

纯相位编码的无透镜全息视网膜投影近眼显示

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

¹合肥工业大学仪器科学与光电工程学院测量理论与精密仪器安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009;

²合肥工业大学光电技术研究院特种显示国家工程实验室, 安徽 合肥 230009

摘要 基于波前调控的全息视网膜投影显示(RPD)能够在无透镜条件下对图像光束进行会聚且可以实现图像景深、视点位置、数量、间距等参数的自由调控。目前,无透镜波前调控全息 RPD 多数选用振幅型全息图进行研究,存在衍射效率低、共轭像串扰等问题。基于此,提出了一种无透镜全息 RPD 的纯相位全息图计算方法,通过两步计算即可得到所需全息图。首先,将目标图像乘以均匀相位后作为输入,在输入面和全息面之间进行基于角谱衍射的 Gerchberg-Saxton 迭代后在全息面获得相位分布。然后,在迭代后的相位分布上乘以会聚球面波相位并对其编码得到最终全息图。在实验中,通过时分复用技术实现了彩色 RPD 并利用多球面波相位实现出瞳拓展,验证了该方法的有效性。

关键词 成像系统; 无透镜全息视网膜投影显示; 波前调控; 相位型全息图; Gerchberg-Saxton 迭代

中图分类号

文献标志码

DOI: 10.3788/LOP202259.2011009

Lensless Holographic Retinal Projection Near-Eye Display Based on Phase-Only Holograms

Tu Kefeng^{1,2}, Pang Yujian^{1,2}, Chen Tao^{1,2}, Zhang Xu^{1,2}, Liang Li^{1,2},
Wang Zi^{1,2*}, Lü Guoqiang^{1,2**}, Feng Qibin^{1,2}

¹Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, School of Instrumentation and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

²National Engineering Laboratory of Special Display Technology, Academy of Opto-Electric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China

Abstract The holographic retinal projection display (RPD) technology based on wavefront modulation can converge an image beam without a lens and realize the free adjustment of the image depth of field; position, number, and spacing of viewpoints; and other parameters. At present, the amplitude-type hologram is mostly used to explore the lensless wavefront modulation hologram RPD; however, using this type of hologram involves the problems of low diffraction efficiency and conjugate image crosstalk. Hence, a calculation method of the phase-only hologram of the lensless holographic RPD is proposed. The required hologram can be obtained in two steps. First, the target image is multiplied by the uniform phase as the input. Upon performing the Gerchberg-Saxton iteration based on angular spectrum diffraction between the input surface and the hologram surface, the phase distribution is obtained on the hologram surface. Further, the phase distribution after iteration is multiplied by the phase of the converged spherical wave and encoded to obtain the final hologram. In the experiment, the color RPD was realized by the time division multiplexing technology, and the exit pupil expansion was realized by the multi spherical wave phase; thus, the effectiveness of the proposed method was verified.

Key words imaging systems; lensless holographic retinal projection display; wavefront modulation; phase-only hologram; Gerchberg-Saxton iteration

收稿日期: 2022-06-29; 修回日期: 2022-07-28; 录用日期: 2022-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61805065)、安徽省科技重大专项项目(202203a05020005)、中央高校基本科研业务费(JZ2021HG TB0077)

通信作者: *wangzi@hfut.edu.cn; **guoqianglv@hfut.edu.cn

1 引言

近眼显示器(NED)作为实现增强现实并为人眼提供交互式体验的基本设备之一,是目前的一项研究热点^[1-6]。传统的NED存在辐辏-聚焦冲突(VAC),长期观看会使眼睛疲劳^[7]。研究人员提出了多种方法来克服或缓解VAC问题,如多焦平面技术^[8-9]、光场技术^[10-11]、全息技术^[12-16]和视网膜投影技术(RPD)^[17-21]等。其中,RPD技术通过透镜将图像会聚在瞳孔位置,在视网膜上成像。由于平行光源在瞳孔处产生了小于瞳孔直径的出瞳孔径,大幅增加了NED的景深,能够缓解VAC问题^[22]。

