

## 计算机制半周视彩色彩虹全息体视图

许富洋<sup>1,2</sup>, 杨鑫<sup>3\*</sup>, 刘子陌<sup>1,2</sup>, 宋强<sup>3</sup>, 马国斌<sup>3</sup>, 任志君<sup>1,2</sup><sup>1</sup>浙江师范大学物理与电子信息工程学院信息光学研究所, 浙江 金华 321004;<sup>2</sup>浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室, 浙江 金华 321004;<sup>3</sup>珑璟光电-微纳光学研究中心, 广东 深圳 518000

**摘要** 全息体视图(HS)是一种可加速计算的全息图,能够实现单色全息三维(3D)显示,将其与彩色彩虹全息相结合并实现允许许多人围观的半周视彩色彩虹全息 3D 显示具有实际应用价值。在 HS 计算原理的基础上,设计单元全息图侧视角及视场角等参数,通过频域复用获得包含红色、绿色和蓝色信息的单元全息图的频谱,对频谱进行傅里叶逆变换后取实部得到该单元全息图,所有单元全息图的组合形成完整的半周视彩色彩虹 HS。通过并行加速计算的方法实现分辨率为 200800 pixel×200800 pixel、尺寸为 64 mm×64 mm 的高分辨率半周视彩色彩虹 HS 仅需 15.15 min。采用反射照明的方式进行光学再现,实现了允许许多人同时观看的清晰的彩色全息 3D 显示,其有望应用于 3D 军事地图、3D 沙盘等领域。

**关键词** 全息; 彩色全息三维显示; 周视彩色彩虹全息三维显示; 全息体视图

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0409001

## Computer Generated Half-Circle Viewable Color Rainbow Holographic Stereogram

Xu Fuyang<sup>1,2</sup>, Yang Xin<sup>3\*</sup>, Liu Zimo<sup>1,2</sup>, Song Qiang<sup>3</sup>, Ma Guobin<sup>3</sup>, Ren Zhijun<sup>1,2</sup><sup>1</sup>*Institute of Information Optics, College of Physics and Electronic Information Engineering,**Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China;*<sup>2</sup>*Key Laboratory of Optical Information Detecting and Display Technology of Zhejiang Province,**Jinhua, Zhejiang 321004, China;*<sup>3</sup>*Lochn Optics-Micro/Nano Photonics Research Center, Shenzhen, Guangdong 518000, China*

**Abstract** Holographic stereogram (HS) is a kind of hologram that can accelerate calculation, which can realize the monochromatic holographic three-dimensional (3D) display, and combining it with the color rainbow hologram and realizing the half-circle viewable color rainbow holographic 3D display which can be watched by many people have practical application value. Based on the HS calculation principle, the side angle of view and the field of view of the elemental hologram are designed, and the spectrum of the elemental hologram containing red, green, and blue information through frequency domain multiplexing is achieved. The elemental hologram is obtained by taking the real part of the complex amplitude from the inverse Fourier transform of the spectrum. The high-resolution half-circle viewable color rainbow HS can be achieved by combining all elemental holograms. A high resolution half-circle viewable color rainbow HS with a resolution of 200800 pixel×200800 pixel and a size of 64 mm×64 mm is calculated only within 15.15 min by parallel acceleration. Reflective illumination is used for optical reproduction and a clear color holographic 3D display that can be viewed by multiple people is achieved, which is expected to be applied to 3D military maps, 3D sand tables, and other fields.

**Key words** holography; color holographic three-dimensional display; circle-viewable color rainbow holographic three-dimensional display; holographic stereogram

收稿日期: 2021-07-21; 修回日期: 2021-08-10; 录用日期: 2021-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(62005006)、浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室开放课题

通信作者: \*yangxin@lochn.com

# 1 引言

三维(3D)显示是显示领域一直以来的重要追求目标,全息 3D 显示以其具有完整光场重构的能力受到广泛关注<sup>[1-3]</sup>。基于空间光调制器的动态全息 3D 显示<sup>[4-5]</sup>和基于微纳加工的大尺寸高分辨率全息 3D 显示<sup>[6-7]</sup>是两个主要的研究方向,现有空间光调制器有限的带宽积使其无法满足实际 3D 显示需求,而大尺寸高分辨率全息图可通过微纳加工技术<sup>[8-11]</sup>进行加工,可用于实现大场景大视场的全息 3D 显示,所加工的全息图可制作成模板,通过纳米压印等技术进行批量生产具有重要的商业价值。

