

## 计算机制相位彩虹全息近眼显示

杨鑫<sup>1</sup>, 焦述铭<sup>2\*</sup>, 宋强<sup>3</sup>, 马国斌<sup>3</sup><sup>1</sup>北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;<sup>2</sup>鹏城实验室, 广东 深圳 518055;<sup>3</sup>珑璟光电微纳光学研究中心, 广东 深圳 518000

**摘要** 基于现有的相位空间光调制器, 提出并实现了计算机制相位彩虹全息近眼显示。指出带限条件下物光在全息面上相位分布的计算及高频闪耀光栅纵向色散的控制是实现相位彩虹全息的关键要素。在计算相位彩虹全息图时, 首先利用带限条件下的角谱衍射算法获取全息面上物光的复振幅分布, 并利用双向误差扩散算法将复振幅分布编码为相位分布。然后, 对参考光对应的高频闪耀光栅的相位进行编码, 得到计算机制相位彩虹全息图。最后, 设计了包含白色点光源、准直透镜、空间光调制器、 $4f$  滤波系统及目镜的全息彩色近眼显示系统, 并通过光学再现获得了相位彩虹全息近眼显示效果, 证明了所提方法的有效性。

**关键词** 全息; 全息显示; 近眼显示; 相位彩虹全息; 彩色全息显示

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2209001

## Computer Generated Phase-only Rainbow Holographic Near-Eye Display

Yang Xin<sup>1</sup>, Jiao Shuming<sup>2\*</sup>, Song Qiang<sup>3</sup>, Ma Guobin<sup>3</sup><sup>1</sup>School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;<sup>2</sup>Peng Cheng Laboratory, Shenzhen, Guangdong 518055, China;<sup>3</sup>Lochn Optics-Micro/Nano Photonics Research Center, Shenzhen, Guangdong 518000, China

**Abstract** Based on the existing phase-only spatial light modulator (SLM), a computer generated phase-only rainbow holographic near-eye display is proposed and realized. It is pointed out that the calculation of the phase distribution of the object light on the holographic plane under the band-limited condition and the control of longitudinal dispersion by high-frequency blazed grating are the key elements to realize the phase-only rainbow holography. When calculating the phase-only rainbow hologram, the complex amplitude distribution of the object light on the holographic plane is obtained by using the angular spectrum diffraction algorithm under the band-limited condition, and the complex amplitude distribution is encoded as the phase distribution by the bidirectional error diffusion algorithm first. Then, the phase of high-frequency blazed grating corresponding to the reference light is encoded, and the computer generated phase-only rainbow hologram is obtained. Finally, a holographic near-eye color display system including a white light point source, a collimating lens, a spatial light modulator, a  $4f$  filtering system and an eyepiece is designed and the phase rainbow holographic near-eye display effect is obtained by optical reconstruction, which proves the effectiveness of the proposed method.

**Key words** holography; holographic display; near-eye display; phase-only rainbow holography; color holographic display

**OCIS codes** 090.1760; 090.2870; 090.4220

收稿日期: 2021-04-19; 修回日期: 2021-05-06; 录用日期: 2021-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(62005006)

通信作者: \*jiaoshm@pcl.ac.cn

## 1 引言

信息量有限是利用空间光调制器(SLM)实现动态全息三维显示的最主要问题,因此在现有条件下实现多人观看的大视场、大视角动态全息三维显示存在困难<sup>[1-3]</sup>。在近眼显示领域中,仅需保证人眼球移动范围内能观看到图像即可,而无需满足多人同时观看的需求,从而大大减少了对 SLM 的信息量要求,这是将基于 SLM 的动态全息三维显示应用于近眼显示的一个重要原因。另外,在现有的基于双目视差的近眼三维显示中,辐辏调节冲突所引起的观看者眩晕等问题也会直接影响观看效果。通过光场三维显示<sup>[4]</sup>或变焦三维显示<sup>[5]</sup>方法可在一定程度上降低辐辏调节冲突对观看者的影响,但完全消除辐辏调节冲突仍存在一定困难。计算全息三维显示通过衍射的方式进行波前信息编码解码,有能力实现像素级别的波前调控和畸变矫正,逐渐成为近眼显示研究的一个热门领域<sup>[6-8]</sup>。

