

基于多空间光调制器拼接的空间悬浮 全息真三维显示

刘吉成¹, 吴汉¹, 高洪跃^{1*}, 周文¹, 殷长志², 顾开宇³, 贾斌¹, 于志扬¹, 沈宇¹, 黄玄旻¹, 周宇聪¹, 杨鼎¹,
陈程伟¹, 陈妍霓¹, 王兴琳¹, 胡慧凤¹, 朱海磊¹, 付馨格¹, 杨信田¹, 闫语哲¹, 许轶泽¹

¹上海大学机电工程与自动化学院精密机械工程系, 上海 200072;

²上海瑞立柯信息科技有限公司, 上海 200233;

³宁波维真显示科技股份有限公司, 浙江 宁波 315105

摘要 全息技术是实现空间悬浮真三维(3D)显示的重要方法。空间光调制器(SLM)作为当前唯一的实时动态全息真3D图像投射仪器,像素量、分辨率等不足限制了其在空间悬浮真三维显示领域的应用。研究多SLM拼接实现高分辨低噪声的空间悬浮真3D显示,首先通过菲涅耳层析法结合空间坐标变换技术,计算获得3D物体360°视角的高分辨率全息图;然后将每张全息图分为相同分辨率的4幅图,加载到阵列式拼接的4个SLMs上,滤除一阶之外的光束后,再呈现出完整的具有高信息容量高分辨率的全息3D实像;最后利用超声雾化介质进行承载,实现实时动态空间悬浮真3D显示。另外,利用时间平均法对重建像进行噪声抑制研究,实验结果证明该方法可有效地提升空间悬浮全息显示图像的质量。

关键词 全息真三维显示; 空间悬浮动态显示; 多空间光调制器拼接; 超声雾化介质; 时间平均法

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230782

Multi-Spatial Light Modulator Splicing-Based Real 3D Display of Spatially Suspended Holography

Liu Jicheng¹, Wu Han¹, Gao Hongyue^{1*}, Zhou Wen¹, Yin Changzhi², Gu Kaiyu³, Jia Bin¹,
Yu Zhiyang¹, Shen Yu¹, Huang Xuanmin¹, Zhou Yucong¹, Yang Ding¹, Chen Chengwei¹,
Chen Yanni¹, Wang Xinglin¹, Hu Huifeng¹, Zhu Hailei¹, Fu Xinge¹, Yang Xintian¹,
Yan Yuzhe¹, Xu Yize¹

¹Department of Precision Mechanical Engineering, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

²Shanghai Realic Information Technology Co., Ltd., Shanghai 200233, China;

³NingBo (China) 3D Vision Display Technology Co., Ltd., Ningbo 315105, Zhejiang, China

Abstract Holographic technology is crucial for realizing a true three-dimensional (3D) display of space suspension. The spatial light modulator (SLM) is currently the only device capable of real-time dynamic holographic true 3D image projection. However, the lack of pixels and resolution limits its application in the field of space suspended true 3D displays. This study examines the real 3D display of space suspension with high resolution and low noise realized using multi-SLM splicing. First, the high resolution hologram with the 360° viewing angle of a 3D object was calculated by Fresnel tomography combined with the spatial coordinate transformation technology. Then, each hologram was divided into four pieces of the image with the same resolution, which were loaded onto four SLMs spliced in an array. After filtering the light beams other than the first order, a complete holographic 3D real image with high information capacity and resolution was reconstructed. Finally, the ultrasonic atomized medium was used for carrying the 3D real image, realizing real-time dynamic space suspension true 3D display. Additionally, this study investigates the noise suppression for the

收稿日期: 2023-03-06; 修回日期: 2023-03-12; 录用日期: 2023-03-16; 网络首发日期: 2023-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(61005073, 51872183, 21571125, 11004037, 11474194)、上海市自然科学基金(14ZR1415500, 14ZR1415700, 19ZR1417800)、上海市教委创新研究基金(14YZ009)、重大横向项目(19H02307, 23H00025)

通信作者: *gaohylet@shu.edu.cn

reconstructed image using the time-averaged method, and the experimental results prove that this method can effectively improve the quality of the spatially suspended holographic display image.

