

文章编号: 1007-2780(2024)07-0892-09

基于 HOE 的全息显示双目视差构建方法

张虎鸣, 颜玢玢*, 仲崇力, 肖 瑞, 秦秀娟, 全佳乐, 桑新柱
(北京邮电大学 信息光子学与光通信全国重点实验室, 北京 100876)

摘要: 全息光学元件(Holographic Optical Element, HOE)是全息三维显示的重要器件之一。为了解决 HOE 用于双目全息显示时视差不匹配的问题, 本文提出并实现了一种基于 HOE 的全息显示双目视差构建方法, 同时对元件成像时的像差进行了分析校正。通过对 HOE 的制作原理和成像规律分析, 结合光线跟踪技术渲染的虚拟模型和现实场景模型, 设计了基于 HOE 的全息双目显示系统, 提出了双目视差构建方法, 即在获取人眼坐标位置时为观察者实时提供包含双目视差关系的视点图像。通过进一步分析全息显示系统内部的图像畸变产生原因及过程, 提出了去畸变的优化处理算法。实验结果表明, 提出的方法不仅能够实现 HOE 实时显示全息三维图像, 而且解决了 HOE 在全息双目显示中视差不匹配以及成像畸变的问题。

关键词: 全息显示; 全息光学元件; 光线跟踪; 空间光调制器; 双目视差

中图分类号: TN27 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2024-0033

Construction method of binocular parallax for holographic display based on HOE

ZHANG Huming, YAN Binbin*, ZHONG Chongli, XIAO Rui,
QIN Xiujuan, QUAN Jiale, SANG Xinzhu

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Holographic optical element (HOE) is one of the important devices for holographic 3D display. In order to solve the problem of parallax mismatch when HOE is used for binocular holographic display, this paper proposes and implements a holographic display binocular parallax construction method based on HOE. At the same time, the aberrations of the components are analyzed and corrected. By analyzing the production principle and imaging rule of HOE, combining the virtual model rendered by ray tracing technology and the real scene model, a holographic binocular display system based on HOE is designed, and a binocular parallax construction method is proposed, that is, a real-time view image containing binocular parallax relationship is provided for the observer when acquiring the coordinate position of the human eye. By further analyzing the cause and process of image distortion in holographic display system, an optimization algorithm to remove the distortion is proposed. Experiment results show

收稿日期: 2024-01-24; 修订日期: 2024-02-21.

基金项目: 国家自然科学基金(No.62175017, No.62075016)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.62175017, No.62075016)

*通信联系人, E-mail: yanbinbin@bupt.edu.cn

that the proposed method can not only realize the HOE display holographic 3D image in real time, but also solve the problem of parallax mismatch and image distortion in the holographic binocular display of HOE.

Key words: holographic display; holographic optical element; ray tracing; spatial light modulator; binocular parallax

1 引言

全息三维显示技术通过对包含物体振幅和相位信息的全息图进行重建,不仅可以真实地再现实际的三维场景,还可以解决传统立体显示中存在的视疲劳问题,在医疗、军事、教育、娱乐等领域内受到了广泛的关注^[1-5]。

随着计算机软件技术的不断提升,计算机生成全息图在AR显示领域发挥着重大的作用^[6-8]。相比于传统的光敏介质和复杂的干涉记录程序,计算全息图显示技术具有很高的灵活性^[9],因此越来越多地被用于实现真三维显示。空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)作为计算全息技术的核心器件,被用于承载并调制入射光的波前信息。然而,基于SLM的计算全息显示技术也存在许多的局限性。对于目前可用的SLM,只能通过最大衍射SLM的像素化结构来实现可以覆盖一只眼睛的狭窄视角^[10-11],无法实现双眼观察全息重建,这极大地限制了观看者的视觉体验。为了扩展全息显示器的视角,目前常用的扩展全息显示器视角的两种方法分别是基于SLM的空分复用^[12]和时分复用^[13]。然而,这些方法通常需要使用多个SLM^[14],并对多个光信号进行调制和合并,因此需要更复杂的硬件和软件系统来实现,不仅造价昂贵,而且在合并或者切换的过程中可能会对观众的视觉系统造成不适感或者疲劳感。近年来,全息光学元件(Holographic Optical Element, HOE)越来越多地被应用于全息三维显示,用来优化调制显示视角。HOE是一种薄膜衍射光学元件,与传统光学元件相比,具有重量轻、厚度薄、制造方便、成本低等优点。Hideya Takahashi等人采用HOE阵列,利用其特定的离轴凹面镜的功能,增大显示系统视角^[15]。肖瑞等人使用计算机生成全息图打印的HOE作为导光板,实现了高分辨率双视角全息三维显示功能^[16]。Byoung-ho Lee等人介绍了利用HOE实现自由曲面镜像阵列扩展AR显示系统的视