实现全息图计算的方法有多种<sup>[12-17]</sup>,如将 3D 物体看作发光点的集合,通过将每个物点发出的球面波在全息面上进行叠加得到物光复振幅,引入参考光编码全息图<sup>[12]</sup>。但对于高分辨率全息图而言,其计算量巨大,导致上述方法并非都适用。例如文献<sup>[15]</sup>中基于完全计算的全息体视图计算分辨率为 20000 pixel×20000 pixel 的全息图需要 32.9 h,且该全息图仅用于单色 3D 显示。文献<sup>[6,18-19]</sup>提出基于频域融合的快速算法以加速全视场像面全息、彩虹全息和半周视彩色彩虹全息计算,其中半周视彩色彩虹全息图可满足多人同时俯视围观的需求,在 3D 地图等方面有重要意义。尽管如此,这些频域融合的高分辨率全息算法对计算及内存的要求极大,且无法实现并行加速。文献<sup>[20]</sup>中提出了基于光场图像编码的高分辨率全息算法,该算法进行计算时避免了物光的衍射计算,大幅缩短了计算时间,但其仅可实现单色全息 3D 显示。文献<sup>[21]</sup>是将文献<sup>[20]</sup>中算法与彩虹全息相结合的彩色彩虹全息快速算法,该算法实现了清晰的彩色 3D 显示效果,但仅能满足一人正对着观看的需求,无法实现多人同时观看彩色全息再现像。

为了实现多人可围观的半周视彩色彩虹全息 3D 显示,本文在全息体视图计算原理基础上提出计算机制半周视彩色彩虹全息体视图。设计单元全息图侧视角及视场角等参数,通过频域复用获得包含红色、绿色和蓝色信息的单元全息图的频谱,对频谱进行傅里叶逆变换(IFFT)后取实部得到该单元全息图,所有单元全息图的组合形成完整的半周视彩色彩虹全息体视图。采用并行加速的方式实现分辨率为 200800 pixel×200800 pixel、尺寸为 64 mm×64 mm 的高分辨率半周视彩色彩虹全息体视图仅需 15.15 min。通过反射式照明的方式进行光学再

现,实现了允许多人观看的彩色全息 3D 显示。

本文所提出的彩色全息 3D 显示的全息图像素数约为文献<sup>[19]</sup>的 5.71 倍,侧视角约为其 1.64 倍,计算速度约为其 15.84 倍。本文提出的方法对计算机内存无更大的要求,在一般计算机上即可进行计算,并且可进行并行加速计算,从而实现更大场景的彩色全息 3D 显示。

## 2 基本原理

### 2.1 全息体视图基本原理

全息体视图是一种可加速计算的全息图<sup>[16]</sup>,其基本计算原理如图 1 所示,3D 物体  $O_{bj}$  是由大量发光点元组成的,全息图  $H$  被分割为多个小的单元全息图,每个单元全息图发出不同方向的细束平面波,而大量单元全息图发出的细束平面波融合形成 3D 图像。全息图计算是对由一个物点与单元全息图中心点的连线决定的单元全息图发出的细束平面波的计算,由  $\frac{\sin \theta_{px}}{\lambda}$ ,  $\frac{\sin \theta_{py}}{\lambda}$ ,  $A_p$ ,  $r_p$ ,  $\phi_p$  决定,其中  $\frac{\sin \theta_{px}}{\lambda}$ ,  $\frac{\sin \theta_{py}}{\lambda}$  为频率,  $\lambda$  为波长,  $\theta_{px}$ ,  $\theta_{py}$  为光束的传播角度,  $A_p$ ,  $r_p$ ,  $\phi_p$  分别表示 3D 物点  $p$  的振幅、物点  $p$  到某个单元全息图中心的距离和初始相位,  $r_p = \sqrt{(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2 + z_p^2}$ ,  $(x_p, y_p, z_p)$  为 3D 物点  $p$  的空间坐标,  $(x_c, y_c)$  为该单元全息图中心点  $c$  的坐标。每一束平面波可以表示为

$$U_p(x, y) = \frac{A_p}{r_p} \exp(i\phi_p) \exp[i2\pi(f_{px}x + f_{py}y)], \quad (1)$$

$$f_{px} = \frac{\sin \theta_{px}}{\lambda} = \frac{x_p - x_c}{\lambda \sqrt{(x_p - x_c)^2 + z_p^2}}, \quad (2)$$

$$f_{py} = \frac{\sin \theta_{py}}{\lambda} = \frac{y_p - y_c}{\lambda \sqrt{(y_p - y_c)^2 + z_p^2}}. \quad (3)$$

