

彩色计算全息 3D 显示技术

王迪, 侯页好, 黄倩, 郑义微, 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 计算全息可以记录和再现任意物体的波前信息, 无论物体是否真实存在, 因此在裸眼 3D 显示领域具有很大的应用潜力, 其中彩色计算全息 3D 显示技术得到了广泛关注。首先分析了彩色计算全息 3D 显示技术中的色差种类与原理, 接着对彩色计算全息 3D 显示技术进行了分类概述, 总结了现有彩色计算全息 3D 显示技术的优缺点, 并对未来彩色计算全息 3D 显示技术的发展趋势进行了展望。

关键词 全息; 3D 显示; 计算全息; 彩色计算全息

中图分类号 O438.1 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL202249.1909001

1 引言

3D 显示在医学、教育、工业、娱乐等多个领域有着巨大的市场需求。目前广泛应用的助视 3D 显示技术是通过向观看者的左眼和右眼提供存在水平视差的二维图像而得到实现的^[1], 该技术存在辐辏调节冲突引起的致眩晕问题。计算全息 3D 显示技术能精确调控光波前^[2-4], 提供人眼视觉所需要的全部深度暗示, 避免了辐辏调节冲突问题, 因而被认为是最理想的 3D 显示方案之一。

理想的计算全息 3D 显示技术应具有观看视角大、散斑噪声低、动态刷新速度快和色彩丰富等特点。然而, 受限于现有计算机的算力和显示器件的性能, 当前的计算全息 3D 显示距离理想目标还有很大的差距。相较于全息显示中大视角、低散斑噪声、动态显示的目标, 彩色全息显示效果由于激光技术的快速发展而得到了很大的提高。目前彩色计算全息 3D 显示技术在消色差方面已得到诸多的研究。倍率色差、轴向色差等问题已得到了较好的解决, 彩色计算全息 3D 显示技术正朝着高分辨率等方向发展。本文介绍了彩

色计算全息 3D 显示技术: 首先阐述了彩色计算全息 3D 显示技术的原理, 分析了彩色计算全息 3D 显示技术中的色差种类及产生机理; 接着根据显示分辨率的不同对诸多彩色计算全息 3D 显示技术进行了分类概述, 总结了各类彩色计算全息 3D 显示技术的优势与不足; 最后对未来彩色计算全息 3D 显示技术的研究重点和发展方向进行了展望。

2 彩色计算全息 3D 显示的原理

根据光的三原色原理可知, 任意颜色光都可以由红(R)、绿(G)、蓝(B)三原色光以一定的比例和强度混合得到。因此, 在彩色计算全息显示过程中, 需要预先将被记录物体的光场信息分离为红、绿、蓝三个通道的光场信息, 然后分别计算对应通道的全息图并将其加载到空间光调制器(SLM)上。经过 SLM 的调制, 红、绿、蓝三色通道对应的衍射光场在目标空间产生全息再现像, 将这三个通道对应的全息再现像精确地叠加到一起就得到了正确色彩的全息再现像, 如图 1 所示。

根据光传播的标量衍射理论, 在非涅耳衍射条件下, 全息面的光场分布为

$$U(H) = \frac{1}{i\lambda z} \exp(ikz) \exp\left[i\frac{k}{2z}(x^2 + y^2)\right] \times \iint U(O) \exp\left[i\frac{k}{2z}(m^2 + n^2)\right] \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda z}(xm + ym)\right] dm dn, \quad (1)$$

式中: $U(H)$ 和 $U(O)$ 分别表示全息面光场分布和被记录物体的光场分布; k 、 λ 和 z 分别表示波数、波长和衍射距离; (m, n) 和 (x, y) 分别表示被记录物体的平面坐标和全息面坐标。当被记录物体的光场分布和衍射

距离确定时, 全息面光场分布只与波长有关系。全息 3D 显示的波长是与参考光源息息相关的参量。

此外, 在彩色计算全息再现过程中, 还会引入具有特定功能的光学器件。比如, 在基于傅里叶衍射的全

收稿日期: 2022-03-22; 修回日期: 2022-05-06; 录用日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(62020106010)

