的非周期排列破坏了原本的周期性衍射级次，使原先高衍射级次的光线可以在波前重建中被利用，从而增加光束调制的自由度，本质上与随机散射介质有异曲同工之妙。总的来说，当前新兴的空间带宽积扩展方法在全息三维波前的调节精度与传统空间复用或时间复用方法相比处于劣势，但在系统轻量化设计上的优势使得其在全息近眼显示光学设计上具备一定的竞争力。

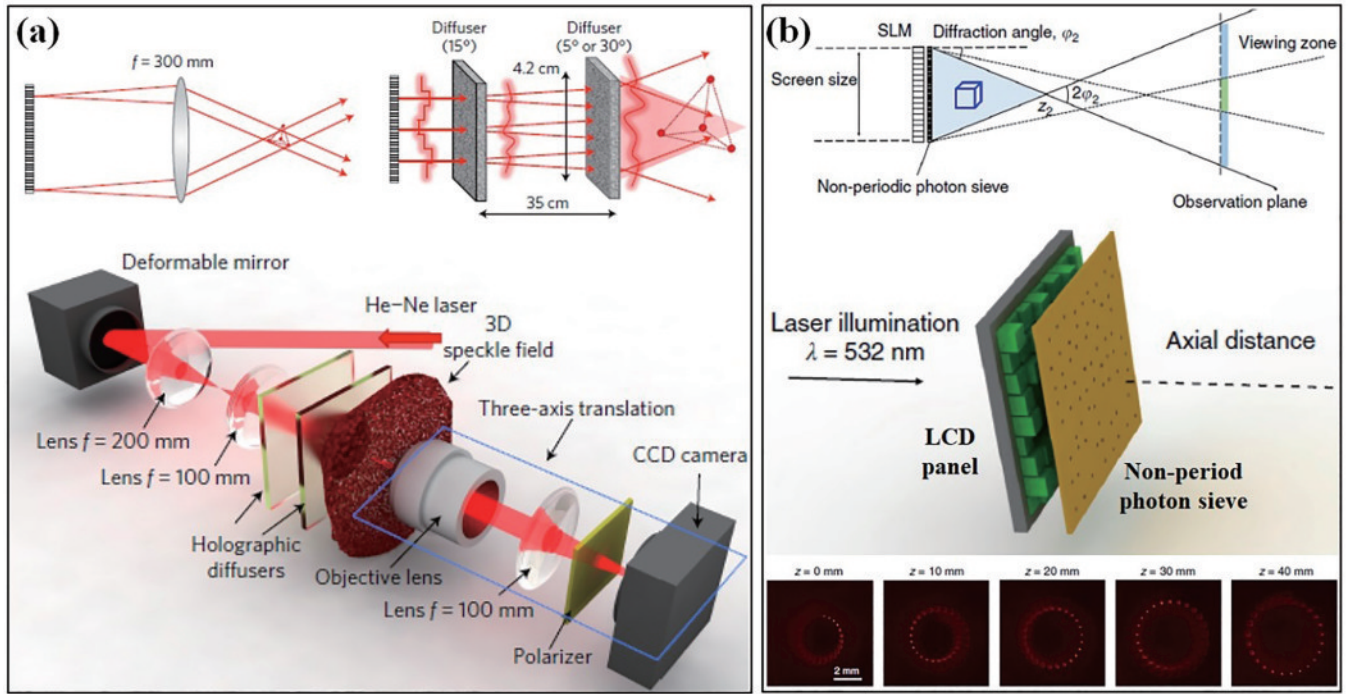


图 6 基于非周期波前调制的空间带宽积扩展。(a)利用全息散射介质^[40]；(b)利用非周期光子筛^[41]
 Fig. 6 Spatial bandwidth product expansion based on non-period wavefront modulation. (a) Using holographic scattering media^[40];
 (b) using non-period photon sieve^[41]

值得注意的是,尽管全息近眼显示系统的视场角和动眼眶都可以在系统空间带宽积扩展后得到提高,但是由于人眼瞳孔活动范围的局限性使得近眼显示技术对提升动眼眶的需求较为有限。因此相比于动眼眶的提高,很多全息波前空间带宽积扩展的工作或许更加注重于提高观看视场角方面的表现。

4 全息近眼显示:观看内容

4.1 观看清晰度(衍射噪声)

由于全息显示是基于相干衍射和干涉原理对光波前进行调控和重建的,在全息显示中通常使用具有高相干性的激光来作为照明光源。然而,高相干性激光的使用会导致重建图像中产生明显的散斑噪声,严重影响用户的观看体验。在全息显示中,入射到全息图上的光波前根据全息图的分布进行振幅或相位的调制,调制后的波前继续衍射传播后在指定的空间位置重建出特定的三维光波。通常基于像素化空间光调制器的全息显示系统由于衍射置限效应导致重建光波无法实现对于三维物点的理想聚焦,反而形成了具有一定尺寸的衍射光斑,光斑之间互相重叠的区域经过再次干涉叠加之后形成了最终人眼所观看的图像效果(这里忽略了人眼瞳孔的衍射影响)^[42]。在干涉叠加过程中,由于光束具有高相干性,各光斑的相位对最终叠加后的图像效果起着重要的作用,当光斑之间的相位呈现随机分布时,相干叠加后的光斑由于存在相消干涉的影响呈现出随机性的强度分布,产生了显著的散斑噪声。散斑噪声的存在严重影响了全息图像的观看

质量,因此有效抑制散斑噪声对于实现高观看舒适度的全息近眼显示设备十分必要。散斑噪声的抑制通常采用噪声平均和相干性抑制两种主流技术路线,其中相干性抑制又可以根据空间相干性和时间相干性进一步分为复振幅调制法和弱相干照明法。

由于散斑噪声以图像上的随机强度分布的形式存在,最直接的散斑抑制方法就是按时间顺序依次显示多个具有不同独立散斑噪声的重建图像,在高速显示的条件下,利用人眼视网膜对多个图像光信号的停留效应,在光信号停留时间内将多个具有不同随机强度特性的散斑噪声图像在视网膜上进行强度平均,这样可以将不同图像中不相关的散斑噪声图案进行匀化处理,从而降低图像的散斑对比度,提高图像的信噪比,有效抑制所显示内容的散斑噪声。在全息图的计算中,通常会对目标三维物体施加随机相位分布使其成为漫射体后再计算其传播到全息图的波前,因此在时间平均法中,通过对目标三维物体依次施加一系列具有统计独立的随机相位分布后再分别计算出每个随机相位物体对应的全息图。这些全息图在人眼视网膜的光信号停留时间内以高帧率依次加载并显示于空间光调制器上,重建图像中的散斑噪声被平均化后得到有效的抑制^[32,43-48]。图 7(a)中展示了高速叠加 20 张基于随机相位漫射体计算的全息图后的散斑抑制效果^[43]。研究表明,如果时序显示 N 张相位无关的全息图,那么经过平均后的重建图像中散斑对比度将下降 \sqrt{N} ^[46]。该方法实现方式较为简单,因此被广泛用于全息显示中散斑噪声的抑制。与散斑噪声平均化原理不同,另

