

基于频域合成的计算机半周视彩色彩虹全息

杨鑫^{1,2}, 王辉^{2,3}, 李勇^{2,3}, 李志光^{2,3}

¹苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006;

²浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004;

³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

摘要 根据光路可逆的原理,提出了一种基于频域合成的计算机半周视彩色彩虹全息算法。首先对半周视彩色彩虹全息的原理进行分析,总结了观察窗口与频域的对应关系,指出半周视彩色彩虹全息图物光的频谱由三原色的半环形频谱组合而成;使用彩色三维物体在特定方向上的多个投影图像分别进行分色、插值,再进行二维傅里叶变换,在频域内合成半周视彩色彩虹全息的物光频谱,对合成的物光频谱进行二维傅里叶逆变换,取实部,加上一个偏置分量,得到半周视彩色彩虹全息图。采用该算法计算了一个面积为 $47\text{ mm} \times 47\text{ mm}$ 、分辨率为 $84000\text{ pixel} \times 84000\text{ pixel}$ 的全息图,通过全息输出系统输出,再进行显影定影漂白,实现了可白光再现的半周视彩色彩虹全息图,其显示的三维效果逼真,颜色绚丽,可以同时供多人观赏。

关键词 全息; 半周视彩色彩虹全息; 计算机制全息; 彩虹全息; 傅里叶变换; 傅里叶逆变换

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0309001

Computer Generated Half-Circle View-Able Color Rainbow Hologram Based on Frequency Domain Synthesis

Yang Xin^{1,2}, Wang Hui^{2,3}, Li Yong^{2,3}, Li Zhiguang^{2,3}

¹Institute of Information Optics Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

²Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China;

³Key Laboratory of Optical Information Detecting and Display Technology of Zhejiang Province, Jinhua, Zhejiang 321004, China

Abstract According to the reversible principle of optical path, a computer generated half-circle view-able color rainbow holographic algorithm based on frequency domain synthesis is proposed. Firstly, the principle of half-circle view-able color rainbow hologram is analyzed, and the corresponding relationship between observation window and frequency domain is summarized. It is pointed out that the frequency spectrum of half-circle view-able color rainbow hologram object light is composed of the half-ring frequency spectrum of three primary colors. A plurality of projection images in a specific direction of a color three-dimensional object are used to separately perform color separation and interpolation, and perform a two-dimensional Fourier transform. The object light frequency spectrum of the half-circle view-able color rainbow hologram in the frequency domain is synthesized. And the synthesis object light frequency spectrum is transformed by two-dimensional inverse Fourier transform. Half-circle view-able color rainbow hologram is got by taking the real part and adding a bias component. Using this algorithm, a hologram with the area of $47\text{ mm} \times 47\text{ mm}$ and a resolution of $84000\text{ pixel} \times 84000\text{ pixel}$ is calculated and output by the holographic output system. Then it is followed by development, fixation and bleaching. Half-circle view-able color rainbow hologram with white light reconstruction is realized. The hologram shows vivid three-dimensional effect, brilliant colors, and can be watched by many people at the same time.

Key words holography; half-circle view-able color rainbow hologram; computer generated hologram; rainbow hologram; Fourier transform; inverse Fourier transform

OCIS codes 090.1705; 090.1760; 090.5640

收稿日期: 2017-08-29; 收到修改稿日期: 2017-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(11374267, 61505177)

作者简介: 杨鑫(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事全息三维显示方面的研究。E-mail: 2006endeavour@163.com

导师简介: 王辉(1958—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光信息处理、全息三维显示、微光学设计等方面的研究。

E-mail: wh@zjnu.cn(通信联系人)