将所有物点发出的光线与第  $(i, j)$  个单元全息图中心连线决定的平面波进行叠加,可以得到全息面上物光的复振幅:

$$U_{i,j}(x, y) = \sum_p U_p(x, y). \quad (4)$$

(1)式表示频率坐标为  $(\frac{\sin \theta_{px}}{\lambda}, \frac{\sin \theta_{py}}{\lambda})$  的一个复振幅:

$$F_p(f_{px}, f_{py}) = \frac{A_p}{r_p} \exp(i\phi_p) \Big|_{f_{px} = \frac{\sin \theta_{px}}{\lambda}, f_{py} = \frac{\sin \theta_{py}}{\lambda}}. \quad (5)$$

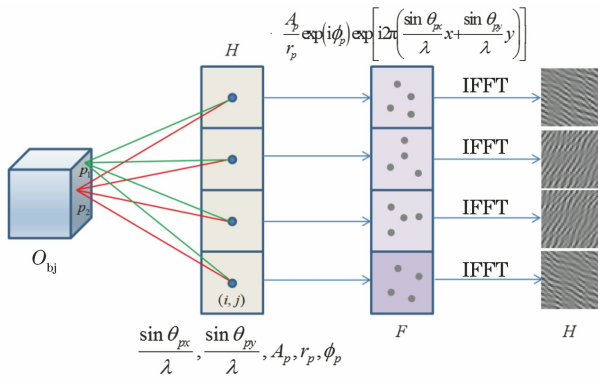


图 1 全息体视图计算原理<sup>[16]</sup>

Fig. 1 Calculation principle of holographic stereogram<sup>[16]</sup>

将所有物点在与第  $(i, j)$  个单元全息图连线确定的平面波在频域内叠加, 获得该单元全息图物光的频谱, 可表示为

$$F_{i,j}(f_x, f_y) = \sum_p F_p(f_{px}, f_{py}). \quad (6)$$

然后对该单元全息图所决定的频谱进行 IFFT, 得到全息面上的物光的复振幅分布:

$$U_{i,j}(f_x, f_y) = \mathfrak{S}^{-1}[F_{i,j}(f_x, f_y)], \quad (7)$$

式中:  $\mathfrak{S}^{-1}$  表示 IFFT。获得全息面上物光复振幅后, 通过引入参考光编码即可获得单元全息图。可以看出, 各个单元全息图的计算相互独立且可并行计算, 基于一束平面波在频域内仅需表示一个频域点的稀疏性, 先重构频域再通过 IFFT 的加速计算获得全息面复振幅分布, 从而可大大缩短计算时间。

以下给出全息图与频域坐标位置关系的计算方法。假设每个单元全息图的尺寸为  $w_h \times l_h$ , 采样间隔为  $\Delta h$ , 则每个单元全息图的分辨率为  $m_h \times n_h = \frac{w_h}{\Delta h} \times \frac{l_h}{\Delta h}$ , 频域内的采样间隔可以表示为  $\Delta f_x = \frac{1}{w_h}$ ,  $\Delta f_y = \frac{1}{l_h}$ , 单元全息图频域的范围可以表示为

$$f_x \in \left(-\frac{m_h}{2}\Delta f_x, \frac{m_h}{2}\Delta f_x\right), \quad (8)$$

$$f_y \in \left(-\frac{n_h}{2}\Delta f_y, \frac{n_h}{2}\Delta f_y\right). \quad (9)$$

由(8)、(9)式可知, 单元全息图尺寸及采样间隔确定后, 频域的范围就确定了, 从而也确定了衍射光的传播方向范围。

## 2.2 计算机制半周视彩色彩虹全息体视图

当对彩虹全息的原理进行深入分析, 可以发现彩虹全息是通过牺牲一个方向上的视场角而在该方向上控制色散、在与其正交的方向上提供视场角的一种彩色显示技术。当人眼在色散方向上的不同视

