

# 大尺寸全息 3D 显示系统

李移隆, 王迪, 李楠楠, 黄倩, 王琼华\*

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 全息显示技术被认为是最有前景的显示技术之一。然而, 目前的空间光调制器(SLM)尺寸很小, 不能满足大尺寸全息显示的要求。提出了一种大尺寸全息 3D 显示系统, 该系统由 1 个激光器、1 个扩束器、3 个透镜、1 个分束器、2 个 SLM 及 1 个孔径光阑构成。首先使用误差扩散方法生成大尺寸的全息图; 然后将大尺寸全息图分割为 2 幅具有相同分辨率的全息图, 并将它们分别加载到 2 个 SLM 上; 最后在空间上将 2 个 SLM 的衍射光场无缝拼接在一起, 实现大尺寸全息 3D 显示。实验结果验证了该系统的有效性。

**关键词** 成像系统; 全息显示; 空间光调制器; 大尺寸; 全息 3D 显示

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2011013

## Holographic 3D Display System with Large Size

Li Yilong, Wang Di, Li Nannan, Huang Qian, Wang Qionghua\*

School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** Holographic display technology is considered as one of the most promising display technologies. However, the existing spatial light modulators (SLM) are insufficient for large-scale holographic display. In this research, a large-scale holographic 3D display system, which consists of a laser, a beam expander, three lenses, a beam splitter, two SLMs, and an aperture stop is proposed. First, a large-scale hologram is generated using the error diffusion method. Then, the large-scale hologram is divided into two holograms with the same resolution, and loaded onto two SLMs, respectively. Finally, the diffraction light fields of the two SLMs are seamlessly spliced together in space to realize large-scale holographic 3D display. The experimental results verify the effectiveness of the system.

**Key words** imaging systems; holographic display; spatial light modulator; large size; dynamic holographic 3D display

## 1 引言

全息显示技术可以完整地记录并再现 3D 光场的波前信息, 被认为是最理想的 3D 显示技术之一<sup>[1-4]</sup>。随着计算机技术的发展, 基于空间光调制器(SLM)的全息显示技术受到越来越多研究者的关注<sup>[5-9]</sup>。基于 SLM 的全息显示技术可以将被记录物体数字化, 通过模拟计算物光传播过程的方式得到全息图, 可以不受物体存在形式的客观约束, 不但可以再现真实物体, 而且也可以再现不存在的虚拟物体<sup>[10-12]</sup>。由于 SLM 的可刷新特性及像素级的独立调控能力, 基于 SLM 的全息显示技术在彩色、动态、高分辨率全息显示等方向潜力巨大<sup>[13-15]</sup>。目前, 基于 SLM 的全息显示技术已经在近眼显示、投影显示等多个领域逐步得到了应用。然

而, 受限于当前 SLM 的参数和性能, 全息显示技术再现的 3D 物体尺寸很小, 难以满足大尺寸全息再现的要求, 很多研究者围绕这个问题开展了研究工作<sup>[16]</sup>。例如, SeeReal Technologies 公司的 Leister 等<sup>[17]</sup>利用眼球追踪技术, 通过生成视觉范围内信息的全息图, 实现了大尺寸全息显示。剑桥大学的 Li 等<sup>[18]</sup>通过精密的光学系统设计, 搭建了一种横向纵向可以任意拼接扩展的全息模块, 实现了多个 SLM 衍射光场无缝拼接的效果, 通过两个全息模块的无缝拼接将全息显示尺寸扩大了两倍。该方法虽然实现了高质量的大尺寸全息显示效果, 但结构较为复杂。韩国科学技术高等研究院的 Park 等<sup>[19]</sup>提出了一种平板波前调制器, 该平板波前调制器由一个超大容量的非周期光子筛和一个液晶显示面板组成, 实现了 30° 视角下、尺寸为 3.68 cm ×

收稿日期: 2022-06-15; 修回日期: 2022-08-10; 录用日期: 2022-08-20

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2802100)、国家自然科学基金(62020106010)