角^[17]。这些方法通过扩展全息显示器的显示视角,为实现双目全息显示奠定了坚实的基础。

目前,基于SLM的双目全息显示技术中,苏州大学团队利用两个SLM分别加载场景的左右三维透视图象的纯相位全息图,在正确的深度线索下进行光学全息重建^[18],验证了双目显示效果。同时,苏州大学团队也利用单个SLM设计制作光栅^[19-20],将重建的左右三维透视图象引导到相应的左右眼,成功呈现了具有双目视差的全息三维图像。北京邮电大学团队通过设计制作特定的HOE,利用单个SLM实现了基于HOE的双视点显示功能^[19,21],由于显示过程中并没有考虑到视差匹配的问题,该方法并不能提供具有双目视差的全息三维图像。

本文从人眼产生立体视觉的原理出发,提出一种基于单个SLM的HOE全息显示双目视差构建方法,实现基于HOE的实时动态双目全息显示。该方法通过对HOE制备和显示过程进行分析,构建了HOE用于双目全息显示的物理模型,以及采用光线跟踪技术搭建了虚拟模型。通过计算推导基于HOE的双目显示视差条件,建立了虚拟场景中相机拍摄位置、再现像入射位置和人眼观看距离的映射关系。通过映射关系设置相机参数,采用分层角谱衍射计算左右视点的叠加相位全息图,通过HOE显示系统调制后,人眼便可观察到具有双目视差的全息三维图像。此外,针对双目显示系统内存在的光路折叠等问题造成的成像畸变进行分析,设计了去畸变的优化方法。实验结果表明,提出的方法在低实验成本的情况下,构建了基于HOE双目显示的正确视差关系,有效地实现了左右视点融合。

2 原理

2.1 HOE双目显示的衍射计算及光学原理

基于单个SLM的HOE双目全息显示主要分为衍射过程和显示过程,如图1所示。将左右

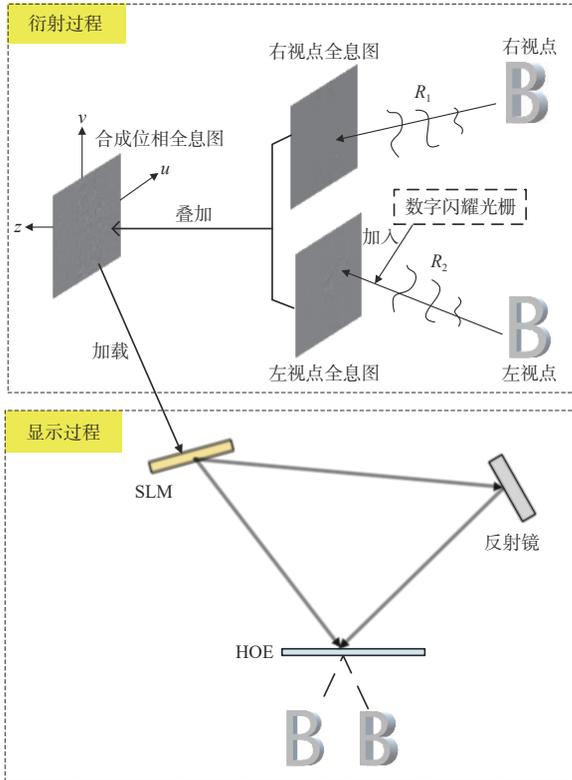


图1 双目全息显示系统原理

Fig. 1 Principle of binocular holographic display system

视点图像作为信息源,通过衍射计算并叠加数字闪耀光栅得到左右视点的合成位相全息图。为确保再现的左右视点图像具有不同的再现方向,计算过程中设置左右视点具有不同的参考波方向。合成全息图加载到SLM进行光学再现,根据视差构建方法,将左右视点的再现像分别照射在HOE上。经过HOE控光,调制后图像被引导进入观察者的左右眼视区。人眼获取到同一场景下具有正确视差关系的左右视点图像,在大脑中形成立体视觉。

衍射计算中采用分层角谱算法,根据深度信息将3D场景进行离散化,每个2D图像的振幅分布与其所在层的量化深度相对应,这样3D场景就转化成一系列平行于全息图平面的2D图像。将每层图像的振幅信息叠加随机相位分布作为输入波前,根据角谱衍射理论计算出每层图像在全息面的角谱分布,对这些角谱分布进行叠加,即可求出整个3D场景在全息面的振幅分布。然后利用逆傅里叶变换就可以求出全息图的复振幅。复振幅分布表示为式(1):

$$h(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \sum_{j=1}^N \mathcal{F} [L_j(x, y)] \times \exp \left(ikz_j \sqrt{1 - \lambda^2 u^2 - \lambda^2 v^2} \right) \right\}, \quad (1)$$