常用基于三片 SLM<sup>[9]</sup>或单片 SLM<sup>[10-12]</sup>的方案来实现彩色动态全息三维显示,如将三色激光准直扩束后分别照明三片 SLM,再利用合束镜将三色再现像合并能够实现彩色全息三维显示,但是该系统的体积大,不利于小型化以及在近眼显示方面的应用<sup>[9]</sup>。通过时序刷新、空间分割或频域复用的方式可实现单片 SLM 的动态彩色全息三维显示<sup>[10-12]</sup>,但上述方案中均将激光作为光源,故再现像中存在明显的散斑噪声。彩虹全息是一种可实现白光照明的彩色全息三维显示方式,但传统的彩虹全息均是利用光学曝光或微纳加工方式制作的彩虹全息<sup>[13-14]</sup>,故仅能实现静态彩色三维显示。为了实现紧凑型及无散斑噪声干扰的彩色彩虹全息近眼显示,文献[15]中利用频域分析模型进行彩色彩虹全息的计算,实现了动态彩色彩虹全息近眼显示。与文献[16]中的傅里叶彩虹全息不同,文献[15]中的方法无需利用光栅进行色散照明,能够直接实现白光照明的全彩色近眼显示。

振幅 SLM 和相位 SLM 是目前使用较为广泛的 SLM。与振幅 SLM 相比,利用相位 SLM 能够实现更高的衍射效率,从而能够有效提高能量利用率,故相位全息显示是目前的主流方向。尽管文献[15]实现了白光照明的彩色彩虹全息近眼显示,但文献[15]中的彩虹全息图为振幅全息图,衍射效率低,不利于近眼显示的实际应用,故研究计算机制相位彩虹全息具有重要意义。

相位全息图的计算可通过多种方式实现,如经典的 Gerchberg-Saxton(GS)迭代算法及其改进算法<sup>[17-20]</sup>、双相位编码<sup>[21-22]</sup>和误差扩散算法<sup>[23-25]</sup>等。迭代算法具有计算时间长且对初始相位敏感的缺点。双相位编码通过牺牲空间分辨率的方式实现相位全息,进而存在频谱分布复杂的缺点。利用误差扩散算法实现相位全息虽然牺牲了一定的相位准确性,但是不牺牲全息图的分辨率且对频域成分未产生大的影响,这是本研究中利用误差扩散算法进行相位彩虹全息图计算的原因。

基于现有的相位硅基液晶(LCoS),本文提出了计算机制相位彩虹全息近眼显示。首先,在频域内设计了带限滤波器,利用带限衍射的角谱算法获得了目标图像在全息面上的复振幅分布。然后,利用双向误差扩散算法将复振幅分布转换为相位分布,并对与参考光相位对应的闪耀光栅的相位进行编码以获得计算机制相位彩虹全息图。最后,设计并实现了紧凑型全息彩色近眼显示系统,实现了白光照明的无散斑噪声干扰的相位彩虹全息近眼显示。

## 2 基本原理

图 1 为彩色彩虹全息再现原理图。当采用一束白光平面波  $C$  照明全息图  $H$  时,平面波经过彩色彩虹全息图衍射后,在空间一定距离  $z_0$  处可形成三色光谱错位叠加的光谱分布。人眼在设计狭缝位置处观看时,红、绿、蓝窄带光谱恰好可以进入人眼,进而人眼可以观看到准确的彩色再现像。当人眼纵向移动时,观看到的图像呈现彩虹色变化的效果,该彩色彩虹全息再现过程如图 1(a)所示,其中  $\theta_{\text{ref},y_0}$  为参考光在  $y$  方向上与  $z$  轴的夹角。利用足够高的载频使白光在纵向上充分色散是实现彩色彩虹全息显示的重要条件。然而,在全息近眼显示时,由于 SLM 的分辨率低、像素尺寸大、衍射角小,故直接在空间内形成彩虹色光谱分布存在困难。因此,文献[15]在频域内实现了彩色彩虹全息图的设计,如图 1(b)所示,其中  $f_1$  为透镜的焦距、 $\Delta f_{y_1}$  为频带宽度。此时,衍射光可在透镜焦平面上形成正负一级衍射光和零级光。图 1(b)中未给出负一级光分布,而正一级光即为三色光谱重叠分布的情形。该振幅彩虹全息图的计算<sup>[15]</sup>可以表示为