角观看时, 不同光谱成分进入人眼形成彩虹色变化的效果, 而在正交方向上不同视角观看时, 可看到 3D 再现像视差变化的情况。

本文提出的计算机制半周视彩色彩虹全息体视图计算中, 全息图被分解为多个单元全息图, 每个单元全息图发出的光束方向被限制在一个以该单元全息图为中心的圆锥形视场内。所有单元全息图具有相同的发光模型。周视彩色彩虹全息体视图的原理如图 2(a) 所示, 在  $yo z$  平面以一个单元全息图的情况进行说明; 对于第  $(i, j)$  个单元全息图  $H_{ij}$ , 其侧视角为  $\theta_d$  (将其定义为所设计的衍射光中心方向与  $z$  轴的夹角), 视场角为  $\theta_{Fy}$  (将其定义为以  $\theta_d$  为中心的一个小的张角, 在该视场角范围内的光将被记录和再现)。将图 2(a) 所示的单元全息图发光视场模型绕  $z$  轴旋转一周, 形成周视全息的发光视场, 即单元全息图在垂直照明的情况下, 衍射光形成锥形范围的衍射光。当白光垂直照射单元全息图时,  $\theta_d$  为一个大的视角, 其记录的全息图具有高的频率, 导致不同波长的光在侧方发生大的色散。视场角  $\theta_{Fy}$  是一个受限的角度, 其含义与传统彩虹全息图中限制视场的含义类似, 控制侧方的色模糊, 再现时观察视场是一个与全息图平行的环形视场, 因此将全息图平放时, 可允许多人俯视围观彩色全息再现像。

计算周视彩色彩虹全息图时, 使用三原色波长  $\lambda_r, \lambda_g$  和  $\lambda_b$ , 侧视角  $\theta_d$  决定的三原色中心频率可以表示为

$$f_{rc} = \frac{\sin \theta_d}{\lambda_r}, \quad (10)$$

$$f_{gc} = \frac{\sin \theta_d}{\lambda_g}, \quad (11)$$

$$f_{bc} = \frac{\sin \theta_d}{\lambda_b}. \quad (12)$$

由于视场角  $\theta_{Fy}$  是一个很小的角度, 由视场角决定的三原色光波的带宽可近似为

$$\Delta f_r = \frac{\sin \theta_{Fy}}{\lambda_r}, \quad (13)$$

$$\Delta f_g = \frac{\sin \theta_{Fy}}{\lambda_g}, \quad (14)$$

$$\Delta f_b = \frac{\sin \theta_{Fy}}{\lambda_b}. \quad (15)$$

由(10)~(15)式可知, 对于给定的侧视角  $\theta_d$  和视场角  $\theta_{Fy}$ , 三原色光波波长不同, 导致在频域内具有不同的频谱位置。图 2(b) 给出了单元全息图的频域示意图, 其中包含的 3 个环形分布的频谱区域分别表示三原色的频谱分布。

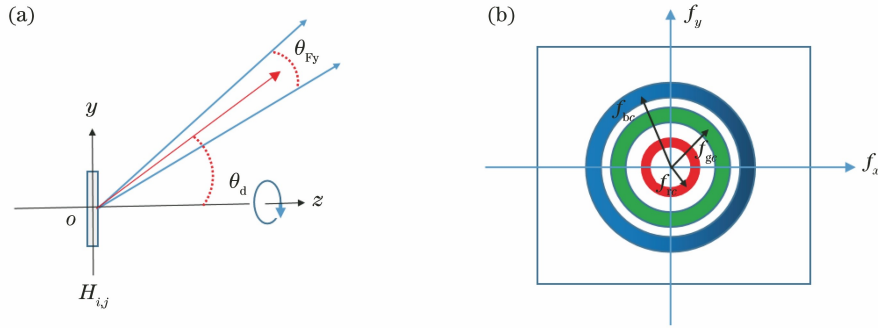


图 2 计算机周视彩色彩虹全息体视图原理。(a)单元全息图衍射示意图;(b)频域分布示意图

Fig. 2 Principle of computer generated circle viewable color rainbow holographic stereogram. (a) Diffraction diagram of elemental hologram diffraction; (b) frequency domain distribution diagram

