

紧凑型纯相位全息近眼三维显示

蔡晓峰^{1,2}, 宋恭渝^{1,2}, 杨鑫³, 王曾垚^{1,2}, 文清^{1,2}, 许富洋^{1,2*}, 任志君^{1,2}¹浙江师范大学物理与电子信息工程学院信息光学研究所, 浙江 金华 321004;²浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室, 浙江 金华 321004;³珑璟光电-微纳光学研究中心, 广东 深圳 518000

摘要 提出了一种紧凑型纯相位全息近眼显示方法, 避免了 $4f$ 系统的使用且通过滤波可消除零级光和高级衍射光的干扰, 能够实现近眼虚拟现实 (VR) 和增强现实 (AR) 三维显示。在进行全息图计算时, 三维物体被分割成多层图像, 利用每一层图像相对于投影透镜焦平面的距离和投影透镜的焦距获得该深度对应的补偿相位因子, 采用迭代优化算法获得三维物体的纯相位全息图并在所提系统中进行显示。通过数值模拟和光学实验, 证明了所提方法的有效性。

关键词 全息; 全息三维显示; 近眼显示; 相位全息; 虚拟现实; 增强现实

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221697

1 引言

元宇宙是一个与现实平行的虚拟三维空间, 增强现实 (AR) 和虚拟现实 (VR) 被认为是进入元宇宙的大门, 而实现观看舒适自然的 AR 和 VR 的关键便是三维显示技术^[1-2]。目前实现三维显示的方法主要有双目视差三维显示、体三维显示、光场三维显示和全息三维显示等^[3-5]。其中, 全息三维显示因能够完整地重建三维场景的波前而被视为最理想的三维显示。采用微纳加工的静态全息三维显示和采用空间光调制器 (SLM) 的动态全息三维显示均已被实现^[6-10]。由于反射式相位型硅基液晶 (LCoS) 在各类 SLM 中具有更高的衍射效率, 故被认为是动态三维显示的理想载体。然而, 受到 LCoS 的像素结构特点的影响, 经过它调制的光场中存在不可避免的零级光和高级衍射光, 这会严重干扰全息近眼三维显示的效果。为了消除零级光和高级光的影响, 通常使用 $4f$ 光学系统对衍射光进行滤波, 再用目镜观察成像于远处的放大的三维虚像^[11-13]。然而, $4f$ 光学系统的存在会使得近眼显示系统的体积变大, 不利于将该系统集成到穿戴设备上。

纯相位全息图算法可以分为迭代方法、非迭代方法和其他方法^[14]。经典的迭代计算方法有 GS (Gerchberg-Saxton) 算法^[15-16]、误差扩散算法^[17]等, 在这些算法的基础上又衍生出了具有更高重建质量和更好收敛速度的优化算法, 但往往也增加了对计算资源的需求。非迭代类型的算法包括随机相位算法、模式

化相位掩膜算法和双相位方法等^[18-19], 这类方法相较于迭代计算方法在计算负荷上有很大的降低。随机相位算法在对目标强度图增加随机相位之后, 直接将计算得到的全息图的振幅设置为常数, 计算速度快, 但重建像的质量并不理想。模式化相位掩膜算法和双相位方法在此基础上, 减少了散斑噪声, 但也各自引入了一些其他问题。迭代算法和非迭代算法外还有直接算法 (直接搜索算法、模拟退火算法、遗传算法等) 和基于数据驱动的深度学习方法^[20-21]: 直接算法有可能找到全局最优解, 但很耗费时间或内存; 深度学习算法确实有良好的显示效果和较快的计算速度, 但神经网络训练过程中需要的大量数据集难以获取, 训练也较为困难。因此, 纯相位全息图算法的设计应当权衡计算速度与显示效果, 并且应与全息显示系统的物理结构相契合, 从而推进更加紧凑的近眼显示系统的实现与应用。

本文提出了一种紧凑型的纯相位全息近眼三维显示方法。在所提显示系统中, SLM 后仅有一个投影透镜和一个目镜, 结合所设计的与投影物镜参数匹配的纯相位全息图计算方法, 便可以实现更加紧凑的纯相位全息近眼三维显示。在迭代过程中针对三维物体的多层深度图像进行全息图的优化, 但与参考文献^[15]中提到的使用菲涅耳衍射计算多层深度图像的相位全息图的全局 GS 迭代算法 (GGs) 和序列 GS 迭代算法 (SGs) 不同。所提迭代算法将与投影透镜焦距和各层深度相关的二次相位作为补偿因子, 在迭代中仅需进行傅里叶变换而无需进行菲涅耳衍射计算, 最终生成

收稿日期: 2022-09-13; 修回日期: 2022-10-08; 录用日期: 2022-10-14; 网络首发日期: 2022-10-24

基金项目: 国家自然科学基金 (62005006)、浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室开放课题

通信作者: *xfy@zjnu.cn

一个三维物体的纯相位全息图。当再现计算得到的纯相位全息图时,可在投影透镜焦平面附近形成多深度的三维实像,在投影透镜焦平面处滤波,再用目镜观看放大的全息近眼 VR 三维虚像,在目镜后放置分光棱镜(BS)则可实现全息近眼 AR 三维显示。

2 基本原理

2.1 全息近眼三维显示系统原理

图 1 为所提全息近眼三维显示系统的原理图,其中激光器出发散球面波,经过透镜的准直和 BS 的部分反射后照射到反射式相位型 LCoS 上,加载到 LCoS 上的全息图对照明光进行调制,调制后的光场反向传播,在投影透镜 L_2 的后焦面上形成零级光 and 高级衍射光,利用光阑进行滤波可使得含有所记录三维信息的第一阶衍射光从光阑 F_t 中透过。在所提显示系统中,LCoS 位于投影透镜 L_2 的前焦平面上,在 L_2 的后焦平面附近可形成由多层再现像组合而成的三维实像,而每一层图像相对于聚焦平面的位置可以被精确地控制。如图 1 所示,三维物体被划分成多个具有不同深度的平面,其中 P_i 为第 i 个平面,其与焦平面的距离定义为 z_i ,其与透镜 L_3 的距离定义为 z'_i 。