$$H(x_1, y_1) = H_0 + A_{o,r}(x_1, y_1) \cos\left[\phi_{o,r}(x_1, y_1) - \frac{2\pi}{\lambda_r} y_1 \sin \theta_{\text{ref},y_1}\right] + A_{o,g}(x_1, y_1) \cos\left[\phi_{o,g}(x_1, y_1) - \frac{2\pi}{\lambda_g} y_1 \sin \theta_{\text{ref},y_1}\right] +$$

$$A_{o,b}(x_1, y_1) \cos[\phi_{o,b}(x_1, y_1) - \frac{2\pi}{\lambda_b} y_1 \sin \theta_{ref,y_1}], \quad (1)$$

式中:  $(x_1, y_1)$  为全息面上任意点的坐标;  $H_0$  为常数因子, 作用是保证全息图本身的透过率不小于 0;

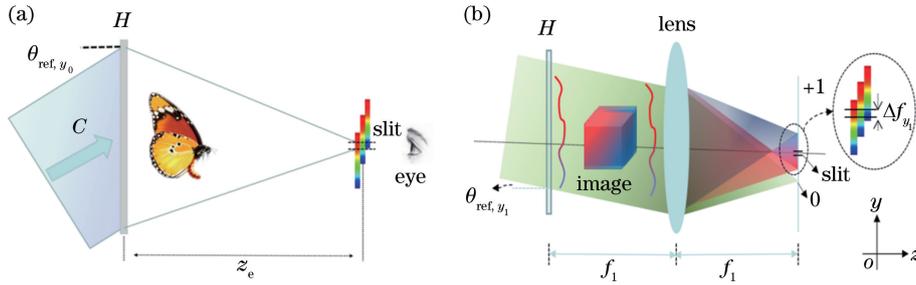


图 1 彩色彩虹全息再现原理图。(a)传统彩色彩虹全息再现<sup>[14]</sup>; (b)彩色彩虹全息近眼显示<sup>[15]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of color rainbow holographic reconstruction. (a) Traditional color rainbow holographic reconstruction<sup>[14]</sup>; (b) color rainbow holographic near-eye display<sup>[15]</sup>

(1)式表示的振幅全息图在光学再现时存在共轭光和零级光, 降低了能量利用率。在相位全息图的理想情况中仅存在所需的衍射光, 能量利用率高。为此, 对计算机制相位彩虹全息实现的可能性问题进行了研究。为了简便起见, 仅研究单波长记录的彩虹全息, 此时相位彩虹全息图的计算可以表示为

$$H_p = \exp \left[ i \left( \phi_o - \frac{2\pi}{\lambda} y_2 \sin \theta_{ref,y_2} \right) \right], \quad (2)$$

式中:  $\phi_o$  为频带受限情况下物光在全息面上的相位分布, 此时物光复振幅可表示为  $\exp(i\phi_o)$ ;  $\frac{2\pi}{\lambda} y_2 \sin \theta_{ref,y_2}$  为参考光相位, 对应一个频率为  $\frac{\sin \theta_{ref,y_2}}{\lambda}$  的闪耀光栅的相位;  $\lambda$  为全息图计算时的波长;  $y_2$  为全息面上  $y$  方向的坐标。在全息再现时, 以倾斜的白光平面波  $C = \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda_C} y_2 \sin \theta_{ref,y_2} \right]$  照明全息图, 则在全息图平面后的衍射光可以表示为

$$H' = \exp \left[ i \left( \phi_o - \frac{2\pi}{\lambda} y_2 \sin \theta_{ref,y_2} + \frac{2\pi}{\lambda_C} y_2 \sin \theta_{ref,y_2} \right) \right], \quad (3)$$