从上述分析可知,计算机周视彩色彩虹全息体视图是全息体视图在给定侧视角  $\theta_d$  和视场角  $\theta_{Fy}$  限制条件下的应用特例。在一定参数下,三原色频谱分离,采用频域复用方法可以直接获得包含三原色信息的频谱,进行 IFFT 获取全息面上的复振幅分布,再将其编码为全息图,而无需计算每个波长对应的全息图并将其叠加为彩色全息图,从而可加速单元全息图的计算。

将计算机周视彩色彩虹全息体视图的计算方法总结如下:

- 1) 将全息图分割为多个单元全息图。
- 2) 对于每个单元全息图,设置相同的侧视角  $\theta_d$  和视场角  $\theta_{Fy}$ 。

3) 3D 物体上的每个点与该单元全息图中心连线,根据(2)式和(3)式,将  $\lambda$  分别替换为  $\lambda_r, \lambda_g$  和  $\lambda_b$  (对应三原色波长),计算三原色波长对应的频域坐标  $(f_{r,px}, f_{r,py}), (f_{g,px}, f_{g,py})$  和  $(f_{b,px}, f_{b,py})$ ,并计算出三原色关于频率中心的径向频率  $f_{rp} = \sqrt{f_{r,px}^2 + f_{r,py}^2}$ ,  $f_{gp} = \sqrt{f_{g,px}^2 + f_{g,py}^2}$  和  $f_{bp} = \sqrt{f_{b,px}^2 + f_{b,py}^2}$ ,当频域坐标分别满足  $f_{rp} \in [f_{rc} - \frac{\Delta f_r}{2}, f_{rc} + \frac{\Delta f_r}{2}]$ ,  $f_{gp} \in [f_{gc} - \frac{\Delta f_g}{2}, f_{gc} + \frac{\Delta f_g}{2}]$ ,  $f_{bp} \in [f_{bc} - \frac{\Delta f_b}{2}, f_{bc} + \frac{\Delta f_b}{2}]$  时,根据(5)式,将彩色物点的振幅信息分别赋值到对应的频域坐标位置处,即将  $A_p$  替换为  $A_{pr}, A_{pg}$  和  $A_{pb}$  (对应彩色物点的三色值),从而得到单元全息图对应的频谱。

4) 对频谱进行 IFFT,得到单元全息图平面上的复振幅分布,再进一步将其编码为单元全息图。

5) 将所有单元全息图组合成完整的高分辨率计算机周视彩色彩虹全息图。

在实际计算中,对频谱进行 IFFT 后取实部,将

其编码为振幅全息图,在此种情况下,即参考光垂直照射全息图的情形,参考光的相位为常数。白光垂直照射时,计算时的三原色波长再现光是以设计的侧视角  $\theta_d$  和视场角  $\theta_{Fy}$  方向发生衍射,而其他波长在侧方以不同的衍射角度发生色散。所计算的全息图为振幅型离轴全息图,存在共轭像干扰,为此对于上述讨论的周视彩色彩虹全息,牺牲一半视场角,实现半周视彩色彩虹全息 3D 显示,即在图 2(b)所示的频域分布中,仅保留  $f_y > 0$  的部分频谱,从而在  $180^\circ$  范围内可允许多人围观,且在该范围内看到的是正一级衍射光,在另外  $180^\circ$  范围内看到的是共轭光,二者互不干扰。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 全息图计算、实验及结果

图 3 给出 3D 模型与全息图的相对位置示意图,3D 模型的尺寸为  $26 \text{ mm} \times 24 \text{ mm} \times 42 \text{ mm}$ ,包含  $4.06 \times 10^5$  个物点,物体中心与全息图的距离为  $31 \text{ mm}$ 。计算全息图时,将侧视角  $\theta_d$  设置为  $25^\circ$ ,而将视场角  $\theta_{Fy}$  设置为  $2^\circ$ 。全息图的分辨率为  $200800 \text{ pixel} \times 200800 \text{ pixel}$ ,取样间隔  $\Delta h = 0.318 \text{ } \mu\text{m}$ ,对应的全息图

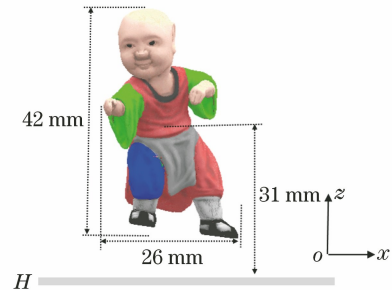


图 3 全息图与 3D 模型的相对位置示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of relative position of hologram and 3D model