式中: $L_j(x, y)$ 描述一个视点每一深度层的复振幅信息, z_j 为第 j 层距离全息图平面的传播距离, λ 为光波波长, u 和 v 描述了空间频率, $k = 2\pi/\lambda$ 。

以左视点为例,利用分层角谱算法计算出左视点的复振幅分布。当只使用一个SLM进行光学重建时,为了确保左右视点具有不同的再现方向,在全息衍射计算过程中两个视点的参考波设置为不同的方向。如图1中衍射过程所示,假设左视点的参考波 R_1 与 z 轴的夹角为 θ_1 ,根据角谱衍射理论,将空间平面上的光波场利用傅里叶变换分解为沿不同方向传播的平面光波,得到左视点复振幅分布为:

$$h_1(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \sum_{j=1}^N \mathcal{F} [L_j(x, y)] \times \exp \left(ikz_j \sqrt{1 - (\lambda u \cos^{-1} \theta_1)^2 - (\lambda v)^2} \right) \right\}. \quad (2)$$

若将计算得到的纯相位图直接叠加后加载到SLM上,SLM的像素化结构将会产生多级重建图像以及零级和多级衍射光束在内的干扰光^[22],严重影响重建图像的效果。因此,在衍射计算过程中引入数字闪耀光栅,将目标重建像与零级衍射光束分开,并通过 $4f$ 系统滤波,得到一级再现像的复振幅分布。数字光栅相位分布可以描述为^[23]:

$$\varphi_{DG} = \frac{2\pi}{T} \text{mod}(br + cs, T), \quad (3)$$

式中: mod 为模运算, T 为数字光栅的周期, r 和 s 分别为数字光栅的垂直和水平范围,通过取不同的 b, c 值可以得到不同方向的数字闪耀光栅。由于所采用的SLM的最大相位调制为 2π ,因此叠加数字光栅后的最终纯相位全息图的相位分布 φ' 可以表示为:

$$\varphi' = \text{mod}(\varphi + \varphi_{DG}, 2\pi). \quad (4)$$

基于SLM的相位特性,在合成全息图时只需保留其相位部分,则合成相位全息图的相位分布为:

$$\text{res} = \arg \left\{ \text{real} \left[h_1(x, y) \right] \exp(\varphi') + h_2(x, y) \right\}, \quad (5)$$

式中:real表示取实部函数,arg表示取相位函数, $h_2(x, y)$ 描述了右视点的复振幅分布。通过衍射计算得到合成的相位全息图,将最终的合成全息图加载到SLM上进行离轴光学全息重建,使左右视点图像具有不同的再现方向,不会发生重叠失焦等问题。

显示过程主要依赖于HOE特定的控光特性,即调制入射光波聚焦在特定位置,通过HOE将3D场景的左右视点再现像分别调控到观察者的左右眼视区。

基于体全息光学元件的角复用技术,将两个具有不同定向控光参数的透镜以不同的参考光波记录在同一块HOE上。如图2(a)所示,记录过程分为两次曝光,参考光波分别以不同的角度与球面信号光波进行干涉。再现过程如图2(b)所示,将两束平面光以参考光波的角度分别入射HOE,衍射后的光束沿着记录物体光束的方向传播,分别聚焦在焦点1和焦点2。经多次实验测量,当第一步的曝光量为 110 mJ/cm^2 ,第二步的曝光量为 100 mJ/cm^2 时获得最高衍射效率,对应每个视点的衍射效率分别为50%和52%。

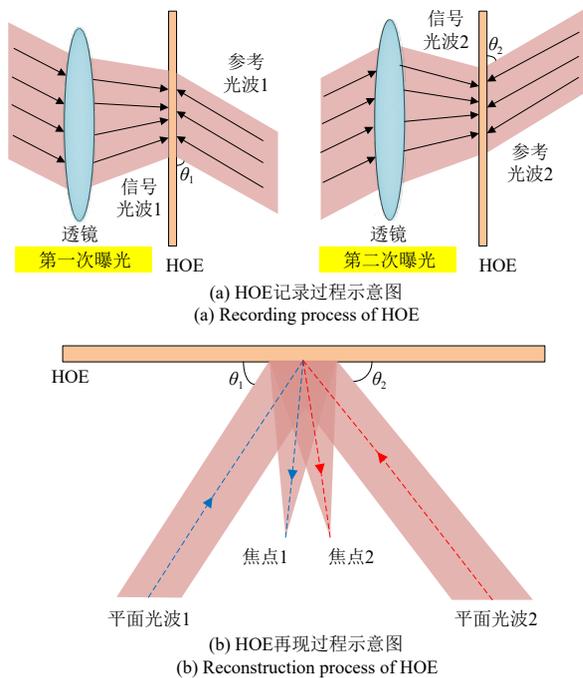


图2 HOE记录和再现过程示意图

Fig. 2 Recording and reconstruction process of HOE

根据HOE的记录过程,将其可视区域看作是一个具有两个离轴焦点的透镜形成的视区。以其中一个焦点为例,HOE成像原理如图3所示。其中, f 表示HOE的焦距, a 表示SLM再现像到HOE的距离, b 为HOE所成像到HOE的距离, H 和 h 分别表示SLM再现像通过HOE成像前后的大小。类比透镜的成像规律,得出以下关系:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad \frac{H}{h} = \frac{b}{a}. \quad (6)$$