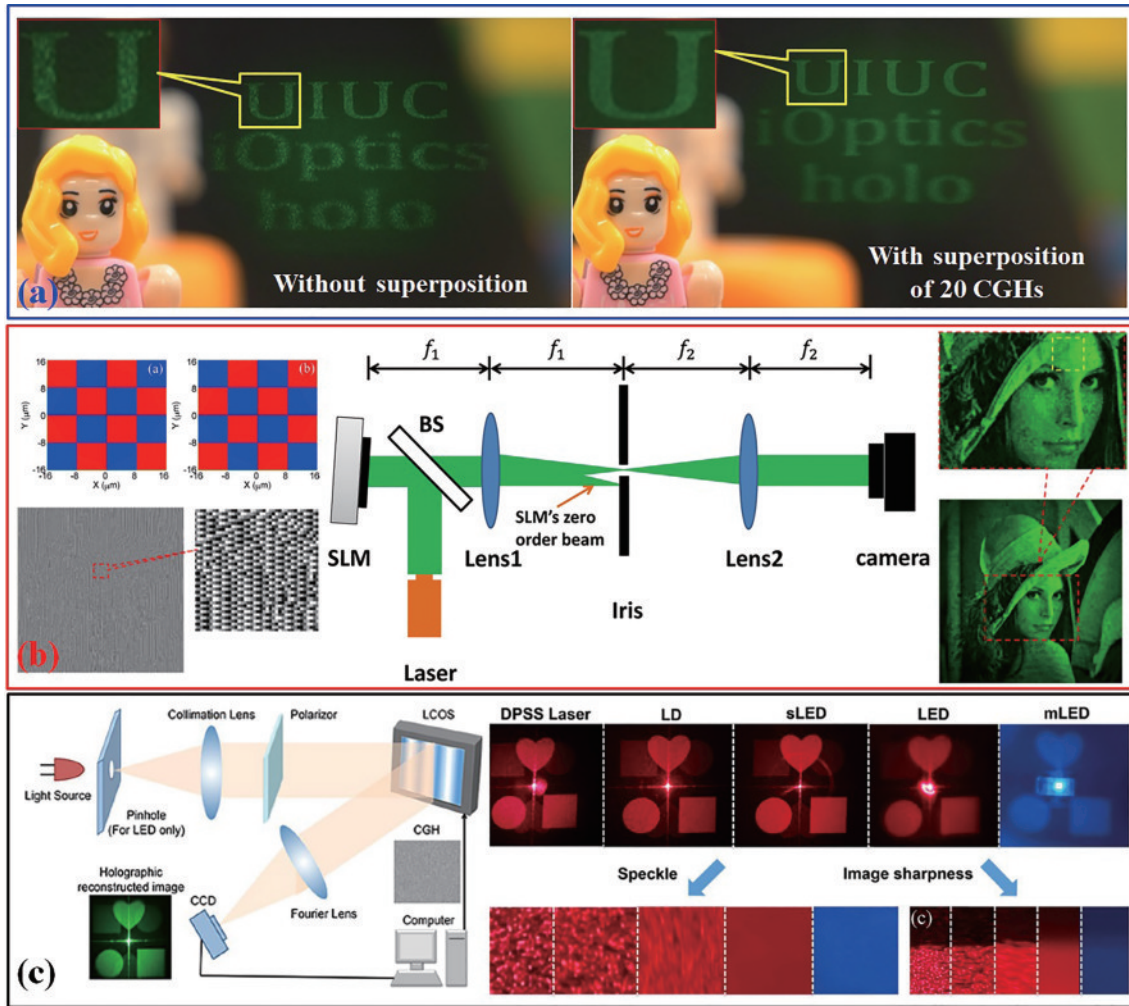


图 7 全息显示中的散斑抑制。(a)时间平均法^[43];(b)基于双相位编码的复振幅调制法^[50];(c)部分相干光源照明法^[51]
 Fig. 7 Speckle noise suppression. (a) Time average method^[43]; (b) double-phase based complex amplitude modulation^[50];
 (c) partially coherent illumination^[51]

一种时间平均方法则将目标图像通过不同的下采样方式分割成一系列像素分离的子图像,每张子图像单独计算一张对应的全息图,由于子图像中相邻像素距离较远,在重建时相邻的像素光斑并未发生重叠从而未发生随机相消干涉,因此不会产生散斑噪声,这样通过时序显示所有子图像对应的全息图后便可以将全部像素在时间顺序上全部显示完整,实现无散斑噪声的全息再现^[42,49]。尽管时间平均法可以用较为简单的光学系统结合特定的全息图算法来实现散斑抑制,然而其缺点也较为明显。显示一个不受散斑噪声影响的清晰全息图像,需要计算和显示多张全息图,这对全息图的计算效率及空间光调制器件的刷新速率有很高的要求。同时由于显示一帧图像消耗了太多调制器件的时间带宽,现有器件的帧率无法再进一步显示高动态的全息视频。因此,需要寻求能够通过单张全息图来实现散斑噪声抑制的方法。

复振幅调制法是基于单张全息图从光的空间相干性原理出发来抑制散斑的一种方法。由于人眼仅能感知到相干光波信号的振幅(强度)信息,全息图通常仅

负责重建图像波前的振幅分量而相位分量则呈现随机状态(如时间平均法中施加随机相位的漫射体模型),这便导致了相邻光斑之间的相位容易出现较大的变化,再次干涉之后产生与目标图像相差较大的干涉相长或相消(即亮暗程度不同的散斑噪声)。因此,全息图在重建时不仅需要调制目标图像的振幅分量,还要同时调控图像像素光斑的相位信息,使光斑之间经过再次干涉之后的强度分布能够得到有效的控制,不出现随机无序的强度变化,这就是复振幅调制的最终目的。由于常见的空间光调制器仅显示纯相位全息图,基于相位型全息图的复振幅调控成为了近年来的研究热点。目前常见的方法主要包括迭代优化法和光栅编码法。在迭代优化法中,较为直接的思路是以传统的GS相位恢复算法为基本框架,在全息显示的目标图像波前上除了施加振幅约束外,同时再施加一个均匀的相位约束,以此构成“振幅+相位”的双重约束条件来进行迭代优化,使得到的相位全息图可以在经过衍射传播之后同时重建出精确的振幅信息和相位信息^[52-53]。此外,通过设计数字化重建图像与目标图像

之间损失函数的梯度下降算法通过不断迭代搜索最优的相位全息图也可以实现高质量的全息显示效果^[54-56]。光栅编码法则将全息图平面的复振幅波前通过一定的算法直接编码到纯相位光栅中作为相位全息图。在全息图重建时,目标复振幅信息被隐含在特定的衍射级次中,通过空间滤波系统进行选择性滤波后便可将所需的目标复振幅波前完全恢复^[50,57-61]。

图 7(b)显示了一种较为常用的双相位编码方法,该方法首先将目标复振幅函数分解为两个双相位函数的和,再将双相位函数通过周期性棋盘格光栅采样后编码为相位全息图^[50]。与迭代方法相比,光栅编码方法计算速度较快,复振幅的调制精度较高,是目前使用比较广泛的全息复振幅调制方法。复振幅调制法通过调控重建图像中的相位信息来实现散斑噪声抑制,已被证明可以实现高质量的全息图像重建^[60-61]。然而,该方法由于给重建图像的波前施加了均匀或平滑的相位分布,等价于将原目标物体建模成向特定角度发射光波的非漫射体(例如施加均匀相位的镜面反射体),这类模型与漫射体模型相比具有十分有限的数值孔径,导致三维重建图像中的景深分辨能力受限(即不同空间距离的物体聚焦模糊效果不明显),在一定程度上影响了三维立体视觉效果,因此该方法对于能否合理地实现全息真三维显示效果来说还有待于更进一步的研究和讨论^[47]。

除了基于空间相干性原理来抑制散斑噪声外,减少光源的时间相干性是另一种基于单张全息图来抑制散斑的有效方法。由于全息显示系统不需要完美的单色照明,通常采用部分相干光源(即足够窄的波段并且具有较小的发射面积)来提供低时间相干性的照明。

同时,为了从这些照明中获得全息重建所需要的空间相干性,需要在光源后增加额外的空间滤波来增强光源的空间相干性。单色或白光 LED 可以作为很好的部分相干光源,并且已经广泛用于全息近眼显示的散斑噪声抑制^[51,62-64]。使用部分相干光源的缺点是其较低的时间相干性会导致图像轻微模糊(降低图像清晰度)及限制三维图像的深度范围。此外,用于空间相干性增强的针孔滤波器系统也会给系统的通光效率造成很大的损失。除了使用 LED 外,其他具有高空间相干性和低时间相干性的光源也可以作为全息近眼显示设备的理想光源选择,获得具有消除散斑的高质量全息图像。剑桥大学的研究人员使用各种部分相干光源进行实验后发现,超发光二极管(sLED)和微型发光二极管(mLED)在各方面性能上是较为合适的全息显示光源^[51],如图 7(c)所示。

大多数传统的全息图计算模型都是基于理想的光学显示系统来进行计算的,因此当全息图被显示在真实光学系统中进行重建时,由于实际的光学系统在许多方面都偏离了理想的系统参数,不可避免地会导致图像质量的下降。针对此问题,斯坦福大学的研究人员将物理光学系统加入全息图优化算法中^[65-68]。研究人员在全息图像观看位置放置了一个摄像头来捕捉光学重建的全息图像,并将此图像与理想图像进行比较后对全息图进行迭代优化,如图 8(a)所示。在每次迭代中,全息图都朝着减少光学重建图像与理想目标图像之间误差的方向进行更新,根据该优化策略最终得到的全息图将在光学系统中显示出非常高质量的全息图像^[65]。图 8(b)则显示了研究人员进一步将该方法从二维图像显示拓展到了真三维图像显示的成果^[66]。