目前,RPD技术面临的关键问题是出瞳(eyebbox)受限。传统基于几何光学的RPD利用透镜等几何光学元件实现对图像光束的会聚并可以利用LED阵列^[23]、动态倾斜镜^[18]和Pancharatnam-Berry偏转器^[24]等时分多路复用技术转换视点位置来扩大eyebbox范围,但这些方法增加了NED的复杂度。更轻薄的全息光学元件(HOE)能够替代透镜,在增加系统紧凑性的同时通过角度复用特性实现eyebbox拓展。然而,HOE也面临视点间距与瞳孔大小不匹配等问题^[25]。

基于波前调控的全息RPD通过对图像景深、视点位置、数量、间距等参数的灵活控制可以完成视点间距与人眼瞳孔大小匹配,从而实现连续视点^[26]。Takaki等^[22]将目标图像的振幅乘以会聚球面波相位后再通过衍射和编码得到最终的振幅全息图,实现了无透镜波前调控全息RPD。基于波前调控,无透镜全息RPD可以实现eyebbox的拓展。在全息图上乘以不同闪耀光

栅的球面波相位,使得图像会聚于多个视点,增加eyebbox范围^[27]。Wang等^[28]利用振幅全息图的共轭光,使得视点数量增加至原有的两倍。另外,灵活的波前调控也能在图像显示效果上起到作用,利用球面波和平面波相位结合的方式,可以在保证图像再现质量的同时拓展景深范围^[29]。将三色RPD波前信息编码在单张全息图中并利用数字孔径滤波消除颜色串扰,可以实现彩色动态全息RPD显示^[30]。Zhang等^[31]通过超多视点和RPD结合实现了提供单目深度线索的RPD。然而,目前的无透镜波前调控全息RPD多数采用振幅型全息图进行研究,存在衍射效率低、共轭像串扰的问题。

本文提出了一种无透镜波前调控全息RPD的纯相位全息图计算方法。该方法通过两步计算得到纯相位全息图。首先,将目标图像上乘以均匀相位后作为输入,通过在输入面和全息面之间的Gerchberg-Saxton(GS)迭代,于全息面上生成迭代后的相位分布。之后,将迭代后的相位分布与会聚球面波相位相乘,经编码后得到纯相位全息图。在此基础上,讨论了该方法下再现图像的视场角和成像面距离。在实验中,利用多球面波叠加后的相位替代单个球面波相位扩大eyebbox的范围并通过时分复用技术实现彩色的RPD来验证所提方法的有效性。