Key words holographic true 3D display; spatial suspension dynamic display; multi-spatial light modulator splicing; ultrasonic atomization medium; time-averaged method

1 引言

基于光干涉记录和衍射再现的全息技术能够完整记录和重现物体的波前信息,是实现光波面复现的真三维显示技术^[1-4]。计算全息能通过计算机模拟再现光学记录的全过程,避免了光敏材质和复杂的干涉过程^[5]。基于计算全息的三维显示技术具有灵活、可复用、可实现虚拟物体等优点,国内外高校和科研机构对此展开了深入的研究并取得了一定成果^[6-7]。随着计算机技术和半导体技术的高速发展,计算全息得到发展的同时,也涌现了空间光调制器(SLM)等数字化器件。SLM是一种能够通过改变光波相位、振幅和偏振状态来实现光场调制的装置,它可以将一个光束分成许多光斑,对每个光斑进行独立调节,从而实现精密的光场控制。通过计算机生成三维图像,利用SLM来调制光波,再利用光学系统将调制信息投射到观察者眼睛中,就可以实现逼真的三维立体效果,这使得基于SLM和计算全息的三维显示技术逐渐成为研究热点^[8-12],该技术在全息光学投影^[13]、全息显示器^[12]、全息眼镜等研究领域都有广泛应用,也极大促进了动态全息^[8]和彩色全息^[14]的发展。

作为全息显示的重要分支,空间悬浮显示技术能够提供更真实、更震撼的三维立体视觉效果,也得到了国内外很多研究人员的关注。上海大学Zeng等^[15]对

基于SLM和圆柱雾屏的动态全息3D空间悬浮投影进行了研究。Son等^[16]利用数字微镜器件(DMD)投影全息图,将两束光交会在掺Er³⁺的ZBLAN玻璃中获得荧光激发,得到全息再现。然而他们实现的空间悬浮显示图像的分辨率不高,尺寸较小,观感体验有待提高。基于SLM和计算全息的三维显示可以衍射出真三维实像,通过承载介质可以使衍射光波到达人眼实现成像,是空间悬浮显示一种很好的实现方法。然而,相比二维图像的像素量(10²),三维图像的像素数量(10³)呈指数级增长,这对SLM的分辨率和像素量都提出了更高的要求。

针对上述问题,本文研究了一种基于多SLM拼接的空间悬浮全息真三维显示,所设计的由4个SLMs组成的SLM拼接系统能实现8×10⁶多信息容量的高分辨全息显示,提供更好的观感体验。首先使用菲涅耳层析算法^[17-18]结合空间坐标变换技术,生成高分辨率的计算全息图,将其分割为具有相同分辨率的4个亚全息图,再将亚全息图分别加载进阵列式SLM中并滤除掉不必要的光束;然后用超声雾化介质承载重合的一阶拼接像,实现空间悬浮的全息真三维动态显示;最后利用时间平均法提升重建像的质量。