物理尺寸为  $63.8 \text{ mm} \times 63.8 \text{ mm}$ 。单元全息图的分辨率取  $400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$ , 尺寸为  $127.2 \mu\text{m} \times 127.2 \mu\text{m}$ , 单元全息图的个数为  $502 \times 502 = 252004$ 。计算时三原色波长分别为  $\lambda_r = 632 \text{ nm}$ 、 $\lambda_g = 532 \text{ nm}$  和  $\lambda_b = 467 \text{ nm}$ 。计算全息图时物点的初始相位  $\phi_p$  取随机数。

计算全息图时使用 MATLAB 编程, 开启 8 个 worker 进行并行加速计算, 计算时所采用的计算机硬件为: CPU 为 I7-10700K, 内存 32G, 1 T 固态硬

盘。整个全息图的计算时间约为 15.15 min。全息图计算完成后, 由实验室自行研制的全息输出系统输出全息图<sup>[6-7,9,18-21]</sup>, 获得可光学再现的全息图。

图 4 给出了计算得到的单元全息图的频域图、单元全息图及数值再现结果。图 4(a) 中的三种颜色仅说明该部分图像属于物体的那个颜色通道数据, 计算时将其作为一个整体进行 IFFT 后, 取实部得到图 4(b)。图 4(c) 是对图 4(b) 的数值再现结果, 可以看到存在与原图相同的正一级再现像和共轭像。

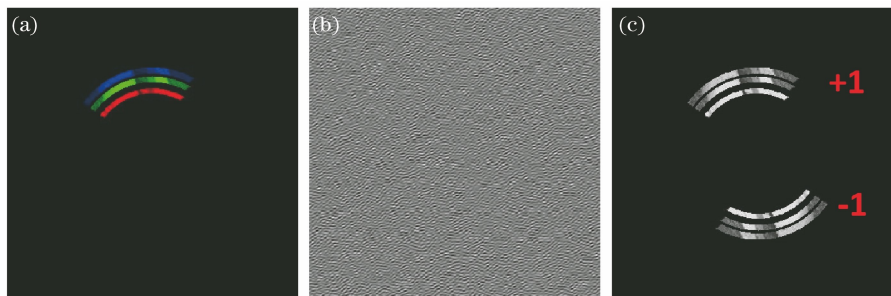


图 4 单元全息图的计算情况。(a) 频谱图像; (b) 单元全息图; (c) 数值再现结果

Fig. 4 Calculation of elemental hologram. (a) Spectrum image; (b) elemental hologram; (c) numerical reconstruction result

全息图再现时, 采用反射式照明的方式进行光学再现, 如图 5 所示, 采用准直的发光二极管(LED) 发出的光垂直照射全息图  $H$  并向着侧方衍射, 形成视场, 人眼在视场内时可观察到彩色 3D 再现像, 人

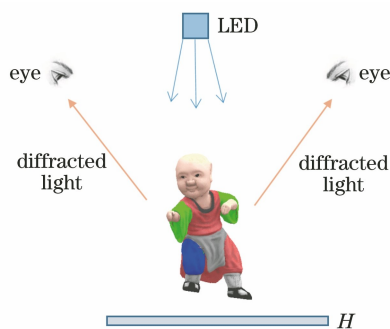


图 5 全息图再现的照明模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of illumination model for hologram reconstruction

眼在侧视角方向移动时会看到彩虹色变化的效果, 而观看角度与侧视角接近时 3D 再现像的颜色接近原物本身的颜色。

图 6 给出采用手机在 4 个不同视角拍摄的再现像, 对应的视角约为  $30^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $110^\circ$  和  $150^\circ$ 。可以看出, 人眼沿着环形视窗观察时, 能够感受到明显的立体感和视差变化, 且图像的清晰度较高, 色彩强烈。图 6 中所示的骰子为一个真实物体, 用于参考, 而小人图像为全息再现像, 实际观看效果比手机拍摄的照片好。实验结果可以证明所提出方法的可靠性。

### 3.2 分析及讨论

在全息再现时, 使用了一个准直的 LED 白光光源, 采用反射式照明的方式进行再现, 在全息图背部放置黑色布, 用于吸收直透光, 以避免直透光的反射影响对比度, 从而可从不同角度看到悬浮于全息图上彩色 3D 显示效果。在全息再现时, 仍然可以使

