

计算机制集成彩色彩虹全息三维显示

刘子陌^{1,2}, 姚建云^{1,2}, 许富洋^{1,2*}, 杨鑫^{3**}, 宋强⁴, 马国斌⁴, 李勇^{1,2}¹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;²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;³北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;⁴珑璟光电-湖南大学微纳光学研究中心, 广东 深圳 518000

摘要 基于光场图像提出了一种计算机制集成彩色彩虹全息图的快速计算方法,并通过光学实验实现了全息图的彩色三维(3D)显示。首先,将全息图平面分割为多个连续的单元线全息图平面,再根据每个单元线全息图平面的顶点坐标和虚拟狭缝顶点坐标计算单元线全息图平面投影点的 3D 坐标。然后,以投影点作为虚拟针孔,将 3D 物体通过虚拟针孔进行投影,将该单元线全息图平面上的光场图像和虚拟针孔处会聚的球面波相位分别作为计算全息图时的物光振幅和相位,并引入参考光编码得到该单元线全息图。最后,用所有单元线全息图组合成彩色彩虹全息图。实验结果表明,用本方法实现一个尺寸为 50 mm×50 mm,分辨率为 600 pixel×600 pixel 的全息图仅需 43 min,在全息包装、3D 广告等领域具有广泛的应用前景。

关键词 全息; 计算机生成全息; 彩色彩虹全息; 光场图像渲染

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1009002

Computer Generated Integral Color Rainbow Holography
Three-Dimensional DisplayLiu Zimo^{1,2}, Yao Jianyun^{1,2}, Xu Fuyang^{1,2*}, Yang Xin^{3**}, Song Qiang⁴,
Ma Guobin⁴, Li Yong^{1,2}¹College of Physics and Electronic Information Engineering, Institute of Information Optics,
Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China;²Key Laboratory of Optical Information Detecting and Display Technology of Zhejiang Province,
Jinhua, Zhejiang 321004, China;³School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;⁴Lochn Optics-Hunan University Micro/Nano Photonics Research Center, Shenzhen, Guangdong 518000, China

Abstract In this study, a fast calculation method of the computer generated integrated color rainbow holography based on the light field image is proposed, and the color three-dimensional (3D) display of the hologram is realized through optical experiments. First, the hologram plane is divided into several continuous unit line hologram planes, and the 3D coordinates of the unit line hologram planes projection points are calculated according to the vertex coordinates of each unit line hologram plane and the virtual slit vertex coordinates. Then, using the projection point as a virtual pinhole, the 3D object is projected through this pinhole; the light field image on the plane of the unit line hologram and the phase of the spherical waves converging at the virtual pinhole are used as the object light amplitude and phase in the computational hologram, and the reference light code is used to obtain the unit line hologram. Finally, all unit line holograms are combined to form a color rainbow hologram. The experimental results show that

收稿日期: 2020-11-16; 修回日期: 2020-12-09; 录用日期: 2020-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(62005006,11674288)、浙江省高等教育“十三五”第二批教改项目(jg20190097)

* E-mail: xfy@zjnu.edu.cn; ** E-mail: holooptics@buaa.edu.cn

only takes 43 min to realize a hologram with a size of 50 mm×50 mm and a resolution of 600 pixel×600 pixel using the method, which has broad application prospects in the fields of holographic packaging and 3D advertising.

Key words holography; computer generated holography; color rainbow holography; light field image rendering

OCIS codes 090.1760; 090.2870; 090.4220

1 引言

全息是基于干涉记录和衍射再现的真三维(3D)显示,能重构完整的 3D 场景,为人眼提供物体的所有视觉感知信息,是 3D 显示领域的重点研究对象^[1-3]。相比激光再现的全息 3D 显示,白光再现的全息 3D 显示实用性更高,是全息 3D 显示走出实验室,走向实际应用的重要方向。白光再现的全息有体全息^[4-5]、像面全息^[6-8]和彩虹全息^[9-12],其中,体全息仅能通过干涉曝光方式进行制作,对激光器及光学平台的稳定性要求较高。像面全息和彩虹全息可采用光学曝光方式制作,也可通过计算全息方式制作。相比光学曝光的全息,计算全息的灵活性更高,可数字化的模型均能用于计算全息图的制作,且全息图的数据易于保存、传输及多次使用。