2 实验系统及原理

实验中全息图的制作方法如图1(a)所示。采用

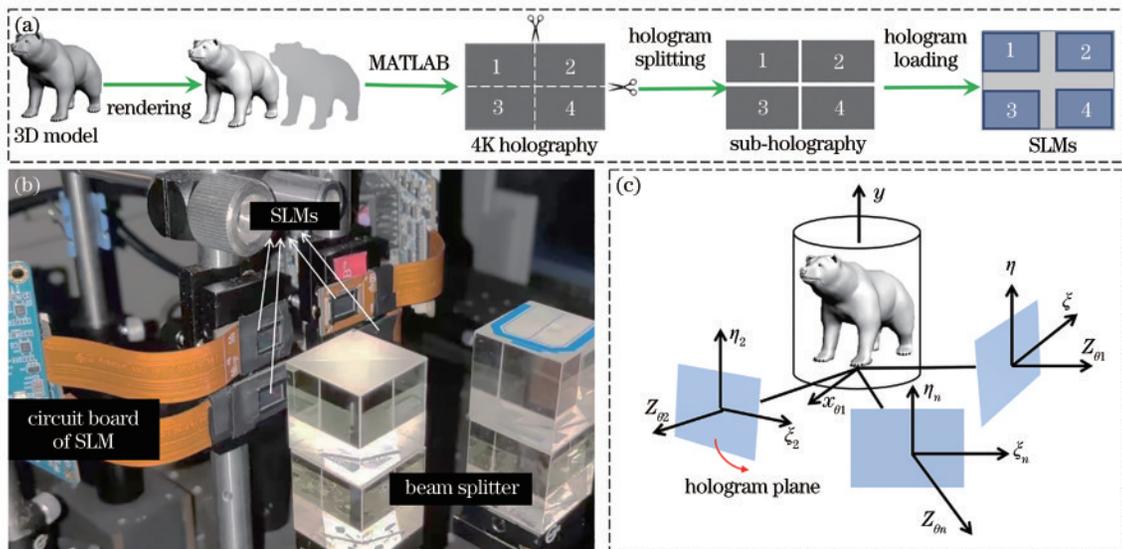


图1 全息图制作及加载方法示意图和阵列式SLMs拍摄图。(a)高分辨率全息图制作和加载方法示意图;(b)阵列式SLMs拍摄图;(c)对模型多视角全息图计算的空间坐标变换关系示意图

Fig. 1 Schematic of the fabrication and loading method of holograms and photograph of arrayed SLMs. (a) Schematic of the fabrication and loading method of high-resolution holograms; (b) photograph of arrayed SLMs; (c) schematic of spatial coordinate transformation relationship of model multi-angle hologram

计算全息算法将模型的深度强度数据编码成高分辨率计算全息图,沿水平和垂直方向的两条对称轴切割全息图后按照一一对应的关系将切割后的图像加载进阵列式 SLMs 中进行光电再现。根据全息的原理,全息图的任何碎片都包含原本整个结构所有的信息,因此每个亚全息图的衍射像都是一个完整的物体模型,但它们都是由单个 SLM 衍射出来的,因此分辨率仅为单个 SLM 的分辨率,相比原本的整张全息图,其像素密度(pixel per inch, PPI)反而是下降的,包含的光场信息也显然少了很多,由图 2(b)虚线圆圈中的 4 个一阶衍射像(北极熊)可知,还原出的重建像细节丢失,清晰度下降。因此,对 4 个 SLM 的一阶衍射像进行叠加,还原了原本物体的高分辨率和高像素密度。相比传统的单个 SLM 加载与其分辨率相匹配全息图的方法,所提方法能有效地提高重建像的分辨率和空间带宽积,能提升图像清晰度和亮度,优化观感体验。

采用的计算全息算法是非涅耳层析法^[19]。该方法将三维物体分成沿光轴方向的许多二维截面,单独计算每个层面在全息面上的非涅耳衍射,然后对各层面的光波复振幅分布进行叠加,即可得到三维物体的全息图。为了计算 3D 模型多个视角的全息图,引入空间坐标变换来生成每个视角的深度数据。图 1(c)为对模型多视角全息图计算的空间坐标变换关系示意图,3D 模型置于一个包络圆柱体的中心,并绕 $y(y_0)$ 轴旋转。在水平面内整个 360° 圆周方向上,可以通过空间坐标变换获得模型的均匀间隔为 6° 的 60 个视角的深