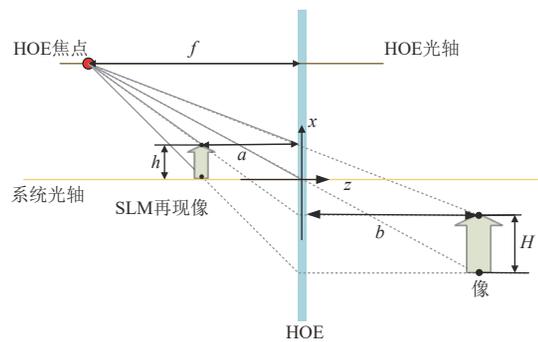


图3 HOE光学成像示意图

Fig. 3 Optical imaging of HOE

2.2 双目显示系统视差构建方法

通过衍射计算和SLM光学重构得到了左右视点的再现像,经过HOE调制后再再现像会聚焦在不同位置上。但是由于调制后两个视点再现像大小和位置均不满足正确的视差关系,观察者双眼不能同时观看到正确的左右视点图像,无法实现双目立体显示。为确保观看到包含正确视差的视点图像,提出了双目全息显示的视差构建方法。

该方法采用光线跟踪渲染技术,搭建虚拟场景模拟现实场景,如图4所示。图4(a)为现实场景模型,其中 F_1, F_2 分别表示HOE的两个焦点, D 表示人眼到HOE的观看距离, z_1 表示左右视点融合图像到HOE的距离。图4(b)为虚拟场景模型,其中 d 为相机平面到目标物体的距离。为了更直观地表达成像过程以及方便计算推导,左右视点图像均采用箭头方式表示,叠加的图像表示左右视点融合后的图像。虚拟场景下设有目标物体和两部相机,其中相机用于模拟真实人眼,实时拍摄获取目标物体的左右视点图像,并通过光线跟踪渲染得到合成位相全息图。若现实场

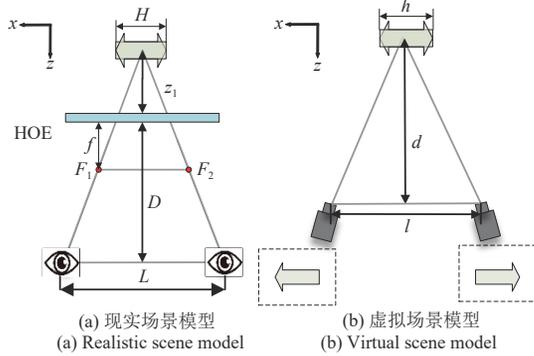


图 4 场景模型构建

Fig. 4 Scene model construction

景下观看到具有正确视差的左右再现像,人眼看到的融合图像和左右相机拍摄到的图像应该具有几何相似性。

进一步构建图 4(a)中双目全息显示系统 HOE 调制部分的双视点融合模型,如图 5 所示。假设现实场景中观察者的观看距离 D 是已知的,人眼间距设置为 L ,HOE 的相关参数是固定的。根据人眼观察的位置,设置虚拟相机的拍摄距离 d 和相机间距 l ,计算 SLM 再现像的位置(HOE 调制前),即图中 (x_0, z_0) 。左右视点再现像经调制后,观察者在观看距离 D 处左右眼分别获取到包含正确视差关系的左右视点图像。

为了确保清晰展示推导过程,图 5 中描述了左视点的成像过程,计算推导均以右视点为例。其中, x_0 表示右视点再现像在 x 轴方向上距离中心光轴的距离, z_0 表示右视点再现像在 z 轴方向上距离 HOE 的距离, s 表示 HOE 焦点距离中心