人眼在目镜焦平面附近观察,可看到再现三维实像经过目镜放大后位于远处的虚像,设目镜焦距为 f_e ,三维实像每一层图像 P_i 对应的横向放大率 M_β 和纵向放大率 M_a 可以分别表示为

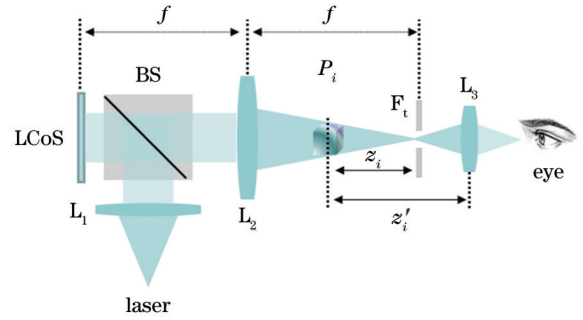


图 1 全息近眼三维显示系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of holographic near-eye 3D display system

$$\begin{cases} M_\beta = \frac{f_e}{f_e - z'_i} \\ M_a = M_\beta^2 \end{cases} \quad (1)$$

根据人眼的视觉特征,人眼可以清晰聚焦的图像深度范围为明视距离到无穷远,将明视距离定义为 D_e ,则给定目镜焦距之后,允许的实像深度范围可以表示为

$$\frac{f_e(D_e - f_e)}{D_e} \leq z'_i < f_e, \quad (2)$$

定义 W_z 为 SLM 衍射产生的三维实像的有效深度,即

$$W_z = f_e - \frac{f_e(D_e - f_e)}{D_e} = \frac{f_e^2}{D_e}. \quad (3)$$

在计算全息图时,通过在全息图中添加二次相位因子 φ_i 来控制每一层图像相对于投影透镜的距离 z_i 。 φ_i 的计算如图 2 所示,其中 H 为纯相位全息图。

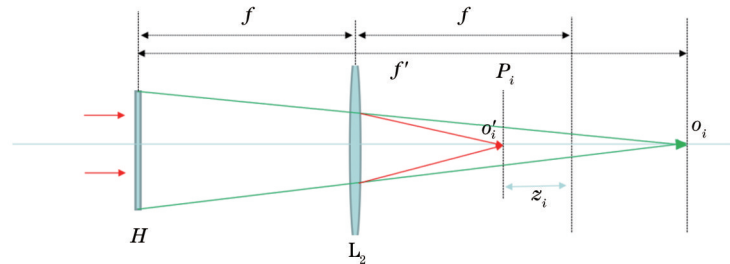


图 2 用于控制 z_i 的二次相位因子推导原理图

Fig. 2 Derivation diagram of quadratic phase factor used to control z_i

当不加透镜时,全息面上存在一个会聚球面波,会聚点为 o_i 。在加上透镜 L_2 后, o'_i 为 o_i 的像点,与 L_2 后焦平面的距离为 z_i , f 为透镜 L_2 的焦距。此时,通过 f 和 z_i 表示的位于全息面上的相位可表示为

$$\varphi_i(x, y) = \frac{\pi z_i}{\lambda f} (x^2 + y^2), \quad (4)$$

式中: λ 为波长。式(4)的含义为:当考虑投影透镜的物理参数 f 和成像平面与投影透镜焦平面的距离 z_i 时, φ_i 为全息图上的相位驱动函数,该二次相位已被用于在焦平面附近生成三维光学阱阵列^[22]。在所提迭代算

法中,将该二次相位因子及其共轭用于算法中以补偿图像平面不是焦平面时进行傅里叶变换的相位误差。

2.2 纯相位全息图迭代算法

图 3 展示了全息图的迭代计算过程。假设该全息图的重构像具有三层深度。先设置初始相位 φ_{ini} 为随机相位或二次相位,在补偿有二次相位因子的全息平面上的初始复振幅可以表示为

$$U_{h1}(x, y) = \exp(i\varphi_{ini}) \exp(-i\varphi_1). \quad (5)$$

将每个深度对应的共轭相位作为补偿相位是所提迭代算法中的关键,其含义为:初始相位与该相位相乘

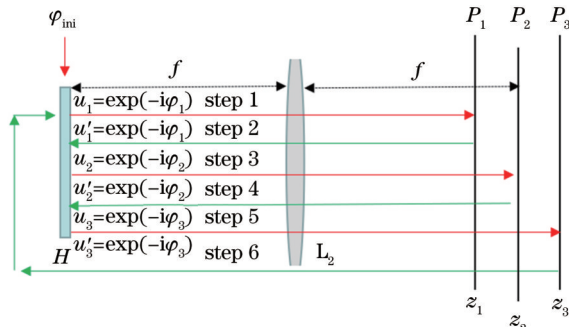


图 3 全息图迭代算法原理图

Fig. 3 Schematic diagram of hologram iterative algorithm

后进行傅里叶变换的图像平面即为所设计深度的图像平面。第一平面上的复振幅可以通过傅里叶变换得到,即

$$U_{\rho_1}(u, v) = \mathfrak{F}[U_{h_1}(x, y)], \quad (6)$$

式中: $\mathfrak{F}[\cdot]$ 表示傅里叶变换。

保持该平面上相位不变而对振幅进行加权约束,受约束的复振幅可表示为

$$U'_{\rho_1}(u, v) = [\delta_1 A_{\rho_1} + (1 - \delta_1) A_1] \exp(i\varphi_{\rho_1}), \quad (7)$$