度数据。选取北极熊作为实验模型。

所提系统的结构如图 2(a)所示,由激光扩束准直模块、SLM 拼接衍射模块、介质承接显示模块组成。绿色激光器(波长为 532 nm)发出的光源经过扩束和准直后照射在分光棱镜上,之后垂直入射进阵列式 SLMs(2×2)中,如图 1(b)所示。实验所用 SLM 像素尺寸为 $4.5 \mu\text{m}$,分辨率为 1920×1080 。通过调整 SLM 液晶面板的俯仰角和偏航角,4 个 SLM 的一阶衍射像重叠在一起,可提升重建像的衍射分辨率,增大信息容量。图 2(b)为 SLM 衍射像调整示意图,主要部分为调整前用纸屏承接的 4 个 SLM 的一阶衍射像,右下角为调整后的重叠重建像。实验中计算全息图时添加的闪耀光栅周期为 $1/2$ pixel,光电再现时每个 SLM 都会有 4 个一阶衍射像分布在零级光斑周围。根据 SLM 的衍射成像规律,衍射像距离零级光斑越近的部分衍射效率越高,通过图 2(b)中各个一阶衍射像可直观地看出此规律。因此在实验中,从 4 个 SLM 各自的 4 个一阶衍射像中各挑选 1 个一阶衍射像,通过对这些不同亮度分布的衍射像进行重叠,实现亮度匀化。最后将计算得到的高分辨全息图序列以 60 frame/s 的帧率按照时序加载到 SLM 上,利用超声雾化介质在成像清晰面进行承接显示。作为一种散射物质,用其来承载 3D 空间像,可观察到 3D 影像的每个物点,原理如图 2(a)所示。实验中为实现较好的 3D 图像承载效果,确保超声雾化介质呈圆柱形,气流均匀稳定且有一定的浓度。

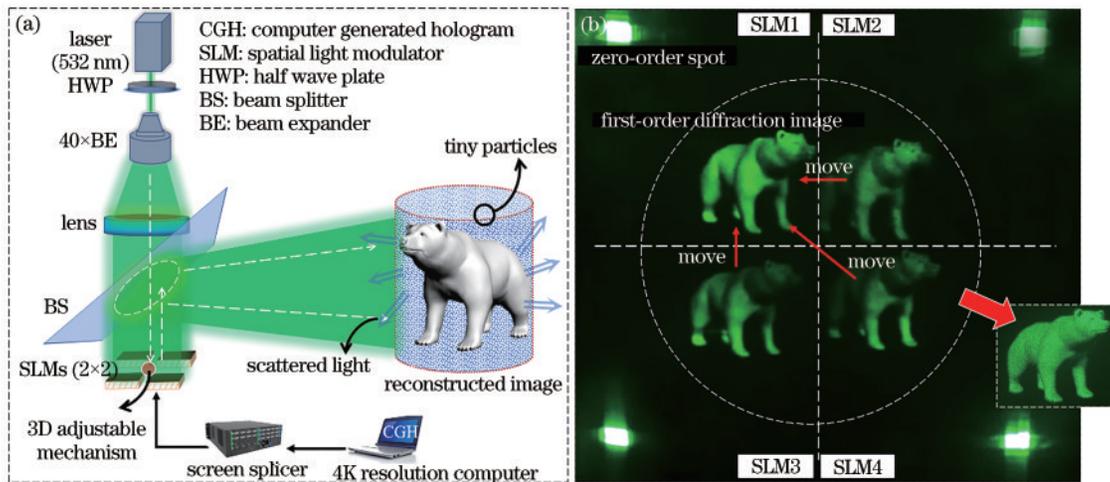


图 2 基于多 SLM 拼接的空间悬浮全息真三维显示系统示意图和 SLM 衍射像调整示意图。(a)基于多 SLM 拼接的空间悬浮全息真三维显示系统示意图;(b)SLM 衍射像调整示意图

Fig. 2 Schematic of the space suspended holographic true 3D display system based on multi-SLM splicing and the adjustment for the SLM diffraction images. (a) Schematic of the space suspended holographic true 3D display system based on multi-SLM splicing; (b) schematic of the adjustment for the SLM diffraction images