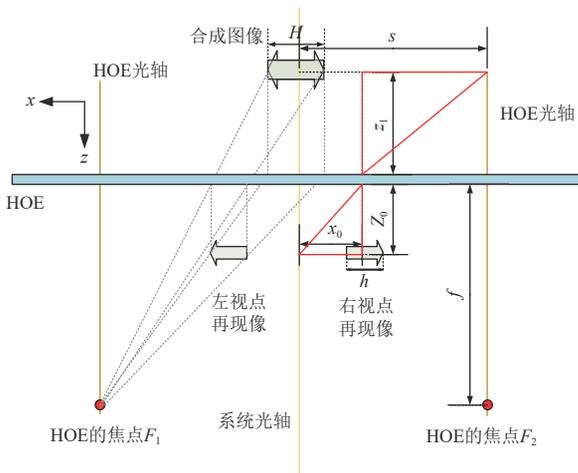


图 5 双视点融合设计原理

Fig. 5 Design principle of left and right viewpoint fusion

光轴的距离, f 表示 HOE 焦点距离。

首先推导再现像经过 HOE 调制得到融合图像前的入射位置,由公式(6)可知:

$$\frac{1}{z_0} - \frac{1}{z_1} = \frac{1}{f}. \quad (7)$$

根据图 5 中红色标注的两个三角形相似关系可以进一步得到:

$$\frac{s - x_0}{x_0} = \frac{z_0}{z_1}. \quad (8)$$

根据公式(7)和(8),获取 HOE 调制前的再现像位置 x_0, z_0 ,需要先求出 z_1 ,此变量依赖于人眼距离 HOE 的观看距离 D 。在图 4 中,根据 HOE 成像和人眼观看位置的对应关系可以得到:

$$\frac{z_1 + f}{z_1 + D} = \frac{2s}{L}, \quad (9)$$

式中解得: $z_1 = \frac{2Ds - fL}{L - 2s}$ 。

将 z_1 的结果代入公式(7)、(8),计算出在获取到人眼观看距离 D 的情况下,双目显示系统中左右视点再现像的正确照射位置 (x_0, z_0) ,描述为:

$$x_0 = \frac{2s^2 f - 2Ds^2}{4sf - fL - 2Ds}, z_0 = \frac{f^2 L - 2Ds f}{2sf - 2Ds}. \quad (10)$$

其次,根据人眼位置和 HOE 的相关参数需要正确设置虚拟相机的参数,由图 4 中两个模型的比例关系发现,比例系数 M 可以描述为:

$$M = \frac{H}{h} = \frac{z_1}{z_0} = \frac{D + z_1}{d}. \quad (11)$$

代入 z_1, z_0 的计算结果,最终得到相机位置距离 d 和人眼观看距离 D 之间的关系:

$$d = \frac{z_0}{z_1} D + z_0 = \frac{(DL - fL) f}{2Ds - 2sf}. \quad (12)$$

综上所述,在人眼观看距离已知的情况下,设置正确的相机距离获取到左右视点图,通过 SLM 进行离轴全息光学重建。通过设置再现像距离 HOE 的正确位置 (x_0, z_0) ,人眼便可在左右视区内分别观看到具有正确视差关系的左右视点图像。

2.3 HOE 的像差校正方法

由于双目显示系统内存在离轴和折叠光路,全息图像入射到 SLM 再经 HOE 调制后图像会发生横向畸变。如图 6 所示,以其中一个视点为例,假设入射到 SLM 上的平面波与 SLM 的 z 轴方向夹角为 φ ,经 SLM 调制后光波与 HOE 的 x

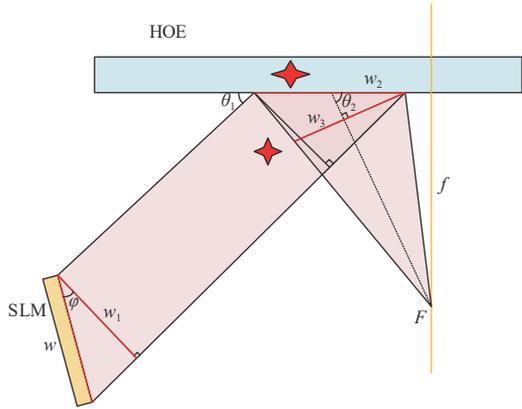


图 6 双目显示系统内畸变分析原理图

Fig. 6 Schematic diagram of distortion analysis for the binocular display system

方向夹角为 θ_1 , 经 HOE 调制后球面波至视区中心点连线和 HOE 的 x 轴夹角为 θ_2 。SLM 的分辨率是 $i \times j$, 像素间距是 ρ 。因此, SLM 的宽度表示为 $w = \rho \times j$, SLM 可再现的全息图在垂直光束方向最大为 $w_1 = w \times \cos \varphi$, 畸变系数描述为:

$$\gamma_1 = \frac{w_1}{w} = \cos \varphi . \quad (13)$$

由于显示过程中需将重建的全息图像沿 HOE 记录时的参考波方向入射至 HOE, 会使其在投影到 HOE 时发生畸变。若 HOE 上投影区域在 x 轴方向上大小为 w_2 , 此处畸变系数描述为:

$$\gamma_2 = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{\sin \theta_1} . \quad (14)$$