1 引 言

全息显示技术^[1-3]是一种最符合人眼观看的显示技术,其中周视全息可以实现物体 360°的显示,是一种极具震撼力的全息三维显示方法。早期人们采用光学方法制作柱面全息^[4],后来的计算机技术发展促进了计算柱面全息技术^[5]的进步。王典民等^[6]在 1990 年借助彩虹全息的原理实现了一种平板型周视彩虹全息技术,采用复杂的光路实现了单色周视彩虹全息的记录和再现。随着全息直写系统的发展,利用计算全息的方法有可能实现平板型周视彩虹全息,钱惠国等^[7]在 2005 年提出了计算机制平板型周视全息,比较仔细地介绍了光场的传输特性,给出了一个简单三维模型的再现结果。毋东元等^[8]采取了比较巧妙的参考光设置方法,将计算全息与光学全息相结合来进行周视全息的制作,给出了初步的结果。然而两种方法所实现的全息图均为单色全息,实际光学再现效果并不理想。2014 年,李志光等^[9]在前人的研究基础上,实现了计算机与光学相结合彩色平板周视全息显示。他们采用计算机与光学技术相结合的方法首先制作三基色环带菲涅耳全息图,之后再行光学拍摄得到平板周视全息。光学全息拍摄对实验条件要求严格,需要较多的实验设备,操作复杂。平板型周视彩虹全息图进行 360°显示时,由于其具有对称结构,眼睛在某个位置观察,不仅可以看到与该视角对应的正确三维像,同时也会看到与该位置对称的观察窗口处的共轭像,影响观看效果^[10]。可以采用体全息的方式通过光学平台拍摄^[11]周视彩虹全息来去除共轭像干扰。对于平面型的计算全息,很难去除共轭像的干扰。

实现大侧视角的平板型周视全息图,全息图的空间频率极高^[12],在目前全息输出系统输出能力有限的条件下,很难实现,为了避免共轭光对观看的影响,本文提出了一种基于频域合成的计算机制半周视彩色彩虹全息算法。首先分析了半周视彩色彩虹全息图的基本原理,总结了半环形观察窗口与频域的对对应关系,使用三维物体特定方向的视图序列,通过将三个颜色分量线性插值,并利用二维傅里叶变换将其衍射到频域,组合形成半周视彩色彩虹全息图的物光频谱分布,通过二维傅里叶逆变换将物光频谱衍射到全息面,得到全息面上的物光分布,取其实际部,加上一个偏置分量,得到半周视彩色彩虹全息图。所计算的全息图再现的三维彩色显示的效果逼

真,颜色绚丽,可以多人同时观赏。通过所提出的算法,避免了光学拍摄的复杂性,可以在笔记本电脑上实现全息图的计算。

2 基本原理

2.1 半周视彩色彩虹全息计算原理

半周视彩色彩虹全息再现原理如图 1 所示,平行光 L 垂直照明全息图 H ,距离全息面 h 处形成一个环形的观察视窗 S ,其半径为 r ,观察视窗被分为蓝色和红色两部分,当人眼在红色区域内移动观察时,可以看到物体不同视角的三维像,当人眼在蓝色区域观察时,看到的是全息再现的共轭像。

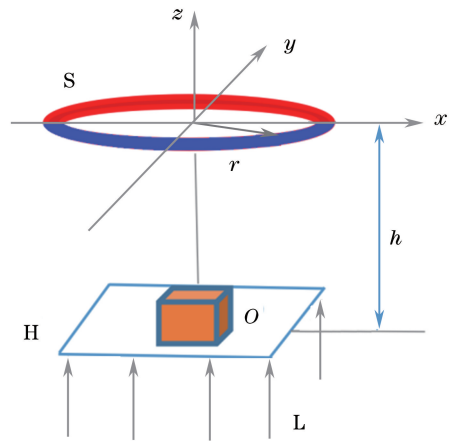


图 1 半周视彩色彩虹全息图再现原理示意图

Fig. 1 Schematic of the reconstruction of half-circle viewable color rainbow hologram

观察窗口为半环状分布,具有轴对称结构,以一个截面来分析物光的传播特性。如图 2 所示,三维物体位于 AB 平面附近,宽度为 w_0 ,观察窗口 CD 位于 S 平面内,与 AB 平面的距离为 h ,观察

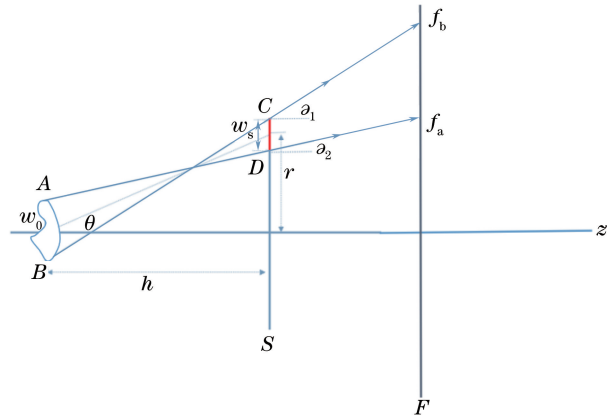


图 2 半周视彩色彩虹全息图物光传播原理图

Fig. 2 Principle of object light propagation of half-circle viewable color rainbow hologram