式中: δ_1 为权重因子; A_{ρ_1} 为对应于第一平面 P_1 的目标图像的振幅; A_1 为对 $U_{\rho_1}(u, v)$ 取模并归一化后得到的振幅; φ_{ρ_1} 为 $U_{\rho_1}(u, v)$ 的相位。

考虑三维物体的第一个深度,在全息面上加入二次相位因子后的复振幅可表示为

$$U'_{h_1}(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}[U'_{\rho_1}(u, v)] \exp(i\varphi_{\rho_1}), \quad (8)$$

式中: $\mathfrak{F}^{-1}[\cdot]$ 表示傅里叶逆变换。图 3 中的 P_1 平面完成一次迭代计算的 step 1 和 step 2 后可得到 $U'_{h_1}(x, y)$,接着使用 $U'_{h_1}(x, y)$ 的相位作为初始相位继续对下一个平面 P_2 进行迭代,得到 $U'_{h_2}(x, y)$,同理将 $U'_{h_2}(x, y)$ 的相位作为初始相位继续对平面 P_3 进行迭代,得到 $U'_{h_3}(x, y)$,如此便完成了一轮迭代计算。经过多轮迭代之后,纯相位全息图可表示为

$$H = \text{angle}[U'_{h_3}(x, y)], \quad (9)$$

式中: $\text{angle}[\cdot]$ 为取相位函数。

从上述迭代过程可知,对于某个深度图像的计算包含相位补偿后的傅里叶变换和在频谱面上对振幅加权约束后的逆傅里叶变换。在得到全息面上的复振幅之后,对该深度对应的二次相位进行补偿以控制全息图再现的对应深度,需要经过两步傅里叶变换,即当目标图像数为 N 时,一轮迭代总共需要的傅里叶变换次数为 $2N$ 。

当再现全息图时,每一层深度对应的数值重建可以表示为

$$A_i = \left| \mathfrak{F}[\exp(iH) \exp(-i\varphi_i)] \right|, \quad (10)$$

式中: A_i 为在第 i 个深度平面处重建得到的振幅。

在所提算法中,每一轮迭代都包含了对每一层深

度成像的优化计算,每次迭代都执行了相应深度的相位补偿。同时,在迭代过程中包含了投影透镜 L_2 的焦距 f 和深度 z_i 参数,从而进行再现时,使用对应的投影透镜 L_2 可得到对应深度处的再现像,即所提迭代算法是包含显示系统物理参数的迭代算法,与显示系统具有明显的相关性。

为了评估该算法的性能,对照目标图像,利用峰值信噪比 (PSNR) 和归一化相关系数 (CC) 对每一层深度的再现像进行测评。两个包含数值范围为 0~1 的具有相同形状的矩阵 A 与 B 之间的 PSNR 和 CC 可以表示为

$$R_{\text{PSNR}} = 10 \lg(1/E_{\text{MS}}), \quad (11)$$

$$C_C = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A}) \sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})}}, \quad (12)$$

式中: E_{MS} 为矩阵 A 与 B 之间的均方误差; \bar{A} 为矩阵 A 的平均值; \bar{B} 为矩阵 B 的平均值。

3 实验结果及分析

3.1 全息图计算、实验及结果

设全息图分辨率为 $1080 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$, 显示系统中投影透镜的焦距为 $f = 100 \text{ mm}$, 重建像为空间上具有 4 层深度的“浙”、“江”、“师”和“范”4 个字, 4 个字与 L_2 后焦平面的距离依次为 $z_1 = 5 \text{ mm}$ 、 $z_2 = 6 \text{ mm}$ 、 $z_3 = 7 \text{ mm}$ 和 $z_4 = 8 \text{ mm}$, 每一层的权重因子 δ_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 都设置为 $1/N$, 其中 $N = 4$ 为分层的数量。波长为 $\lambda = 520 \text{ nm}$, 与再现时使用的激光波长相同。

分别以随机相位和二次相位作为初始相位, 测试所提算法的收敛性。二次相位的表达式为 $\varphi_Q = \kappa[\nu x^2 + (1 - \nu)y^2]$, 其中 κ 和 ν 的取值分别为 0.004 和 0.500。二次相位及其对应的频谱如图 4 所示。这些参数的设定可以保证二次相位的频谱能够覆盖目标图像的区域。

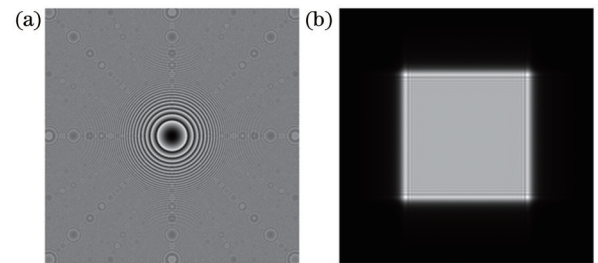


图 4 二次相位分布及其频谱。(a) 相位; (b) 频谱
Fig. 4 Quadratic phase and its spectrum. (a) Phase; (b) spectrum

经过 200 轮迭代计算后得到的全息图的数值重建效果如图 5 所示。图 5(a)~(d) 为以二次相位作为初始相位的情况下, 每层深度位置处的重构图像。图 5(e)~(h) 为以随机相位作为初始相位的情况下, 每

层深度位置处的重构图像。图 5(a)和图 5(e)中“浙”和“师”的局部放大图如图 5(i)~(l)所示。与使用随机相位得到的再现像相比,使用二次相位得到的再现像的散斑噪声得到了一定的抑制。从图 5(k)和图 5(l)的比较中可以看出,第一深度平面(“浙”字对应的深度平面)