3 实验结果及分析

对实验结果进行拍摄。图 3(a)为相机拍摄的空间 3D 重建像与摆放在旁边的真实物体的合影。按照

一定帧率加载模型不同视角的全息图序列,可以看到北极熊在超声雾化介质中旋转的视频画面。拍摄 0° 、 60° 和 -60° 视角下的全息 3D 模型重建像,结果如图 3(b)~(d)所示。由拍摄结果可知,承接到的空间悬

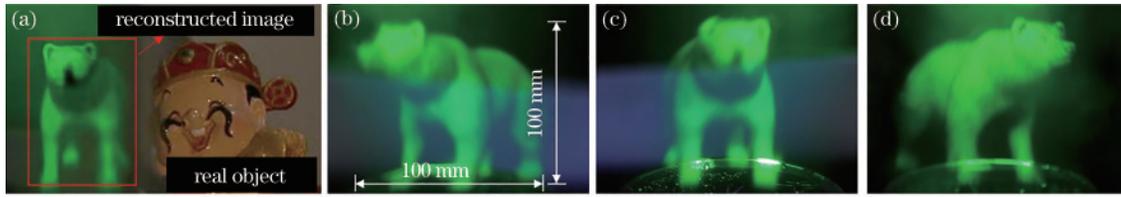


图 3 北极熊模型与真实物体合影及在不同视角的再现结果。(a)模型与真实物体合影;(b)模型在 -6° 角度的再现结果;(c)模型在 0° 角度的再现结果;(d)模型在 6° 角度的再现结果

Fig. 3 Photo of the polar bear model with the real object and the reconstructed results from different perspectives. (a) Photo of the model with the real object; (b) reconstructed result at -6° ; (c) reconstructed result at 0° ; (d) reconstructed result at 6°

浮重建像细节保留较好,清晰度和亮度均符合人眼,且重建的视频流畅无拖尾,表明该基于多SLM拼接的空间悬浮全息真三维显示实验系统能够实现高分辨率全息3D重建像的实时承载显示。但因为光束通过雾气时存在前后串扰,目前无法实现整周观看,只能在光束投射方向左右一定视区内进行观看。

实验中限于实验台尺寸,成像距离设置为1000 mm,重建出的空间悬浮物体的体积约为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,根据SLM衍射角的几何关系,可计算出不同成像处重建像的尺寸,显然重建像的尺寸会随着成像距离的增加而增大,但重建像清晰度也会因此下降。这是由两个参数决定的,一个是PPI,定义为单位面积的像素个数,表示画面的细腻程度,随着重建像尺寸变大,PPI会变小;另一个参数是视分辨夹角,人眼的分辨角为 $1' \sim 1.5'$ ($1^\circ = 60'$),当两个物体在人眼光学系统里的夹角小于人眼分辨角时,人眼将无法分辨出来。因此当重建像被放大,两个

像素之间的间距也被放大,其视分辨夹角应小于人眼分辨角,否则观看时会出现像素感,降低观感体验。因此,应在重建像尺寸和清晰度之间做出权衡。而所提提高重建像分辨率的方法在一定程度上能缓解投影距离拉长而带来的视觉效果损失的问题。

还对空间悬浮3D重建像的成像质量优化进行了研究。观察重建像,会发现有的部分散斑噪声较严重。在计算全息图时,一般会加入随机相位,这可以使得物体信息中的高低频分布变得进一步平滑,从而能记录大部分的物体信息以提高重建像的质量。但是加入随机相位后散斑噪声影响较大,重建像细节会被淹没。选择时间平均法进行去噪。时间平均法对多幅添加了不同随机相位的全息图重建像进行叠加,通过叠加可提高重建像的对比度,降低散斑噪声影响。Goodman^[20]证明当 N 幅非相关、且具有相同平均强度的散斑图样叠加时,叠加后的图像散斑对比度会降低为原来的 $1/\sqrt{N}$,其实现过程如图4(a)所示。