窗口宽度为 w_s 。图 2 中 F 为频谱面,可以看出,由于观察窗口的限制,三维物体所发出的光波在频域内处于 f_a 和 f_b 之间。在观察窗口处,物体三原色光将准确重合,因此观察窗口中心与 AB 平面中心连线与 z 轴的张角是 θ ,对于三原色光来说,其传播方向是相同的,但是由于三原色光波的波长不同,以 θ 为传播方向的光波的空间频率是不相同的。物光的频谱是由三原色的三个环带频谱组成的。三原色光波波长分别为 $\lambda_r, \lambda_g, \lambda_b$, 频率半径表示为:

$$f_r = \frac{\sin \theta}{\lambda_r} = \frac{r}{\lambda_r \sqrt{r^2 + h^2}}, f_g = \frac{\sin \theta}{\lambda_g} = \frac{r}{\lambda_g \sqrt{r^2 + h^2}},$$

$$f_b = \frac{\sin \theta}{\lambda_b} = \frac{r}{\lambda_b \sqrt{r^2 + h^2}}, \quad (1)$$

式中 f_r, f_g, f_b 分别为物体红色分量、绿色分量、蓝色分量的频率半径。

物体上顶点 A 与狭缝下边缘 D 连线与 z 轴的夹角为 ∂_2 , 物体下边缘 B 与狭缝上边缘 C 的连线与 z 轴夹角 ∂_1 决定了狭缝所限制的带宽,对于三原色光波而言,频带宽度分别为:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta f_r &= f_{br} - f_{ar} = \frac{\sin \partial_1}{\lambda_r} - \frac{\sin \partial_2}{\lambda_r} = \frac{1}{\lambda_r} \left[\frac{r + \frac{w_s}{2} + \frac{w_o}{2}}{\sqrt{\left(r + \frac{w_s}{2} + \frac{w_o}{2}\right)^2 + h^2}} - \frac{r - \frac{w_s}{2} - \frac{w_o}{2}}{\sqrt{\left(r - \frac{w_s}{2} - \frac{w_o}{2}\right)^2 + h^2}} \right] = \\ &\frac{1}{\lambda_r} \left[\frac{2r + w_s + w_o}{\sqrt{(2r + w_s + w_o)^2 + 4h^2}} - \frac{2r - w_s - w_o}{\sqrt{(2r - w_s - w_o)^2 + 4h^2}} \right] \\ \Delta f_g &= f_{bg} - f_{ag} = \frac{\sin \partial_1}{\lambda_g} - \frac{\sin \partial_2}{\lambda_g} = \frac{1}{\lambda_g} \left[\frac{r + \frac{w_s}{2} + \frac{w_o}{2}}{\sqrt{\left(r + \frac{w_s}{2} + \frac{w_o}{2}\right)^2 + h^2}} - \frac{r - \frac{w_s}{2} - \frac{w_o}{2}}{\sqrt{\left(r - \frac{w_s}{2} - \frac{w_o}{2}\right)^2 + h^2}} \right] = \\ &\frac{1}{\lambda_g} \left[\frac{2r + w_s + w_o}{\sqrt{(2r + w_s + w_o)^2 + 4h^2}} - \frac{2r - w_s - w_o}{\sqrt{(2r - w_s - w_o)^2 + 4h^2}} \right] \\ \Delta f_b &= f_{bb} - f_{ab} = \frac{\sin \partial_1}{\lambda_b} - \frac{\sin \partial_2}{\lambda_b} = \frac{1}{\lambda_b} \left[\frac{r + \frac{w_s}{2} + \frac{w_o}{2}}{\sqrt{\left(r + \frac{w_s}{2} + \frac{w_o}{2}\right)^2 + h^2}} - \frac{r - \frac{w_s}{2} - \frac{w_o}{2}}{\sqrt{\left(r - \frac{w_s}{2} - \frac{w_o}{2}\right)^2 + h^2}} \right] = \\ &\frac{1}{\lambda_b} \left[\frac{2r + w_s + w_o}{\sqrt{(2r + w_s + w_o)^2 + 4h^2}} - \frac{2r - w_s - w_o}{\sqrt{(2r - w_s - w_o)^2 + 4h^2}} \right] \end{aligned} \right. , \quad (2)$$