2 基本原理

纯相位全息图的计算可分为两个步骤,如图1所示:位于输入图像面的输入复振幅分布通过基于角谱衍射的GS迭代,在全息面获得迭代后的相位分布;将

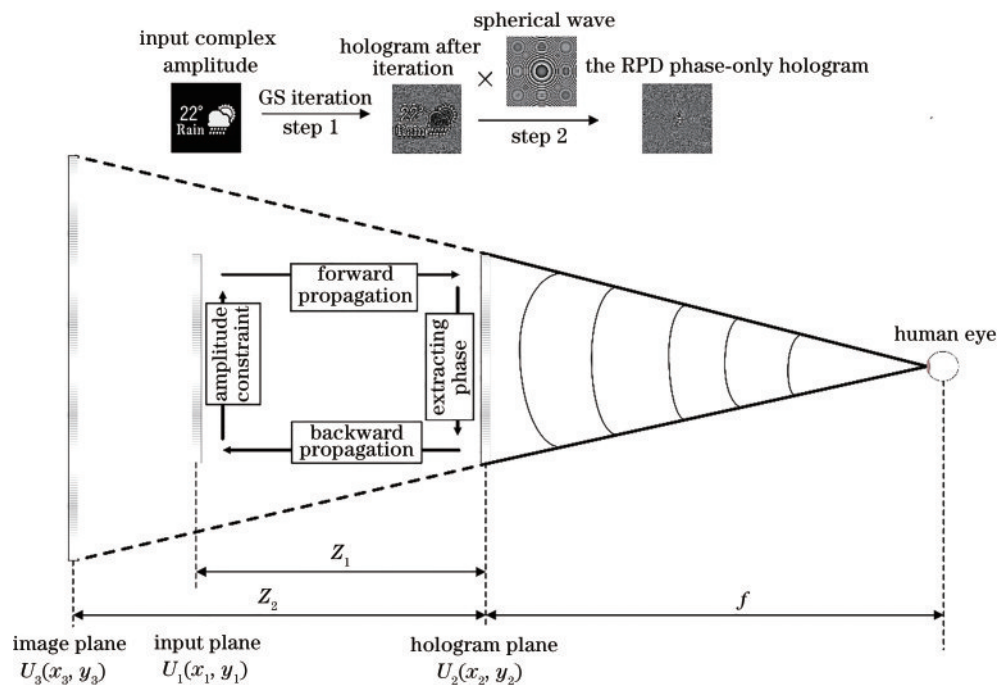


图1 纯相位全息图的计算和再现过程

Fig. 1 Calculation and reproduction process of phase-only hologram

全息面的相位分布乘以会聚的球面波相位,编码后即可获得纯相位全息图。该纯相位全息图经空间光调制器(SLM)加载后,可实现无透镜会聚图像光束至人眼位置。

输入图像面是整个计算过程和GS迭代的初始平面,GS迭代在输入图像面和全息面之间进行。将目标图像乘以均匀相位后作为输入复振幅,并经过衍射得到在全息面的复振幅分布。该衍射过程中应用到的角谱法可描述为

$$U_2(x_2, y_2) = F^{-1}\{F[U_1(x_1, y_1)] \cdot H(f_x, f_y)\}, \quad (1)$$

$$H(f_x, f_y) =$$

$$\begin{cases} \exp(i\frac{2\pi}{\lambda}Z\sqrt{1-\lambda^2f_x^2-\lambda^2f_y^2}), \lambda^2f_x^2+\lambda^2f_y^2 < 1, \\ 0, \text{ else} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: F 代表傅里叶变换; F^{-1} 代表傅里叶逆变换; $U_1(x_1, y_1)$ 为输入图像面复振幅分布; $U_2(x_2, y_2)$ 为全息面复振幅分布; $H(f_x, f_y)$ 为与传播距离 Z 相关的传递函数,正向传播时 Z 为正值,逆向传播时为负值; λ 为参考光和物光的波长; f_x, f_y 分别为 x 轴和 y 轴方向的空间频率。提取全息面复振幅的相位信息并回传至输入图像面,其过程可描述为

$$\varphi_2(x_2, y_2) = \frac{U_2(x_2, y_2)}{|U_2(x_2, y_2)|}, \quad (3)$$

$$U_1'(x_2, y_2) = F^{-1}\{F[\varphi_2(x_2, y_2)] \cdot H(f_x, f_y)\}, \quad (4)$$

式中: $|\cdot|$ 代表取振幅; $U_1'(x_1, y_1)$ 为回传至输入图像面的复振幅分布; $\varphi_2(x_2, y_2)$ 为全息面的相位分布。对更新的输入面图像振幅与目标图像进行振幅误差计算:若不满足,则将输入图像面的振幅替换为目标振幅并进入下一次循环;若满足误差要求则退出GS迭代,并保留全息面的相位分布。最后,将迭代后的相位分布乘以会聚球面波相位,可获得所需RPD相位分布。

$$\varphi(x_2, y_2) = \varphi_a(x_2, y_2) \cdot \exp\left[\frac{-jk(x_2^2 + y_2^2)}{2f}\right], \quad (5)$$

