

基于柱面全息波导的增强现实近眼显示系统

梅宇^{1,2}, 彭飞², 孙明¹, 郑华东¹, 于瀛洁¹, 夏新星^{1,2*}

¹上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444;

²光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000

摘要 基于全息波导的增强现实近眼显示技术可以直接为用户双眼提供虚实融合的图像信息,形态相对便携,近年来发展较为迅速。但目前报道的全息波导近眼显示多采用平板波导结构,一般需额外添加曲面护目镜,系统体积相对较大。因此提出基于柱面全息波导的增强现实近眼显示方法,实现了近眼显示从传统平板全息波导形态到曲面类型全息波导的拓展。提出柱面全息波导的全息曝光制备方法并制备柱面全息波导,搭建柱面全息波导近眼显示平台实验系统,实现了出瞳大小约 10 mm,单目视场角约 24°的增强现实显示效果,将为曲面波导与曲面护目镜的结合提供技术基础。

关键词 柱面波导; 全息波导; 全息光学元件; 近眼显示; 头盔显示器

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2011012

Augmented Reality Near-Eye Display System Based on Cylindrical Holographic Waveguide

Mei Yu^{1,2}, Peng Fei², Sun Ming¹, Zheng Huadong¹, Yu Yingjie¹, Xia Xinxing^{1,2*}

¹School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, Henan, China

Abstract Augmented reality near-eye display technologies based on holographic waveguide can directly provide user's eyes with virtual and real image fusion information and a relatively compact form factor; these have been developed rapidly in recent years. However, the reported displays of the near-eye holographic waveguide mostly adopt a flat waveguide structure, which require additional curved goggles, and thus the system volume is relatively large. Therefore, based on a cylindrical holographic waveguide, this paper proposes an augmented reality near-eye display method to extend the near-eye display based on the traditional flat holographic waveguide to a curved shape. Furthermore, a holographic exposure preparation method for this cylindrical waveguide is proposed, followed by the fabrication of the cylindrical waveguide. Finally, a bench-top experimental system for the near-eye display is set up using the cylindrical holographic waveguide. Investigations revealed that the novel waveguide achieved an augmented reality display effect, with an exit pupil size of approximately 10 mm and a monocular field of view of approximately 24°. Therefore, we propose that this improved holographic waveguide will provide a technical basis for combining curved waveguides with curved goggles.

Key words cylindrical waveguide; holographic waveguide; holographic optical element; near-eye display; head-mounted display

1 引言

随着信息技术的高速发展,增强现实(AR)近眼显示技术已经逐渐走进大众的视野,可以使观察者在观察外界事物的同时,也能够看到叠加在真实场景中的虚拟场景,在军事、医疗、娱乐、教育等方面已经展现出

巨大的使用价值和发展潜力。目前,虚拟现实(VR)技术得到了长足的发展,计算机软硬件技术完全能够支持图形图像质量更高、时间延迟更短的VR产品。世界各国都开始在VR技术上寻求进一步的突破,不再只局限于沉浸式体验。于是,有更高互动感和现实感的AR技术被推上了快速发展的轨道。

收稿日期: 2022-08-23; 修回日期: 2022-09-10; 录用日期: 2022-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(62005154)、国家重点研发计划(2021YFF0307803)、上海市自然科学基金(20ZR1420500)、重点实验室基金(6142504200312)

通信作者: *lygxia@gmail.com

作为下一代移动计算平台的显示终端技术,AR近眼显示仍然面临着诸如视场角、分辨率、外观形态、眼瞳箱、聚焦辐辏冲突等许多问题,依然存在着巨大发展空间。目前,AR近眼显示主要包括棱镜、曲面反射镜、Birdbath、自由曲面棱镜、光波导等多种技术方案。其中光波导类型的近眼显示系统体积较小、重量较轻,比较接近于眼镜形态,易于穿戴。高亮度的微显示器作为图像源并结合全息波导,较容易实现高质量的显示效果。光波导类型的近眼显示可以解决其他传统AR近眼显示技术难以避免的结构复杂、整机重量和体积偏大、装配精度要求苛刻、结构强度低、后期维护成本高的问题。因此针对可穿戴应用方面尤其是头盔显示器的应用场景,基于全息波导的AR近眼显示技术是一种较为理想的技术方案。