式中 $\Delta f_r, \Delta f_g, \Delta f_b$ 分别为物体红色分量、绿色分量、蓝色分量的频带宽度。

全息图上的最大空间频率由 f_{bb} 所决定,可以表示为:

$$f_{\max} = f_{bb} = \frac{\sin \partial_1}{\lambda_b} = \frac{1}{\lambda_b} \frac{2r + w_s + w_o}{\sqrt{(2r + w_s + w_o)^2 + 4h^2}} \quad (3)$$

根据空域与频域关系可知,当物体宽度为 w_o 时,其频域内的采样间隔 Δf 为:

$$\Delta f = \frac{1}{w_o} \quad (4)$$

最终所计算的全息图尺寸 w_h 与物体尺寸 w_o 相同,全息图的采样间隔为 Δh (由全息图输出系统的分辨率决定),则全息面采样点数 M 为:

$$M = \frac{w_h}{\Delta h} = \frac{w_o}{\Delta h} \quad (5)$$

则频域内的坐标 f 的范围为:

$$-\frac{M}{2}\Delta f < f < \frac{M}{2}\Delta f \quad (6)$$

由上述分析可知,观察窗口位置确定后,由观察窗口所决定的频谱范围就确定了。

对于二维的情况,物体尺寸为 $w_o \times h_o$, 频谱的分辨率设置为 (M_{fx}, N_{fy}) 。分别对三原色频谱进行分块处理。

设红色分量每一块的分辨率为 $(M_{f_{xr}}, N_{f_{yr}})$, 则绿色和蓝色分量每一块的频谱的分辨率可表示为:

$$M_{f_{xg}} = \frac{\lambda_r}{\lambda_g} M_{f_{xr}}, N_{f_{yg}} = \frac{\lambda_r}{\lambda_g} N_{f_{yr}},$$

$$M_{f_{xb}} = \frac{\lambda_r}{\lambda_b} M_{f_{xr}}, N_{f_{yb}} = \frac{\lambda_r}{\lambda_b} N_{f_{yr}}, \quad (7)$$

式中 $(M_{f_{xg}}, N_{f_{yg}})$ 表示绿色分量每一块频谱的分辨率, $(M_{f_{xb}}, N_{f_{yb}})$ 表示蓝色分量每一块频谱的分辨率。

频域内的分块数分别为:

$$\begin{cases} m_r = \frac{M_{f_x}}{M_{f_{xr}}}, n_r = \frac{N_{f_y}}{N_{f_{yr}}} \\ m_g = \frac{M_{f_x}}{M_{f_{xg}}}, n_g = \frac{N_{f_y}}{N_{f_{yg}}} \\ m_b = \frac{M_{f_x}}{M_{f_{xb}}}, n_b = \frac{N_{f_y}}{N_{f_{yb}}} \end{cases}, \quad (8)$$

式中红色分量的分块数是 m_r 行 n_r 列,绿色分量的分块数是 m_g 行 n_g 列,蓝色分量的分块数是 m_b 行 n_b 列。

图3给出了半环形频域计算示意图。以红色分量计算为例进行说明。半环形频域是由观察狭缝所决定的频域范围,包含物体不同视角图像的频谱信息。将频域分割为 $m_r \times n_r$ 块,每一块的分辨率为 $M_{f_{xr}} \times N_{f_{yr}}$,如图3所示,其中的 (i, j) 块频域位于半环形频域内,其中心频率为 (f_{xic}, f_{yjc}) ,则对应的

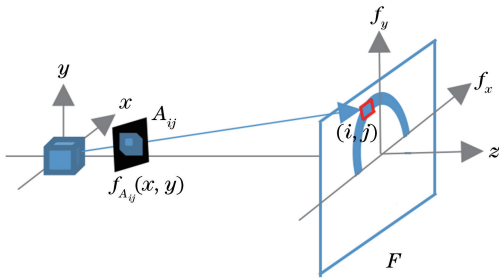


图3 半周视彩色彩虹全息图频谱合成示意图

Fig. 3 Schematic of the frequency synthesis of half-circle view-able color rainbow hologram

三维物体视图投影角度 $(\theta_{ix}, \theta_{iy})$ 可以表示为:

$$\theta_{ix} = \arcsin(\lambda_r f_{xic}), \theta_{iy} = \arcsin(\lambda_r f_{yjc}). \quad (9)$$