式中: $\varphi_a(x_2, y_2)$ 为退出迭代后的全息面相位分布; φ

(x_2, y_2) 为RPD相位分布,经编码后为纯相位全息图; f 为全息图面与人眼距离。

在再现图像过程中,SLM位于全息面并加载被编码后的纯相位全息图。光波在人眼位置处会聚,实现视网膜投影显示。另外,会聚球面波相位具有透镜的功能,输入图像面和成像面的距离满足透镜公式关系:

$$\frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{f}. \quad (6)$$

输入图像面和全息面距离 Z_1 需小于全息图面与人眼距离 f ,从视线方向上再现图像才能成像于SLM后方。在保持人眼离全息面距离 $f=150$ mm时,成像面距离 Z_2 随输入图像面位置 Z_1 变化如图2(a)所示。

同时,在角谱法计算中,输入图像尺寸和全息图相同,而输入图像面图像 $U_1(x_1, y_1)$ 和成像面虚像 $U_3(x_3, y_3)$ 满足透镜成像关系。因而,虚像尺寸和视场角大小的表达式分别为

$$L_3 = Nd x_2 \frac{Z_2}{Z_1}, \quad (7)$$

$$\theta_{\text{FOV}} = 2\arctan \frac{L_3}{2(Z_2 + f)} = 2\arctan \frac{Nd x_2 \frac{Z_2}{Z_1}}{2(Z_2 + f)} = 2\arctan \frac{Nd x_2}{2f}, \quad (8)$$

式中: L_3 为再现图像长度; N 为全息面像素数; $d x_2$ 为全息面像素间距。当使用的空间光调制器像素数为4096、像素间距为 $3.8 \mu\text{m}$ 、 θ_{FOV} 在 f 为50~200 mm范围内的变化趋势如图2(b)所示。视点与SLM距离在200 mm以内时,再现图像视场角均在 4° 以上且随着 f 缩短快速增大。值得注意的是,视场角大小受到全息图一级光最大衍射角的限制,最大为衍射角两倍。在入射光波长 λ 为520 nm条件下,一级光最大衍射角为

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2d}\right), \quad (9)$$

式中: θ 为一级光最大衍射角; d 为全息图像素间距。代入相关数据可得, θ 约为 7.8° 。

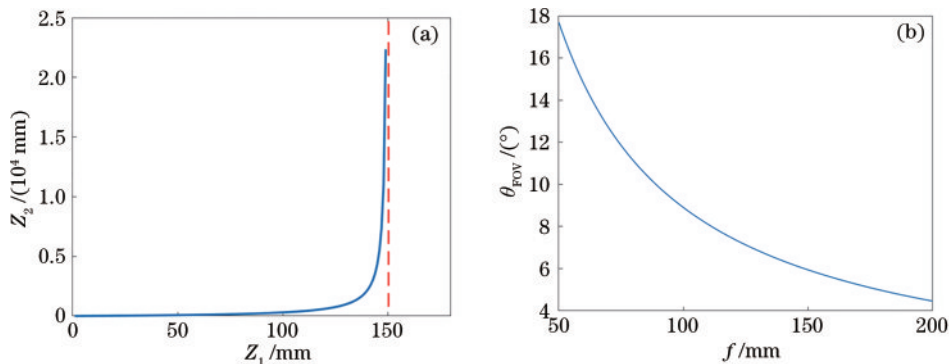


图2 全息图计算过程距离参数的影响。(a)输入图像面与成像面位置关系;(b)会聚球面波焦距与视场角的关系

Fig. 2 Influence of distance parameter on hologram calculation. (a) Position relationship between input image plane and imaging plane; (b) relationship between focal length of spherical wave and field of view

3 实验

实验光路如图 3 所示, 波长为 520 nm 的激光从激光器发出, 通过准直透镜后照射在空间光调制器上。该空间光调制器 (3.8 μm, 相位型) 加载了一幅 2160 × 2160 分辨率的全息图, 受激光照射后发生衍射并通过半透半反镜会聚至人眼。真实场景也通过半透半反镜组合进入人眼。光路中, 视点位置在空间光调制器前 10 cm 处, 输入图像面位于空间光调制器后 8.5 cm 处, 因而目标成像面位于空间光调制器后 0.57 m 处。实物 1 离空间光调制器的光程为 0.45 m, 实物 2 离空间光调制器 0.9 m。视网膜投影纯相位全息图在不同深度下的重建如图 4 所示。在 0.45 m 和 0.9 m 的深度处, 虚拟图像均能够清晰成像, 而两个宇航员随着聚焦位置的变化出现不同程度的聚焦模糊现象。这表明所