通信作者: \*qionghua@buaa.edu.cn

2.76 cm 的全息 3D 显示效果。该方法在视角与尺寸上均有了较大突破,然而仅能实现光点阵列的全息重建,且再现像的散斑噪声较为严重,光能利用率较低。

本文提出了一种大尺寸全息 3D 显示系统。首先,使用误差扩散方法<sup>[20]</sup>来生成大尺寸的全息图。然后将大尺寸全息图分割为 2 幅具有相同分辨率的全息图,并将它们分别加载到 2 个 SLM 上。最后通过大尺寸全息 3D 显示系统,将 2 个 SLM 的衍射光场无缝拼接到一起,解决了由于 SLM 边框限制无法直接拼接到一起的问题,实现了高质量的大尺寸全息显示。

## 2 系统原理

所提系统的结构如图 1 所示,由 1 个激光器、1 个扩束器、3 个透镜、1 个分束器、2 个 SLM 及 1 个孔径光阑构成。其中,激光器提供稳定准直的单色相干光,该相干光经过扩束器扩束后,通过透镜 1 产生均匀的平面光波。平面光波经过分束器后分别照射在 SLM1 和 SLM2 上,SLM1 和 SLM2 的衍射光场在空间上无缝拼接到一起,达到横向尺寸放大的效果。此外,通过透镜 2、孔径光阑和透镜 3 组成的 4f 系统来滤除全息再现光场的零级光及高级次的杂散光。该系统能有效抑制

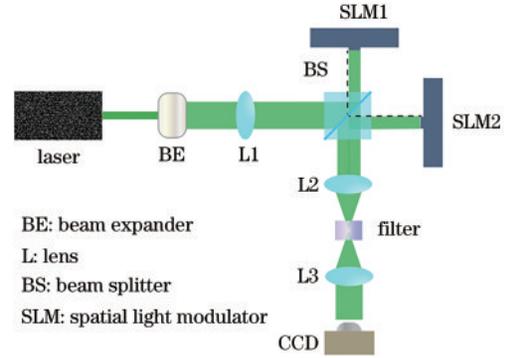


图 1 大尺寸全息 3D 显示系统的结构图  
Fig. 1 Structure of large-size dynamic holographic 3D display system

散斑噪声,提高全息显示的质量。

全息图计算过程中所使用的误差扩散算法是基于角谱传播算法的一种改进算法。角谱传播理论描述了光在自由空间中衍射一段距离之后的变化情况。在傅里叶光学中,任意光场均可分解为不同空间频率和不同振幅子波的叠加。因此,初始光场与目标光场可以分别看作是初始光场空间频谱和目标光场空间频谱的积分:

$$U_0(x_0, y_0, 0) = \iint_{-\infty}^{\infty} A_0\left(\frac{\cos \alpha}{\lambda}, \frac{\cos \beta}{\lambda}, 0\right) \exp\left[j2\pi\left(\frac{\cos \alpha}{\lambda} x_0 + \frac{\cos \beta}{\lambda} y_0\right)\right] d\frac{\cos \alpha}{\lambda} d\frac{\cos \beta}{\lambda}, \quad (1)$$

$$U(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} A\left(\frac{\cos \alpha}{\lambda}, \frac{\cos \beta}{\lambda}, z\right) \exp\left[j2\pi\left(\frac{\cos \alpha}{\lambda} x + \frac{\cos \beta}{\lambda} y\right)\right] d\frac{\cos \alpha}{\lambda} d\frac{\cos \beta}{\lambda}, \quad (2)$$