国外很多公司或高校研发出了相关的全息波导近眼显示产品,如英国的BAE公司^[1]利用全息波导出瞳扩展技术研发出了Q-sight头盔显示器;日本的SONY公司^[2-4]提出了全色体全息波导眼戴式显示技术,研发了Smart Eyeglass设备;美国的Microsoft^[5-6]发布的Hololens更是能够结合Windows系统实现智能显示;韩国的Chungbuk大学^[7]利用全息微透镜阵列与双棱镜波导的结合,实现了三维透视的近眼显示系统。目前国外也有一些有关曲面波导的报道,如俄罗斯的Moscow物理与技术学院^[8]通过结合弯曲楔形波导与全息光学元件来实现大视场的紧凑系统,但是这种系统会影响成像光束的平面度,从而导致图像破坏和离焦。美国的Arizona大学^[9]设计了一维眼瞳箱扩展的弯曲全息波导,但是其视场角较小且衍射效率不够均匀。虽然我国对该技术的研究起步较晚,但依然取得了一定的成果。在平板波导显示方面:北京理工大学的Lü等^[10]提出了一种将红外体全息光栅与可见光光栅集合的全息波导显示系统,并利用基于4个自由曲面的耦入光学元件和六层平面体全息光栅作为耦出光学元件,设计了全息波导结构^[11];东南大学的Wei等^[12]提出了一种将新型反射偏振体全息光栅作为全息光学元件的方法,并将其应用于全息波导显示系统中;东南大学的王闯等^[13]提出一种双重体光栅波导结构,有效扩展了衍射响应带宽,从而扩展了波导显示的视场;暨南大学的胡润等^[14]建立了三层全息平板波导显示系统并实现了出瞳扩展和全色显示。在曲面波导显示方面:洛阳光电设备研究所^[15]提出了曲面全息波导成像的设计方法,分别开展了球面面型和柱面面型的曲面全息波导光学系统设计,但实验中光在柱面波导中传播距离较短,应用范围相对受限。

目前报道的大多数全息波导近眼显示基本是基于平板波导结构的,全息波导入瞳与出瞳共轭,且全息波导近眼显示模块需插入前置曲面遮光罩内侧,这样人眼直接观看透视环境背景时需要透过平板波导和遮光罩两层结构,光学透过率降低,且整个系统的质量和体

积相对较大^[16-17]。在与抬头显示设备(HUD)结合时,弯曲波导可以直接集成到曲面护目镜,而不是在设备前另外设置一个独立的波导系统。此外人体头部接近于椭球形,平板波导不能和人眼轮廓吻合,佩戴时会存在无效的空间占用问题,不利于搭建紧凑型的设备。曲面类型的波导能贴合人头轮廓且易于集成,所以更适合人体佩戴。

本文提出了一种将平面波导改为柱面波导来实现全息波导的近眼显示方案。该方案直接利用柱面类型的头盔护目镜作为光波导,光线在柱面波导中通过全反射来无损传播图像,直至遇到耦出全息光学元件,改变传输方向耦出波导进入人眼。相对于平板类型的波导,这种方法提高了光学透过率,也减轻了整个系统的体积和质量,为波导类型的多样化选择提供了可行性,拓展了全息波导显示的应用范围。

2 基于柱面全息波导的近眼显示系统原理与设计

2.1 柱面全息波导近眼显示系统的基本原理

全息波导显示通过全息光学元件的衍射效应实现图像在波导的耦入和耦出,为方便对柱面类型的波导显示基本原理进行描述,先简要介绍平面的全息波导显示系统的基本结构。整个平面波导显示系统结构示意图如图1(a)所示,整体结构由平面全息波导和微投影模组两部分组成。