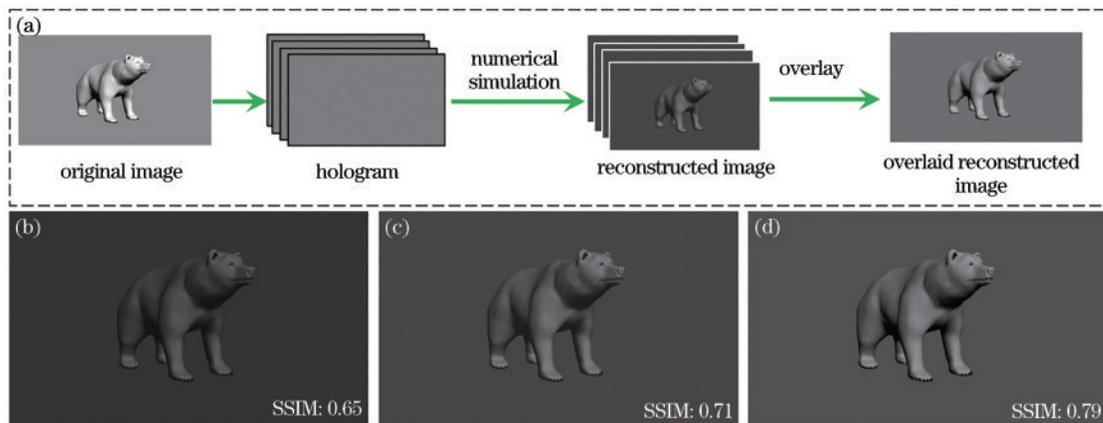


图 4 时间平均法实现过程示意图与叠加不同幅数的数值重建像的数值模拟结果。(a)时间平均法实现过程;(b)叠加1幅数值重建像;(c)叠加2幅数值重建像;(d)叠加4幅数值重建像

Fig. 4 Schematic of the implementation process of the time-averaged method and numerical simulation results of superimposed numerical reconstructed images with different number of frames. (a) Realization process of the time-averaged method; (b) overlaying 1 piece of numerical reconstruction image; (c) overlaying 2 pieces of numerical reconstruction image; (d) overlaying 4 pieces of numerical reconstruction image

为了更好地对时间平均法降低散斑噪声的效果进行定量分析,引入结构相似性(SSIM)作为评价指标,它是一种衡量两张影像相似程度的指标,更符合人眼

对图像品质判断的要求。结构相似性指标在计算过程中将图像亮度、对比度和结构三个不同因素组合,分别将均值、标准差和协方差作为三个因素的度量。结构

相似性计算公式为

$$SSIM(x, y) = l(x, y)c(x, y)s(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)}, \quad (1)$$

式中： μ_x 是 x 的平均值， μ_y 是 y 的平均值， σ_x^2 是 x 的方差， σ_y^2 是 y 的方差， σ_{xy} 是 x 和 y 的协方差； $c_1 = (k_1L)^2$ 和 $c_2 = (k_2L)^2$ 是用来维持稳定的常数， L 是像素值的动态范围， $k_1 = 0.01, k_2 = 0.03$ 。

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}, c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}, s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3}, \quad (2)$$

式中： $l(x, y), c(x, y)$ 和 $s(x, y)$ 分别为亮度、对比度和结构的对比函数。一般取 $C_3 = C_2/2$ 。

实验中制作多张北极熊模型的全息图并进行数值再现，图 4(b)~(d) 所示为叠加不同幅数的数值重建像的结果。计算出叠加 1 幅、2 幅和 4 幅全息图的结构相似性分别为 0.65、0.71 和 0.79。进一步，计算了 60 幅重建像序列，分析 SSIM 数值随叠加数增加的变化趋势，如图 5 所示，随叠加幅数增多，结构相似性变大，图像质量更好。