处的“师”字会在使用随机相位作为初始相位时更模糊。也就是说,利用二次相位作为初始相位的全息图重建出来的图像中散斑噪声得到降低了,但也减弱了散焦和聚焦差效果,从而产生了更大的聚焦深度范围。

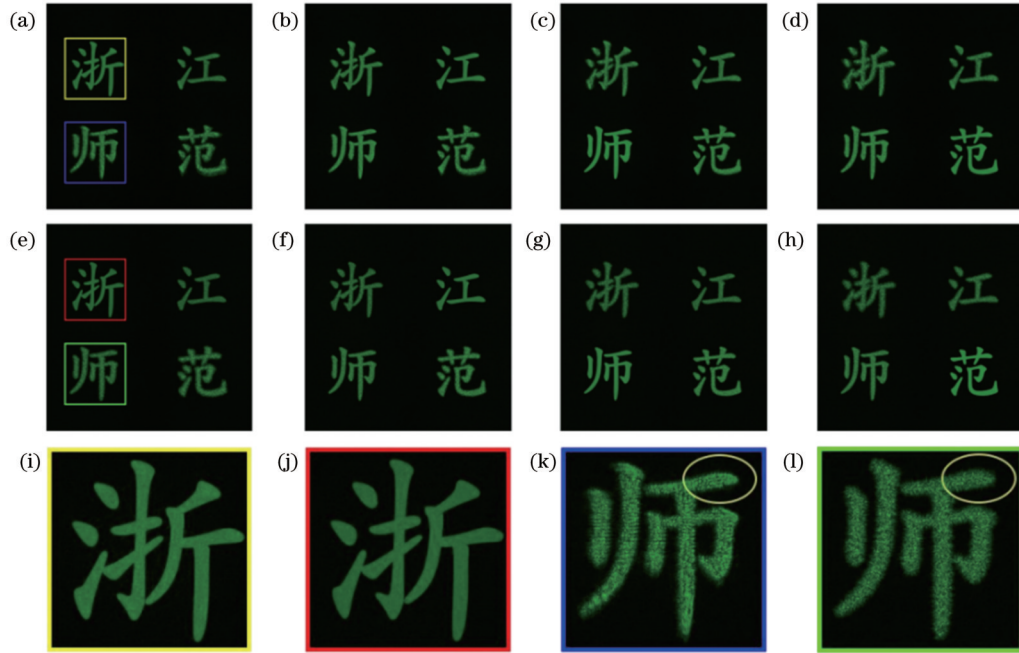


图 5 不同深度平面的数值重建像和部分局部放大图。(a)~(d)二次相位作为初始相位的重建像;(e)~(h)随机相位作为初始相位的重建像;(i)(k)图 5(a)的局部放大图;(j)(l)图 5(e)的局部放大图

Fig. 5 Numerical reconstruction and partial local magnification of different depth planes. (a)–(d) Reconstructions with initial quadratic phase; (e)–(h) reconstructions with initial random phase; (i)(k) partial local magnification of Fig. 5(a); (j)(l) partial local magnification of Fig. 5(e)

图 6 展示了 4 层不同深度图像在分别使用二次相位和随机相位作为初始相位的情况下,PSNR 和 CC 随迭代次数变化的曲线图。以随机相位作为初始相位的全息图收敛速度较快,但最终的 PSNR 评价指标稍差。随着迭代次数的增加,4 个深度的图像都收敛到了一个相对稳定的值,4 个深度图像的 PSNR 和 CC 之间的差值最终稳定在一个较小的范围内。

当进行光学再现时,为了避免零级光和高级衍射光的干扰,在纯相位全息图中加入一个离轴相位,最终全息图上的复振幅可以表示为

$$U(x, y) = \exp(iH) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} x \sin \theta\right), \quad (13)$$

式中: θ 为离轴参考光的角度,设置为 1.5° 。纯相位 SLM 的分辨率为 $1080 \text{ pixel} \times 1920 \text{ pixel}$,像素尺寸为 $4.5 \mu\text{m}$,所计算的分辨率为 $1080 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ 的全息图外围补零后用于显示。

实验中的目镜焦距为 $f_e = 50 \text{ mm}$,用 CCD 相机拍摄的光学重建图如图 7 所示,从左到右相机依次聚焦在“浙”、“江”、“师”和“范”对应的深度平面。其中,图 7(a)~(d)为使用二次相位作为初始相位的纯相位全

息图的再现像,图 7(e)~(h)为使用随机相位作为初始相位计算的纯相位全息图的再现像。通过对比重建结果可以得出,以随机相位作为初始相位的重建结果具有更多的散斑噪声,但离焦的效果更明显,这与数值模拟结果一致,即直接通过目镜观看全息再现像的情况为 VR 全息近眼三维显示。

图 7 中设计的三维模型为 4 个相互不重叠的字,而对于前后有遮挡的实际物体,如果多个深度图像之间的距离非常近,就会出现相互干扰的问题。为此,设置物体的不同深度平面间具有较大的距离,并利用所迭代算法进行计算,以此获得具有前后遮挡关系的三维模型的相位全息图。

原始图像分辨率为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,周围进行 0 填充后得到分辨率为 $1080 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ 的目标图像,用于相位全息图计算。4 个图像深度分别为 $z_1 = -15 \text{ mm}$ 、 $z_2 = -30 \text{ mm}$ 、 $z_3 = -45 \text{ mm}$ 和 $z_4 = -60 \text{ mm}$ 。每一层使用的权重因子 δ_i 都设置为 0.25。原始图像和重建像如图 8 所示。与以随机相位为初始相位计算出的全息图的重建像相比,利用二次相位作为初始相位的重建像具有更好的 PSNR 和 CC,如