如图1(a)所示,平面全息波导近眼显示系统由耦入全息光学元件(HOE1)、耦出全息光学元件(HOE2)、平面波导组成,微投影模组则包含微显示器与投影模组。其基本工作原理为:微显示器产生的图像经过投影模组构成的准直系统后变为平行光;平行光透过波导照射到耦入端HOE1上,经耦入端HOE1衍射,平行光传播方向改变并满足全反射条件,被限制在波导内向前无损传播;当平行光传播到耦出端HOE2时,全反射条件被破坏,光线再次发生衍射从波导出射进入人眼成像^[18]。柱面全息波导近眼显示系统则由柱面全息波导和微投影模组组成。柱面全息波导主要包括耦入和耦出全息光学元件以及柱面波导,微投影模组则仍由投影模组和微显示器构成。与平面全息波导近眼显示相比,柱面全息波导近眼显示系统主要在波导类型上发生了较大变化,具体结构如图1(b)所示。

波导形态的改变会使入射光线有不同的传播形式,光线可以沿着柱面波导的轴向方向或径向方向进行传播。图1(b)展示了光线沿柱面波导的轴向方向传播的情况。由于存在柱面波导传播引起的像差,其投影模组、耦入全息光学元件(HOE1)、耦出全息光学元件(HOE2)需要进行特殊设计。因此,相较于平面全息波导,柱面全息波导显示系统中微显示器产生的图像经过投影模组后不一定为平行光,在波导内部传

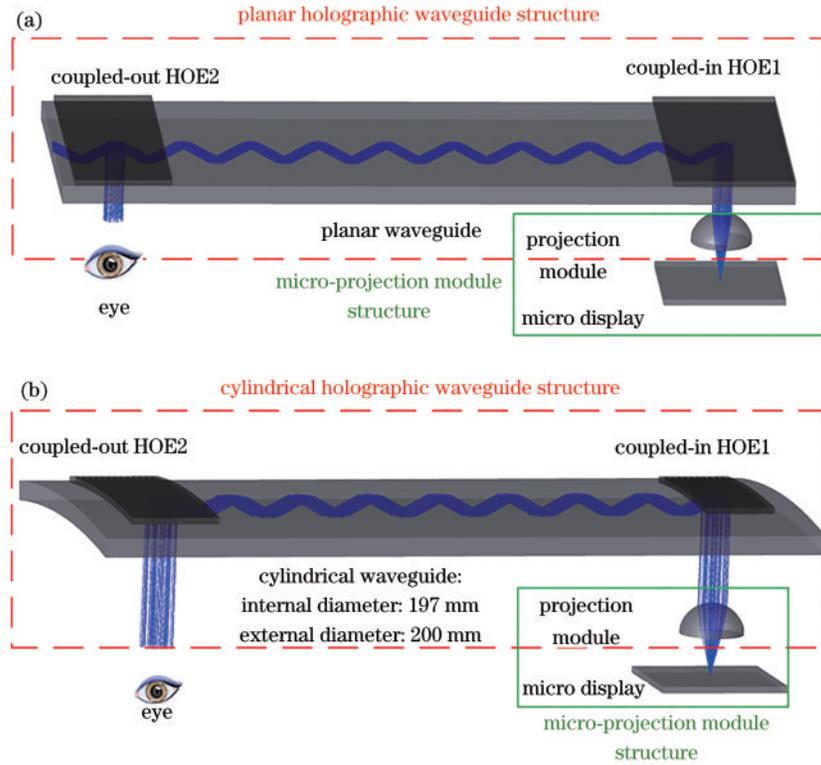


图 1 全息波导显示系统。(a) 平面全息波导显示系统基本结构；(b) 柱面全息波导显示系统基本结构

Fig. 1 Holographic waveguide display system. (a) Basic configuration of planar holographic waveguide display system; (b) basic structure of cylindrical holographic waveguide display system

输的光线也不一定为平行光,但需要保证经 HOE2 耦出进入人眼的光线为平行光,这样可获得和平面波导近眼显示类似的效果。

2.2 柱面全息波导近眼显示系统光学设计

对于柱面波导,随着曲率半径的增大,波导弯曲带来的像差越小,后续投影模组光学设计也越轻松。结合实际优化难度和佩戴情况,选择柱面波导外表面的曲率半径为 200 mm。而为了考虑增大光透过率和厚度对反射次数的影响,可选择 3 mm 厚的 H-K9L 玻璃作为柱面波导,则内表面的曲率半径为 197 mm。全息光学元件贴附于柱面波导表面。根据 Kogelnik 耦合波理论^[19],在 HOE 厚度增大情况下,反射型 HOE 的衍射效率变化比透射型 HOE 要舒缓很多,且达到一定的厚度峰值时,衍射效率会保持在最高值。且反射型 HOE 的角度选择性要优于透射型 HOE,其半峰全宽大于透射型 HOE。反射型 HOE 设计关键是确定中心视场的