通信作者: *qionghua@buaa.edu.cn

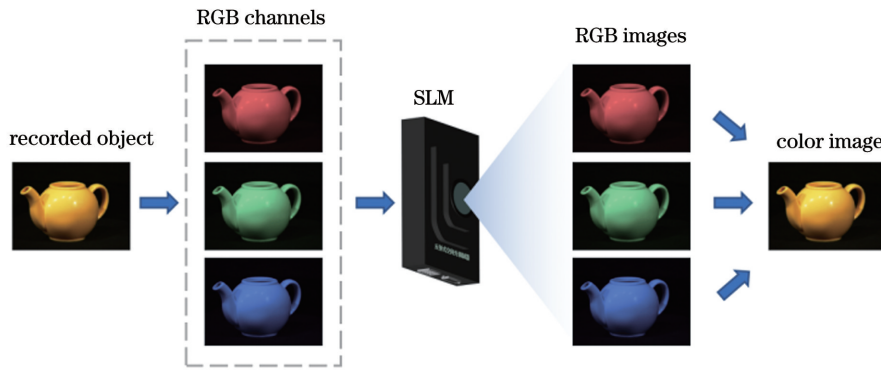


图1 彩色全息3D显示的原理

Fig. 1 Principle of color holographic 3D display

息再现过程中,需要引入傅里叶透镜来实现空域傅里叶变换,从而得到全息再现像。在部分全息系统中还会引入非球面镜^[5]、衍射光学元件^[6]或者波道光栅^[7]等光学器件来实现全息3D显示视角扩大等功能。对于各类光学器件,不同波长具有不同的折射率和透过率,红、绿、蓝三色再现光场在经过这些器件时,再现像的位置和大小不相同,从而产生倍率色差、轴向色差和横向色差,如图2所示。这些色差影响了全息3D显示质量。

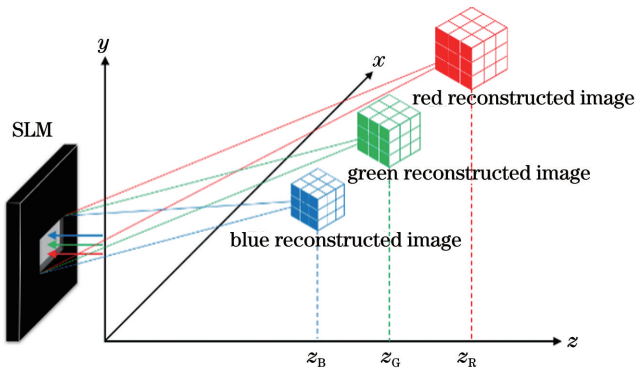


图2 彩色全息3D显示的色差

Fig. 2 Chromatic aberration of color holographic 3D display

2.1 倍率色差

在彩色全息显示中,在再现像的同一平面上,红、绿、蓝三色光对应的再现像大小不同,这种现象叫做倍率色差。假设 SLM 的像素间距为 p , 像素数为 $M \times N$, 当再现距离为 d 时, 像素数为 $m \times n$ 的再现像的大小为

$$L \times H = \frac{\lambda d m}{M p} \times \frac{\lambda d n}{N p}, \quad (2)$$

式中: L 为再现像的横向尺寸; H 为再现像的高度。由式(2)可以看出, 再现像的大小与再现光波长、再现距离和再现像像素数有关。由于波长不同, 三种颜色的再现像尺寸并不相同, 如图2所示, 红色再现像的尺寸最大, 其次是绿色, 最后是蓝色。

2.2 轴向色差

在全息再现过程中, 当利用透镜进行傅里叶变换时, 会引入轴向色差。对于薄透镜而言, 它的焦距 f

表示为

$$f = \frac{r}{2(n-1)}, \quad (3)$$

式中: r 是透镜的曲率半径; n 是透镜的折射率。由于 n 与波长有关, 红、绿、蓝光对应的 n 依次增大, 因此红、绿、蓝三色光在透镜中的焦距 f_R 、 f_G 、 f_B 各不相同。在彩色全息显示时, 不同颜色光的再现像会聚焦到不同的焦平面, 即产生了轴向色差, 如图2所示, 红色再现像的再现距离 (Z_R)、绿色再现像的再现距离 (Z_G)、蓝色再现像的再现距离 (Z_B) 各不相同。