通过 HOE 调制后的球面光波聚焦于 HOE 的焦点 F 上。人眼观看到的图像为垂直于视线方向的 w_3 , 根据数学关系将 w_3 描述为:

$$w_3 = \frac{w_2}{2} \sin \theta_2 - \left(\frac{f}{\sin \theta_2} - \frac{w_2}{2} \cos \theta_2 \right) \times \tan^{-1} \left[\arctan \left(\frac{w_2}{2f} + \cot \theta_2 \right) + \theta_2 \right] = \gamma_3 w_2 . \quad (15)$$

综上所述, 若获得无失真的视点图像, 需要提前对成像过程进行预处理, 整体的畸变系数为:

$$\gamma = \gamma_1 \times \gamma_2 \times \gamma_3 . \quad (16)$$

为了校正双目显示系统内由于离轴和折叠造成的图像畸变, 采用缩小光线跟踪计算全息图采样阶段的采样间隔方法, 如图 7 所示。当缩小采样间隔时, 采样窗口会被横向缩放, 物体再现

像也会随之横向缩放。处理过程中采样间隔前后关系为:

$$\Delta x' = \Delta x \times \gamma . \quad (17)$$

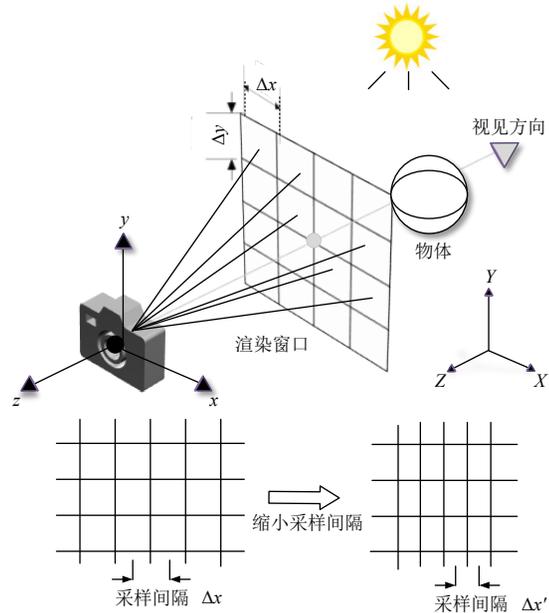


图 7 光线跟踪采样阶段示意图

Fig. 7 Sampling phase of ray tracing

3 实 验

对提出的方法进行实验验证, 搭建如图 8 所示的实验验证系统。实验中使用了分辨率为 1920×1080 、显示刷新率为 60 Hz、像素间距为 $8 \mu\text{m}$ 的反射式纯相位型 SLM, 一个 639 nm 的固体激光器, 一套扩束准直系统(包括针孔滤波器和准直透镜)和一块新型全色光敏材料(GJ-

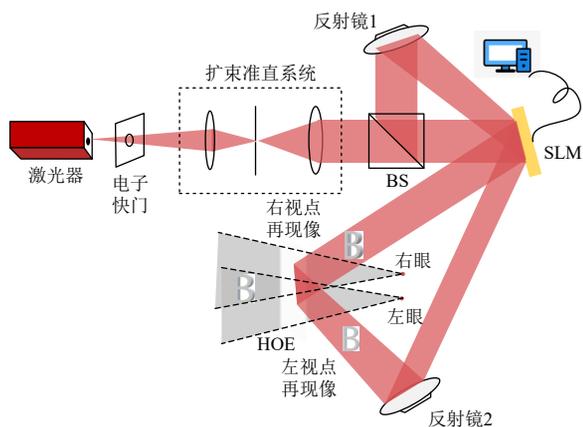


图 8 实验光路图

Fig. 8 Diagram of experimental optical path

03)经曝光后制成的HOE。激光器出射的光束通过扩束准直后获得均匀的平面波,经过分束器后会形成两束不同方向的平面波。这两束平面波以不同角度入射到SLM,使左右视点再现像具有不同的再现方向。将左右视点再现像信息作为探测光波,在满足其再现角度与HOE记录时的参考光波方向一致时,通过设置左右再现像的正确位置,经HOE调制后,观察者左右视区内分别可以观察到包含正确视差关系的左右视点再现像。

首先通过对比使用像差校正方法前后的实验再现全息图像的横向大小来验证HOE像差校正方法的正确性。为了更好地展示实验效果,实验中采用黑色背景,对二维字母“B”经不同角度入射SLM,再现像经HOE调制后的图像大小进行分析。采用分层角谱衍射,字母“B”垂直入射SLM后的再现像宽度为12 mm。根据实验光路图,未添加像差校正算法时,字母“B”以一定角度入射SLM和HOE后,实验结果如图9(a)所示,字母“B”横向发生畸变,宽度约为13.5 mm。添加像差校正算法后,实验结果如图9(b)所示,字母“B”横向大小得到一定的修正,宽度约为11.5 mm。实验结果表明,该算法具有较好的校正效果。