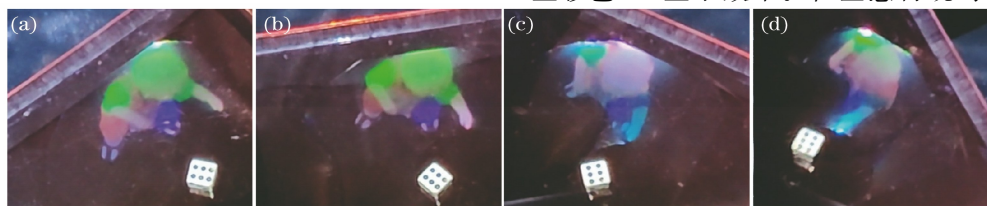


图 6 4 个方向不同视角的彩色全息再现像。(a)  $30^\circ$  方向上再现像; (b)  $70^\circ$  方向上再现像; (c)  $110^\circ$  方向上再现像; (d)  $150^\circ$  方向上再现像

Fig. 6 Color holographic reconstruction images captured from different views in four directions. (a) Reconstructed image in  $30^\circ$ ; (b) reconstructed image in  $70^\circ$ ; (c) reconstructed image in  $110^\circ$ ; (d) reconstructed image in  $150^\circ$

用文献[19]中的显示平台进行透射式照明,从而实现半周视彩色全息 3D 显示。

本文提出的计算机制半周视彩色彩虹全息体视图与传统的彩色彩虹全息图有所不同,在设计传统的彩色彩虹全息图时,设计了确定的狭缝位置,在该位置可看到准确的再现像。本文中,每个单元全息图本身就是一个半周视彩色彩虹全息体视图,但仅再现了局部的物光信息,最终光谱的扩展扩大了观看区域,人眼在一定位置观看到的图像颜色由进入人眼的光谱成分决定。图 7 中 C 为一个白光平面波,以侧视角  $\theta_d$  所记录的全息图的再现情况进行简单分析,对于所记录的三原色光,再现光波长为  $\lambda_c$ ,衍射光对应的衍射角分别为

$$\theta_{cr} = \arcsin\left(\frac{\lambda_c}{\lambda_r} \sin \theta_d\right), \quad (16)$$

$$\theta_{cg} = \arcsin\left(\frac{\lambda_c}{\lambda_g} \sin \theta_d\right), \quad (17)$$

$$\theta_{cb} = \arcsin\left(\frac{\lambda_c}{\lambda_b} \sin \theta_d\right), \quad (18)$$

式中: $\theta_{cr}$ 、 $\theta_{cg}$  和  $\theta_{cb}$  为再现波长为  $\lambda_c$  时不同记录波长对应的衍射角。可以看出:当照明波长  $\lambda_c$  分别等于  $\lambda_r$ 、 $\lambda_g$  和  $\lambda_b$  时,三原色光的角度均为  $\theta_d$ ,即传播方向相同;而以其他波长的光照射时,侧方发生色散。当  $\theta_d$  较大时,对于相同的衍射距离,色散范围越大,越能提升进入人眼光谱成分的饱和度。而在  $\theta_d$  一定的情况下,观察距离较远时也可提升看到图像的饱和度。在实际观察时,观察距离不足 1 m,也可观看到与原图颜色接近的再现像,这说明所提方法的可行性。

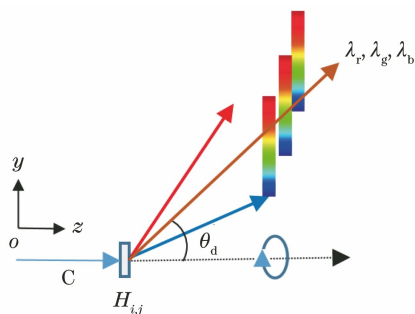


图 7 单元全息图再现的色散模型

Fig. 7 Dispersion model of elemental hologram reconstruction

所计算的计算机制半周视彩色彩虹全息体视图为振幅型全息图,为了避免共轭光干扰,牺牲了一半的视场角,实现了半周视彩色彩虹全息 3D 显示。但通过设置完整的环状频域分布,在获得全息面上的复振幅之后,将其编码为纯相位全息图<sup>[22]</sup>,通过