式中:  $\lambda_C$  为再现白光光源的一个波长。可见当  $\lambda_C$  与全息图计算时的波长  $\lambda$  相同时, 能够准确得到物光复振幅  $\exp(i\phi_o)$ 。当波长不相同,  $\frac{2\pi}{\lambda_C} y_2 \sin \theta_{ref,y_2}$  与  $\frac{2\pi}{\lambda} y_2 \sin \theta_{ref,y_2}$  的相位差为一个载频, 调节相位差可以控制衍射光的方向。衍射光频率的表达式为

$$f_D = \sin \theta_{ref,y_2} \frac{\lambda - \lambda_C}{\lambda_C \lambda} = \frac{\sin \theta_D}{\lambda_C}, \quad (4)$$

$A_{o,r}$ 、 $A_{o,g}$  和  $A_{o,b}$  为三原色物光的振幅;  $\phi_{o,r}$ 、 $\phi_{o,g}$  和  $\phi_{o,b}$  为三原色物光的相位;  $\lambda_r$ 、 $\lambda_g$  和  $\lambda_b$  为三原色光波的波长;  $\theta_{ref,y_1}$  为参考光在  $y$  方向上与  $z$  轴的夹角。物光在全息面上的复振幅分布受到频域内狭缝带宽的限制。

式中:  $\theta_D$  为衍射光在  $y$  方向上和  $z$  轴的夹角。(4)式中衍射光频率的表达形式本质上是由光栅方程决定的。进而可知, 当使用具有连续光谱分布的白光照明相位彩虹全息图时, 在频域内不同波长的光具有不同的频域位置, 进而会形成连续的光谱分布。当人眼处于不同位置时, 不同的光谱成分进入人眼, 进而可以得到彩虹色变化的显示效果。需要注意的是: 1) 在再现白光光源的波长与计算时的波长不同情况下的再现仅会引起波前相位差, 而不会产生共轭光或高级衍射光; 2) 相位差的存在会导致不同波长再现像在一定区域内重叠, 进而造成再现像分辨率的降低。上述两种情况与传统彩虹全息再现中的情况是类似的。

由上述分析可知, 实现相位彩虹全息计算的核心要素为: 1) 频带受限情况下物光在全息面上的相位分布  $\phi_o$  的计算; 2) 编码与参考光对应的高频闪耀光栅的相位  $\frac{2\pi}{\lambda} y_2 \sin \theta_{ref,y_2}$ 。

接下来, 讨论频带带宽的选择问题。以全息计算时的波长为 632 nm、全息图像素尺寸为  $3.74 \mu\text{m}$  为例, 图 2 为参考光角度与频移量的关系。SLM 像素决定的最大空间频率为  $f_{SLM} = \frac{1}{2 \times 3.74 \mu\text{m}} = 133 \text{ lp/mm}$ 。对于一个参考光角度, 当设置其所对应的频率为  $f_{rc}$  时, 则以此  $f_{rc}$  为中心确定物光的频带宽度。当参考光角度为  $3^\circ$  时,  $f_{rc} = 82.81 \text{ lp/mm}$ 。频带范围需要满足的采样定理条件为  $f_{rc} + \frac{\Delta f_{y_3}}{2} \leq f_{SLM}$ , 其中  $\Delta f_{y_3}$  为频带宽度。如果

频带宽度太窄,则编码图像在  $y$  方向上的分辨率会很低。如果频带宽度太宽,则再现时进入该频带宽度的光谱成分增大,再现像变得模糊。因此,需要适当选择频带宽度  $\Delta f_{y_3}$ 。另外,通过对(4)式的分析可知,参考光的角度越大,光谱色散越强,有利于不同颜色光谱的展开,从而可以实现饱和度较高的彩色显示效果。

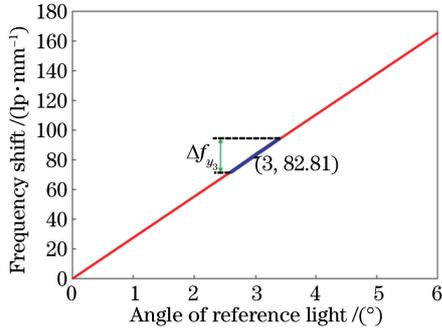


图 2 频移量与参考光角度关系

Fig. 2 Relationship between frequency shift and angle of reference light

在确定频带宽度后,需要进行  $\phi_0$  和与观察狭缝对应的频域二值滤波器  $F_t$  的计算。假设彩虹全息图在  $y$  方向上的物理尺寸为  $w_h$ ,则  $y$  方向上的频带采样间隔为  $1/w_h$ ,给定带宽  $\Delta f_y$  后,频域滤波器的中心分辨率为  $m_h = \Delta f_y w_h$ 。由于彩虹全息图计算时不限制横向视场角,故给定全息图的分辨率为  $M_h \times N_h$ ,其中  $N_h$  为滤波器横向的分辨率, $M_h$  为滤波器纵向的分辨率。图 3 给出了频域二值滤波器的示意图。其中,中心区域带宽的频谱被保留而高频信息被去除。