根据投影角度算出投影图像,通过线性插值得到分辨率为 $M_{f_{xr}} \times N_{f_{yr}}$ 的插值图像,取出红色分量,即为图3中视图 A_{ij} ,其振幅分布为 $f_{A_{ij}}(x, y)$ 。该局部频谱可以通过对视图 A_{ij} 进行二维傅里叶变换得到:

$$F_{A_{ij}}(f_x, f_y) = \iint f_{A_{ij}}(x, y) \exp[-j2\pi(xf_x + yf_y)] dx dy, \quad (10)$$

式中 $F_{A_{ij}}(f_x, f_y)$ 为第 (i, j) 个视图的频谱成分。是全息图物光频谱的一块局部频谱。

对于狭缝所决定的频域范围外的区域块,局部频谱数据为零。对所有局部频域进行叠加,可以得到整个频域内的分布,红色分量的物光频谱可以表示为:

$$F_{red}(f_x, f_y) = \sum_{i=1}^{m_r} \sum_{j=1}^{n_r} F_{A_{ij}}(f_x, f_y). \quad (11)$$

频域分块决定了可以观察到视图的数量和分辨率。分块尺寸大,则每个视图的分辨率高,总的可观看的视图数量减少,视图数量与视图分辨率的选择需要取舍。假设两个视图之间的视角为 $\Delta\theta$,则两块局部频域之间的频域间隔为 $\frac{\sin(\Delta\theta)}{\lambda_r}$,采样点数为 $w_o \frac{\sin(\Delta\theta)}{\lambda_r}$ 。

同理可以在频域内合成绿色和蓝色分量的物光频谱 $F_{green}(f_x, f_y)$ 和 $F_{blue}(f_x, f_y)$,总的物光频谱分布可以表示为:

$$F(f_x, f_y) = F_{red}(f_x, f_y) + F_{green}(f_x, f_y) + F_{blue}(f_x, f_y). \quad (12)$$

图4给出三原色分量的频谱分布示意图和合成后的物光频谱分布。

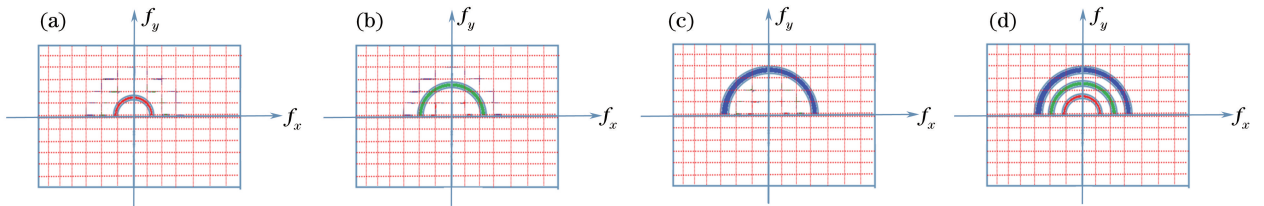


图4 频谱合成示意图。(a) $F_{red}(f_x, f_y)$; (b) $F_{green}(f_x, f_y)$; (c) $F_{blue}(f_x, f_y)$; (d) $F(f_x, f_y)$

Fig. 4 Diagram of frequency synthesis. (a) $F_{red}(f_x, f_y)$; (b) $F_{green}(f_x, f_y)$; (c) $F_{blue}(f_x, f_y)$; (d) $F(f_x, f_y)$

则全息面上的物光分布可以表示为:

$$O(x, y) = O_o \exp(j\varphi_o) = \text{ifft2}[F(f_x, f_y)], \quad (13)$$

式中 $\text{ifft2}(\ast)$ 表示对 \ast 进行二维傅里叶逆变换, O_o 为物光的振幅, φ_o 为物光相位。

对于大尺寸、高采样频率的全息图,由于巨大的数据量,直接对 $F(f_x, f_y)$ 进行二维傅里叶逆变换将变得非常困难(电脑内存有限)。采用行方向一维傅里叶逆变换和列方向一维傅里叶逆变换组合的方式实现二维傅里叶逆变换,通过对图4(d)的分析可

以发现,在频域内,频谱信息仅存在于一半频谱中,其他部分的数据是零。因此先采用一维行方向傅里叶逆变换,仅对存在频谱数据的区域进行变换,之后再行列表方向傅里叶逆变换,可以节约计算时间。