高分辨率计算全息图可通过激光直写^[13]、投影曝光^[5-9,11-12]或电子束刻蚀^[14]方式进行输出,从而实现大场景、大视场角的全息 3D 显示。但高分辨率计算全息图的计算时间较长,如 Yamaguchi 等^[10]将全息图分割成多个块单元,用每一块全息图中心点对应视场角下的 3D 数据计算该单元的全息图,计算尺寸为 20 mm×20 mm、大小为 20 K 的全息图需 32.9 h。高分辨率像面全息图指成像位于全息图附近的全息图,由于色模糊在景深较小时对再现像清晰度的影响不大,因此可用白光再现。为了快速计算高分辨率像面全息图,Yang 等^[7]通过融合频域内多视点图像的频谱形成高分辨率频谱,再通过逆傅里叶变换得到全息面的复振幅,最后通过编码得到全息图。该方法计算分辨率为 94340 pixel×94340 pixel,尺寸为 30 mm×30 mm 的全视差像面全息图需要 72 min。相比像面全息,计算彩色彩虹全息可实现彩色 3D 显示效果,实用价值更高。Yang 等^[11-12]通过频域融合方法实现高分辨率彩色彩虹全息图(尺寸为 30 mm×30 mm,分辨率为 94340 pixel×94340 pixel)和半周视彩色彩虹全息图(尺寸为 47 mm×47 mm,分辨率为 84000 pixel×84000 pixel)分别需要 25 min 和 4 h。但基于频域融合的高分辨率全息图计算方法受计算机内存的限制,无法进行更大尺寸和更高分辨率的全息图计算。Yang 等^[6]提出了一种基于光场图像

渲染的高分辨率全息计算方法,该方法将全息图分块并直接将光场图像和人为设定的相位编码到全息图中,实现了高分辨率全息图的快速计算,且该方法不受计算机内存的限制。许富洋等^[8]在文献[6]的基础上实现了连续变化效果的多视点动态全息 3D 显示,丰富了高分辨率全息 3D 显示的效果,但这两种方法均为灰度的像面全息 3D 显示。

为了实现大尺寸、高分辨率彩色彩虹全息 3D 显示,本文在文献[6]的基础上,基于光场图像渲染与彩色彩虹全息提出了一种计算机集成彩色彩虹全息图快速计算方法,并通过光学再现方法实现了全息图的彩色 3D 显示。实验结果表明,相比文献[11]中的方法,本方法对计算机内存的要求低且能进行并行计算;相比文献[10]中的方法,全息图编码时无需额外的柱透镜相位,且编码的是光场图像而不是所有物点在单元线全息图平面上复振幅的叠加,计算速度更快。

2 基本原理

图 1 为彩色彩虹全息图再现的示意图,其中,白光平面波 C 以角度 θ_{refly} 倾斜照明全息图 H,衍射光衍射一段距离 z_e 后形成三条空间错位的光谱分布。当人眼通过设计的虚拟狭缝 slit 观看时,恰好能看到由红色、绿色和蓝色光谱叠加成的彩色 3D 再现像;当人眼位置上下移动时,不同光谱成分的组合可显示出彩虹色变化的效果,因此,将这种 3D 显示称为彩色彩虹全息 3D 显示。彩色彩虹全息在横向的视场角较大,但其纵向视场角由狭缝严格限制。传

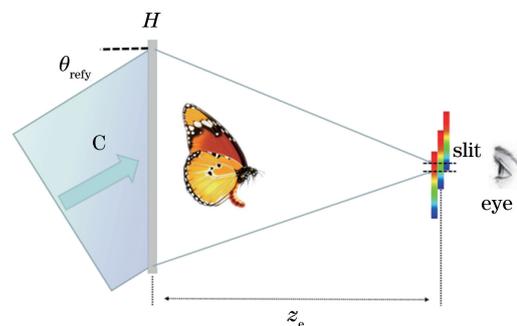


图 1 彩色彩虹全息再现原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the color rainbow holography reproduction