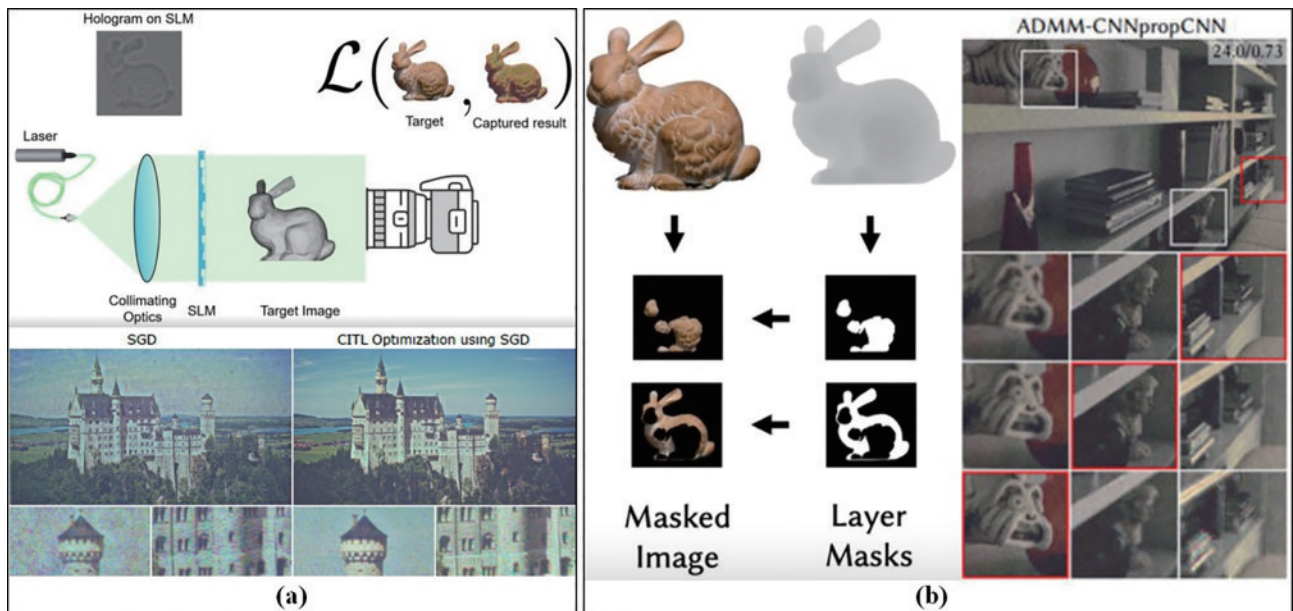


图 8 基于光学重建图像反馈的全息图优化。(a)二维图像显示效果^[65]; (b)三维图像显示效果^[66]

Fig. 8 Optimization of hologram from feedback of optical captured image. (a) Camera-in-the-loop optimization for 2D holographic display^[65]; (b) camera-in-the-loop optimization for 3D holographic display^[66]

除了相干散斑噪声外,由于空间光调制器件具有像素化结构,像素之间存在微小的间隔,而入射到间隔部分的光则不参与全息图的波前调制,直接被器件的基底材料进行反射或透射后形成零级衍射光束,该光束直接叠加在全息重建图像上形成零级衍射噪声,影响图像的观看质量。尽管零级衍射噪声可以通过引入透镜组合进行滤波后消除,但是对于近眼显示设备来说该方法增加了系统的复杂度和体积,难以满足系统紧凑性和轻量化的要求。因此零级衍射噪声的抑制可以从硬件和算法两个层面来寻求解决。目前大多数空间光调制器设备在进行像素化调制时都具有偏振选择特性,即只对特定偏振方向(如水平线偏振光)的入射光束进行调制,同时在调制过程中会根据所调制的相位产生偏振方向的改变,而像素间隙反射的零级光波则维持了入射光束的偏振方向。因此可以通过控制入射光束的偏振态以及在空间光调制器之后施加检测偏振片来一定程度上消除零级衍射噪声^[60]。不过该方法需要空间光调制器具有较大(远大于 2π)的相位调制范围。另一方面,本着“既然无法消除,就想办法加以利用”的原则,可以将零级衍射光束也看成是参与重建全息图像的光波来加以利用。来自阿卜杜拉国王科技大学的研究人员把零级衍射光束对全息重建光波的影响加入构建波前衍射逆运算的计算模型中,进行全息图的协同优化算法设计,这样便可以在全息图重建时将所有的光束一起进行衍射重构后再现出高质量的全息图像^[69],解决了零级衍射噪声带来的烦恼。

4.2 三维波前重建

在全息近眼显示中,为了方便地计算从目标三维物体或场景发射的光波到全息图平面的衍射传播,通常需要先对三维目标进行数字化渲染,获得目标的三维模型,该模型数据能够充分表达三维场景发射的空间光波信息。随后采用数值衍射算法模拟计算三维模型发出的光波到全息图平面的物理衍射传播过程,获

得从三维场景传播到全息图平面的完整数字化光波前信息并进行编码后生成计算全息图(CGH)。计算全息图记录了三维物体发射的全部光波前信息,将其显示于空间光调制器上并对入射的相干光源进行调制后,便可通过衍射传播后在观看者眼中再现出原物体完整的真三维波前,结合光学穿透式系统设计,能够为人眼提供具有真实临场感和沉浸式的虚实融合真三维显示效果。目前常用的数字化三维模型通常以几何模型和图像模型两种数据形式进行表征和存储^[70]。因此全息图的数值生成算法可以被归纳为基于这两种模型数据的算法,并最终根据不同三维模型的渲染特点再再现出人眼观看所需的三维信息。

几何模型通常包含点云模型和多边形模型,前者将三维物体看成是由大量单独发射的离散点光源组成的,通过计算所有点光源衍射波前的相干叠加来得到全息面上的波前信息^[60]。点云模型对三维物体的表达精度较高,然而由于其逐点衍射计算的特点导致计算效率很低。采用查找表、波前记录平面等算法可进一步对计算进行加速^[71],例如,在图 9(a)所示的波前记录平面算法中,在距离三维点云很近的距离建立一个中间平面(波前记录平面)后以该平面为界将计算分为两个阶段,使得整个过程所需计算的采样点数量大幅度减少^[72-73]。虽然比起传统逐点衍射算法有了极大的提升,但离实时计算仍有差距。而多边形模型则利用计算机图形渲染软件的强大功能将三维物体利用微小的多边形进行模拟,如图 9(b)所示,每个小多边形作为单独的发光面发出光波,该模型的衍射计算本质上是计算无数个与全息图具有倾斜空间几何关系的倾斜平面到全息图平面的传播^[74],相比于点云计算,这种(倾斜)平面之间的衍射计算可以借助于快速傅里叶变换算法(FFT)进行加速,因此具有相对较高的计算效率。然而多边形模型对三维物体形貌的依赖程度较高,计算效率也随着渲染精度的提高而下降,并且较多

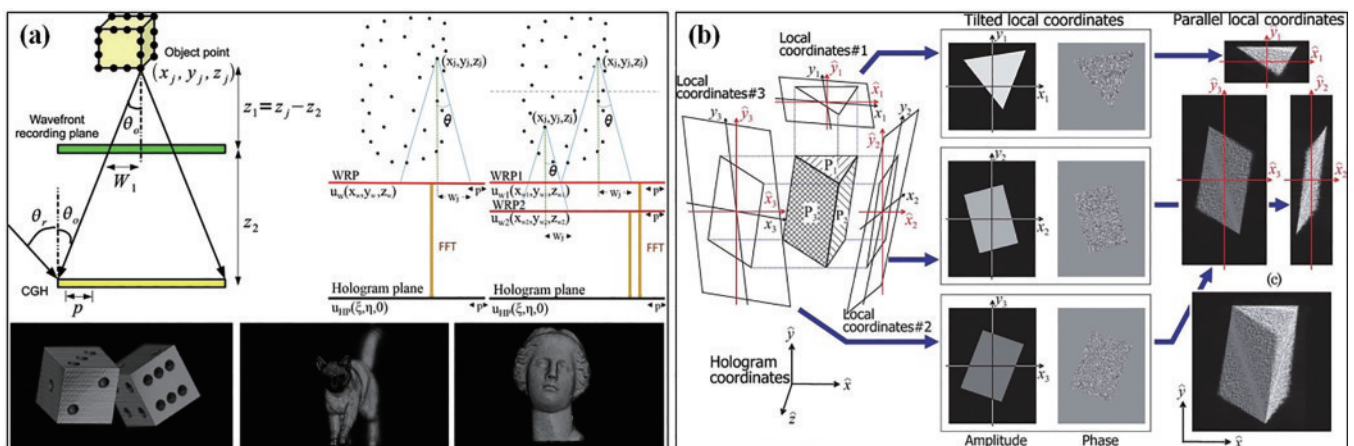


图 9 基于几何模型的全息图波前计算。(a)点云模型中采用波前记录平面加速衍射计算^[73];(b)多边形模型中的几何关系^[74]
Fig. 9 CGH generation based on geometry models. (a) Point-cloud based CGH algorithm accelerated by wavefront recording plane^[73];
(b) local coordinates of polygon based algorithm^[74]