衍射角度 θ_d 。柱面全息波导近眼显示系统中,选择中心视场的衍射角时只需要考虑边缘垂直视场角 θ_{FOV} 的衍射角度即可,即保证所有视场光线经过 HOE 衍射后均满足波导内部的全反射条件,可得达到 θ_{FOV} 的波导内部入射角度 α_v 为

$$\alpha_v = \arcsin \left[\frac{\sin(\theta_{FOV}/2)}{n} \right], \quad (1)$$

式中: n 是波导材料的折射率; α_v 也是反射式 HOE 的最大临界角。限定衍射角范围满足全反射条件,即在全反射角 θ_{TIR} 和 90° 衍射角 θ_{90} 之间,计算得出中心视场 (0°) 的衍射角 θ_d 范围;同时能够使确定的 $-\alpha_v$ 的衍射角 θ_{d1} 与 α_v 的衍射角 θ_{d2} 分别经过有限次反射传播合适距离后能够会聚在位置相近的一片区域,以此避免 HOE2 的耦合全息面过大导致光学系统复杂的问题。柱面全息波导内部不同视场传播示意图如图 2 所示。

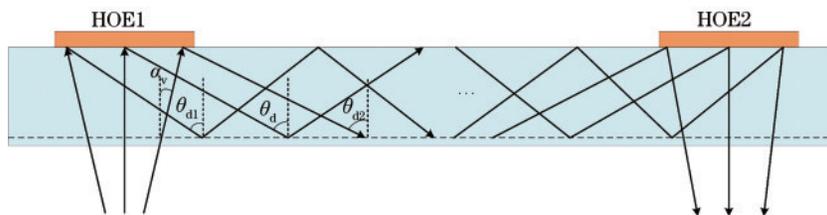


图 2 柱面全息波导内部不同视场传播示意图

Fig. 2 Diagram of the light propagation inside the cylindrical holographic waveguide with different FOVs

假设中心视场衍射光线在波导内部的传播次数为 m_0 , $-\alpha_v$ 的衍射光线在波导内部的传播次数为 m_1 , α_v 的衍射光线在波导内部的传播次数为 m_2 , 根据几何关系, 则有

$$m_0 \tan \theta_d \approx m_1 \tan \theta_{d1} \approx m_2 \tan \theta_{d2} \quad (2)$$

通过选择合适的中心视场衍射角 θ_d , 确定出 $-\alpha_v$ 的衍射角 θ_{d1} 与 α_v 的衍射角 θ_{d2} , 当 m_0, m_1, m_2 在合适次数时, 传播距离近似于 $2dm_0 \tan \theta_d$, 其中 d 为柱面波导厚度。而传播距离的合理性则依据正常人头佩戴需求来评定。

本文研究的近眼显示系统中的微投影模组主要由微显示器和投影模组两部分组成。考虑到整体佩戴尺

寸的情况, 可以在显示器传播至波导表面之间的光路中引入反射镜, 以进一步改善空间尺寸, 构建的近眼显示系统的佩戴效果示意图如图 3(a) 所示。因此, 在对微投影模组中的投影模组进行设计时, 就需要考虑投影模组到波导中间传播光路的长度, 这个长度要足以放置反射镜, 或者可以将反射镜引入投影模组内部, 作为投影模组的一部分用以折叠光路。对于投影模组的选择, 可以考虑非球面与球面系统的集合, 也可以考虑独立球面目镜系统的组合。本文选择了非球面与球面系统的集合作为设计投影模组的初始结构, 将设计优化后的微投影模组与波导以及全息面相结合, 整体柱面全息波导近眼显示系统结构如图 3(b) 所示。