统彩色彩虹全息图计算时,3D 物点在全息面上的分布为该物点向虚拟狭缝的投影,投影光锥在全息面上的分布为该物点在全息面上的复振幅,每个物点发出的光在全息面上为线状分布,也被称为线全息图。

图 2(a)为计算机集成彩色彩虹全息图在 yoz 平面内的计算模型,可以看出,全息图 H 被分解成多个小单元,每个单元对应一个单元线全息图平面。每个小单元的顶点与虚拟狭缝顶点交叉连接,形成的交点为光场图像渲染时的虚拟针孔(pinhole),单元线全息图发出的光会聚到虚拟针孔后发散,全部传播到狭缝 slit 内。不同单元线全息图平面与狭缝连线形成的虚拟针孔位置不同,假设 $P_{i,j}$ 为 (i,j) 处单元线全息图平面与狭缝的交点, $m_{i,j}(x_h, y_h)$ 为该单元线全息图平面通过虚拟针孔模型渲染的光场图像,可作为该单元线全息图平面上物光的振幅。

成像过程中该单元线全息图平面发出的光在虚拟针孔 $P_{i,j}$ 上会聚成球面波,该球面波可作为该单元线全息图平面上物光的相位,则该单元线全息图可表示为

$$H_{i,j,\lambda}(x_h, y_h) =$$

$$m_{i,j}(x_h, y_h) \cos[\phi_{sp,i,j}(x_h, y_h) - \phi_{refy}], \quad (1)$$

式中, $\phi_{sp,i,j}$ 为单元线全息图平面会聚在 $P_{i,j}$ 上球面波的相位,可表示为 $\phi_{sp,i,j} = -\frac{2\pi}{\lambda}[(x_h - x_{p,i,j})^2 + (y_h - y_{p,i,j})^2 + z_{p,i,j}^2]^{1/2}$,其中, $(x_{p,i,j}, y_{p,i,j}, z_{p,i,j})$ 为 $P_{i,j}$ 的 3D 坐标。 ϕ_{refy} 为参考光的相位,可用 y 方向上与 z 轴有一定夹角 θ_{refy} 的平面波表示为 $\phi_{refy} = \frac{2\pi}{\lambda}y_h \sin(\theta_{refy})$ 。图 2(b)为 3D 空间中,一个线单元线全息图(hogel)与虚拟狭缝投影形成的虚拟针孔。

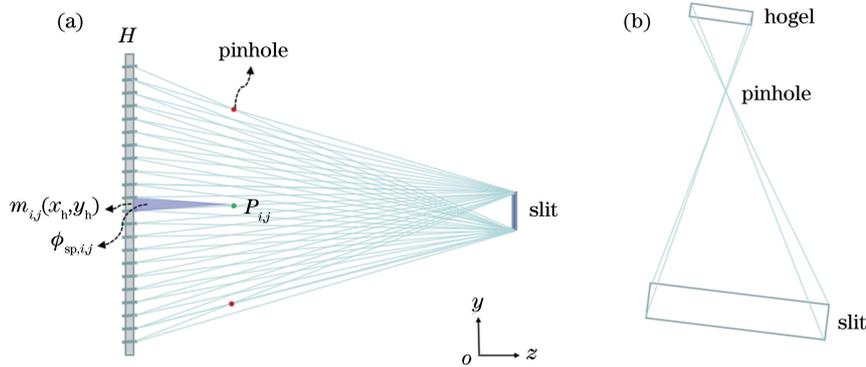


图 2 彩色彩虹全息图的计算模型。(a)计算模型;(b)单元线全息图、虚拟针孔及狭缝的空间位置

Fig. 2 Computational model of the color rainbow hologram. (a) Computational model;

(b) spatial positions of unit line hologram, virtual pinhole and slit

对于计算机集成彩色彩虹全息,单元线全息图为三个波长计算全息图的叠加,可表示为

$$H_{i,j}(x_h, y_h) = H_{i,j,\lambda_r}(x_h, y_h) + H_{i,j,\lambda_g}(x_h, y_h) + H_{i,j,\lambda_b}(x_h, y_h), \quad (2)$$