(13)式可以改写为:

$$O(x, y) = O_0 \exp(i\varphi_0) = \text{ifft}\{\text{ifft}[F(f_x, f_y), 1], 2\}, \quad (14)$$

式中 $\text{ifft}(*, 1)$ 表示对 * 进行行方向一维傅里叶逆变换, $\text{ifft}(*, 2)$ 表示对 * 进行列方向一维傅里叶逆变换。

全息图可以表示为:

$$H = \text{real}[O(x, y)] + C, \quad (15)$$

式中 $\text{real}(*)$ 表示对 * 取实部, C 为一偏置常数,使得全息图透射率大于等于零。

通过(15)式可以得到计算机合成半周视彩色彩虹全息图,之后通过全息输出系统^[13-15]进行输出,显影定影漂白后,得到可用于白光再现的全息图。

2.2 三维模型投影算法

三维点云模型数据可以表示为 $O(x, y, z, r, g, b)$, 其中 (x, y, z) 为三维模型的空间坐标, (r, g, b) 为物体的颜色值。

对于一个确定的视角 $(\theta_{ix}, \theta_{iy})$, 利用旋转矩阵算出该视角下的三维坐标 (x_n, y_n, z_n) :

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中 \mathbf{T} 为旋转矩阵, 表示为:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{ix} & \sin \theta_{ix} \\ 0 & -\sin \theta_{ix} & \cos \theta_{ix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{iy} & 0 & -\sin \theta_{iy} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_{iy} & 0 & \cos \theta_{iy} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

对 z_n 进行大小排序, 并按照排序顺序对 x_n, y_n, r, g, b 进行排序。

设置图像采样间隔为 $\Delta x, \Delta y$, 根据 x_n, y_n 的最大最小值, 选择适当的投影窗口矩阵, 并建立与窗口矩阵对应的物理坐标系。窗口矩阵为三通道全零矩阵, 矩阵的分辨率为 $s \times t$, 则需要满足的条件是:

$$\frac{\max(x_n) - \min(x_n)}{\Delta x} < s, \quad \frac{\max(y_n) - \min(y_n)}{\Delta y} < t. \quad (18)$$

根据投影关系, 某一个点在矩阵中的坐标位置为:

$$i_{dx} = \text{round}\left(\frac{x_n}{\Delta x} + s/2\right), \quad i_{dy} = \text{round}\left(\frac{y_n}{\Delta y} + t/2\right), \quad (19)$$

式中 $\text{round}(*)$ 指的是对 * 取整。 i_{dx} 和 i_{dy} 分别为图像中的像素位置坐标。

判断该位置的三个通道数据是否都为零。如果不都为零, 说明该处已经被之前的物点填充, 当前的物点是被遮挡的一个物点。如果都为零, 则将当前物点的颜色值赋值给矩阵当前位置。对三维物体所有物点进行计算, 可以得到该视角下的投影图像。

3 实验及结果分析

实验中采用的三维模型为通过建模制作的三维人像, 投影图像的尺寸设置为 $47 \text{ mm} \times 47 \text{ mm}$, 物体距离半环形观察窗口的距离为 $h = 1100 \text{ mm}$ 。人眼的瞳孔直径为 $3 \sim 8 \text{ mm}$, 半环宽度与人眼瞳孔尺寸一致, 根据彩虹全息的原理可知, 当狭缝宽度增大, 色模糊增加。在此计算中, 选择半环宽度为 $w_s = 3 \text{ mm}$, 圆环半径为 $r = 300 \text{ mm}$ 。光波波长分别为 $\lambda_r = 632.8 \text{ nm}$, $\lambda_g = 547 \text{ nm}$, $\lambda_b = 467 \text{ nm}$ 。全息面的采样间隔为 $0.57 \mu\text{m}$, 与全息输出系统的输出分辨率一致。观察全息图的侧视角为 $\arctan(r/h) = 15.25^\circ$ 。全息图上最大空间频率为 606.7 line/mm , 全息输出系统能够输出的最高空间频率为 877.19 line/mm , 所计算的全息图可以正确输出。在全息计算时设置两个视图视差为 1° , 共有 180 张视图用于全息图的计算, 此时计算得到的红色分量每一块分辨率为 $1298 \text{ pixel} \times 1298 \text{ pixel}$ 。绿色分量每一块的分辨率为 $1488 \text{ pixel} \times 1488 \text{ pixel}$, 蓝色分量每一块的分辨率为 $1754 \text{ pixel} \times 1754 \text{ pixel}$ 。全息图的分辨率为 84000×84000 。采用笔记本电脑 (acer-v3-571 G, i5-2450 M 双核处理器), 通过 Matlab 软件进行编程实现, 整个全息图的计算耗时约 4 h。