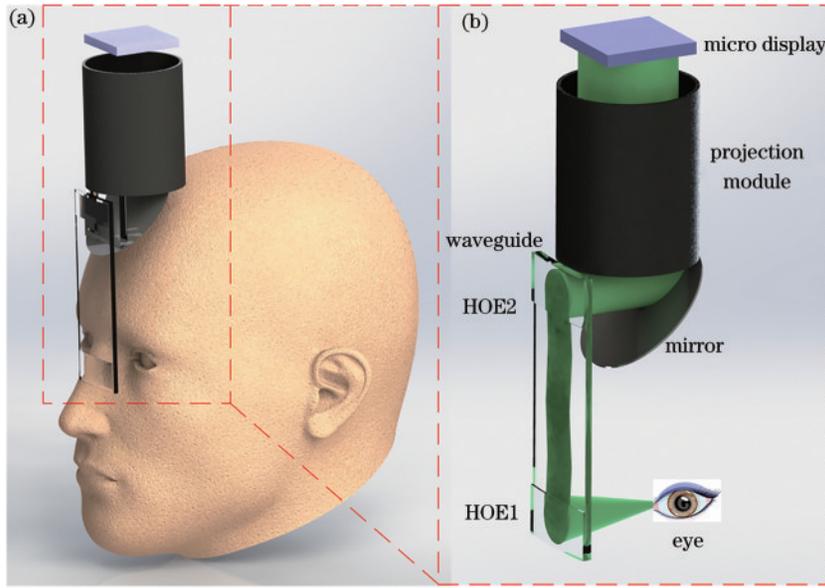


图 3 柱面全息波导近眼显示示意图。(a) 佩戴效果示意图; (b) 全息波导近眼显示系统结构

Fig. 3 Diagram of the near-eye display with the cylindrical holographic waveguide. (a) Schematic of wearing effect; (b) structure of holographic waveguide near-eye display system

3 柱面全息波导的全息曝光系统及制备实验

耦入和耦出 HOE 均附着在柱面波导表面, 也均为柱面面型。本方案采用两束参考光入射全息记录材料发生干涉并曝光的方法来进行全息波导制备。柱面全息波导中 HOE 与平面全息波导中 HOE 制备方法不同, 后者只需要两束平行光干涉制备即可, 而柱面波导存在一定曲率, 需要额外引入校正波导曲率的柱面镜来制备符合设计特征的 HOE。依据实际光路, 垂直入射光线无需柱面镜, 倾斜入射光线需要柱面镜, 以校正柱面波导带来的影响。同时考虑到两束参考光的光程差影响, 搭建一个便于调节的曝光制备系统, 将其应用于耦入和耦出 HOE 的全息曝光。曝光系统光路以及两束光的干涉示意图如图 4 所示。

激光器出射光通过由物镜、针孔滤波器及傅里叶变换透镜组成的准直系统后实现准直扩束, 经过反射

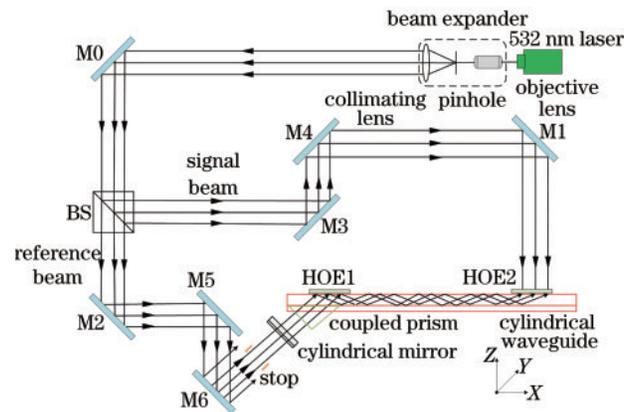


图 4 全息波导光学元件曝光制备系统光路图

Fig. 4 Optical path of exposure system fabricated by the holographic waveguide optical element