式中: $U_0$ 是初始光场; $U$ 是目标光场; $x_0, y_0$ 是初始光场的二维坐标; $x, y$ 是目标光场的二维坐标; $j$ 是虚数单位; $z$ 是目标光场的位置;初始光场处于零坐标处; $\frac{\cos \alpha}{\lambda}$ 和 $\frac{\cos \beta}{\lambda}$ 是空间光场在  $x$  方向和  $y$  方向的空间频率; $A_0\left(\frac{\cos \alpha}{\lambda}, \frac{\cos \beta}{\lambda}, 0\right)|_{z=0}$ 是初始光场的空间频谱; $A\left(\frac{\cos \alpha}{\lambda}, \frac{\cos \beta}{\lambda}, z\right)$ 是目标光场的空间频谱。通过求解亥姆霍兹方程可以得到二者的关系:

$$A\left(\frac{\cos \alpha}{\lambda}, \frac{\cos \beta}{\lambda}, 0\right) = A_0\left(\frac{\cos \alpha}{\lambda}, \frac{\cos \beta}{\lambda}, z\right) \exp(jkz\sqrt{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta}), \quad (3)$$

式中:波矢大小 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。式(3)表明自由传播仅仅是在两个角谱之间引入了一个相位因子,该相位因子只与光场传播的距离有关系。因此,现在要得到  $z$  处的目标光场,只需要将初始光场 $A_0\left(\frac{\cos \alpha}{\lambda}, \frac{\cos \beta}{\lambda}, 0\right)|_{z=0}$ 乘以一个只与  $z$  有关的相位因子得到 $A\left(\frac{\cos \alpha}{\lambda}, \frac{\cos \beta}{\lambda}, z\right)$ ,

然后对目标光场的空间频谱进行一次傅里叶逆变换即可。由于所使用的 SLM 是纯相位型,在利用角谱算法得到目标光场的复振幅信息后,若直接将复振幅全息图的振幅信息移除,每个像素点都会产生误差,影响再现像质量。为了减小这种误差,在得到纯相位信息后,通过误差扩散算法逐个扫描像素点,并将每个像素点的误差按照一定权重向尚未扫描到的 4 个相邻像素点扩散。经过迭代优化可以提高重建相位的准确性,并优化全息显示的图像质量。

当复振幅全息图的振幅信息被直接移除时,每个像素点都会产生误差。

$$E(u_i, v_i) = H(u_i, v_i) - P(u_i, v_i), \quad (4)$$

式中: $H(u_i, v_i)$ 为点 $(u_i, v_i)$ 的复振幅像素值; $P(u_i, v_i)$ 为该点舍弃振幅信息后的纯相位像素值; $E(u_i, v_i)$ 为所产生的误差。而误差扩散算法将逐行从左向右依次扫描每个像素点,并将每个像素点的误差按照一定的比重向尚未扫描到的像素点扩散。

全息图的生成及加载流程如图 2 所示。首先将 3D 物体分为  $n$  个具有不同深度的图像切片,然后通过误差扩散算法生成 3D 物体的全息图 (CGH),其横向分辨率为 SLM 的 2 倍。接着,对计算好的全息图进行分割处理,沿横向分辨率将全息图分为大小相同的全息图 1 和

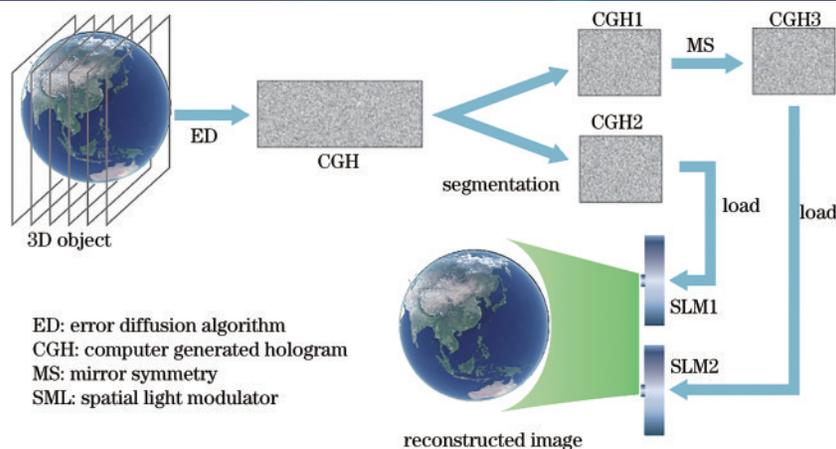


图 2 全息图生成及加载流程图

Fig. 2 Hologram generation and loading flow chart

全息图 2, 对全息图 1 进行镜像处理得到全息图 3。最后, 将全息图 2 和全息图 3 分别加载到大尺寸全息 3D 显示系统中的 SLM1 和 SLM2 上。经过系统的光学再现, 人眼在空间中能够观察到 3D 物体的再现图像。