精准的微纳加工实现准确的相位调制,可以避免振幅全息图导致的共轭像,从而有望实现 360°可围观的周视彩色彩虹全息 3D 显示。

全息体视图是将每个单元全息图发出的光作为细束平面波,将多个单元全息图发出的不同方向的细束平面波融合形成 3D 显示。为了提高波前控制的精确性,增加相位的全息体视图等算法也被相继提出,这在文献[16]中有比较详细的讨论和比较,在此不一一展开。结合本文的思路,这些算法亦可应用于计算机制半周视彩色彩虹全息体视图计算中,以进一步提升彩色 3D 显示的质量,但这需要更多的计算时间。

## 4 结 论

在前期研究的基础上,结合全息体视图及彩色彩虹全息的概念,提出计算机制半周视彩色彩虹全息体视图快速算法,该算法实现分辨率为 200800 pixel×200800 pixel 的高分辨率半周视彩色彩虹全息体视图的计算仅需 15.15 min,通过光学再现实现了允许多人围观的彩色 3D 显示效果,所提算法有望应用于 3D 军事地图、3D 沙盘等领域。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Geng J. Three-dimensional display technologies[J]. Advances in Optics and Photonics, 2013, 5(4): 456-535.
- [3] Matsushima K, Arima Y, Nakahara S. Digitized holography: modern holography for 3D imaging of virtual and real objects[J]. Applied Optics, 2011, 50(34): H278-H284.
- [4] Sui X M, He Z H, Cao L C, et al. Recent progress in complex-modulated holographic display based on liquid crystal spatial light modulators[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2021, 36(6): 797-809.  
隋晓萌, 何泽浩, 曹良才, 等. 基于液晶空间光调制器的复振幅全息显示进展[J]. 液晶与显示, 2021, 36(6): 797-809.
- [5] 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.
- [6] Yang X, Wang H, Li Y, et al. Computer generated

- full-parallax synthetic hologram based on frequency mosaic[J]. *Optics Communications*, 2019, 430: 24-30.
- [7] Shi Y L, Wang H, Li Y, et al. Practical method for color computer-generated rainbow holograms of real-existing objects[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(21): 4219-4226.
- [8] Tsuchiyama Y, Matsushima K. Full-color large-scaled computer-generated holograms using RGB color filters[J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2016-2030.
- [9] 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. 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.
- [10] Shi Y L, Wang H, Li Y, et al. Practical color matching approach for color computer-generated holography [J]. *Journal of Display Technology*, 2013, 9(8): 638-643.
- [11] Ren H R, Fang X Y, Jang J, et al. Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space [J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(11): 948-955.
- [12] Tsang P W M, Poon T C, Wu Y M. Review of fast methods for point-based computer-generated holography [Invited] [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(9): 837-846.
- [13] Liu J P, Liao H K. Fast occlusion processing for a polygon-based computer-generated hologram using the slice-by-slice silhouette method [J]. *Applied Optics*, 2017, 57(1): A215-A221.
- [14] Chen J S, Chu D P. Improved layer-based method for rapid hologram generation and real-time interactive holographic display applications[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18143-18155.
- [15] Zhang H, Zhao Y, Cao L C, et al. Fully computed holographic stereogram based algorithm for computer-generated holograms with accurate depth cues[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 3901-3913.
- [16] Kang H, Stoykova E, Yoshikawa H. Fast phase-added stereogram algorithm for generation of photorealistic 3D content[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): A135-A143.
- [17] Huang Y Q, Zhao K, Jiang X Y, et al. Improvement of imaging resolution of holographic stereogram using wavefront plane [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0209002. 黄应清, 赵锴, 蒋晓瑜, 等. 用波前平面提高全息视图成像分辨率 [J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0209002.
- [18] Yang X, Wang H, Li Y, et al. Large scale and high resolution computer generated synthetic color rainbow hologram [J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(2): 025601.
- [19] 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.
- [20] Yang X, Xu F Y, Zhang H L, et al. High-resolution hologram calculation method based on light field image rendering[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(3): 819.
- [21] Liu Z M, Yao J Y, Xu F Y, et al. Computer generated integral color rainbow holography three-dimensional 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.
- [22] Bu H Z, Jiao S M. Review of computer-generated phase-only hologram optimization algorithm [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(6): 810-826. 卜浩祯, 焦述铭. 纯相位全息图优化算法 [J]. *液晶与显示*, 2021, 36(6): 810-826.