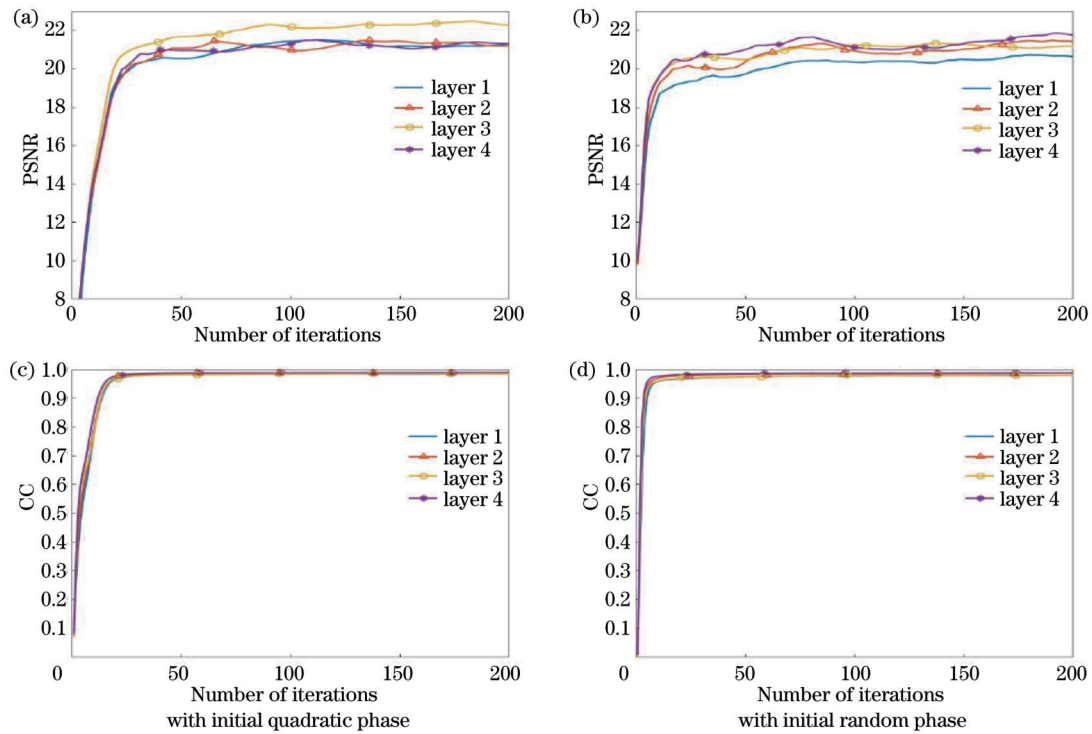


图 6 重建图像的 PSNR 和 CC 随迭代次数的变化曲线。(a)(b) PSNR; (c)(d) CC

Fig. 6 PSNR and CC of reconstructions varying with number of iterations. (a)(b) PSNR; (c)(d) CC

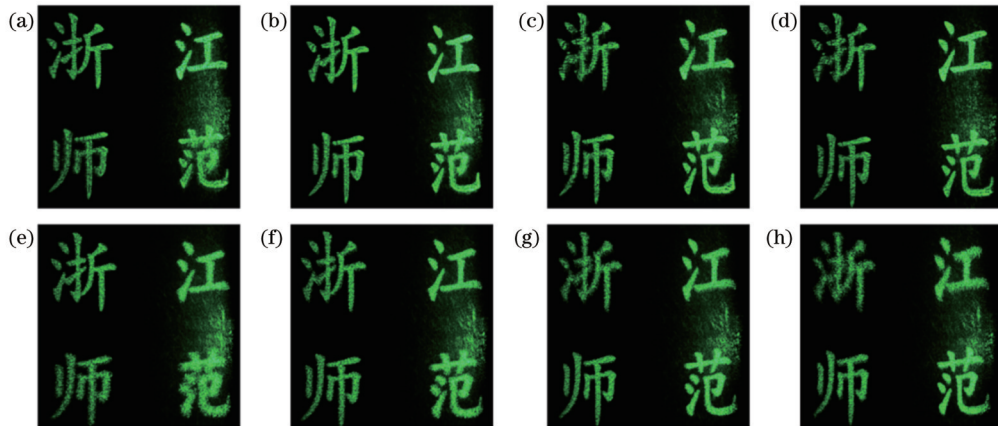


图 7 相机聚焦不同深度平面获得的光学重建像。(a)~(d)二次相位作为初始相位的重建像; (e)~(h)随机相位作为初始相位的重建像

Fig. 7 Optical reconstructions obtained by camera focused on different depth planes. (a)~(d) Reconstructions with initial quadratic phase; (e)~(h) reconstructions with initial random phase

图 8(e)~(h)。在这两种情况下,重建像不同深度图像之间都不存在相互遮挡产生的明显串扰。

在图 9 中,使用 BS 与目镜相结合的方式实现全息 AR 三维显示。图 9(a)为局部光路示意图,由前部分光路再现的三维实像通过目镜 L_3 后形成的图像光被 BS 半反射后进入人眼,环境光可通过 BS 部分透射进入人眼,此时即可实现 AR 显示效果,其中 BG 为实验环境背景。为了获得更清晰的显示效果,仅使用与图 7 实验中相同的以二次相位作为初始相位计算的纯相位全息图进行显示。图 9(b)和图 9(c)为相机拍摄的

重建像和环境背景,两次拍摄分别聚焦在“浙”和“师”所在的平面。

3.2 分析及讨论

在纯相位全息图计算中,每个深度使用的权重因子 δ_i 是非常重要的。从式(7)可以看出,振幅约束是一个全局约束,即若某一层权重因子 δ_i 太大,则其他层图像的权重将减弱,这会引起最终再现图像的亮度均匀性和图像质量发生很大变化。使用随机相位作为初始相位计算纯相位全息图,当其他参数与图 5 的实验相同,而每一层的权重因子分别更改为 $\delta_1 = 0.2$ 、 $\delta_2 = 0.3$ 、