### 3 实 验

实验中使用的激光器型号为 MGL-III-532-20 mW, 波长为 532 nm。SLM 为反射式纯相位型, 型号为 FSLM-2K55-P, 像素间隔是 6.4 μm, 分辨率为 1920×1080。因为初始全息图的横向分辨率是 SLM

横向分辨率的 2 倍, 所以初始计算的全息图的分辨率为 3840×1080。首先, 进行了 2D 的大尺寸全息显示实验。分别用“风景”和“龙”作为 2D 物体进行全息显示实验, “风景”的分辨率为 3000×1080, 再现图像的尺寸为 1.92 cm×0.69 cm, “龙”的分辨率为 2800×950, 再现图像的尺寸为 1.79 cm×0.61 cm, 横向分辨率均远大于单个 SLM 的横向分辨率, 能很好地验证所提方法的大尺寸显示效果。实验结果如图 3 所示, 其中, 图 3(a)~(d) 依次是“风景”的原始图片、使用 SLM1 和 SLM2 的全息显示结果及该系统最终的大尺

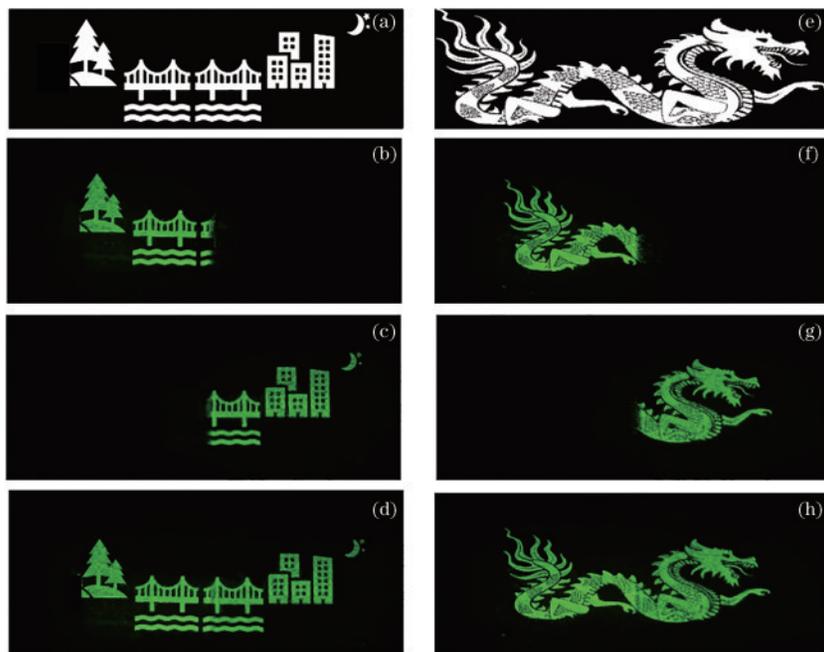


图 3 2D 物体“风景”和“龙”的大尺寸全息显示结果。(a)“风景”原始图像;(b)只使用 SLM1 时的全息显示结果;(c)只使用 SLM2 时的全息显示结果;(d)大尺寸全息显示结果;(e)“龙”原始图像;(f)只使用 SLM1 时的全息显示结果;(g)只使用 SLM2 时的全息显示结果;(h)大尺寸全息显示结果。

Fig. 3 Large-size holographic display results of the 2D objects “scenery” and “dragon”. (a) Original image of “scenery”; (b) holographic display result when only using SLM1; (c) holographic display result when only using SLM2; (d) large size holographic display result; (e) image of “dragon”; (f) holographic display result when only using SLM1; (g) holographic display result when only using SLM2; (h) large-size holographic display result