镜 M0 反射后垂直入射进 BS 分束棱镜。BS 分束棱镜将光束分成等光强的信号光和参考光, 两束光分别通过多组反射镜等光学元件以不同角度在柱面波导右侧

相同位置照射全息记录材料,从而记录干涉条纹,完成单侧全息光学元件的制备。一般在激光器出口处放置电子快门,用于控制曝光时间。这里需要注意的是,参考光倾斜入射进柱面波导内部前需要通过柱面镜和耦合棱镜。其中,柱面镜主要用于校正补偿柱面波导的像差,而耦合棱镜将倾斜入射的光线耦入波导并以和波导内部传播相同的角度照射全息记录材料。耦合棱镜表面与柱面波导内表面紧贴,通过折射率匹配液将两者粘合。实验中,耦入 HOE1 和耦出 HOE2 的尺寸分别为 $44.0\text{ mm} \times 26.0\text{ mm}$ 和 $16.0\text{ mm} \times 14.5\text{ mm}$,斜入射倾斜角度约为 62° 。

由于不同的曝光强度和曝光时间会影响全息光学元件的衍射效率,为使曝光的全息光学元件获得较好的衍射效率,通过控制激光器和电子快门,分析在不同的曝光强度和曝光时间下全息光学元件的衍射效率变化情况,以获得最佳曝光强度和曝光时间。当曝光强度一定时,衍射效率随着曝光时间的增加而提高,当衍射效率达到峰值时,随着曝光时间再增加,衍射效率略有下滑,但总体趋势基本保持不变。经测试,当曝光时间为 180 s 时全息光学元件的衍射效率最高,接近 34%。同时随着曝光强度的增加,衍射效率呈提高趋势,但与曝光时间对衍射效率的影响类似。曝光时间一定时,衍射效率随着曝光强度的增加而提高,当衍射效率达到峰值时,曝光强度增加到 4.45 mW/cm^2 时,衍射效率基本保持不变。综合考虑选择曝光强度为 4.45 mW/cm^2 ,曝光时间为 180 s 的条件进行全息光学元件的制备,完成柱面波导两侧的全息面曝光。曝光后柱面全息波导如图 5 所示,其中柱面波导外表面的曲率半径为 200 mm,内表面曲率半径为 197 mm,波导长为 115 mm,宽为 44 mm,厚度为 3 mm。经测试,双侧全息光学元件的衍射效率最高约为 9.2%。在实际制备过程中,在黑暗环境中将全息材料粘贴于柱面波导表面时要尽可能避免产生气泡等不利情况。



图 5 曝光制备的柱面全息波导

Fig. 5 Fabricated cylindrical holographic waveguide

4 柱面全息波导近眼显示系统构建和实验验证

利用曝光完成的柱面全息波导,配合微投影光学模组搭建了基于柱面全息波导近眼显示的平台实验验证系统,如图 6 所示。搭建的系统主要包含微显示器,由商用物镜和聚焦透镜组成的投影模组以及制备完成的柱面全息波导组成。在设计的人眼位置放置相机用于拍摄显示图像。

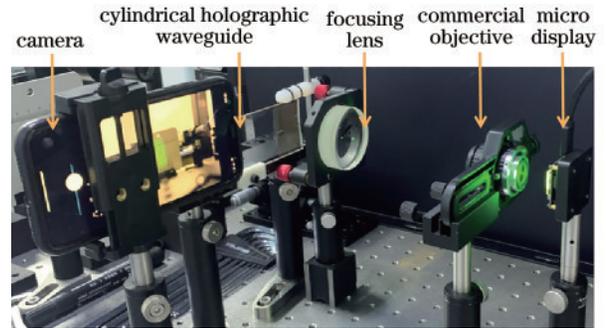


图 6 构建的柱面全息波导近眼显示原型系统

Fig. 6 Implemented near-eye display prototype with cylindrical holographic waveguide

验证实验中,所采用的微显示器是尺寸为 0.6 inch (1 inch=2.54 cm) 的绿色高亮 OLED,分辨率为 1024×768 ,如图 7(a)所示。同时也测量了所采用的 OLED 微显示器的光谱分布情况,如图 7(b)所示,可