针对平面图像的情况计算相位彩虹全息图,包含图像平面  $I$  和全息面  $H$ ,图像  $I$  在带限条件下衍射一定距离  $z$  后获得全息面  $H$  上的复振幅分布,其

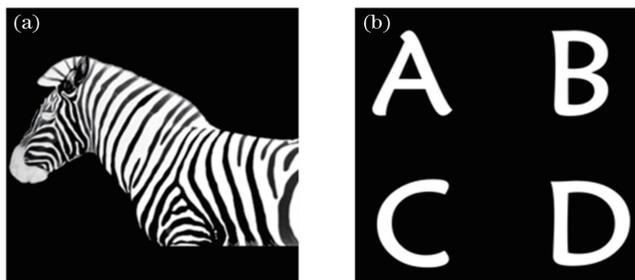


图 4 用于全息图计算的目标图像。(a)斑马图像;(b)带有字母的图像

Fig. 4 Target image for hologram calculation. (a) Zebra image; (b) image with letters

图 5 为纵向带宽为 20 lp/mm 情况下,两个目标图像的彩虹全息图以及数值再现结果。图 5 (a1)、(b1)为目标图像在全息面上的相位分布,图 5

角谱衍射计算可以表示为:

$$u_t = \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}(I) \times H_{f_z}(f_x, f_y) \times F_t], \quad (6)$$

式中: $u_t$  为光场复振幅分布; $(f_x, f_y)$  为频域内的坐标; $H_{f_z}(f_x, f_y) = \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}\right]$  为相干光学传递函数; $\mathcal{F}(\cdot)$  和  $\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$  分别为傅里叶变换和傅里叶逆变换。获得了物光在全息面上的复振幅  $u_t$  后,利用双向误差扩散算法<sup>[23]</sup> 计算得到频带受限情况下物光在全息面上的相位分布  $\phi_0$ 。将  $\phi_0$  代入(2)式并求幅角即可得到计算机制相位彩虹全息图。

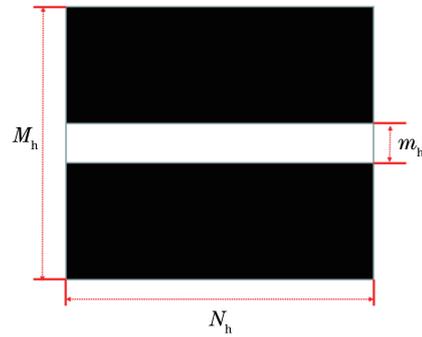


图 3 频域二值滤波器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of binary filter in frequency domain

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 全息图计算及实验结果

实验中使用的相位 LCoS 的分辨率为 4094 pixel  $\times$  2160 pixel、像素尺寸为 3.74  $\mu\text{m}$ ,为了方便起见将目标图像的分辨率设定为 2160 pixel  $\times$  2160 pixel。此外,设定全息图与目标图像的距离为 10 mm,计算的波长为 632 nm。最后,将所计算的相位彩虹全息图进行外围补零后载入相位 LCoS 中进行显示。图 4 为用于全息图计算的目标图像。