图 5 给出了用于全息计算的 4 幅不同视角的投影图像。

图 6(a) 为全息图的局部放大图像, 图 6(b) 为全息图显示装置。显示装置的底部为一个卤素灯, 位于中央透镜的焦平面上, 顶层为一个开口, 放置全息图。卤素灯发出的光经过透镜后, 产生近似垂直的平行光照射全息图。

图 7 给出了 4 幅在暗室环境下采用单反相机拍摄的不同视角下的再现像, 其中的打火机位置与全息干板位置固定。从不同角度观察时, 可以看到不同视角下的彩色三维图像。实际观看效果更佳, 可以清楚地看到一个站立的彩色人像, 人眼移动过程中很难感觉出视角的跳变。

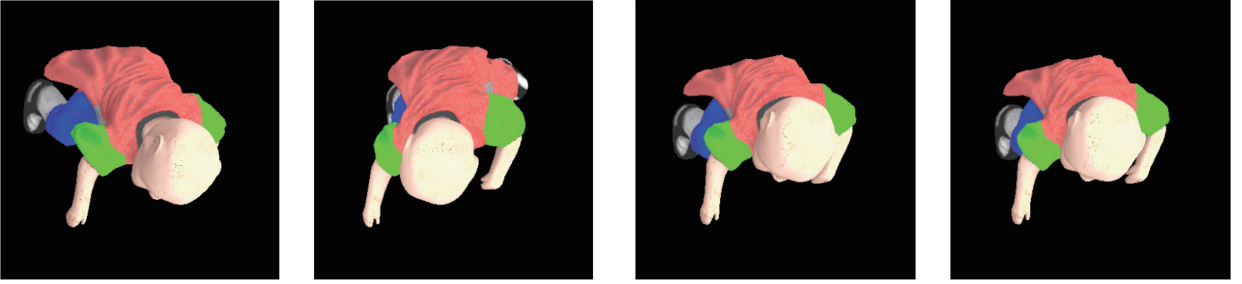


图 5 三维模型 4 幅投影图像

Fig. 5 Four projection images of 3D model

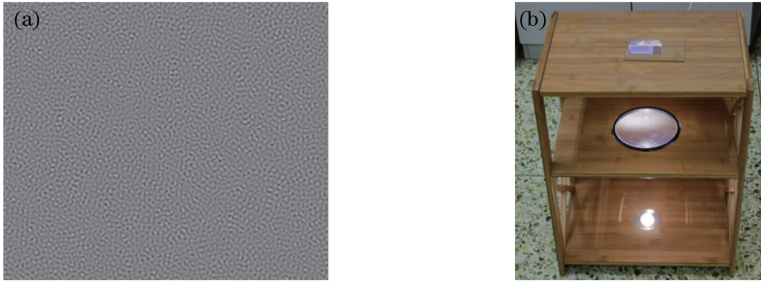


图 6 全息图的(a)局部放大图及(b)显示装置

Fig. 6 (a) Local magnification and (b) display equipment of hologram

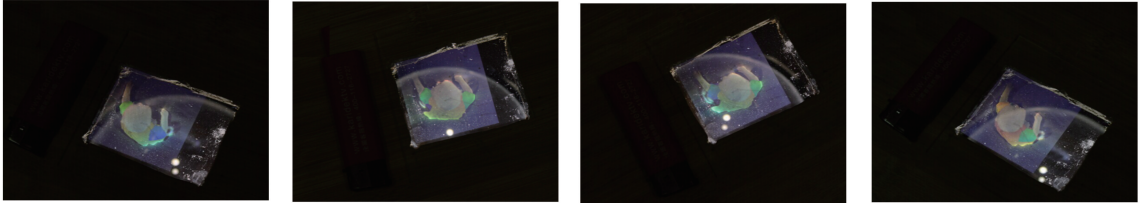


图 7 不同视角再现像

Fig. 7 Reconstruction images from different perspectives

4 结 论

根据光路可逆原理,分析了半周视彩色彩虹全息物的物光频谱分布。通过频域合成的方法得到半周视彩色彩虹全息图的物光频谱,之后逆衍射到全息面得到物光复振幅,然后编码为全息图。所计算的全息图侧视角较小,为 15.25° ,当全息输出系统进一步发展,能够输出更高频率的全息图时,则可以实现更大侧视角的半周视彩色彩虹全息显示。

参 考 文 献

[1] Wang D, Tang W H, Wang J, *et al.* A method of wide-viewing angle holographic display in color [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52 (6): 060901.
王迪, 唐文华, 王君, 等. 大视角的全息真彩色显示方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52 (6):

060901.