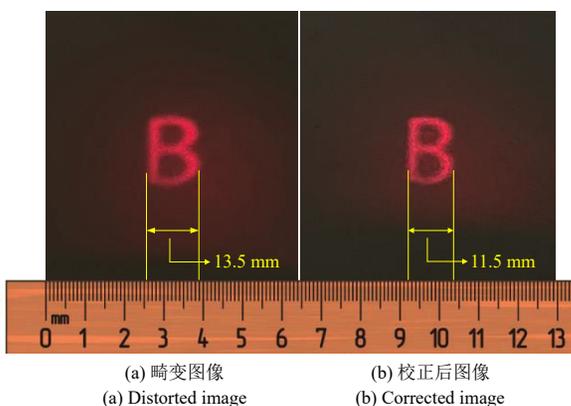


图9 像差校正实验结果
Fig. 9 Experimental results of aberration correction

在系统再现像的像差被有效校正之后,提出的视差构建方法可以得到具有正确视差关系的左右视点图像。通过计算机图形学软件获取字母“B”的3D模型,设定人眼位置,按照视差构建方法进行全息计算,获取到正确的左右视点全息图再现像。实验中,在左右眼处分别使用相机1

和相机2记录左右视点图像。为了验证左右视点图像具有正确的视差关系,在实验装置中放置了一把钥匙和一只小熊用来描述真实的物理深度。如图10所示,图10(a)是左视区内图像,即相机1拍摄到的全息再现像;图10(b)是右视区内图像,即相机2拍摄到的全息再现像。从实验结果10(a)左、(a)右或者10(b)左、(b)右可以看出,当相机聚焦在字母“B”时,钥匙是清晰的,小熊是模糊的。相反,当相机聚焦在小熊时,钥匙和字母“B”是模糊的。结果表明,字母“B”与钥匙处于同一个物理深度下。通过对比左右视点图像10(a)左、(b)左或者10(a)右、(b)右可以看出,由于字母“B”和钥匙处于同一物理深度上,右视点中钥匙和字母“B”的相对位置相较于左视点中的并没有明显改变。但是由于小熊和钥匙、字母“B”物理深度不同,左右视点中相对位置有明显改变,存在明显的视差感。且在实验中,人眼在假定的位置上可以观看到3D模型“B”的立体效果。实验结果表明,提出的方法可以构建正确的视差关系,实现HOE的双目全息显示。

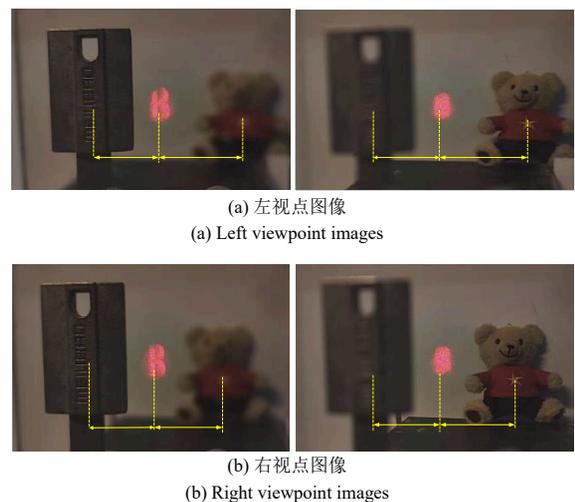


图10 视差构建实验结果

Fig. 10 Experimental results of disparity construction

4 结 论

本文提出一种基于HOE的全息显示双目视差构建方法,利用分层角谱衍射,通过引入两种不同的参考波来分离三维场景的左视图和右视图,生成了合成纯相位全息图。结合光线跟踪技术利用单个SLM和HOE搭建双目显示系统,解

决了HOE在全息双目显示中视差不匹配以及成像畸变的问题,对双目全息显示技术具有一定的应用价值。此外,该方法与人眼跟踪技术相结

合,可通过人眼实时获取到具有正确视差关系的左右视点全息再现图像,有望应用于未来的AR全息显示设备。

参 考 文 献:

- [1] BLANCHE P A. Holography, and the future of 3D display [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(4): 446-459.
- [2] BIGLER C M, BLANCHE P A, SARMA K. Holographic waveguide heads-up display for longitudinal image magnification and pupil expansion [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 2007-2013.
- [3] DRAPER C T, BIGLER C M, MANN M S, *et al.* Holographic waveguide head-up display with 2-D pupil expansion and longitudinal image magnification [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): A251-A257.
- [4] CHEN X J, XU L, WANG Y P, *et al.* Development of a surgical navigation system based on augmented reality using an optical see-through head-mounted display [J]. *Journal of Biomedical Informatics*, 2015, 55: 124-131.
- [5] NGUYEN-PHUOC T, LI C, THEIS L, *et al.* HoloGAN: Unsupervised learning of 3D representations from natural images [C]//*Proceedings of the 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. Seoul: IEEE, 2019: 7587-7596.
- [6] ST-HILAIRE P, BENTON S A, LUCENTE M E, *et al.* Electronic display system for computational holography [C]//*Proceedings of the SPIE 1212, Practical Holography IV*. Los Angeles: SPIE, 1990: 174-182.
- [7] 李会,桑新柱,仲崇力,等. 基于数字微镜器件的高分辨率计算全息显示[J]. *液晶与显示*, 2022, 37(5): 625-631.
LI H, SANG X Z, ZHONG C L, *et al.* High-resolution computed holographic display using digital micromirror device [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(5): 625-631. (in Chinese)
- [8] PAN Y J, LIU J, LI X, *et al.* A review of dynamic holographic three-dimensional display: algorithms, devices, and systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(4): 1599-1610.
- [9] 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(1): 6177.
- [10] ONURAL L, YARAŞ F, KANG H. Digital holographic three-dimensional video displays [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(4): 576-589.
- [11] MICHALKIEWICZ A, KUJAWINSKA M, KOZACKI T, *et al.* Holographic three-dimensional displays with liquid crystal on silicon spatial light modulator [C]//*Proceedings of the SPIE 5531, Interferometry XII: Techniques and Analysis*. Denver: SPIE, 2004: 85-94.
- [12] ZHAO W Y, LIU B Y, JIANG H, *et al.* Full-color hologram using spatial multiplexing of dielectric metasurface [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(1): 147-150.
- [13] YANG L, SANG X Z, YU X B, *et al.* Viewing-angle and viewing-resolution enhanced integral imaging based on time-multiplexed lens stitching [J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 15679-15692.
- [14] 郑义微,王迪,李移隆,等. 基于液晶空间光调制器的大视角全息显示技术[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(6): 789-796.
ZHENG Y W, WANG D, LI Y L, *et al.* Holographic display technology with large viewing angle based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(6): 789-796. (in Chinese)
- [15] TAKAHASHI H, FUJINAMI H, YAMADA K. Wide-viewing-angle three-dimensional display system using HOE lens array [C]//*Proceedings of the SPIE 6055, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIII*. San Jose: SPIE, 2006: 453-461.
- [16] XIAO R, YAN B B, LI H, *et al.* High-resolution dual-view computer-generated holographic display based on holographic optical element [C]//*Proceedings of the SPIE 12166, Seventh Asia Pacific Conference on Optics Manufacturing and 2021 International Forum of Young Scientists on Advanced Optical Manufacturing (APCOM and YSAOM 2021)*. Hong Kong, China: SPIE, 2022: 1303-1307.

- [17] LEE B, BANG K, CHAE M, *et al.* Holographic optical elements for head-up displays and near-eye displays [C]// *Proceedings of the SPIE 11708, Advances in Display Technologies XI*. SPIE, 2021: 1170803.
- [18] SU Y F, TANG X Y, ZHOU Z, *et al.* Binocular dynamic holographic three-dimensional display for optical see-through augmented reality using two spatial light modulators [J]. *Optik*, 2020, 217: 164918.
- [19] SU Y F, CAI Z J, LIU Q, *et al.* Binocular holographic three-dimensional display using a single spatial light modulator and a grating [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(8): 1477-1486.
- [20] LIN S F, ZHANG S H, ZHAO J, *et al.* Binocular full-color holographic three-dimensional near eye display using a single SLM [J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 2552-2565.
- [21] QIN X J, SANG X Z, LI H, *et al.* Binocular holographic display based on the holographic optical element [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2022, 39(12): 2316-2324.
- [22] ZHANG H, XIE J H, LIU J, *et al.* Elimination of a zero-order beam induced by a pixelated spatial light modulator for holographic projection [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(30): 5834-5841.
- [23] SU Y F, CAI Z J, LIU Q, *et al.* Projection-type dual-view holographic three-dimensional display and its augmented reality applications [J]. *Optics Communications*, 2018, 428: 216-226.

作者简介:



张虎鸣,男,硕士研究生,2021年于南京邮电大学获得学士学位,主要从事全息显示及光信息处理方面的研究。
E-mail:huming_z@bupt.edu.cn



颜玢玢,女,博士,教授,2010年于北京邮电大学获得博士学位,主要从事智能光电信息处理、3D显示、人机交互与认知科学、新型光电子器件等方面的研究。E-mail:yanbinbin@bupt.edu.cn