计算的纯相位全息图能够保持 RPD 大景深的特征且实现高亮度显示。

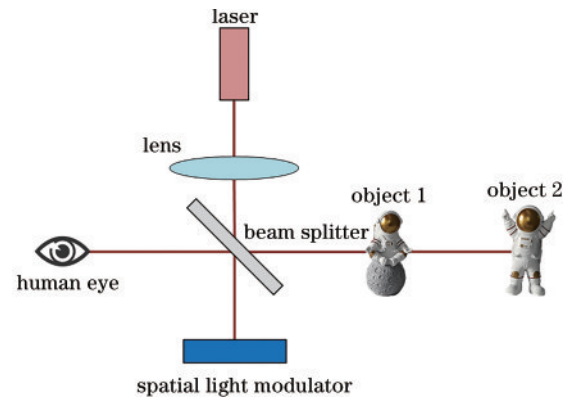


图 3 实验光路图

Fig. 3 Experimental optical path

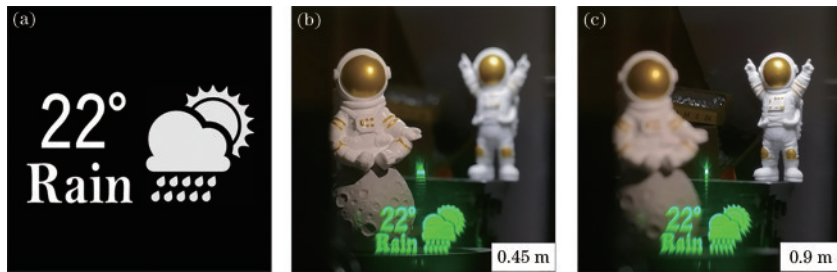


图 4 聚焦于不同深度的拍摄图像。(a) 目标图像; (b) 聚焦在 0.45 m 处的拍摄图像; (c) 聚焦在 0.9 m 处的拍摄图像

Fig. 4 Captured results focused at different depths. (a) Target image; (b) captured result focused at 0.45 m; (c) captured result focused at 0.9 m

为了拓展 eyebox 范围, 用多球面波相位代替原来的单个球面波相位。多球面波相位由会聚在不同视点的单个会聚球面波叠加并提取相位得到。

$$\varphi(x_2, y_2) = \arg \left\{ \sum_{n=1}^N \frac{\exp \left[-jk \sqrt{(x_2 - a_n)^2 + (y_2 - b_n)^2 + f^2} \right]}{\sqrt{(x_2 - a_n)^2 + (y_2 - b_n)^2 + f^2}} \right\}, \quad (10)$$

式中: $\arg\{\cdot\}$ 代表提取相位; $\varphi(x_2, y_2)$ 为多球面波相位; (a_n, b_n) 代表第 n 个视点在人眼面的坐标。实验中, 计算了 3 个视点的视网膜投影纯相位全息图。每个视点在水平方向上间距为 4 mm。图 5 展示了不同深度下不同视点的聚焦模糊效果。图 5(a)、(b)、(c) 分别为聚焦在距离相机 0.45 m 处的左中右等 3 个视点的拍摄图像。图 5(d)、(e)、(f) 分别为聚焦在距离相机 0.9 m 处的左中右等 3 个视点的拍摄图像, 不同视点下拍摄