(a2)、(b2)为编码了角度为 3° 的参考光对应的高频闪耀光栅相位后的相位彩虹全息图,图 5(a3)、(b3)为在所设计的波长下误差扩散算法计算得到的全息

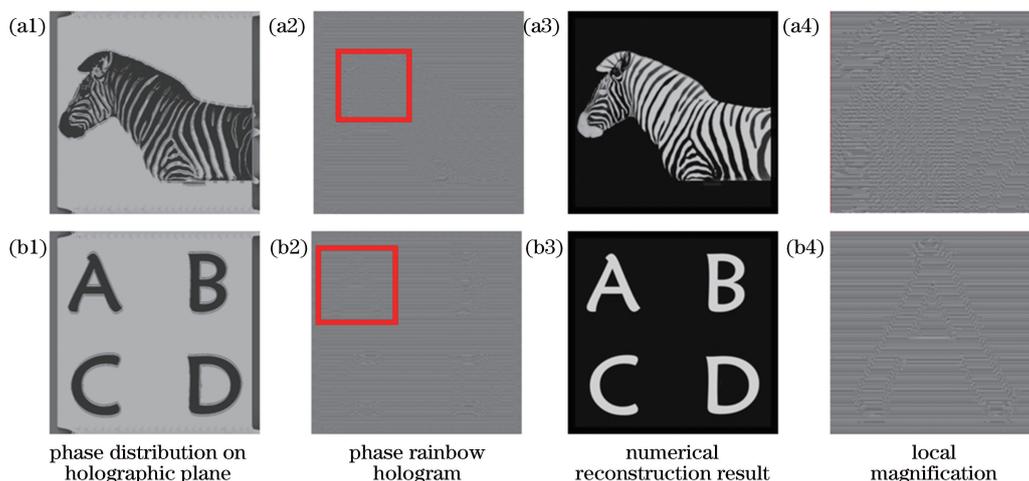


图 5 目标图像的相位彩虹全息图及数值再现结果。(a1)~(a4)斑马图像;(b1)~(b4)带有字母的图像

Fig. 5 Phase rainbow hologram and numerical reconstruction result of target image.

(a1)~(a4) Zebra image; (b1)~(b4) image with letters

图的数值再现结果,图 5(a4)、(b4)分别为图 5(a2)、(b2)中矩形部分的放大图。

图 6 为相位彩虹全息近眼彩色显示原理图,其中 P 为具有连续光谱的卤素灯, Q 为相位 LCoS, L1、L2、L3、L4 为透镜, BS 为分光镜, M 为可调条形滤波器。器件 Q 的作用是载入计算机相位彩虹全息图对照明光进行调制。可调条形滤波器 M 位于  $4f$  系统的频谱面上,其既可以允许所有衍射光谱通过,也可以允许一定波长范围的光谱通过。相位彩虹全息近眼彩色显示的基本过程为:通过光纤顶端发出的发散光被透镜 L1 准直后经过分光镜 BS,其中部分光被分光镜 BS 反射至器件 Q 上。经器件 Q 调制后的光经过由 L2、狭缝、L3 组成的  $4f$  光学系统后,人眼可通过 L3 后方一定距离处的目镜 L4 观察到位于远处被放大的彩色全息再现像。当人眼上下移动时,在一定范围内将看到彩虹色变