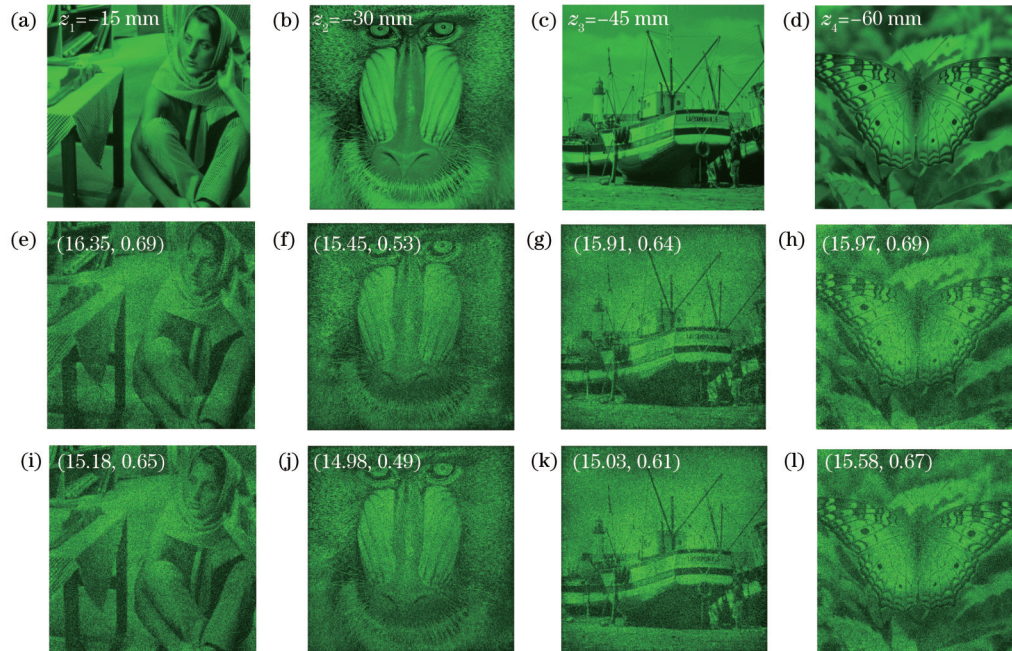


图 8 有遮挡关系三维模型的不同深度平面的数值重建图。(a)~(d)不同深度的原始图像;(e)~(h)二次相位作为初始相位的不同深度的重建像;(i)~(l)随机相位作为初始相位的不同深度的重建像

Fig. 8 Numerical reconstructions of 3D model focused on different depth planes with occlusions. (a)~(d) Original images at different depths; (e)~(h) numerical reconstructions at different depths with initial quadratic phase; (i)~(l) numerical reconstructions at different depths with initial random phase

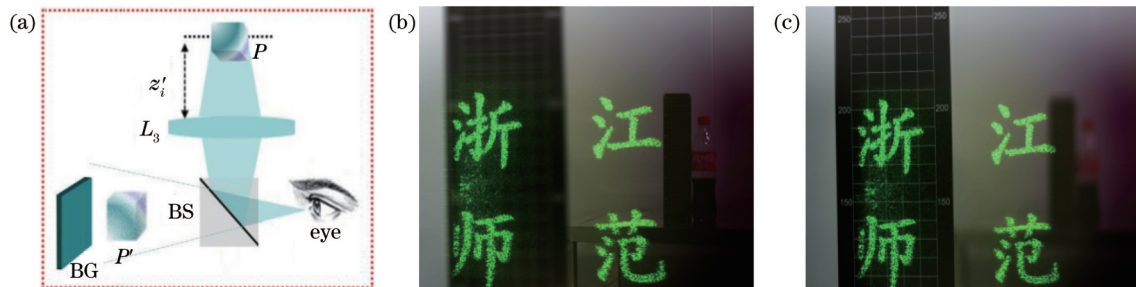


图 9 AR 显示光路原理图及实验结果。(a)光路原理图;(b)聚焦在“浙”字对应平面的实验图;(c)聚焦在“师”字对应平面实验图
Fig. 9 Optical setup for AR 3D display and displayed results. (a) Optical setup; (b) displayed result obtained by focusing on plane corresponding to "浙"; (c) displayed result obtained by focusing on plane corresponding to "师"

$\delta_3 = 0.4$ 和 $\delta_4 = 0.5$ 时,重建图像的 PSNR 和 CC 随迭代次数的变化曲线如图 10 所示。对于不同深度重建的图像,收敛后的 PSNR 和 CC 都有较大的差异。因此,当不同深度图像之间的亮度和对比度差异不显著时,将每次深度迭代的权值设置为 $1/N$ 是一种较优的参数选择方法。

图 11 给出了 SLM 再现像有效深度 W_z 与目镜焦距 f_e 的关系曲线,可知当 $f_e = 50$ mm 时,三维实像的有效深度为 10 mm。在图 5 和图 7 的实验中,三维实像的深度范围为 3 mm,故当人眼通过目镜观看时,均可清晰地聚焦于不同深度。然而,在图 8 所示的实验中,三维实像的深度范围为 45 mm,远远超过了实像的有效深度,故必然存在一部分再现像在明视距离以内而人眼无法聚焦,为此图 8 的实验中仅给出了数值再现以