实验中研究了用时间平均法叠加 1~4 幅全息图的光电重建像的差异，叠加结果如图 6 所示，随叠加幅数的增加，空间悬浮的北极熊模型散斑得到抑制且肢体轮廓逐渐清晰。重建像的 SSIM 数值分别为 0.55、

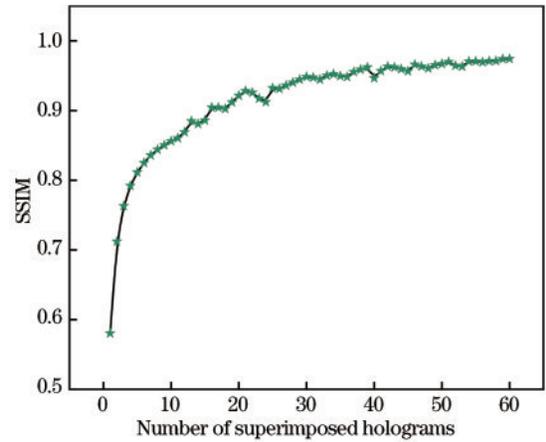


图 5 叠加不同幅数的数值重建像的 SSIM 变化曲线

Fig. 5 SSIM change curve when overlaying different number of numerical reconstructed images

0.59、0.66 和 0.73，计算得到叠加 4 幅的 SSIM 数值相比叠加 1 幅提升 32.73%。实验结果验证了时间平均法优化成像质量在基于多 SLM 拼接的空间悬浮全息真三维显示实验系统中的有效性。

由于实验结果拍摄于暗室，拍摄效果稍逊于人眼直接观看的结果，且用于承接重建像的超声雾化介质本身气流的不稳定及实际光路中光学器件等影响，重建像的 SSIM 数值低于理想值，但 SSIM 上升的变化趋势是与理论模拟保持一致的。另外，由于上述原因，重建像分辨率和清晰度也有所损失，如果增加 SLM 拼接的数量，可以预见重建像的图像质量会进一步提高。

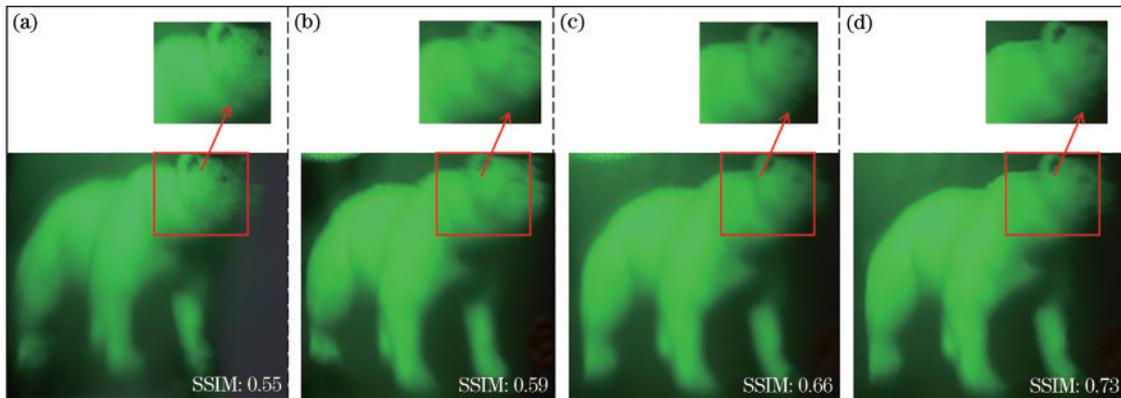


图 6 叠加不同幅数全息图时的 3D 重建像。(a) 叠加 1 幅全息图；(b) 叠加 2 幅全息图；(c) 叠加 3 幅全息图；(d) 叠加 4 幅全息图

Fig. 6 3D reconstructed images when overlaying different number of holograms. (a) Overlaying 1 hologram; (b) overlaying 2 holograms; (c) overlaying 3 holograms; (d) overlaying 4 holograms