[2] Wu Q, Wang H, Shi Y L, *et al.* Color reproduction quantitative analysis of color reflection holography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43 (11): 1109001.
吴琼, 王辉, 施逸乐, 等. 彩色反射全息图颜色再现定量分析 [J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1109001.
[3] Zhao K, Huang Y Q, Jiang X Y, *et al.* Color computer holography generated by depth and wavelength compensating algorithm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0609007.
赵锴, 黄应清, 蒋晓瑜, 等. 深度和波长补偿算法生成彩色计算全息图 [J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0609007.
[4] Soares O D D, Fernandes J C. Cylindrical hologram of 360° field of view [J]. *Applied Optics*, 1982, 21 (17): 3194-3196.
[5] Yoshikawa H, Yamaguchi T, Fujii T. Fast calculation method for computer-generated cylindrical

- hologram[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(19): 63-70.
- [6] Wang D M, Ha L Z, Wang M C. Circular-viewing rainbow holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, 10(11): 996-998.
王典民, 哈流柱, 王民草. 周视彩虹全息术[J]. *光学学报*, 1990, 10(11): 996-998.
- [7] Qian H G, Wang H, Jin H Z. Computer-generated circular-viewing plane rainbow hologram [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2005, 16(3): 372-375.
钱惠国, 王辉, 金洪震. 计算机制作平板型周视彩虹全息[J]. *光电子 • 激光*, 2005, 16(3): 372-375.
- [8] Wu D Y, Wang H, Xie Y T, *et al.* Circular-viewing hologram with large side viewing angle generated by combining computer with optical holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(12): 1454-1459.
毋东元, 王辉, 谢裕涛, 等. 计算机与光学全息术结合制作大侧视角周视全息图[J]. *光子学报*, 2013, 42(12): 1454-1459.
- [9] Li Z G, Wu Q, Wang H, *et al.* Computer integrated circular-viewing plane color hologram [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(11): 1109003.
李志光, 吴琼, 王辉, 等. 计算集成平板周视彩色全息图[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1109003.
- [10] Li Z G. Theoretical and technique research of computer integrated circular-viewing plane color hologram[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2015.
李志光. 计算集成平板彩色周视全息图的理论与技术研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2015.
- [11] Li Y, Wang H, Ying C F, *et al.* Research of the computer-generated rainbow hologram with large viewing angle [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(5): 595-597.
李勇, 王辉, 应朝福, 等. 大视角计算机彩虹全息图的研究[J]. *光子学报*, 2003, 32(5): 595-597.
- [12] Bai X H, Wan L, Ren Y P, *et al.* Reflection holography for three-dimensional display based on computer-generated holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(5): 591-595.
拜晓慧, 万霖, 任亚萍, 等. 利用反射全息实现计算全息三维显示[J]. *光子学报*, 2012, 41(5): 591-595.
- [13] Yang X, Li Y, Wang H, *et al.* Reconstruction of computer generated true color rainbow hologram by filtering in frequency domain [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(8): 0809001.
杨鑫, 李勇, 王辉, 等. 基于频域滤波的计算机真彩色彩虹全息图模拟再现[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0809001.
- [14] Yang S G, Du X R, Chen H Y, *et al.* Color rainbow holography combining computer-generated hologram and optical hologram [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2009, 20(1): 74-77.
杨上供, 杜旭日, 陈海云, 等. 计算机与光学方法相结合的彩色彩虹全息术[J]. *光电子 • 激光*, 2009, 20(1): 74-77.
- [15] Shi Y L, Wang H, Wu Q, *et al.* Color matching of color computer-generated holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(1): 104-109.
施逸乐, 王辉, 吴琼, 等. 彩色计算全息颜色匹配的研究[J]. *光子学报*, 2013, 42(1): 104-109.