说明所提迭代算法亦可应用于前后遮挡的三维图像中,而未给出实际的光学显示结果。尽管如此,仍可以在投影镜头后方通过白屏在不同深度处接收到聚焦变化的三维再现像。

在光学实验中,加入了离轴相位以便滤波消除零级光,倾斜角度为 1.5° ,基本上可以保证零级光和衍射光分离,但仍有一部分零级光的旁瓣所导致的杂光会出现在再现像中。可在采样定理的范围内增加离轴角度以保证更完整的图像光和零级光分离,此时图像的亮度会有所降低。另外,利用与纯相位型 LCoS 长轴方向一致的偏振光进行照射才能达到最高的衍射效率。实际中照明光的偏振态难以精准控制,这会导致较多的杂光进入后续系统,从而使最终的再现像存在噪声和杂散光,成像质量略低于模拟结果。未来 SLM

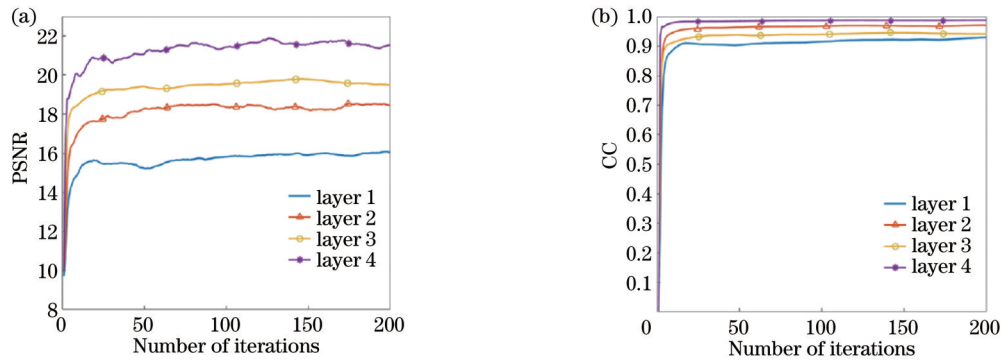


图 10 PSNR 和 CC 随迭代次数的变化曲线。(a) PSNR; (b) CC

Fig. 10 PSNR and CC varying with number of iterations. (a) PSNR; (b) CC

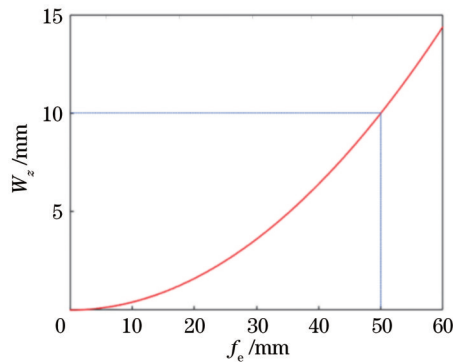


图 11 实像有效深度和目镜焦距关系曲线图

Fig. 11 Relationship between real image depth range and eyepiece focal length

的填充率将进一步提升,当零级光的影响可忽略时,通过滤波仅消除高级衍射光即可实现更好的显示质量。

4 结 论

提出了一种用于全息近眼 VR 和 AR 三维显示的紧凑型全息近眼显示系统,并设计了基于投影透镜参数的纯相位全息图迭代计算方法,最终通过数值模拟和光学实验证明了所提方法的可靠性。实验结果表明:该迭代算法在随机初始相位的情况下能实现良好的聚焦和离焦变化的三维显示效果;当再现使用二次相位作为初始相位计算的全息图时,可获得较大的焦深范围而对散斑噪声有所抑制。将所提方法与光波导结构结合有应用于波导型全息 AR 三维显示的潜力^[23],以促进元宇宙的早日到来。

参 考 文 献

- [1] Lu F, Hua J Y, Zhou F B, et al. Pixelated volume holographic optical element for augmented reality 3D display[J]. *Optics Express*, 2022, 30(10): 15929-15938.
- [2] 曹良才, 何泽浩, 刘珂璋, 等. 元宇宙中的动态全息三维显示: 发展与挑战(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(1): 20210935. Cao L C, He Z H, Liu K X, et al. Progress and challenges in dynamic holographic 3D display for the metaverse (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20210935.
- [3] Geng J. Three-dimensional display technologies[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, 5(4): 456-535.
- [4] Zhang H, Zhao Y, Cao L C, et al. Three-dimensional display technologies in wave and ray optics: a review (invited paper)[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(6): 060002.
- [5] Pi D P, Liu J, Wang Y T. Review of computer-generated hologram algorithms for color dynamic holographic three-dimensional display[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 231.
- [6] Yang X, Wang H, Li Y, et al. Large scale and high resolution computer generated synthetic color rainbow hologram[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(2): 025601.
- [7] Yan X P, Zhang T, Wang C Q, et al. View-flipping effect reduction and reconstruction visualization enhancement for EPISM based holographic stereogram with optimized hogel size [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 13492.
- [8] 许富洋, 杨鑫, 姚建云, 等. 高分辨率多视点动态全息 3D 显示 [J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0109001. Xu F Y, Yang X, Yao J Y, et al. High-resolution multi-view dynamic holographic 3D display[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0109001.
- [9] Wang Z, Zhang X, Lü G Q, et al. Conjugate wavefront encoding: an efficient eyepiece extension approach for holographic Maxwellian near-eye display[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(22): 5623-5626.
- [10] Yang X, Jiao S M, Song Q, et al. Phase-only color rainbow holographic near-eye display[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(21): 5445-5448.
- [11] Jiang X Y, Liang H C, Yan X P, et al. Optimization of reconstructed images of 3D phase hologram based on phase-only spatial light modulator[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8905: 89051H.
- [12] Yan X P, Wang C Q, Liu Y P, et al. Implementation of the real-virtual 3D scene-fused full-parallax holographic stereogram [J]. *Optics Express*, 2021, 29(16): 25979-26003.
- [13] Yang X, Zhang H B, Wang Q H. A fast computer-generated holographic method for VR and AR near-eye 3D display[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(19): 4164.
- [14] 卜浩斌, 焦述铭. 纯相位全息图优化算法[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(6): 810-826. Bu H Z, Jiao S M. Review of computer-generated phase-only hologram optimization algorithm[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(6): 810-826.
- [15] Velez-Zea A, Torroba R. Mixed constraint in global and sequential hologram generation[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(7): 1888-1895.
- [16] Eschbach R, Fan Z. Complex-valued error diffusion for off-axis computer-generated holograms[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(17): 3130-3136.
- [17] Gerchberg R W. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972,