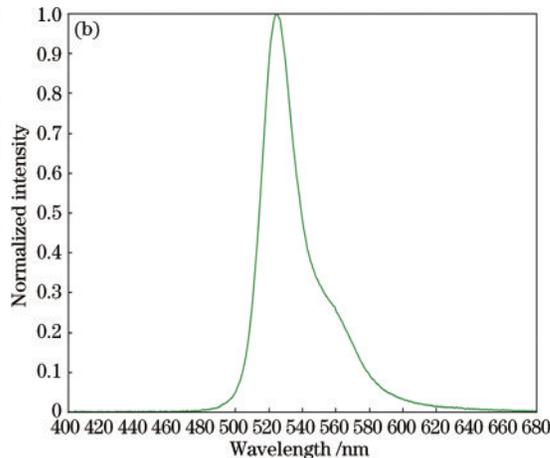
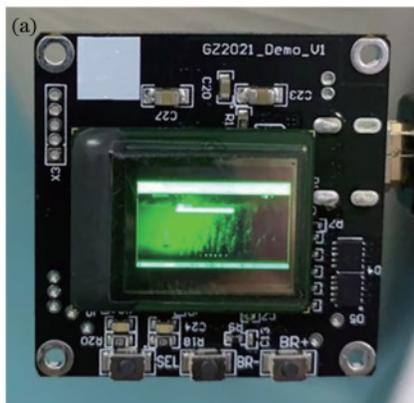


图 7 系统采用的微显示器源。(a)绿色高亮 OLED 像源;(b)相应光谱分布

Fig. 7 Micro-display image source used by the system. (a) Green high-light OLED image source; (b) corresponding spectral distribution

可以看出,所采用的 OLED 发光的波长范围为 510~560 nm,中心波长在 525 nm 左右,符合对微显示器所需波长的要求。在实验中,相机镜头放置在距离柱面波导内表面中心 15 mm 处,拍摄从全息波导中耦出的图像,用于模拟人眼观看到的增强现实图像信息。微显示器显示的源图像如图 8(a)所示。分别在明亮与黑暗环境下进行拍摄,拍摄结果分别如图 8(b)和图 8(c)所示。从实验结果可以看出,所构建的柱面全

息波导近眼显示系统总体成像质量较好,系统显示具有较高的分辨率,在黑暗条件下图像的轮廓较为清晰,也具有较高的显示亮度。但是从显示结果来看,图像成像质量不够清晰,像差未能得到较好校正。这是由于在光学平台上利用现有标准透镜搭建了实验验证系统,并没有经过较好的像差校正处理。后续可以通过特殊设计的校正像差透镜结合柱面全息波导改善这个情况。

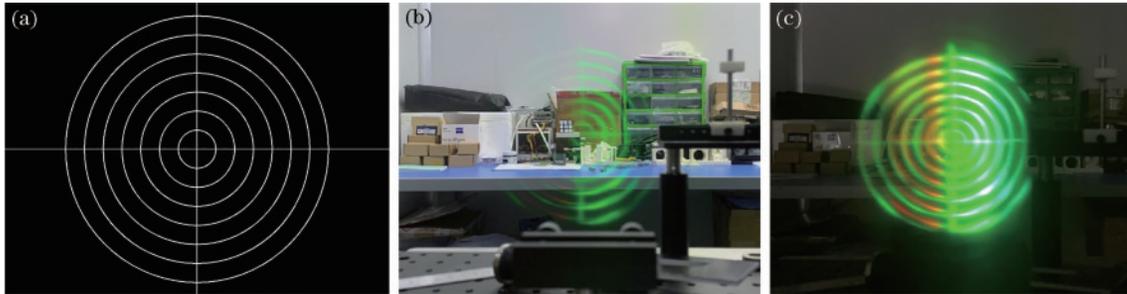


图 8 平台验证系统实验显示效果。(a)显示源图像;(b)光亮环境下拍摄图像;(c)黑暗环境下拍摄图像

Fig. 8 Verification experiment of the proposed near-eye display system. (a) Displayed source image; (b) captured photo in bright environment; (c) captured photo in dark environment

在实际应用过程中,所提系统需要提高微显示像源亮度和全息波导的衍射效率,从而提高显示图像亮度。目前实验中显示图像的均匀性一般,主要是由于全息光学元件存在不同视场角的角度选择性和波长选择性,而这些性质会对实际衍射效率产生影响。在今后的研究中,可以通过显示像源图像亮度的补偿来改善观看图像的均匀性。