应用于计算机创造的虚拟三维物体,难以计算和显示真实物理环境下的三维目标。

与几何模型相比,图像模型由于其广泛性和实用性在渲染、存储和计算方面具有一定的优势。同时图像模型还易于集成复杂物理现象如折射、镜面反射、阴影、光泽等真实物理效果,有利于提升全息显示的真实感,因此近年来逐渐成为了全息图计算的主要三维数据源。基于图像的三维模型也分为两种:多平面模型和光场模型。多平面模型可以从点云或 RGB-D 三维数据转化得到,将目标场景内容近似量化为多个位于不同深度的二维平面图像,从而将逐点衍射计算简化为平面之间的快速衍射计算并采用基于快速傅里叶变换的算法来实现加速,同时还可以有效地保留高分辨率三维深度信息^[43-44,75-76]。图 10(a)显示了剑桥大学的研究人员使用改进的多平面算法提升全息图的计算效率并实现了全息增强现实的观看效果^[44]。多平面内容的全息图算法由于模型简单、计算效率较高得到了较为广泛的使用。然而基于多个平面图像来对复杂连续性的三维场景进行渲染时,需要考虑平面图像的数量与三维深度分辨能力的取舍关系,平面分割的数量越多,所渲染的三维深度信息越精确,但计算复杂度也将成比例上升。通常对于计算机中常见的 256 灰阶图像格式来说,采用 RGB-D(即三维目标的“彩色强度图+256 灰阶深度图”)的方式可以将目标图像按照 256 阶灰度的深度图来精细分割为 256 张代表不同深度平面上的内容图像,因此最大需要计算 256 个衍射传播,再配合先进的人工智能算法,可以在普通消费级硬件上实现全息图的实时计算生成^[61],并且该 256 级的深度

分割也足够达到较为优秀的三维观看效果。因此配合 RGB-D 形式的多平面模型在全息近眼显示中展现出较大的潜力。与之相比,光场模型也可看成是基于图像的数据模型。与多平面图像在深度方向上的采样不同,光场数据中的图像可以看成是对三维目标场景在不同角度的拍摄采样。光场数据本质上是目标光线信息的收集,根据平面波的角谱衍射理论,将全息图看成是由一定数量、单独发射不同角度光线集的微小全息元(Hogel)构成的,如图 10(b)所示,从而建立了目标场景的光场信息与每个子全息元角谱之间的传播关系,并根据此关系实现光线信息和全息图波前信息的转化^[77]。每一个全息元可以看作是将全息图中的多个子像素拼合组成的一个“宏像素”,整个宏像素在计算时可近似看作是对应于某个角度的光场图像中的一个像素,而宏像素中的每个子像素则代表了光场数据中的角度方向采样,因此当一张全息图的分辨率确定后,在全息图计算时需要考虑光场数据中图像的空间分辨率和角度分辨率的取舍问题,当每个角度图像的分辨率较大时(对应于全息重建图像中较高的分辨率),所需采样角度的数量随即减少(对应于全息重建图像中较低的三维深度分辨能力),反之亦然,因此传统的光场全息图无法同时兼顾重建图像的高分辨率和高三维深度感这两方面。近年来,通过全息元重叠覆盖的方法,使相邻的全息元可以进行子像素的共享^[78-80],不需要牺牲像素数量来进行角度和空间分辨率的取舍,可以在有限的全息图分辨率内对具有高空间分辨率和高角度分辨率的光场数据进行全息波前计算和转化,同时实现高空间分辨率和高三维深度感的全息再现图像。

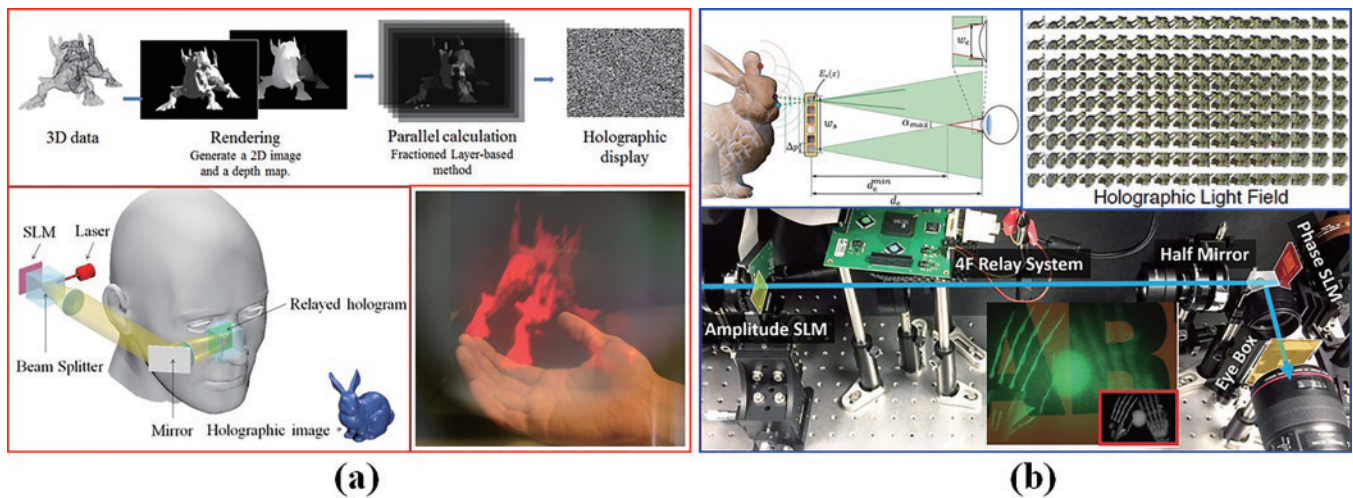


图 10 基于图像模型的全息图波前计算。(a)多平面模型的全息图计算和显示^[44]; (b)光场模型的全息图计算和显示^[77]

Fig. 10 CGH generation based on image models. (a) Hologram calculation and display of multi plane model^[44]; (b) hologram calculation and display of light field model^[77]

值得注意的是,由于近眼显示系统中动眼眶的范围通常为毫米到厘米的级别,对于实现单目观看的全息近眼显示设备来说,重建的三维图像中对于能否实现遮挡内容的观看(体现在 4 种基本三维线索中的双

目视差和运动视差)则要求较低。由于眼睛瞳孔被限制在有限的移动范围内,在移动中也很难捕捉到被前景遮挡住的背景内容信息,对于近眼显示的三维观看效果来说会重点注重三维深度信息的再现能力,而对

前后遮挡内容的计算和显示则相对较为弱化,这与通常基于屏幕的裸眼三维显示器(允许大范围的移动观看)中需要呈现出一定的遮挡效果以满足双目视差和运动视差的情况来说是有一些区别的。基于此分析,在面向全息近眼显示的波前计算中,从三维光波到全息图的衍射计算可相对注重提高计算的效率而牺牲对于复杂光波环境(如前后遮挡内容)的计算设计需求,因此使用相对简单和高效的基于图像模型(如典型的代表“投影式”三维深度信息的RGB-D数据)的全息图算法将有望成为主要思路。

由于人眼视网膜在围绕光轴 5° 左右的范围内具有较高的分辨率感知(中心凹区域),在远离眼球中心区域其分辨能力则随着角度的增大而逐渐下降。因此,可以根据人眼视觉在信息感知方面的特点对全息近眼显示中的任意三维模型数据进行不同分辨率的中心凹渲染处理,提高或保留所显示图像内容中位于中心凹区域内的采样点数量以确保在显示时提供较高的观看分辨率,而适当降低位于外围周视区域内的采样点数量使其仅够维持简单的周视背景效果即可,从而通过优化目标三维数据的采样分布来实现对全息图计算的加速^[81-84]。与此同时,中心凹渲染技术也可以与眼动追踪技术结合,当人眼在观看中进行转动时,使用眼动追踪设备实时追踪和探测人眼的注视方向,从而对所显示三维内容中的不同区域进行动态实时的中心凹渲染、计算和再现。