- 35: 237-246.
- [18] Tsang P W M, Chow Y T, Poon T C. Generation of patterned-phase-only holograms (PPOHs) [J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9088-9093.
- [19] Kim Y K, Lee J S, Won Y H. Low-noise high-efficiency double-phase hologram by multiplying a weight factor[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(15): 3649-3652.
- [20] Zhou G, Chen Y, Wang Z, et al. Genetic local search algorithm for optimization design of diffractive optical elements[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(20): 4281-4290.
- [21] Rivenson Y, Zhang Y B, Günaydın H, et al. Phase recovery and holographic image reconstruction using deep learning in neural networks[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(2): 17141.
- [22] Di Leonardo R, Ianni F, Ruocco G. Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays[J]. *Optics Express*, 2007, 15(4): 1913-1922.
- [23] Draper C T, Blanche P A. Examining aberrations due to depth of field in holographic pupil replication waveguide systems[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(6): 1653-1659.

Compact Phase-Only Holographic Near-Eye 3D Display

Cai Xiaofeng^{1,2}, Song Gongyu^{1,2}, Yang Xin³, Wang Zengyao^{1,2}, Wen Qing^{1,2}, Xu Fuyang^{1,2*}, Ren Zhijun^{1,2}

¹*Institute of Information Optics, College of Physics and Electronic Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang, China;*

²*Key Laboratory of Researching Optical Information Detecting and Display Technology in Zhejiang Province, Jinhua 321004, Zhejiang, China;*

³*Lochn Optics-Micro/Nano Photonics Research Center, Shenzhen 518000, Guangdong, China*

Abstract

Objective As a virtual 3D space parallel to reality, metaverse can greatly enrich human life and work and has received extensive attention. Augmented reality (AR) and virtual reality (VR) are considered the gateway to the metaverse. True 3D display without visual fatigue caused to human eyes is the key to AR and VR displays. Among the 3D displays such as light field 3D display, the holographic 3D display is the only way to completely reconstruct the phase and amplitude information of 3D scenes.

The phase-only hologram is more attractive for its higher diffraction efficiency. The spatial light modulator (SLM), especially the phase-only liquid crystal on silicon (LCoS), is an ideal display panel for dynamic holographic 3D displays with phase-only holograms. However, due to the pixel structure of the LCoS, there are zero-order and high-order lights, which are inevitable and very annoying for holographic near-eye 3D displays and are always filtered with $4f$ optical systems. The enlarged virtual 3D image is viewed with an eyepiece and the presence of $4f$ optical systems increases the size of the display system. Since the complex amplitude distribution of diffracted 3D scenes is difficult to be fully described by phase-only data, the computation of phase-only holograms is a big challenge. Different optimization algorithms including Gerchberg-Saxton (GS) algorithm, patterned phase-only hologram, double phase method, gradient descent algorithm and deep learning algorithm have been proposed for the phase-only hologram calculation. The above algorithms have their advantages and disadvantages. Most of the algorithms are not related to the display systems and cannot be employed to reduce the volume of the display system.

Methods This paper demonstrates a compact holographic near-eye 3D display only with one projection lens and one eyepiece after the SLM, thereby avoiding the utilization of $4f$ optical systems and reducing the display system. In the hologram calculation, an interactive method by considering the parameters of holographic near-eye display systems is designed and implemented. The quadratic phases related to the focal length of the projection lens and the depth of each layer of the 3D model are adopted as compensation phase factors, and only the Fourier transform and inverse Fourier transform are leveraged in the iterations to obtain the 3D phase-only hologram. Finally, the 3D image with multiple layers can be projected near the focus plane of the projection lens and the enlarged virtual image can be watched with the eyepiece for VR near-eye 3D display and an extra beam splitter for AR near-eye 3D display.

Results and Discussions Four layers with a resolution of 1080 pixel \times 1080 pixel non-overlapped 3D model are designed, and the phase-only holograms with random phase and quadratic phase as initial phase are calculated and reconstructed. The peak signal-to-noise ratio (PSNR) and correlation coefficient (CC) are employed to evaluate the proposed calculation method and point out that when the initial phase is random, the speckle noise of the reproduced image is worse but the 3D effect of out-of-focus focusing is more obvious. However, when the quadratic phase is used as the initial phase, the speckle

noise can be suppressed under certain circumstances, but the out-of-focus change is not obvious for the 3D display. In addition, a simulation study is conducted on the multi-depth images with front and back occlusion, which proves that the proposed algorithm is also effective in this case. The optical reconstructions of the phase-only holograms are implemented and the holographic near-eye VR and AR 3D display results are verified with experiments in the proposed compact display system.

Conclusions In this paper, a compact holographic near-eye display is proposed for holographic near-eye VR and AR 3D displays. The proposed iterative algorithm is a display system-related algorithm, which is conducive to reducing the volume of the holographic near-eye display system. The effectiveness of the proposed method is proved by simulations and optical experiments. The combination of the proposed method and the optical waveguide has the potential to be applied to the waveguide-type holographic AR 3D display to promote the early arrival of the metaverse.

Key words holography; holographic 3D display; near-eye display; phase holography; virtual reality; augmented reality