寸全息显示结果,图 3(e)~(h)依次是“龙”的原始图片、使用 SLM1 和 SLM2 的全息显示结果及该系统最终的大尺寸全息显示结果。从图 3 可以看到,该系统可以实现完全无缝拼接的大尺寸全息显示效果,并且全息显示的图像细节完整清晰、散斑噪声较低。

接着,进行了 3D 的大尺寸全息显示实验,该实验选用了“A”“B”“C”这 3 个位于不同深度平面的字母作为 3D 物体。3D 物体的分辨率为  $2900 \times 770$ ,再现图像

的尺寸为  $1.86 \text{ cm} \times 0.49 \text{ cm}$ ,物体“A”的再现深度为 5 cm,物体“B”的再现深度为 20 cm,物体“C”的再现深度为 35 cm。全息显示结果如图 4 所示。其中,图 4(a)是聚焦于深度 5 cm 处,“A”清晰时的全息显示结果,图 4(b)是聚焦于深度 20 cm 处,“B”清晰时的全息显示结果,图 4(c)是聚焦于深度 35 cm 处,“C”清晰时的全息显示结果。从图 4 可以看出,该系统在不同深度均得到了完整清晰的大尺寸全息 3D 显示结果。



图 4 3D 物体的大尺寸全息显示结果。(a)“A”聚焦时的全息显示结果;(b)“B”聚焦时的全息显示结果;(c)“C”聚焦时的全息显示结果  
Fig. 4 Large size holographic display results of 3D scene. (a) Holographic display result when “A” is focused; (b) holographic display result when “B” is focused; (c) holographic display result when “C” is focused

最后进行了大尺寸全息显示实验,该实验选用“旋转的地球”作为全息显示的物体,实验结果如图 5 所

示。图 5(a)~(h)是 8 个不同时刻的全息显示图像,该系统在动态全息显示中也具有良好的效果。

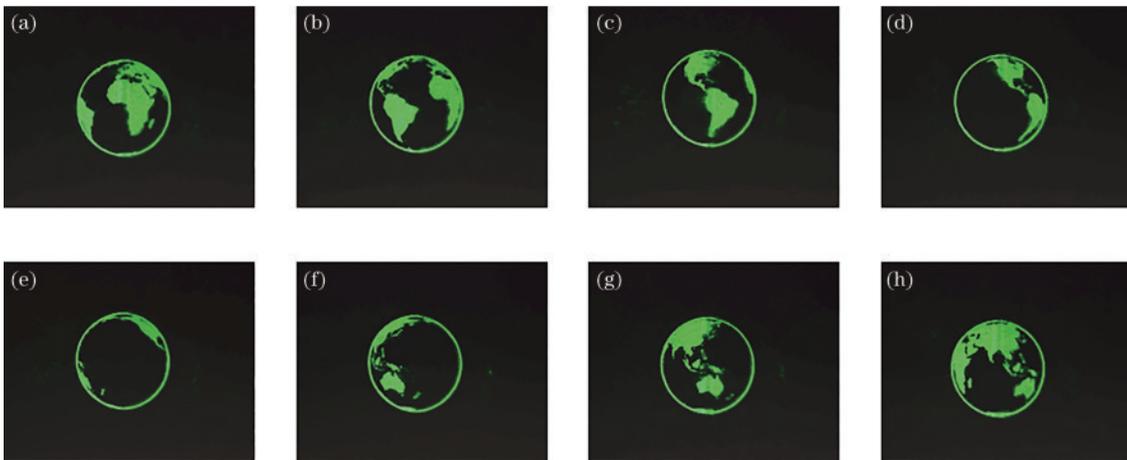


图 5 动态大尺寸全息显示结果。(a)~(h)8 个不同时刻的全息显示结果  
Fig. 5 Dynamic large-size holographic display results. (a)~(h) Holographic display results at eight different moments