式中, λ_r, λ_g 和 λ_b 为计算时红色、绿色和蓝色通道的主波长。

图 3 为虚拟针孔坐标位置计算示意图,其中,狭缝关于 z 轴对称,宽度为 w_s ,两个顶点 A 和 B 的 y 坐标分别为 $-w_s/2$ 和 $w_s/2$ 。单元线全息图的宽度为 w_h ,给定单元线全息图平面上两个顶点 C 和 D 的 y 坐标分别为 y_{hs} 和 y_{he} ,则 $w_h = y_{he} - y_{hs}$ 。虚拟针孔 $P_{i,j}$ 是由狭缝下顶点 A 和单元线全息图平面上顶点 D 的连线与狭缝上顶点 B 和单元线全息图平面上顶点 C 连线的交点。根据几何关系可知

$$z_{p,i,j} = \frac{z_e w_h}{w_s + w_h}, \quad (3)$$

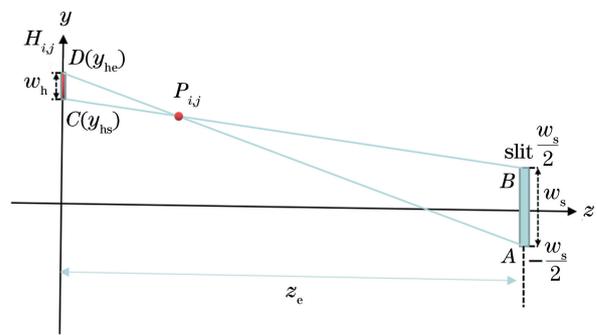


图 3 虚拟针孔的坐标计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the coordinate calculation of virtual pinhole

$$y_{p,i,j} = y_{hs} - \frac{(2y_{hs} - w_s)z_{p,i,j}}{2z_e}. \quad (4)$$

同理,给定 x 方向上狭缝的长为 l_s ,则狭缝两个顶点的 x 坐标分别为 $-l_s/2$ 和 $l_s/2$ 。单元线全息图平面的长为 l_h ,两个顶点的 x 坐标分别为 x_{hs}

和 x_{he} , 则 $l_h = x_{he} - x_{hs}$ 。根据几何关系可知

$$z_{p,i,j} = \frac{z_e l_h}{l_s + l_h}, \quad (5)$$

$$x_{p,i,j} = x_{hs} - \frac{(2x_{hs} - l_s) z_{p,i,j}}{2z_e}. \quad (6)$$

由于狭缝所在平面与单元线全息图所在平面平行且均为矩形, 此外, 狭缝的长宽比与单元线全息图的长宽比相同, 即(3)式与(5)式计算的 $z_{p,i,j}$ 相同。因此, 根据相关参数, 可得到虚拟针孔的 3D 坐标 $(x_{p,i,j}, y_{p,i,j}, z_{p,i,j})$ 。

图 4 为光场图像渲染的原理图, 其中, O_{bj} 为在虚拟针孔 $P_{i,j}$ 和 (i, j) 处单元线全息图平面边缘连线张角范围内的 3D 物体, 向虚拟针孔 $P_{i,j}$ 进行投影, 在单元线全息图平面上形成的投影图像为 $m_{i,j}(x_h, y_h)$ 。如 $O_k(y_k, z_k)$ 为 3D 物体上的一点, 向虚拟针孔投影光线与全息面的交点为 $E(y_{im})$, 则投影点的 y 坐标 y_{im} 可表示为

$$y_{im} = y_k + \frac{z_k (y_k - y_{p,i,j})}{z_{p,i,j} - z_k}, \quad (7)$$

式中, $y_{hs} \leq y_{im} \leq y_{he}$ 。

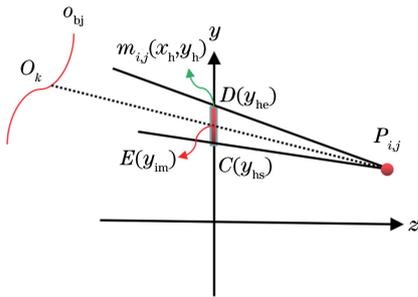


图 4 光场图像渲染原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the light field image rendering