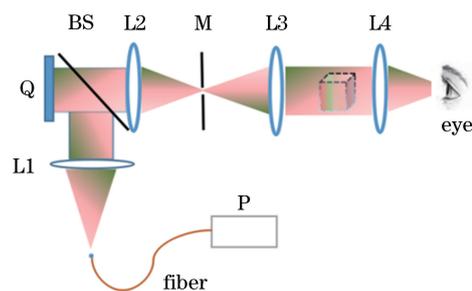


图 6 相位彩虹全息近眼彩色显示原理图

Fig. 6 Schematic diagram of phase rainbow holographic near-eye color display

化的效果。准直透镜和组成  $4f$  系统的透镜以及目镜均采用双胶合消色差透镜。

图 7 为在目镜 L4 后不同纵向位置处拍摄到的彩色显示效果。可以看出,利用所提出的计算机相位彩虹全息图进行再现,可实现对纵向色散的控

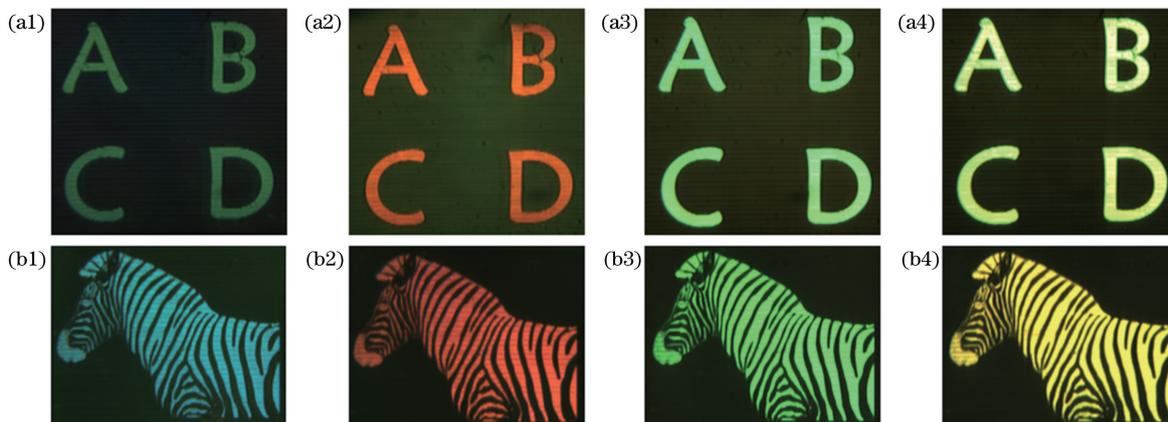


图 7 不同纵向位置处的再现图像。(a1)~(a4)带有字母的图像;(b1)~(b4)斑马图像

Fig. 7 Reconstructed images at different longitudinal positions. (a1)~(a4) Image with letters; (b1)~(b4) zebra image

制,进而实现了清晰彩虹色变化的全息近眼显示效果。

### 3.2 分析及讨论

通过对彩虹全息的模型和原理进行分析,研究了计算机制相位彩虹全息图实现的可能性问题,并指出高频闪耀光栅相位的编码及在频带受限情况下物光在全息面上的相位分布的计算是两个核心要素。利用带限情况下的角谱衍射算法实现了目标图像在全息面上的复振幅计算,并通过双向误差扩散算法,得到了物光在全息面上的相位分布。然后,通过编码与参考光对应的闪耀光栅的相位得到了计算机制相位彩虹全息图,并通过实验验证了算法的可行性。计算物光在全息面上的相位分布的方法有多种,除了所提到的双向误差扩散算法,亦可采用 GS 迭代算法<sup>[19]</sup>或深度学习<sup>[26]</sup>。

在实验中,进行了纵向带宽为 20 lp/mm 情况下相位彩虹全息图的计算。当选择的纵向带宽太窄时,编码的物光高频信息丢失严重,从而影响了图像的分辨率。当纵向带宽太宽时会影响到色彩的呈现。一种极端情况为取消狭缝本身对带宽的限制,此时的全息图就是离轴参考光编码的像面全息图。当利用白光照明全息图时,仅能实现灰度的全息近眼显示。

在实验中,将一个透镜作为目镜进行近眼彩色显示。另外,使用深圳珑璟光电微纳光学研究中心自主研发的具有对角线 42° 视场角、出瞳距离为 15 mm 的 birdbath 目镜,实现了增强现实(AR),即人眼可同时看到全息再现像以及环境中的物体。由于 AR 目镜结构件的存在及目镜出瞳距离小,尚无法直接通过相机靠近的方式拍摄到完整的显示效果,只能通过人眼靠近观看,故彩色全息 AR 显示效果未在文中给出。后续有望通过将衍射光波导与所提方法相结合的方式实现扩瞳的彩虹全息 AR 显示。

虽然在实验中仅给出了一个深度情况下的彩虹全息显示效果,但是所涉及的带限条件下的角谱衍射计算方法,可用于不同深度的彩色图像的相位彩虹全息图的计算中。

在实验中,仅考虑了单波长记录情况下的相位彩虹全息图的计算,将三色波长结合实现相位彩色彩虹全息图的计算将是之后的一个重要研究方向。

## 4 结 论

基于现有的相位 LCoS,首先对相位彩虹全息

实现的方法进行了研究,提出利用带限情况下的角谱衍射算法计算物光在观察狭缝限制的情况下全息面上的复振幅分布。然后,利用双向误差扩散算法计算得到了物光在全息面上的相位分布,并将参考光对应的闪耀光栅的相位进行编码,得到了计算机制相位彩虹全息图。最后,通过实验验证了所提方法的可靠性。由于实现相位彩色彩虹全息图计算及三维物体的相位彩色彩虹全息图具有实际意义,故后续将会逐步开展相关工作,以期获得高质量的白光照明彩色全息近眼显示。