2.3 横向色差

彩色全息显示时, 红、绿、蓝三色光的最大衍射角不同, 其对应的再现像中心位置互不重合, 这种现象叫做横向色差。红、绿、蓝三色再现像中心位置的弧度坐标分别表示为 $(\frac{\lambda_R}{2p}, \frac{\lambda_R}{2p})$ 、 $(\frac{\lambda_G}{2p}, \frac{\lambda_G}{2p})$ 、 $(\frac{\lambda_B}{2p}, \frac{\lambda_B}{2p})$, 其中 λ_R 、 λ_G 、 λ_B 分别为红、绿、蓝光的波长。

总而言之, 对于任何实现彩色计算全息的方法, 只有根据色差的产生原因, 对其分别进行补偿, 才能实现高质量的彩色全息3D显示效果。

3 彩色计算全息3D显示的实现方法

为了实现色彩丰富的清晰全息3D显示, 研究人员提出了诸多方法。根据显示分辨率的不同, 这些方法可分为时分复用法、基于多个SLM的空分复用法、基于单个SLM的空分复用法等。

3.1 时分复用法

2011年, 研究人员采用时分复用法搭建了全彩色全息3D显示系统^[8]。在该系统中, 液晶显示器(LCD)被用作显示器件, 旋转的轮板使得红、绿、蓝三色激光分别以20 Hz的频率交替照射到LCD上。同时, 红、绿、蓝三色全息图以20 Hz的频率依次被加载到LCD上, 每个颜色的全息图分辨率与LCD相同, 如图3所示。为了消除 $4f$ 系统引入的轴向色差, 分别对红、绿、蓝三色全息图的记录距离进行补偿。该系统充分利用SLM的刷新率和人眼的视觉暂留效应, 实现了彩色全息3D重建。2015年, 研究人员利用单个

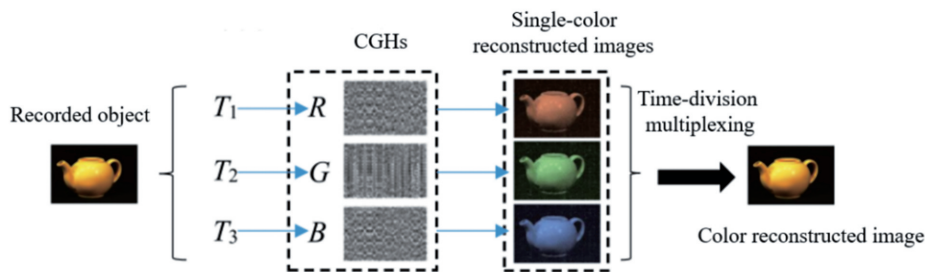


图3 时分复用法的原理^[8]

Fig. 3 Principle of time division multiplex method^[8]

高刷新率的数字微镜器件(DMD)搭建了彩色全息显示系统^[9]。在该系统中,光纤耦合的激光二极管发出的红、绿、蓝三色激光以不同的角度时序照射DMD,高阶衍射光被用于重建再现像。2019年,研究人员设计并搭建了基于复振幅调制的全息近眼显示系统,并基于时分复用实现了彩色显示^[10]。针对彩色全息图计算时间长、再现像质量较差的问题,研究者们还提出了一种精确的高压缩查表算法^[11]。

在时分复用中,针对由SLM相位响应的高度分散特性引起的相位响应色散,研究人员利用数据位深度限制进行补偿^[12]。上海大学的研究人员则是通过差分采样方法消除倍率色差,通过在计算全息图(CGH)中添加数字闪耀光栅进一步消除了横向色差^[13]。土耳其科奇大学的研究人员针对系统中的轴向色差,通过在全息图算法中采用厚透镜近似的方法进行补偿^[14]。韩国首尔大学的研究人员基于时分复用提出了彩色全息近眼3D显示系统^[15]。该系统为

了消除横向色差,对红、绿、蓝三色全息图分别进行了图像扭转,图像扭转的映射函数由光线追迹法计算得到。为了校正轴向色差,研究人员根据波长分别补偿了红、绿、蓝三色全息图的深度。

基于时分复用方法的彩色计算全息3D显示技术对SLM的刷新率和同步控制模块的同步控制性能的要求较高,这也一定程度上限制了动态显示效果的实现。但时分复用方法使得仅利用一个SLM进行彩色全息显示成为了可能,因而在需要紧凑型结构的全息显示系统中有较强的应用潜力。