4.3 彩色效果

尽管在很多情况下,单色显示已能够满足一些应用的需求(例如在一些仅需显示特殊符号、标识、指示信息的应用领域),但全息近眼显示的终极目标仍然是在面向更加复杂的应用场景中提供真正让人舒适和沉浸的真三维视觉画面,因此实现全彩色的显示效果对于提升人眼的观看体验仍然是十分重要的。由于相干光波的衍射计算具有波长独立性,1张全息图只能在特定的单色波长照明下再现其记录的三维图像内容。在彩色全息显示中,首先采用3基色分解法将彩色三维目标的三维模型数据分解为红绿蓝3基色分量各自对应的独立单色三维模型数据,然后再分别针对各自颜色分量的三维模型来计算不同颜色分量波长下的全息图,得到3张分别记录着红绿蓝3基色分量内容的全息图。在光学显示系统中,只需利用红绿蓝3基色的相干光源分别对各自基色的全息图进行照明和重建,将各自基色分量的图像内容在空间中同一位置进行再现和混合后便可重新合成出全息彩色图像。因此,可以简单地将彩色全息显示看成是对3种单色模型的独立重复性全息计算和显示,并在显示过程中将3个基色的重建内容进行空间混合来得到最终的彩色显示效果。根据这一原理,最简单的彩色全息图显示便是将3张全息图分别显示在3个空间光调制器上,然后分别用红绿蓝3色光源照明,通过一定的光学设计方法将3

个颜色的重建图像在空间中同一位置实现重合。然而由于近眼显示设备对体积、质量及成本具有较为苛刻的要求,该方法通常难以适用于全息近眼显示。

时间复用法通常在1个空间光调制器上按时间顺序依次显示红绿蓝3基色的全息图,并配合同步控制系统分别控制红绿蓝3色光源进行各自同步的独立照明^[85-87]。例如,当空间光调制器上显示红色分量全息图时,系统将控制红色光源进行单独照明而关闭其他颜色的光源。绿色和蓝色全息图的控制和显示方式依此类推。只要在人眼视网膜的光信号停留时间内以高速刷新速度依次显示出红绿蓝3色图像,人眼便可将3色图像进行非相干的强度混合后合成出彩色的图像。时间复用法在全息图的计算和显示方面较为简单,本质上是将红绿蓝不同波长的全息图进行3次独立的计算和显示,主要依赖于硬件上的自动化时序控制系统及空间光调制器的高显示帧率,成本较高。同时还可以进一步结合消散斑技术实现高清晰度的彩色全息显示。例如在图11(a)中,首尔国立大学的研究人员利用DMD的高速调制特性实现了基于时间复用的消散斑全彩色全息AR显示效果,DMD的高刷新速率可以在人眼的视觉停留时间内快速显示多张3基色波长的重建图像,因此可以同时实现基于时间复用的散斑噪声匀化抑制效果及彩色图像融合效果^[47]。图11(b)则显示了北京理工大学的研究人员结合复振幅调制技术和时间复用技术实现的彩色全息AR显示^[87]。

空间复用法则通过特殊的算法将红绿蓝3色分量的全息波前信息编码到1张全息图中,并配合特定的光路设计将红绿蓝3色分量的重建图像同时显示在空间中的同一位置进行彩色图像的融合。较为简单的全息图生成方法是首先分别独立计算红绿蓝3基色分量的全息图,然后将3个颜色的全息图进行拼接后合成为1整张全息图。在光学重建时,将空间光调制器的划分为面积相同的3个区域,每个区域负责显示1个颜色分量的全息图,并在每个区域配合对应颜色的光源照明^[88]。该方法本质上是将1个空间光调制器的有效显示面积进行3等分后分割成3个子显示器,在每个子显示器上分别显示对应颜色的全息图进行彩色重建,其缺点是通过面积分割降低了彩色全息图像的显示分辨率。更加先进的方法则是通过复用编码算法将红绿蓝3基色全息图波前通过不同的离轴传播角度同时混合到1张完整分辨率的全息图中,该全息图同时包含了3基色全息图波前,如图12(a)所示,在显示时可使用白光LED光源直接对全息图进行照明,3基色分量的重建光波将在频谱面上进行分离,经过滤波后各颜色分量的图像独立在空间中进行重建并最终实现彩色融合^[89]。为了使近眼显示设备具备更紧凑和更轻量化的结构,通常使用轻薄的光波导元件实现光束的偏折,传统的方法通常先由空间光调制器件显示并调制全息图,随后重建的全息图像经过光波

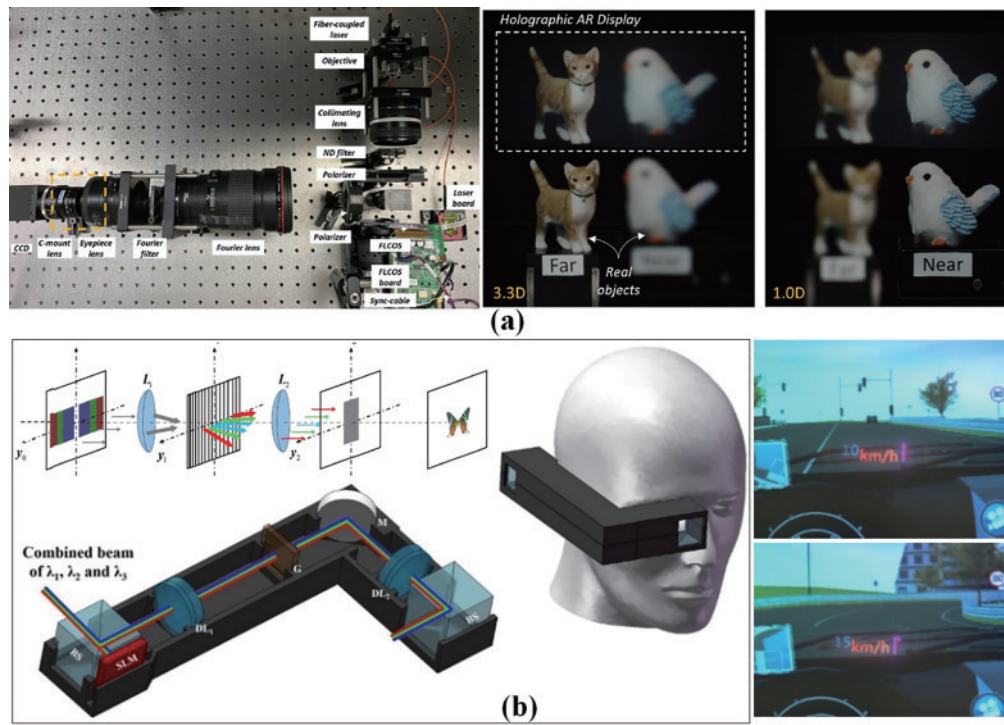


图 11 时间复用实现全彩色全息近眼显示。(a)基于高帧率DMD的时序彩色全息AR显示^[47]；(b)基于波前复振幅调制的时序彩色全息AR显示^[87]

Fig. 11 Full-color holographic near-eye display based on temporal multiplexing. (a) Temporal multiplexed full-color holographic AR display by using high frame rate DMD^[47]; (b) temporal multiplexed full-color holographic AR display combined with complex amplitude modulation optics^[87]