5 结 论

提出了基于柱面全息波导的增强现实近眼显示方案,实现了近眼显示从传统平板全息波导到曲面类型全息波导的拓展,降低了头盔显示器的体积和复杂度,提高了系统透过率和安全性。提出了柱面全息波导的全息曝光制备方法,搭建了全息曝光制备装置并优化相应的制备工艺,完成了全息柱面波导的制备,为实际柱面全息波导原理样机的搭建提供了核心器件。对设计的全息柱面波导系统进行了演示,实验结果表明,原理样机实现了出瞳大小约 10 mm、单目视场角约 24° 的显示效果。本研究成功验证了全息波导与曲面护目镜结合的可行性,并为后续研究工作提供了技术基础。

参 考 文 献

- [1] Cameron A A. Optical waveguide technology and its application in head-mounted displays[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8383: 83830E.
- [2] Mukawa H, Akutsu K, Matsumura I, et al. A full color eyewear display using holographic planar waveguides[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2008, 39 (1): 89-92.
- [3] Aiki K, Nakano S. Illumination optical device and virtual image display: US20100027289[P]. 2010-02-04.
- [4] Rolland J P, Hua H. Head-mounted display systems[J]. Encyclopedia of Optical Engineering, 2005, 2: 1-14.
- [5] Kress B C, Cummings W J. Optical architecture of HoloLens mixed reality headset[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10335: 103350K.
- [6] Levola T, Laakkonen P. Replicated slanted gratings with a high refractive index material for in and outcoupling of light[J]. Optics Express, 2007, 15(5): 2067-2074.
- [7] Darkhanbaatar N, Erdenebat M U, Shin C W, et al. Three-dimensional see-through augmented-reality display system using a holographic micromirror array[J]. Applied Optics, 2021, 60(25): 7545-7551.
- [8] Kalinina A, Putilin A. Wide-field-of-view augmented reality eyeglasses using curved wedge waveguide[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11350: 1135005.
- [9] Draper C T, Blanche P A. Holographic curved waveguide combiner for HUD/AR with 1-D pupil expansion[J]. Optics Express, 2022, 30(2): 2503-2516.
- [10] Lü Z L, Liu J, Xiao J S, et al. Integrated holographic waveguide display system with a common optical path for visible and infrared light[J]. Optics Express, 2018, 26 (25): 32802-32811.
- [11] Shi X L, Liu J, Xiao J S, et al. Design of a compact waveguide eyeglass with high efficiency by joining freeform surfaces and volume holographic gratings[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2021, 38 (2): A19-A26.
- [12] Wei R, Liu H T, Weng Y S, et al. Realizing the imaging simulation of reflective polarization volume gratings[J]. Optics Express, 2022, 30(4): 6355-6364.
- [13] 王闯, 沈忠文, 翁一士, 等. 基于双重体光栅的波导显示系统视场扩展研究[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0723001.

- Wang C, Shen Z W, Weng Y S, et al. Field-of-view expansion of waveguide display system with double-layer volume grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 0723001.
- [14] 胡润, 田方旭, 林旗清, 等. 多层全息平板波导显示系统研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(12): 1209001.
- Hu R, Tian F X, Lin Q Q, et al. Multilayer holographic planar waveguide display system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(12): 1209001.
- [15] 张海军, 赵宝奇, 彭飞. 基于坐标变换的曲面全息波导追迹方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(7): 0722001.
- Zhang H J, Zhao B Q, Peng F. Curved holographic waveguides ray-tracing method via coordinate transformation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(7): 0722001.
- [16] Eisen L, Meyklyar M, Golub M, et al. Planar configuration for image projection[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(17): 4005-4011.
- [17] Schlosser P D, Matthews B, Sanderson P M. Head-worn displays for healthcare and industry workers: a review of applications and design[J]. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2021, 154: 102628.
- [18] Odinkov S B, Shishova M V, Markin V V, et al. Augmented reality display based on photo-thermorefractive glass planar waveguide[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 17581-17594.
- [19] Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[M]//Yeh P, Gu C. *Landmark papers on photorefractive nonlinear optics*. Singapore: World Scientific, 1995: 133-171.