3.2 基于多个SLM的空分复用方法

为了规避SLM的刷新率对彩色显示效果的影响,研究者提出了基于多个SLM的空分复用方法来实现彩色全息图的重建。在这类方法中,红、绿、蓝三色全息图被分别加载到多个SLM上,每个颜色通道的全息图的分辨率都等于SLM的分辨率。通过精确调整光路,红、绿、蓝三色再现像在空间上重合,即可得到彩色再现像。图4所示是基于三个SLM的

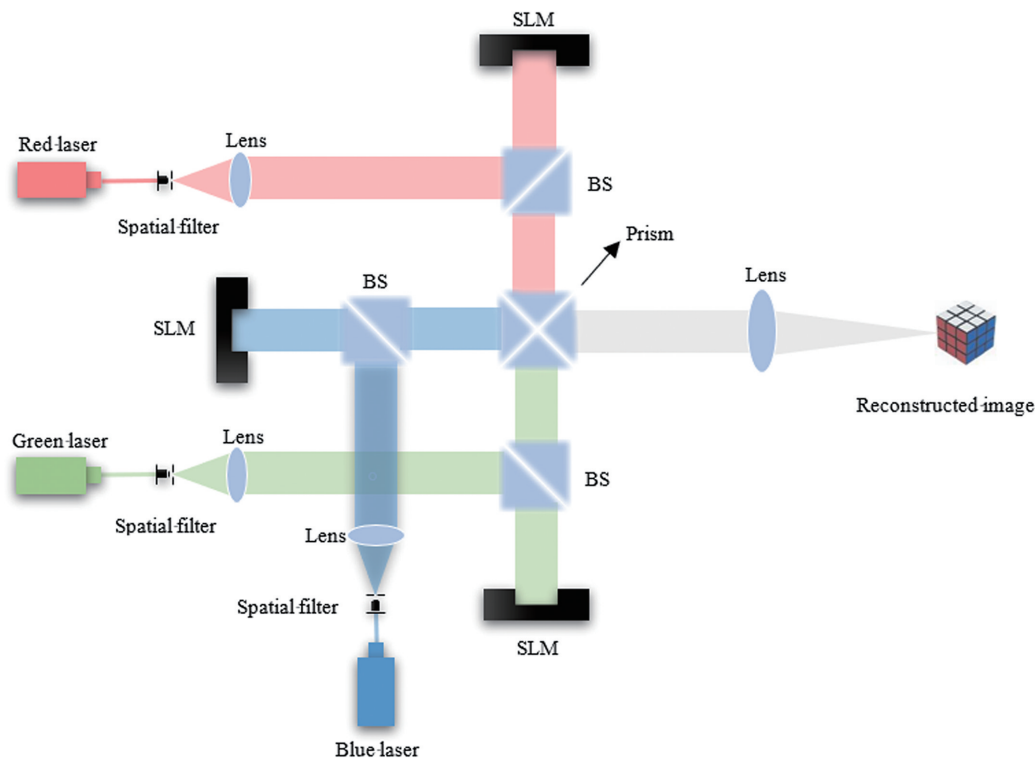


图4 基于三个SLMs的空分复用方法光路图^[16]

Fig. 4 Optical path diagram of space division multiplex method based on three SLMs^[16]

空分复用光路图^[16]。2009年,比尔肯特大学的研究者利用三个不同颜色的发光二极管(LED)作为再现光源分别照射加载有红、绿、蓝三色全息图的三个SLM,实现了彩色显示效果^[17]。LED用作再现光源抑制了散斑噪声对再现像的影响,但是由于LED的光谱较宽,相干性较弱,再现像的质量受到了较大影响。

2019年,北京航空航天大学的研究人员基于空分复用搭建了再现像强度匹配的彩色显示系统^[18]。日本千叶大学的研究人员通过将三个图形处理单元(GPU)和三个SLM相连,将每个GPU计算得到的对应通道的CGH直接传输到对应的SLM上,避免了将数据传输到计算机的中央处理单元这一过程,因此数据传输变得更高效率^[19]。2020年,研究者通过将多GPU集群和三个SLM相连,实现了对含有21000个物点的3D物体的实时彩色再现^[20]。基于多个SLM的空分复用对SLM的刷新率要求较低,因此,不会出现图像的闪烁,但是这种技术所需要的系统结构通常较为复杂,成本较高,对红、绿、蓝三色再现像的空间对准要求很高。