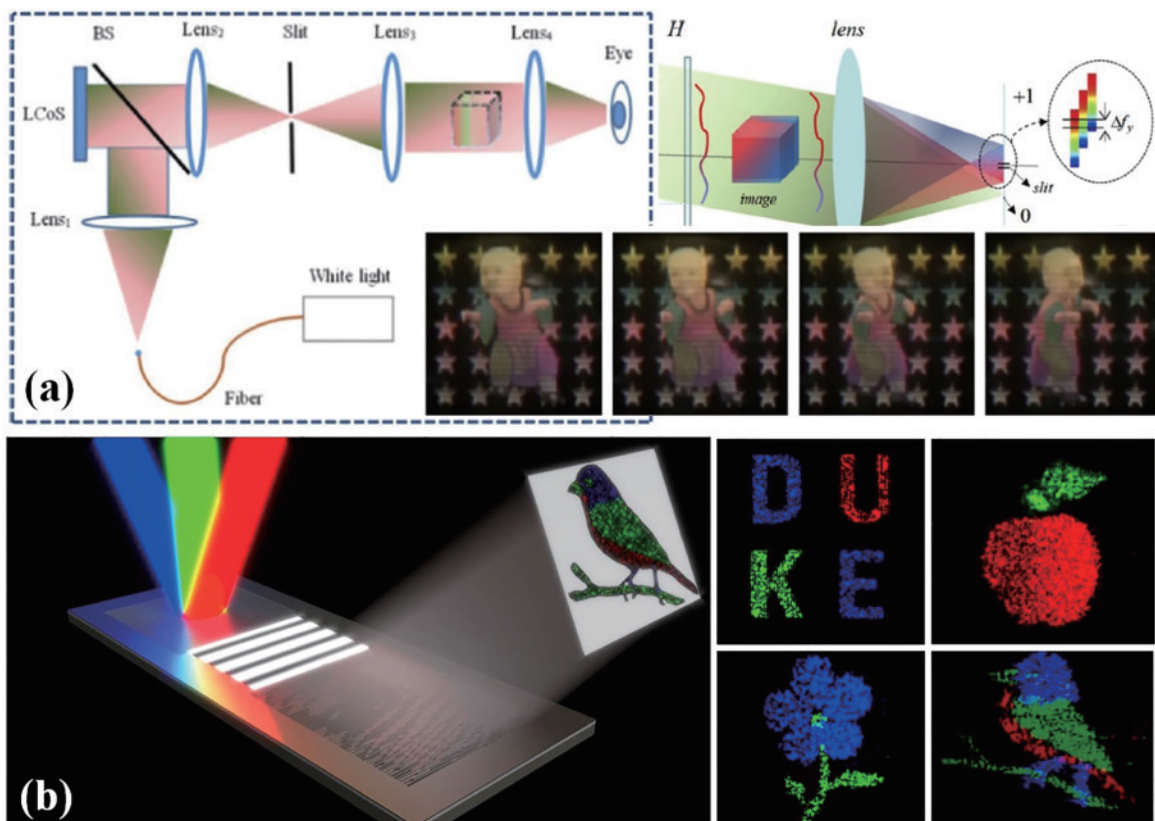


图 12 空间复用实现全彩色全息近眼显示。(a)频谱滤波^[89]；(b)波导超表面全息图^[90]

Fig. 12 Full-color holographic near-eye display based on spatial multiplexing through. (a) Frequency filtering^[89]; (b) waveguide metasurface hologram^[90]

导的耦合输入和耦合输出光栅调制后偏折进入人眼进行观看,此时光波导主要负责对全息重建光波进行传输路径的调整,为了实现彩色重建效果,通常在波导上曝光多层结构的体全息光栅对红绿蓝 3 基色全息重建光波进行耦合调节。近年来随着微纳加工技术的发展,可以直接将全息图的波前调制功能制备于波导上,使波导在对入射光波或出射光波进行耦合时,可以同时实现全息图的波前调制,大大节省空间光调制器件的使用成本。在图 12(b)的工作中,红绿蓝 3 色光波通过光栅以不同的照明角度耦合进入光波导,在耦合输出端通过精密制备的二元超表面全息图对 3 色光波进行调制后在人眼中合成重建出彩色全息图像^[90]。

5 全息近眼显示的应用展望

未来已来。尽管近年来许多公司都在竞相研发消费级别的可穿戴 VR/AR 设备,希望为人们提供能够将虚拟世界和现实世界进行实时无缝融合的全新显示

体验,但目前的产品距离所需要的足够的舒适度和沉浸感体验还很遥远。前文根据观看参数和观看内容这两个主题对全息近眼显示技术进行了分类总结归纳。全息显示最大的优势是能利用单张全息图将任意多维度空间光波前信息(三维目标发出的真三维彩色波前信息以及其他光束调制元件包含的波前调制信息)进行完整的记录,并通过自由空间衍射传播进行精确重建。因此基于全息显示的下一代 VR/AR 光学有望实现非常紧凑的结构设计和低成本的系统配置。基于全息显示的原理,可以仅使用微型光源、空间光调制器件、体全息衍射元件等通过集成后实现眼镜式的 AR 设备,如图 13 所示^[60]。全息近眼显示技术无疑将在未来继续快速发展,为广泛的潜在应用开辟新途径。要将全息近眼显示技术推向消费级市场,需要找到一些“杀手级应用”并为其开发合适的技术/产品。下面从室内和室外两个场景对全息近眼显示可能的应用前景进行讨论。



图 13 可穿戴式全息 AR 眼镜原型及潜在应用场景^[60]

Fig. 13 Compact prototype of holographic AR glass and its potential applications^[60]

室内场景——全息近眼显示设备将在娱乐、教育和医疗等室内活动中具有一定的应用潜力。首先,娱乐行业将最大限度地利用 VR/AR 技术的优势,但游戏并不是 AR 和 VR 在娱乐领域的唯一应用。电影院、文艺演出、博物馆等场所都可以利用 VR/AR 的技术来推广他们的产品并吸引更多的客户。通常来说,VR 显示是娱乐领域中最受欢迎的实现方式,因为它为用户提供了完整封闭的沉浸式体验。与其他 VR 显示技术相比,全息 VR 显示的独特优势在于其能够轻松地为用户创建具有自然的、无视视觉疲劳的真三维显示效果。通过与动眼追踪、手势识别、体感设备相结合,用户还可以和所显示的虚拟三维内容进行交互来进一步增强 VR 产品的娱乐体验。例如,在 VR 游戏中可以尝试使用手势或身体动作来代替传统的硬件设备,实现

游戏所需的操作和命令,仿佛自己置身于真实的三维世界中,增强游玩的真实感,而在 AR 游戏中则可以在现实世界中通过穿透式光学显示和虚拟重建的三维物体进行虚实结合的互动体验(例如著名的增强现实游戏 Pokemon Go)。在基于 VR 显示进行博物馆、文艺展览或虚拟购物时,可以使用不同的手势命令与虚拟的全息三维重建物体进行指令互动(如旋转、缩放等操作)。此外,配合真实场景的数字化实时三维拍摄、获取、重构和建模等技术,为全息图提供真实场景的实时三维数据模型,用户便通过全息显示体验跨越当前所处时空的行为事件,如欣赏虚拟人物和场景的艺术表演和音乐会、体验远在千里之外的世界各地的旅游景点等。在教育领域,全息近眼显示设备可以在课堂教学中通过在眼前显示虚拟三维模型来帮助增强对知识

的理解与练习(例如显示物理三维模型或自然地理场景),同时也可以通过与全息重建的三维模型进行手势互动来开展一些虚拟实验等方面的教学。此外,全息 VR/AR 显示可以使教师实现远程实时授课,使教师和学生可以根据需求在各自舒适的环境中进行场所独立的教学活动。例如,当专家在进行面向大众化的公开授课或专题讲座时,可以使用全息 AR 技术使在世界不同地方的不同人群都实现身临其境地学习。医疗健康是全息 AR 的另一个具备潜力的应用,由于全息显示系统的紧凑特点及真三维显示效果,可以提供无视觉疲劳的长时间佩戴观看,全息图可以在医务工作者眼前触手可及的范围内实时显示患者的器官、组织等真三维再现图像,同时配合全息图的数字化多功能波前调制,可以通过添加不同的相位调制快速方便地对空间中的虚拟全息图像进行旋转、移动、缩放等交互式全息调控功能,以便于医生进行远程精确诊断。此外还可以通过全息图将人体骨骼、肌肉、内脏器官等通过虚实融合的全息 AR 光学显示在皮肤上,提供一种仿佛能够“看穿”皮肤和身体的感觉,帮助医生进行更高级别的无接触式诊断、注射或特殊手术等操作。所有这些应用情景都将使全息三维图像随时随地显示在医生眼前,从而代替位于固定位置的平面显示器图像。

室外场景——未来的 AR 眼镜被认为是手机乃至所有移动便携式电子设备的终极进化。理想状态下甚至期望能够像现在的眼镜一样一直保持日常佩戴状态。当人们在户外环境中行走或驾驶时,将使用 AR 眼镜进行通信、发送/接收消息、查看应用程序等各种操作。与室内应用场景不同的是,近眼显示设备在室外活动中更多将聚焦于和现实世界进行信息交互的虚实融合活动,其特点是全息重建图像不再以能够重建高精度复杂和逼真的虚拟三维物体或场景为主要目标,而是将逐渐趋向于在眼前不同的观看聚焦位置通过自适应调焦方式显示简单的可视化平面信息(例如文本信息、符号标识、简单图片等),并重点关注于所显示内容与眼前所观看真实场景内容的指向性融合。在这种情况下,基于数字化全息波前编码的灵活自由变焦调节功能将会发挥巨大的作用。与室内应用中全息三维图像需在眼前固定距离内具有自然且准确的三维深度观看线索不同,在室外环境下由于人们在具有更加广阔视野的环境中进行活动,全息 AR 眼镜应当能够通过实时改变全息图的波前调制能力在不同变焦显示类型之间进行切换。例如,当全息 AR 眼镜需要向正在行走或驾驶中的人显示文本/电话消息、地图/交通导航或其他引导式的虚拟平面图像时,无论人眼此时聚焦注视于眼前近处或远处任何距离的景色,都应始终保持为人眼提供能够清晰观看的虚拟图像,以避免人眼在观看真实场景和虚拟图像时由于所需聚焦位置不同而频繁进行眼球调焦切换造成眼部不适甚至发生危险。在这种情况下,全息 AR 图像应该随着眼睛