## 4 结 论

提出了一种大尺寸全息 3D 显示系统。该系统使用误差扩散方法生成大尺寸的全息图,然后将全息图分割为分辨率完全相同的 2 部分,分别加载到 2 个 SLM 上。然后利用分束器将 2 个 SLM 工作区域的衍射光场无缝拼接到一起,将全息 3D 显示的尺寸扩大了 2 倍。该方法结构简单,可以实现高质量的大尺寸 3D 动态全息显示效果,并且散斑噪声得到了有效的抑制。2 个 SLM 的重建图像实现了无缝拼接的效果。实验结果表明,该系统在进行全息显示实验时,可得到高质量的大尺寸全息显示结果。

### 参 考 文 献

- [1] Chlipala M, Kozacki T. Color LED DMD holographic display with high resolution across large depth[J]. Optics Letters, 2019, 44(17): 4255-4258.
- [2] Zhang Z Q, Liu J, Duan X H, et al. Enlarging field of view by a two-step method in a near-eye 3D holographic display[J]. Optics Express, 2020, 28(22): 32709-32720.
- [3] Huang Z Z, Memmolo P, Ferraro P, et al. Dual-plane coupled phase retrieval for non-prior holographic imaging [J]. PhotonIX, 2022, 3(1): 3.
- [4] Lee J S, Kim Y K, Lee M Y, et al. Enhanced see-through near-eye display using time-division multiplexing of a Maxwellian-view and holographic display[J]. Optics Express, 2019, 27(2): 689-701.
- [5] Duan X H, Liu J, Shi X L, et al. Full-color see-through near-eye holographic display with  $80^\circ$  field of view and an expanded eye-box[J]. Optics Express, 2020, 28(21): 31316-31329.
- [6] Wang H, Qin Z, Huang L L, et al. Metasurface with

- dynamic chiral meta-atoms for spin multiplexing hologram and low observable reflection[J]. *Photonix*, 2022, 3(1): 10.
- [7] Liu S J, Wang D, Wang Q H. Speckle noise suppression method in holographic display using time multiplexing technique[J]. *Optics Communications*, 2019, 436: 253-257.
- [8] Cho J, Kim S, Park S, et al. DC-free on-axis holographic display using a phase-only spatial light modulator[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3397-3400.
- [9] Li X, Liu J, Zhao T, et al. Color dynamic holographic display with wide viewing angle by improved complex amplitude modulation[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2349-2358.
- [10] 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.
- [11] Takekawa Y, Takashima Y, Takaki Y. Holographic display having a wide viewing zone using a MEMS SLM without pixel pitch reduction[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7392-7407.
- [12] Wang D, Li N N, Li Z S, et al. Color curved hologram calculation method based on angle multiplexing[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 3157-3171.
- [13] 王迪, 侯页好, 黄倩, 等. 彩色计算全息 3D 显示技术[J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 1909001.  
Wang D, Hou Y H, Huang Q, et al. Color computer-generated holographic 3D display technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1909001.
- [14] 谢中思, 郭天太, 刘维, 等. 全息中基于多算法融合的相位拼接方法研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(7): 0709001.  
Xie Z S, Guo T T, Liu W, et al. Phase splicing method based on multi-algorithm fusion in holography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 0709001.
- [15] 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 multiview dynamic holographic 3D display[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0109001.
- [16] Yamamoto K, Ichihashi Y, Senoh T, et al. 3D objects enlargement technique using an optical system and multiple SLMs for electronic holography[J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21137-21144.
- [17] Leister N, Schwerdtner A, Fütterer G, et al. Full-color interactive holographic projection system for large 3D scene reconstruction[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6911: 69110V.
- [18] Li J, Smithwick Q, Chu D P. Holobricks: modular coarse integral holographic displays[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 82.
- [19] Park J, Lee K R, Park Y K. Ultrathin wide-angle large-area digital 3D holographic display using a non-periodic photon sieve[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1304.
- [20] Yang G, Jiao S M, Liu J P, et al. Error diffusion method with optimized weighting coefficients for binary hologram generation[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(20): 5547-5555.