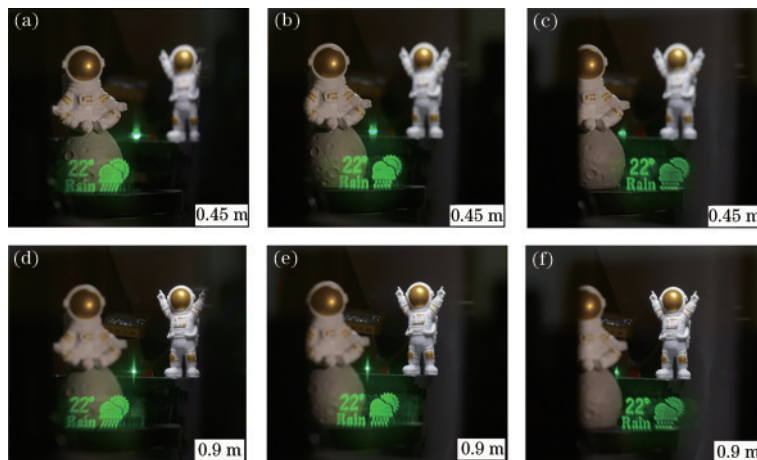


图 5 不同视点下聚焦于不同深度的拍摄图像。(a) (d) 左视点; (b) (e) 中视点; (c) (f) 右视点

Fig. 5 Captured results focused at different depths with different viewpoints. (a) (d) Left viewpoints; (b) (e) middle viewpoints; (c) (f) right viewpoints

的图像存在明显的视差。另外,尽管多个视点使得衍射光能量分散,纯相位全息图高衍射效率的特征仍能保证虚拟图像清晰显示。

为了实现彩色图像显示,计算了一个彩色魔方的红、绿、蓝 3 个颜色通道的全息图。利用人眼滞留特性,高刷新率的相位型空间光调制器配合 3 色激光器,对 3 个颜色通道的全息图进行时序再现,如图 6 所示。