同理, 在 xoz 平面内, 投影点的 x 坐标 x_{im} 可表示为

$$x_{im} = x_k + \frac{z_k (x_k - x_{p,i,j})}{z_{p,i,j} - z_k}, \quad (8)$$

式中, $x_{hs} \leq x_{im} \leq x_{he}$ 。投影图像 $m_{i,j}(x_{im}, y_{im})$ 可表示为

$$m_{i,j}(x_{im}, y_{im}) = A_k, \quad (9)$$

式中, A_k 为第 k 个物点的振幅, 对彩色 3D 模型进行渲染时, A_k 包含了第 k 个物点红色、绿色和蓝色通道的颜色值, 渲染后可得到彩色光场图像 $m_{i,j}(x_h, y_h)$ 。将获得的彩色光场图像及虚拟针孔的 3D 坐标代入(2)式, 再进行编码可得到该单元线全息图, 具体计算过程如下。

1) 设计全息面的长宽和采样间隔及狭缝参数, 将全息面分割为多个单元线全息图平面。对于一个

单元线全息图平面, 根据(3)式、(4)式和(6)式计算得到虚拟针孔的坐标。

2) 根据该单元线全息图的平面位置和虚拟针孔坐标, 用(7)式~(9)式渲染该单元线全息图平面上的投影图像。

3) 将投影的三个颜色通道图像通过(2)式编码为彩色彩虹单元线全息图, 计算完所有单元的全息图后组合得到完整的计算机集成彩色彩虹全息图。

3 实验结果及分析

3.1 全息图计算的实验及结果

计算机集成彩色彩虹全息图计算时使用了一个包含两个深度文字(“珑璟”和“光电”)的彩色 3D 点云模型, 如图 5 所示。该模型的尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 其中, “珑璟”与全息面的距离 $z_1 = -10 \text{ mm}$, “光电”与全息面的距离 $z_2 = -20 \text{ mm}$ 。“珑璟光电”四个字的颜色分别为红色、绿色、蓝色和白色。该彩色 3D 点云模型包含了 361.7 万个物点数, 高分辨率的点云模型可以保证投影光场图像连续性和完整性。

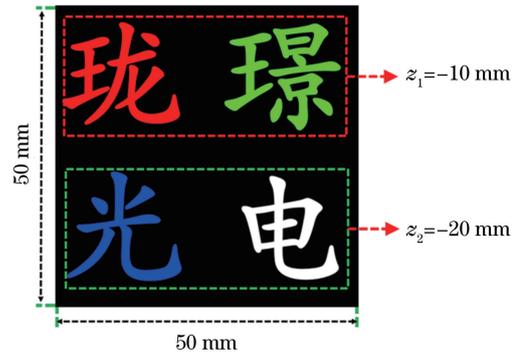


图 5 3D 彩色模型

Fig. 5 3D color model

计算机集成彩色彩虹全息图的尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 采样间隔 $d_h = 0.318 \mu\text{m}$ 由全息输出系统决定, 分辨率为 $157232 \text{ pixel} \times 157232 \text{ pixel}$ 。为了满足人眼的瞳孔尺寸(一般为 $3 \sim 8 \text{ mm}$)和双眼瞳距(一般为 65 mm), 彩色彩虹全息图的狭缝宽度 $w_s = 5 \text{ mm}$, 狭缝长度 $l_s = 70 \text{ mm}$, 单元线全息图的宽度 $w_h = 0.05 \text{ mm}$ 。根据狭缝尺寸与单元线全息图尺寸的比例关系可知, 单元线全息图的长 $l_h = 0.7 \text{ mm}$, 行、列方向的分辨率分别为 $m_h = w_h/d_h = 157$, $n_h = l_h/d_h = 2201$ 。全息图与狭缝的距离 $z_e = 400 \text{ mm}$ 。根据全息图尺寸及单元线全息图的尺寸可知, 单元线全息图的数量与