4 结 论

研究了基于阵列式 (2×2) SLMs 拼接的空间悬浮全息真三维显示。通过菲涅耳层析法结合空间坐标变换技术，计算获得 3D 物体 360° 视角的高分辨率全息图，将分割后的亚全息图同步加载进 4 个 SLMs 中，通过超声雾化介质承接，成功再现出完整的高分辨率空

间悬浮全息图像并实现了空间动态显示。另外利用时间平均法对重建像进行了噪声抑制研究，计算得到叠加 4 幅全息图的 SSIM 数值相比叠加 1 幅提升 32.73%，图像质量优化效果较为明显。实验结果证明，该系统可有效提高空间悬浮 3D 全息重建像的分辨率和信息容量，能优化全息显示成像效果。该拼接方法未来有应用于量子点、上转换材料等空间悬浮全息

真三维显示其他领域的巨大潜力,应用前景广阔。受实验系统硬件设备限制,重建像的可视角度和尺寸均有待提高,下一步将对该基于多SLMs拼接的空间悬浮全息重建像质量的提高、视角和尺寸的扩展进行深入研究。

参 考 文 献

- [1] Situ G H. Deep holography[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(2): 23.
- [2] Park J H, Lee B. Holographic techniques for augmented reality and virtual reality near-eye displays[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(1): 1.
- [3] 曾超, 高洪跃, 刘吉成, 等. 动态全息三维显示研究最新进展[J]. *物理学报*, 2015, 64(12): 124215.
Zeng C, Gao H Y, Liu J C, et al. Latest developments of dynamic holographic three-dimensional display[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(12): 124215.
- [4] 高洪跃, 于瀛洁, 郑华东. 基于超快液晶薄膜的实时动态全息三维视频显示[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209013.
Gao H Y, Yu Y J, Zheng H D. Real-time dynamic holographic three-dimensional video display based on a super fast response liquid crystal thin film[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0209013.
- [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(1): 1-17.
- [6] Senoh T, Mishina T, Yamamoto K, et al. Full-color wide viewing-zone-angle electronic holography system [C]//*Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*, May 9-11, 2011, Tokyo. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2011: DTuA3.
- [7] Lim Y, Hong K, Kim H, et al. 360-degree tabletop electronic holographic display[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 24999-25009.
- [8] 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): 1-8.
- [9] Sando Y, Barada D, Yatagai T. Holographic 3D display observable for multiple simultaneous viewers from all horizontal directions by using a time division method[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(19): 5555-5557.
- [10] Zeng Z X, Zheng H D, Yu Y J, et al. Full-color holographic display with increased-viewing-angle[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): F112-F120.
- [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] Li J, Smithwick Q, Chu D P. Holobricks: modular coarse integral holographic displays[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 1-15.
- [13] Wakunami K, Hsieh P Y, Oi R, et al. Projection-type see-through holographic three-dimensional display[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 1-7.
- [14] Buckley E. Holographic laser projection[J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(3): 135-140.
- [15] Zeng Z X, Zheng H D, Lu X Q, et al. Dynamic holographic three-dimensional projection based on liquid crystal spatial light modulator and cylindrical fog screen [J]. *Optical Review*, 2015, 22(5): 853-861.
- [16] Son J Y, Lee H, Byeon J, et al. Electro-holographic display using a ZBLAN glass as the image space[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1317-1320.
- [17] 李俊昌. 衍射计算及数字全息[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Li J C. *Diffraction calculation and digital holography*[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [18] Picart P, Leval J. General theoretical formulation of image formation in digital Fresnel holography[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2008, 25(7): 1744-1761.
- [19] Trester S. Computer-simulated Fresnel holography[J]. *European Journal of Physics*, 2000, 21(4): 317-331.
- [20] Goodman J W. Statistical properties of laser speckle patterns[M]//Dainty J C. *Topics in applied physics*. Heidelberg: Springer, 1975, 9: 9-75.