3.3 基于单个SLM的空分复用法

为了使彩色显示系统更简单,2010年,华沙理工大学的研究人员提出了基于单个SLM的彩色投影系统^[21]。该系统中波长为632.8,532,488 nm的三色激光同时照射单个SLM,并在投影屏上会聚为同一个点。红、绿、蓝三色光路中均加入了掩模,以确保每个通道分别正确照射到SLM上1/3的区域,每个颜色通道的全息图的分辨率只有SLM分辨率的1/3。2016年,该单位研究人员进一步通过在单个SLM表面附加彩色滤光片,实现了彩色显示,系统结构图如图5所示^[22]。为了提高再现像的质量,研究者对彩色滤光片进行了空间校准,并对玻璃平板表面不平整造成的色差进行了数值校准。2020年,研究者提出了基于变焦相机的全息获取和再现系统^[23]。在三色全息图中添加数字锥透镜,调整焦深使其大于最大轴向色差,以实现无色差的全息再现。基于单个SLM的空分复用彩色显示系统,光路结构较为简单,且再现像不会出现闪烁现象和彩虹效应,但是图像的分辨率下降为原来的1/3,彩色再现像的空间带宽积减小,视角也受到了影响。

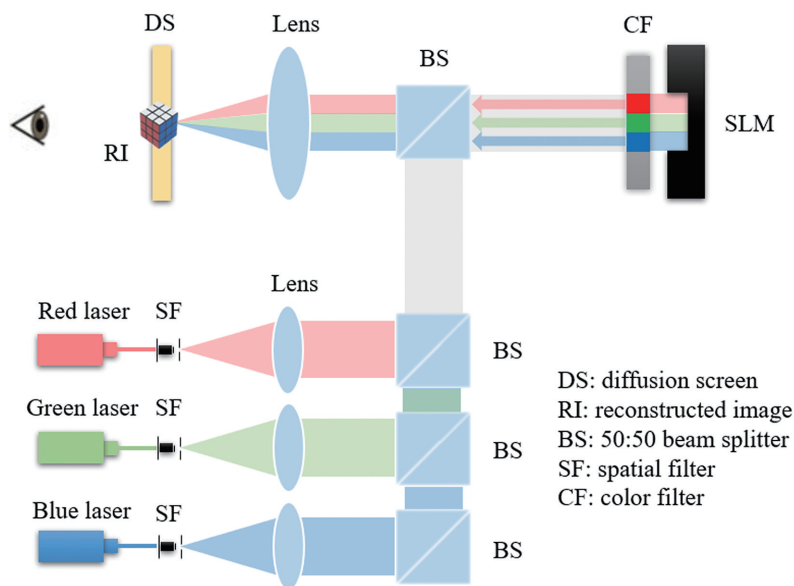


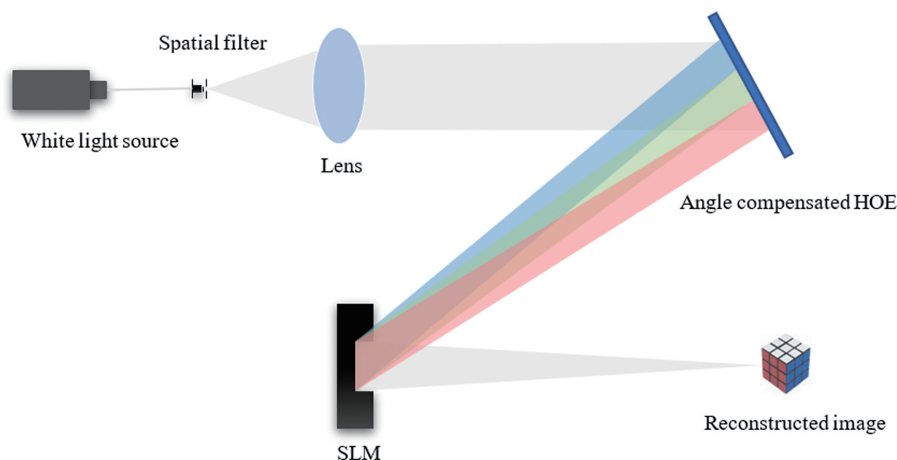
图5 基于单个SLM的空分复用光路图^[22]

Fig. 5 Optical path diagram of space division multiplex method based on single SLM^[22]