对现实世界中不同目标距离的观看而自适应地聚焦在人眼前正在观看的实际深度位置。这种显示效果通常被定义为全焦深(all-in-focus)显示,可通过使用基于超大景深波前调节的全息视网膜投影显示技术^[91-96]或能够在不同深度距离上同时显示多个无串扰图像的全息多平面显示技术^[97-98]来实现。另一方面,当全息 AR 眼镜需要向正在观看单独目标(如建筑物或静止的人等)的人显示独特的指示或说明时,需要在眼前特定距离位置进行全息图像的显示,当眼镜从一个目标向另一个目标移动时,需要即时更新所显示的内容并且随着新目标的距离和位置来改变图像的重建距离实现正确的观看调焦。这种全息显示效果可通过普通的全息图算法配合实时调焦相位因子来实现。可以肯定的是,全息显示由于其灵活的三维波前调控能力,有望在更多的应用场景中展现出多样化的功能,以取代目前所有的便携式设备,包括智能手机、平板电脑、相机、手表、导航、手持游戏机甚至笔记本电脑。

6 结 论

随着 VR/AR 市场需求的不断增加,推动观看舒适的全息近眼显示技术从基础研究走向应用化道路是十分重要且艰巨的任务。当前全息显示技术存在很多待突破的瓶颈问题,仍无法满足消费级市场的需求。但全息显示以其特有的真三维波前调控重建方式及基于衍射成像的轻量化系统设计成为了未来近眼显示设备的理想化技术方案。本综述从视觉舒适度的角度总结和回顾了全息近眼显示在观看动眼眶、观看视场角、全息图像噪声抑制、三维波前计算和重建、全彩色融合等方向近年来的研究进展,并对未来潜在的应用场景进行了讨论和展望。在未来的全息近眼显示研究中,时空带宽积的扩展、散斑噪声的抑制、全息图的高效实时生成及基于新型波前调制器件的系统优化设计等方面将会成为解决全息显示众多瓶颈问题的重要研究方向。作者希望能够与广大同领域的研究人员一起努力在全息近眼显示技术方面取得新的突破,期待在未来能够建立真正的全息元宇宙世界。

参 考 文 献

- [1] Park J H, Lee B. Holographic techniques for augmented reality and virtual reality near-eye displays[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(1): 114-127.
- [2] 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.
- [3] Kersten D, Legge G E. Convergence accommodation[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1983, 73(3): 332-338.
- [4] Akeley K, Watt S J, Girshick A R, et al. A stereo display prototype with multiple focal distances[J]. *ACM*

- Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 804.
- [5] Cui W, Gao L. Optical mapping near-eye three-dimensional display with correct focus cues[J]. Optics Letters, 2017, 42(13): 2475-2478.
- [6] Lanman D, Luebke D. Near-eye light field displays[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(6): 220.
- [7] Huang F C, Chen K, Wetzstein G. The light field stereoscope: immersive computer graphics via factored near-eye light field displays with focus cues[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(4): 60.
- [8] Geng J. Three-dimensional display technologies[J]. Advances in Optics and Photonics, 2013, 5(4): 456-535.
- [9] Wakunami K, Hsieh P Y, Oi R, et al. Projection-type see-through holographic three-dimensional display[J]. Nature Communications, 2016, 7: 12954.
- [10] Goldstein E B, Brockmole J. Sensation and Perception [M]. Cambridge: Wadsworth Publishing, 2016.
- [11] Koulieris G A, Akşit K, Stengel M, et al. Near-eye display and tracking technologies for virtual and augmented reality[J]. Computer Graphics Forum, 2019, 38(2): 493-519.
- [12] Kress B C. Optical architectures for augmented-, virtual-, and mixed-reality headsets[M]. Bellingham: SPIE, 2020.
- [13] Kress B, Starner T. A review of head-mounted displays (HMD) technologies and applications for consumer electronics[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8720: 87200A.
- [14] Jeong J, Lee J, Yoo C, et al. Holographically customized optical combiner for eye-box extended near-eye display[J]. Optics Express, 2019, 27(26): 38006-38018.
- [15] Duan X H, Liu J, Shi X L, et al. Full-color see-through near-eye holographic display with 80° field of view and an expanded eye-box[J]. Optics Express, 2020, 28(21): 31316-31329.
- [16] Park J H, Kim S B. Optical see-through holographic near-eye-display with eyebox steering and depth of field control[J]. Optics Express, 2018, 26(21): 27076-27088.
- [17] Choi M H, Ju Y G, Park J H. Holographic near-eye display with continuously expanded eyebox using two-dimensional replication and angular spectrum wrapping [J]. Optics Express, 2020, 28(1): 533-547.
- [18] Liu Y Z, Pang X N, Jiang S J, et al. Viewing-angle enlargement in holographic augmented reality using time division and spatial tiling[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 12068-12076.
- [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): 195.
- [20] Su Y F, Cai Z J, Zou W L, et al. Viewing angle enlargement in holographic augmented reality using an off-axis holographic lens[J]. Optik, 2018, 172: 462-469.
- [21] Chen Z D, sang X Z, Lin Q J, et al. A see-through holographic head-mounted display with the large viewing angle[J]. Optics Communications, 2017, 384: 125-129.
- [22] Yaraş F, Kang H, Onural L. Circular holographic video display system[J]. Optics Express, 2011, 19(10): 9147-9156.
- [23] Fukaya N, Maeno K, Nishikawa O, et al. Expansion of the image size and viewing zone in holographic display using liquid crystal devices[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2406: 283-289.
- [24] Kozacki T, Kujawińska M, Finke G, et al. Extended viewing angle holographic display system with tilted SLMs in a circular configuration[J]. Applied Optics, 2012, 51(11): 1771-1780.
- [25] Gao H Y, Xu F, Liu J C, et al. Holographic three-dimensional virtual reality and augmented reality display based on 4K-spatial light modulators[J]. Applied Sciences, 2019, 9(6): 1182.
- [26] Sasaki H, Yamamoto K, Wakunami K, et al. Large size three-dimensional video by electronic holography using multiple spatial light modulators[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6177.
- [27] Hahn J, Kim H, Lim Y, et al. Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators[J]. Optics Express, 2008, 16(16): 12372-12386.
- [28] Li J, Smithwick Q, Chu D P. Full bandwidth dynamic coarse integral holographic displays with large field of view using a large resonant scanner and a galvanometer scanner[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 17459-17476.
- [29] Lum Z M A, Liang X N, Pan Y C, et al. Increasing pixel count of holograms for three-dimensional holographic display by optical scan-tiling[J]. Optical Engineering, 2013, 52(1): 015802.
- [30] Li J, Smithwick Q, Chu D P. Scalable coarse integral holographic video display with integrated spatial image tiling[J]. Optics Express, 2020, 28(7): 9899-9912.
- [31] Li G, Jeong J, Lee D, et al. Space bandwidth product enhancement of holographic display using high-order diffraction guided by holographic optical element[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33170-33183.
- [32] Lee B, Yoo D, Jeong J, et al. Wide-angle speckleless DMD holographic display using structured illumination with temporal multiplexing[J]. Optics Letters, 2020, 45(8): 2148-2151.
- [33] Li J, Smithwick Q, Chu D P. Holobricks: modular coarse integral holographic displays[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11: 57.
- [34] 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: 188.
- [35] Hu Y Q, Luo X H, Chen Y Q, et al. 3D-integrated metasurfaces for full-colour holography[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 86.
- [36] Huang L L, Zhang S, Zentgraf T. Metasurface holography: from fundamentals to applications[J]. Nanophotonics, 2018, 7(6): 1169-1190.
- [37] Jiang Q, Jin G F, Cao L C. When metasurface meets hologram: principle and advances[J]. Advances in Optics and Photonics, 2019, 11(3): 518-576.
- [38] Kuo G, Waller L, Ng R, et al. High resolution étendue