### 参 考 文 献

- [1] Wang H, Jin H Z, Wu D Y, et al. Information capacity and reduction in computing holographic three-dimensional display [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209012.  
王辉, 金洪震, 毋东元, 等. 计算全息三维显示的信息量及其简化 [J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209012.
- [2] Yaraş F, Kang H, Onural L. State of the art in holographic displays: a survey[J]. Journal of Display Technology, 2010, 6(10): 443-454.
- [3] Geng J. Three-dimensional display technologies[J]. Advances in Optics and Photonics, 2013, 5(4): 456-535.
- [4] Wang X, Hua H. Depth-enhanced head-mounted light field displays based on integral imaging [J]. Optics Letters, 2021, 46(5): 985-988.
- [5] Rathinavel K, Wetzstein G, Fuchs H. Varifocal occlusion-capable optical see-through augmented reality display based on focus-tunable optics [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2019, 25(11): 3125-3134.
- [6] Yang X, Lin S F, Wang D, et al. Holographic AR display based on free-form lens combiner and LED illumination[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11209: 11209W.
- [7] Maimone A, Georgiou A, Kollin J S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality [J]. ACM Transactions on Graphics, 2017, 36(4): 85.
- [8] Chang C L, Bang K, Wetzstein G, et al. Toward the next-generation VR/AR optics: a review of holographic near-eye displays from a human-centric perspective[J]. Optica, 2020, 7(11): 1563-1578.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Lin S F, Cao H K, Kim E S. Single SLM full-color holographic three-dimensional video display based on image and frequency-shift multiplexing [J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 15926-15942.
- [12] 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.
- [13] Yang X, Wang H, Li Y, et al. Computer generated half-circle view-able color rainbow hologram based on frequency domain synthesis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0309001.  
杨鑫, 王辉, 李勇, 等. 基于频域合成的计算机制半周视彩色彩虹全息 [J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0309001.
- [14] Liu Z M, Yao J Y, Xu F Y, et al. Computer generated integral color rainbow holographic 3D display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 1009002.  
刘子陌, 姚建云, 许富洋, 等. 计算机制集成彩色彩虹全息三维显示 [J]. *光学学报*, 2021, 41(10): 1009002.
- [15] Yang X, Song P, Zhang H B, et al. Full-color computer-generated holographic near-eye display based on white light illumination [J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38236-38249.
- [16] Kozacki T, Chlipala M, Choo H G. Fourier rainbow holography [J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25086-25097.
- [17] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, 35: 237-246.
- [18] Wang H C, Yue W R, Song Q, et al. A hybrid Gerchberg-Saxton-like algorithm for DOE and CGH calculation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 89: 109-115.
- [19] Zhao T Y, Chi Y Y. Modified Gerchberg-Saxton (G-S) algorithm and its application [J]. *Entropy*, 2020, 22(12): 1354.
- [20] Velez-Zea A, Torroba R. Mixed constraint in global and sequential hologram generation [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(7): 1888-1895.
- [21] Song H, Sung G, Choi S, et al. Optimal synthesis of double-phase computer generated holograms using a phase-only spatial light modulator with grating filter [J]. *Optics Express*, 2012, 20(28): 29844-29853.
- [22] Arrizón V, Sánchez-de-la-Llave D. Double-phase holograms implemented with phase-only spatial light modulators: performance evaluation and improvement [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(17): 3436-3447.
- [23] Tsang P W M, Poon T C. Novel method for converting digital Fresnel hologram to phase-only hologram based on bidirectional error diffusion [J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23680-23686.
- [24] Jiao S M, Zhang D F, Zhang C L, et al. Complex-amplitude holographic projection with a digital micromirror device (DMD) and error diffusion algorithm [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(5): 2800108.
- [25] Liu K X, He Z H, Cao L C. Pattern-adaptive error diffusion algorithm for improved phase-only hologram generation [J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(5): 050501.
- [26] Shi L, Li B C, Kim C, et al. Towards real-time photorealistic 3D holography with deep neural networks [J]. *Nature*, 2021, 591(7849): 234-239.