3.4 其他方法

为了不牺牲彩色再现像的分辨率,研究者提出了基于单个SLM的目标像分离法,其基本原理是通过编码方法控制三种颜色的全息再现像在空间上同一位置重合。当利用红、绿、蓝三色光同时照射单个SLM时,目标彩色再现像和干扰像分离,通过滤波即可得到目标彩色再现像。例如,华沙理工大学的研究者在编码时将红、绿、蓝三色再现像设置为不同的再现距离,再现时利用红、绿、蓝三色光同时照射SLM,实现红、绿、蓝三种颜色再现像在同一深度上重合,这种方法也叫深度划分法^[24]。

日本千叶大学的研究者将彩色图像的红、绿、蓝再现像设置为横向分布,用以分离彩色目标像和干扰像^[25]。此外,一些研究者基于角度补偿的原理,使红、绿、蓝三色光分别以不同的角度同时照射SLM,以增大彩色目标再现像与干扰像的分离角度。2021年,北京航空航天大学 and 韩国首尔大学的研究人员对系统进行了改进,通过特殊设计的全息光学元件实现了角度补偿的功能,彩色显示系统结构更加轻便紧凑,系统结构图如图6所示^[26]。这类方法的系统结构简单紧凑,没有复杂的同步控制系统,也没有牺牲SLM的分辨率和刷新率,仅利用单个SLM就实现了彩色显示,但

图6 基于角度补偿的彩色显示系统光路图^[26]Fig. 6 Optical path diagram of color display system based on angular compensation^[26]

是在一定程度上降低了 SLM 的相位调制深度。德国的研究人员利用 SLM 同时调制振幅和相位,通过光聚合物薄膜和全息光学元件实现了彩色全息再现的空间融合^[27]。韩国的研究人员通过设计光束偏转背光单元,在实现彩色全息 3D 显示的同时将有效空间带宽积扩大了 30 倍,研制出了 10.1 inch (1 inch = 2.54 cm) 的超薄全彩全息视频显示器^[28]。

除了从光学系统的角度对系统结构进行设计与改进外,利用新材料的优良特性也是实现彩色显示的另一种思路。例如,超表面是一类人工设计的亚波长结构的光学器件,对光波具有优良的调控特性,近些年受到了越来越多的关注。2015 年,台湾大学的研究者提出了分辨率为 180×180 的基于铝纳米棒的超表面结构,实现了彩色全息再现^[29]。2016 年,中国科学院的研究者将离轴照明与基于单一等离子体像素的超表面相结合,重建出了彩色全息 3D 图像^[30]。在该方法中,红、绿、蓝三色全息图分别对应着不同的波矢量,红、绿、蓝三色光以不同的入射角照射加载有全息图的超表面,即可实现彩色全息 3D 再现。同年,北京大学的学者提出了三种纳米块在一个亚波长单元中复用的超表面结构^[31]。三种纳米块分别对红、绿、蓝三色光束进行波前调控,通过独立改变相应纳米块的面内方向来实现所需的几何相位,以完成对红、绿、蓝三色光束波长的全相位调控。基于超表面的彩色显示系统,结构较为简单,能够对光波实现多维度的调控,但是超表面的加工较为复杂,彩色全息中的噪声和动态显示等问题仍有待解决。

4 结束语

对彩色计算全息 3D 显示的实现技术进行了归纳总结。其中,使用多个 SLM 的空分复用或者使用单个 SLM 的时分复用得到了较多应用。基于单个 SLM 的空分复用由于降低了分辨率,彩色质量也受到了影响。基于角度补偿的方式使用单个 SLM 实现

彩色全息再现,由于节省了空间和时间资源,在分辨率上有着一定的优势。各种方法的提出为彩色计算全息 3D 显示效果的完美实现提供了参考。但从现阶段全息 3D 显示的发展情况来看,高质量计算全息 3D 显示技术对空间带宽积有着较高的要求。在彩色计算全息 3D 显示技术方面,高性能 SLM 对彩色全息质量的提升非常重要。在提高空间带宽积的同时,如何使彩色计算全息 3D 显示系统的结构简单紧凑,且没有复杂的同步控制系统,有待于进一步的研究和探索。此外,如何使彩色物体逼真地重建也是未来彩色计算全息 3D 显示技术需重点解决的问题。