- expansion for holographic displays[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2020, 39(4): 66.
- [39] Choi W Y, Lee C J, Kim B S, et al. Numerical analysis on a viewing angle enhancement of a digital hologram by attaching a pixelated random phase mask[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(4): A54-A61.
- [40] Yu H, Lee K, Park J, et al. Ultrahigh-definition dynamic 3D holographic display by active control of volume speckle fields[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(3): 186-192.
- [41] Park J, Lee K, Park Y. Ultrathin wide-angle large-area digital 3D holographic display using a non-periodic photon sieve[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1304.
- [42] Makowski M. Minimized speckle noise in lens-less holographic projection by pixel separation[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29205-29216.
- [43] Chang C L, Cui W, Gao L. Holographic multiplane near-eye display based on amplitude-only wavefront modulation [J]. *Optics Express*, 2019, 27(21): 30960-30970.
- [44] Chen J S, Chu D P. Improved layer-based method for rapid hologram generation and real-time interactive holographic display applications[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18143-18155.
- [45] Amako J, Miura H, Sonehara T. Speckle-noise reduction on kinoform reconstruction using a phase-only spatial light modulator[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(17): 3165-3171.
- [46] Buckley E. Real-time error diffusion for signal-to-noise ratio improvement in a holographic projection system[J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(2): 70-76.
- [47] Lee B, Kim D, Lee S, et al. High-contrast, speckle-free, true 3D holography via binary CGH optimization[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 2811.
- [48] Golan L, Shoham S. Speckle elimination using shift-averaging in high-rate holographic projection[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1330-1339.
- [49] Takaki Y, Yokouchi M. Speckle-free and grayscale hologram reconstruction using time-multiplexing technique [J]. *Optics Express*, 2011, 19(8): 7567-7579.
- [50] Qi Y J, Chang C L, Xia J. Speckleless holographic display by complex modulation based on double-phase method[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 30368-30378.
- [51] Deng Y B, Chu D P. Coherence properties of different light sources and their effect on the image sharpness and speckle of holographic displays[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 5893.
- [52] Sun P, Chang S Q, Liu S Q, et al. Holographic near-eye display system based on double-convergence light Gerchberg-Saxton algorithm[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10140-10151.
- [53] Chang C L, Xia J, Yang L, et al. Speckle-suppressed phase-only holographic three-dimensional display based on double-constraint Gerchberg-Saxton algorithm[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(23): 6994-7001.
- [54] Chakravarthula P, Peng Y F, Kollin J, et al. Wirtinger holography for near-eye displays[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2019, 38(6): 213.
- [55] Wang D, Li N N, Li Y L, et al. Curved hologram generation method for speckle noise suppression based on the stochastic gradient descent algorithm[J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 42650-42662.
- [56] Chen C, Lee B, Li N N, et al. Multi-depth hologram generation using stochastic gradient descent algorithm with complex loss function[J]. *Optics Express*, 2021, 29(10): 15089-15103.
- [57] Li X, Liu J, Jia J, et al. 3D dynamic holographic display by modulating complex amplitude experimentally[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 20577-20587.
- [58] Gao Q K, Liu J, Han J, et al. Monocular 3D see-through head-mounted display via complex amplitude modulation[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 17372-17383.
- [59] Xue G L, Liu J, Li X, et al. Multiplexing encoding method for full-color dynamic 3D holographic display[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18473-18482.
- [60] Maimone A, Georgiou A, Kollin J S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(4): 85.
- [61] Shi L, Li B C, Kim C, et al. Towards real-time photorealistic 3D holography with deep neural networks [J]. *Nature*, 2021, 591(7849): 234-239.
- [62] Kozacki T, Chlipala M. Color holographic display with white light LED source and single phase only SLM[J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2189-2199.
- [63] Chlipala M, Kozacki T. Color LED DMD holographic display with high resolution across large depth[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4255-4258.
- [64] Lee S, Kim D, Nam S W, et al. Light source optimization for partially coherent holographic displays with consideration of speckle contrast, resolution, and depth of field[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 18832.
- [65] Peng Y F, Choi S, Padmanaban N, et al. Neural holography with camera-in-the-loop training[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2020, 39(6): 185.
- [66] Choi S, Gopakumar M, Peng Y F, et al. Neural 3D holography: learning accurate wave propagation models for 3D holographic virtual and augmented reality displays [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2021, 40(6): 240.
- [67] Choi S, Gopakumar M, Peng Y F, et al. Time-multiplexed neural holography: a flexible framework for holographic near-eye displays with fast heavily-quantized spatial light modulators[C]//SIGGRAPH '22: ACM SIGGRAPH 2022 Conference Proceedings, August 7-11, 2022, Vancouver, BC, Canada. New York: ACM Press, 2022.
- [68] Choi S, Kim J, Peng Y F, et al. Optimizing image quality for holographic near-eye displays with Michelson Holography[J]. *Optica*, 2021, 8(2): 143-146.
- [69] Chen N, Wang C L, Heidrich W. Compact computational holographic display (invited article) [J]. *Frontiers in Photonics*, 2022, 3: 835962.
- [70] Shimobaba T, Kakue T, Ito T. Review of fast algorithms and hardware implementations on computer holography[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(4): 1611-1622.
- [71] Shimobaba T, Nakayama H, Masuda N, et al. Rapid

- calculation algorithm of Fresnel computer-generated-hologram using look-up table and wavefront-recording plane methods for three-dimensional display[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 19504-19509.
- [72] Shimobaba T, Masuda N, Ito T. Simple and fast calculation algorithm for computer-generated hologram with wavefront recording plane[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3133-3135.
- [73] Symeonidou A, Blinder D, Munteanu A, et al. Computer-generated holograms by multiple wavefront recording plane method with occlusion culling[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22149-22161.
- [74] Matsushima K, Nakahara S. Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(34): H54-H63.
- [75] Chen J S, Chu D P, Smithwick Q Y. Rapid hologram generation utilizing layer-based approach and graphic rendering for realistic three-dimensional image reconstruction by angular tiling[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2014, 23(2): 023016.
- [76] Gilles A, Gioia P. Real-time layer-based computer-generated hologram calculation for the Fourier transform optical system[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(29): 8508-8517.
- [77] Shi L, Huang F C, Lopes W, et al. Near-eye light field holographic rendering with spherical waves for wide field of view interactive 3D computer graphics[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(6): 236.
- [78] Padmanaban N, Peng Y F, Wetzstein G. Holographic near-eye displays based on overlap-add stereograms[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2019, 38(6): 214.
- [79] Park J H, Askari M. Non-hogel-based computer generated hologram from light field using complex field recovery technique from Wigner distribution function[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2562-2574.
- [80] Wang Z, Zhu L M, Zhang X, et al. Computer-generated photorealistic hologram using ray-wavefront conversion based on the additive compressive light field approach[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(3): 615-618.
- [81] Wei L J, Sakamoto Y. Fast calculation method with foveated rendering for computer-generated holograms using an angle-changeable ray-tracing method[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): A258-A266.
- [82] Ju Y G, Park J H. Foveated computer-generated hologram and its progressive update using triangular mesh scene model for near-eye displays[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 23725-23738.
- [83] Chang C L, Cui W, Gao L. Foveated holographic near-eye 3D display[J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 1345-1356.
- [84] Cem A, Hedili M K, Ulusoy E, et al. Foveated near-eye display using computational holography[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 14905.
- [85] Moon E, Kim M, Roh J, et al. Holographic head-mounted display with RGB light emitting diode light source[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 6526-6534.
- [86] Kazempourradi S, Ulusoy E, Urey H. Full-color computational holographic near-eye display[J]. *Journal of Information Display*, 2019, 20(2): 45-59.
- [87] Zhang Z Q, Liu J, Gao Q K, et al. A full-color compact 3D see-through near-eye display system based on complex amplitude modulation[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 7023-7035.
- [88] Makowski M, Ducin I, Kakarenko K, et al. Simple holographic projection in color[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 25130-25136.
- [89] Yang X, Song P, Zhang H B, et al. Full-color computer-generated holographic near-eye display based on white light illumination[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38236-38249.
- [90] Huang Z Q, Marks D L, Smith D R. Out-of-plane computer-generated multicolor waveguide holography[J]. *Optica*, 2019, 6(2): 119-124.
- [91] 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.
- [92] Takaki Y, Fujimoto N. Flexible retinal image formation by holographic Maxwellian-view display[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 22985-22999.
- [93] 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.
- [94] Wang Z, Zhang X, Lü 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.
- [95] Wang Z, Zhang X, Lü 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.
- [96] 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.
- [97] Makey G, Yavuz Ö, Kesim D K, et al. Breaking crosstalk limits to dynamic holography using orthogonality of high-dimensional random vectors[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(4): 251-256.
- [98] Zhang J Z, Pégard N, Zhong J S, et al. 3D computer generated holography by non-convex optimization[J]. *Optica*, 2017, 4(10): 1306-1313.