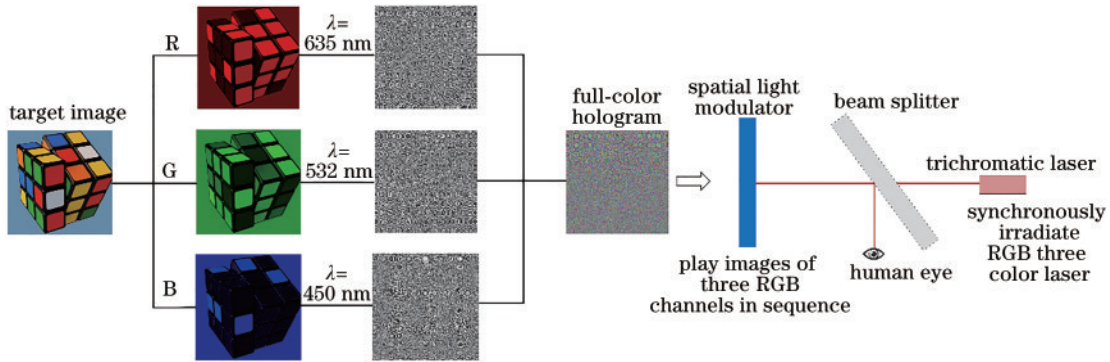


图 6 时分复用技术彩色显示

Fig. 6 Color display by time-multiplexing techniques

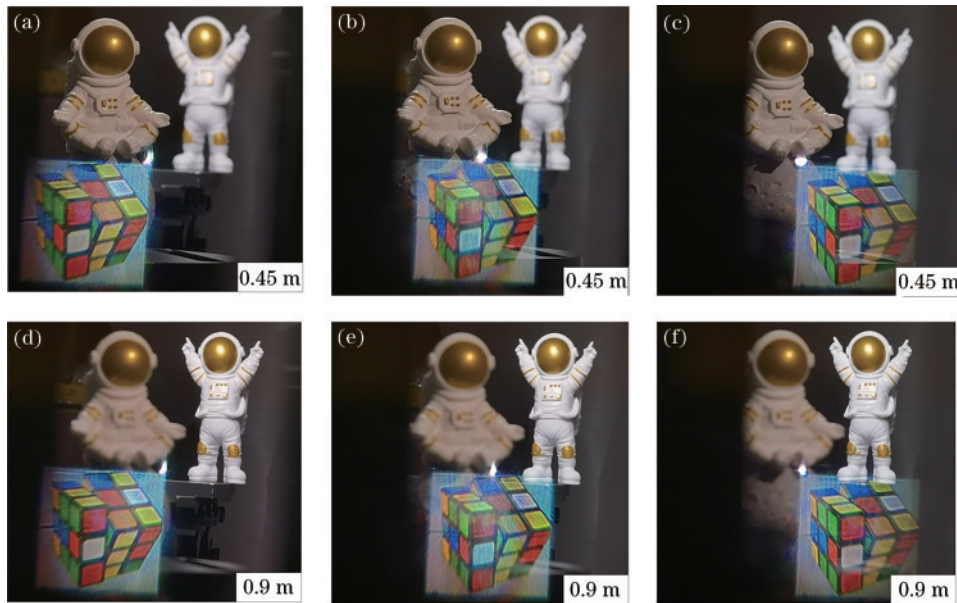


图 7 不同视点下聚焦于不同深度的拍摄图像。(a) (d)左视点;(b) (e)中视点;(c) (f)右视点

Fig. 7 Captured results focused at different depths with different viewpoints. (a) (d) Left viewpoints; (b) (e) middle viewpoints; (c) (f) right viewpoints

4 结 论

提出了一种实现无透镜波前调控全息 RPD 的纯相位全息图计算方法,其具有大景深、高衍射效率、无共轭像的优势。首先,将目标图像乘以均匀相位后作为输入面初始复振幅,经过基于角谱衍射的 GS 迭代后在全息面得到对应的相位分布,然后将全息面的相位分布乘以会聚球面波相位后编码得到最终的纯相位全息图。在实验中,将该方法计算的 RGB 三通道的相位型全息图和时分复用技术结合,即可实现彩色全息

不同深度下的再现结果如图 7 所示。图 7(a)、(b)、(c) 分别为聚焦在距离相机 0.45 m 处的左中右等 3 个视点的拍摄图像。图 7(d)、(e)、(f) 分别为聚焦在距离相机 0.9 m 处的左中右等 3 个视点的拍摄图像。从图中可以看出,在不同深度下真实物体出现离焦模糊,而虚拟图像一直保持清晰。

视网膜投影显示。同时多球面波相位实现了 eyebox 的拓展。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [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] 高源, 刘越, 程德文, 等. 头盔显示器发展综述[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, 28(6): 896-904.
Gao Y, Liu Y, Cheng D W, et al. A review on development of head mounted display[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(6): 896-904.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1146-1161.
- [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] Zhan T, Xiong J H, Zou J Y, et al. Multifocal displays: review and prospect[J]. *PhotonIX*, 2020, 1(1): 1-31.
- [9] 陈寰, 乔杨, 徐熙平, 等. 多焦平面三维投影光学系统设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0922002.
Chen H, Qiao Y, Xu X P, et al. Optical design of three-dimensional projection on multifocal planes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0922002.
- [10] Huang H K, Hua H. Systematic characterization and optimization of 3D light field displays[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 18508-18525.
- [11] 余毅, 李晖, 许明慧, 等. 基于聚合物分散液晶薄膜的高分辨率光场显示研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(7): 0711001.
Yu Y, Li H, Xu M H, et al. High resolution light field display based on polymer dispersed liquid crystal films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 0711001.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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): 1-15.
- [15] Wang Z, Lü G Q, Feng Q B, et al. Resolution priority holographic stereogram based on integral imaging with enhanced depth range[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2689-2702.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Wang Z, Tu K F, Pang Y J, et al. Simultaneous multi-channel near-eye display: a holographic retinal projection display with large information content[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(15): 3876-3879.
- [21] 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.
- [22] Takaki Y, Fujimoto N. Flexible retinal image formation by holographic Maxwellian-view display[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 22985-22999.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Chang C L, Cui W, Park J, et al. Computational holographic Maxwellian near-eye display with an expanded eyebox[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 18749.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [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] 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.