参 考 文 献

- [1] Urey H, Chellappan K V, Erden E, et al. State of the art in stereoscopic and autostereoscopic displays [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(4): 540-555.
- [2] 董昊翔, 于迅博, 金秋, 等. 一种基于视点分段式体像素的具有 100° 正面观看视角的桌面式光场显示系统 [J]. 中国激光, 2022, 49(4): 0409001.
Dong H X, Yu X B, Jin Q, et al. Tabletop 3D light-field display with 100° frontal viewing angle based on views-segmented voxels [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 0409001.
- [3] 张腾, 闫兴鹏, 王晨卿, 等. 多参考平面的 EPISM 全息体视图 [J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0909001.
Zhang T, Yan X P, Wang C Q, et al. EPISM holographic stereogram with multi-reference planes [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0909001.
- [4] 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.
- [5] Song W T, Li X, Zheng Y J, et al. Full-color retinal-projection near-eye display using a multiplexing-encoding holographic method [J]. Optics Express, 2021, 29(6): 8098-8107.
- [6] Li G, Lee D, Jeong Y, et al. Holographic display for see-through augmented reality using mirror-lens holographic optical element [J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2486-2489.
- [7] 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.
- [8] Senoh T, Mishina T, Yamamoto K, et al. Viewing-zone-angle-expanded color electronic holography system using ultra-high-

- definition liquid crystal displays with undesirable light elimination[J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(7): 382-390.
- [9] Takaki Y, Matsumoto Y, Nakajima T. Color image generation for screen-scanning holographic display [J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 26986-26998.
- [10] Zhang Z Q, Liu J, Gao Q K, et al. A full-color compact 3D see-through near-eye display system based on complex amplitude modulation[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 7023-7035.
- [11] Pi D P, Liu J, Kang R D, et al. Reducing the memory usage of computer-generated hologram calculation using accurate high-compressed look-up-table method in color 3D holographic display [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28410-28422.
- [12] Zaperty W, Kujawinska M, Kozacki T, et al. Wide-angle color holographic 3D display with multi-source-based holographic content[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9385: 93850E.
- [13] 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.
- [14] Kazempourradi S, Ulusoy E, Urey H. Full-color computational holographic near-eye display[J]. *Journal of Information Display*, 2019, 20(2): 45-59.
- [15] Nam S W, Moon S, Lee B, et al. Aberration-corrected full-color holographic augmented reality near-eye display using a Pancharatnam-Berry phase lens[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 30836-30850.
- [16] Li S J, Wang Q H, Wang C, et al. Color holographic magnification system based on spatial light modulators [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2016, 24(2): 125-130.
- [17] Yaras F, Onural L. Color holographic reconstruction using multiple SLMs and LED illumination[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7237: 72370O.
- [18] Wang D, Liu C, Chu F, et al. Full color holographic display system based on intensity matching of reconstructed image[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): 16599-16612.
- [19] Nakayama H, Takada N, Ichihashi Y, et al. Real-time color electroholography using multiple graphics processing units and multiple high-definition liquid-crystal display panels[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(31): 5993-5996.
- [20] Ikawa S, Takada N, Araki H, et al. Real-time color holographic video reconstruction using multiple-graphics processing unit cluster acceleration and three spatial light modulators[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(1): 010901.
- [21] Makowski M, Ducin I, Sypek M, et al. Color image projection based on Fourier holograms[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1227-1229.
- [22] Zaperty W, Kozacki T, Kujawinska M. Multi-SLM color holographic 3D display based on RGB spatial filter[J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(12): 1724-1731.
- [23] 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: 6.
- [24] Makowski M, Sypek M, Kolodziejczyk A. Colorful reconstructions from a thin multi-plane phase hologram [J]. *Optics Express*, 2008, 16(15): 11618-11623.
- [25] Shimobaba T, Takahashi T, Masuda N, et al. Numerical study of color holographic projection using space-division method[J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10287-10292.
- [26] Lin S F, Gentet P, Wang D, et al. Simply structured full-color holographic three-dimensional display using angular-compensating holographic optical element[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 138: 106404.
- [27] Häussler R, Gritsai Y, Zschau E, et al. Large real-time holographic 3D displays: enabling components and results[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): F45-F52.
- [28] An J, Won K, Kim Y, et al. Slim-panel holographic video display[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5568.
- [29] Huang Y W, Chen W T, Tsai W Y, et al. Aluminum plasmonic multicolor meta-hologram [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(5): 3122-3127.
- [30] Li X, Chen L W, Li Y, et al. Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation [J]. *Science Advances*, 2016, 2(11): e1601102.
- [31] Wang B, Dong F L, Li Q T, et al. Visible-frequency dielectric metasurfaces for multiwavelength achromatic and highly dispersive holograms[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(8): 5235-5240.

Color Computer-Generated Holographic 3D Display Technology

Wang Di, Hou Yehao, Huang Qian, Zheng Yiwei, Wang Qionghua*

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

Abstract

Significance The wavefront of any object can be recorded and reproduced using computer-generated holography, regardless of whether the object is real or not. Due to a computer-generated holographic display provides all of the object's depth cues, it naturally resolves the vergence-accommodation conflict. The development of color computer-generated holographic three-dimensional (3D) display technology has received a lot of attention as one of the key technologies of the computer-generated holographic 3D display.

Progress The types and principles of chromatic aberration in the color computer-generated holographic 3D display are investigated in this paper. The technologies of color computer-generated holographic 3D display are then classified and outlined.

The time-division multiplexing technology makes it possible to use only one spatial light modulator (SLM) for color holographic display. Some researchers, for example, use the time-division multiplexing method to construct a full-color holographic 3D display system based on liquid crystal displays (LCD). In this system, a rotating wheel plate is used to cause red light, green light, and blue laser light to alternately irradiate the LCD. At the same time, the red, green, and blue holograms are correspondingly loaded on the LCD. The resolution of each color hologram is the same as that of the

LCD. The recording distances of the red, green, and blue holograms are compensated to eliminate the axial chromatic aberration introduced by the $4f$ system. To achieve color holographic 3D reconstruction, the time-division multiplexing technology fully utilizes the refresh rate of the SLM and the persistence of vision effect of the human eye. The demanding requirements on the refresh rate of the SLM and the performance of the synchronization control module limit the realization of the dynamic display effect to some extent.

The space-division multiplexing technology based on multiple SLMs has lower requirements on the refresh rate of the SLMs, so there is no image flickering. Red, green, and blue holograms are loaded on multiple SLMs in this method, and the resolution of the hologram is equal to that of the SLM. The red, green, and blue images reproduced are spatially coincident by precisely adjusting the optical path. The image can then be reproduced in color. However, the system structure of this technology is typically complex, and the cost is high. The spatial alignment of the reconstructed red, green, and blue images is extremely difficult.

The space-division multiplexing technology based on a single SLM has the merits of the relatively simple optical path structure, the flicker-free reconstructed image, and being free from rainbow effect. The red, green, and blue lasers illuminate one-third of the area of a single SLM in this method. Each color hologram has a resolution that is one-third of the resolution of the SLM. However, the image resolution is reduced to one-third of the original, the spatial bandwidth product of the color reproduced image is reduced, and the perspective is also affected.

Some researchers have proposed the target image separation method based on a single SLM to avoid reducing the resolution of the color reproduction image. When the SLM is irradiated by red, green, and blue light at the same time, the target color reproduction image and the interference image are separated, and the target color reproduction image can be obtained by filtering. In addition to designing and improving the optical system structure, using the excellent properties of new materials is another way to realize color holographic display. Other technologies, such as the use of metasurfaces, fully exploit the advantages of the new materials and have promising future prospects.

Conclusions and Prospects Many methods have been proposed to realize color computer-generated holographic 3D display. This paper summarizes the color computer-generated holographic 3D display realization technology. Among these methods, the space-division multiplexing with multiple spatial light modulators and time-division multiplexing with a single spatial light modulator are frequently used. The quality of the color image is affected since the resolution is reduced when using the space-division multiplexing technology based on a single SLM. The technique that using a single SLM to realize the color holographic reconstruction based on the angle compensation method has certain advantages in resolution because it saves space and time resources. The various method proposals provide novel ideas for the perfect reconstruction of color holograms. However, based on the current state of holographic 3D display development, the high-quality holographic 3D display has higher spatial bandwidth product requirements. While improving the spatial bandwidth product, more research and exploration are needed to determine how to make the color computer-generated holographic 3D display system simple and compact without a complex synchronous control system.

Key words holography; 3D display; computer-generated holography; color computer-generated holography