渲染的光场图像数量相同,行、列方向的数量分别为 $M_h=50/w_h=1000, N_h=50/l_h=71$ 。

通过分割的单元线全息图平面坐标位置与狭缝位置以及全息图到狭缝的距离,根据(4)式~(6)式计算出虚拟针孔的坐标位置,并将其用于单元光场图像的渲染。单元光场图像渲染时的采样间隔 $d=4\ \mu\text{m}$,根据单元光场图像的尺寸(单元线全息图尺寸)可知,单元光场图像行、列方向的分辨率分别为 $m=w_h/d=12, n=l_h/d=157$ 。通过插值法获得与单元线全息图分辨率相同的全息图并进行编码计算,通过衍射控制实现了 1884(12×157)个方向的光线,每条光线的局部全息图分辨率为 13×13 。这表明尺寸为 $13\ \text{pixel}\times 13\ \text{pixel}$ 的局部光栅结构可控制口径为 $4\ \mu\text{m}$ 的局部光线传输,由于波长小于 $4\ \mu\text{m}$,因此,局部光栅结构控制的 $4\ \mu\text{m}$ 口径光线衍射在几厘米的深度范围内影响较小,可近似认为最终形成的 3D 图像是由大量 $4\ \mu\text{m}$ 口径的不同方向光线融合而成。

由于每个单元线全息图的计算相互独立,因此用并行加速方法在笔记本电脑(CPU 为 I7-9750H,固态硬盘容量为 1 T)上进行计算。相比机械硬盘,固态硬盘存储数据的速度更快,在减少计算时间方

面的优势更大。用 MatlabR2015b 软件,通过 parfor 命令进行并行加速计算,计算时并行计算池中启动了 6 个 worker,所有单元线全息图的计算总耗时为 43 min,而直接用 for 循环的计算时间为 2.78 h。将所有单元线全息图拼接形成完整的计算机制彩色彩虹全息图,由于 MatlabR2015b 软件对 parfor 的并行计算要求较高,因此,将全息图的计算代码编写为一个函数,该函数仅有循环变量、3D 数据及计算参数,没有任何输出变量。通过该函数计算的线全息图直接保存在硬盘上,基本的模型伪代码可表示为

```
parfor s = 1:M
function(s, data, parameters),      (10)
end
```

式中, s 为循环变量, M 为循环次数, $\text{function}()$ 为调用函数, data 为 3D 模型数据, parameters 为计算时需要的参数。

全息图计算完成后,对完整的全息图进行分割,并用自行研制的全息输出系统输出^[5-9,11-12],逐个微缩曝光到感光胶材料上得到可光学再现的全息图。图 6(a)为计算机制彩色彩虹全息图的局部放大图,图 6(b)为全息图计算过程中渲染的局部光场图像。

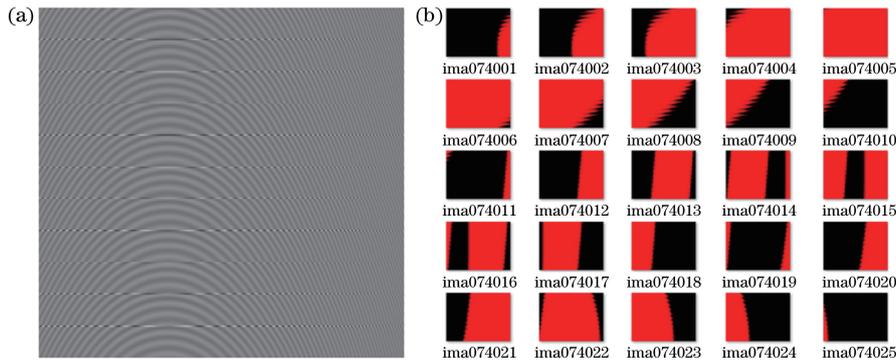


图 6 计算机制彩色彩虹全息图及局部光场图像。(a)全息图的局部放大图像;(b)局部光场图像

Fig. 6 Computer generated integral color rainbow hologram and partial light field image.

(a) Partially enlarged image of the hologram; (b) partial light field images

全息图再现的结果如图 7 所示,可以发现,用一个 LED 点光源位于全息图后方以一定角度照明全息图,能观察到不同文字呈不同的颜色。受限于手机摄像头的聚焦能力,明显呈现出两个深度离焦和聚焦效果较难,但人眼可明显感知两个深度。对比发现,当人眼纵向移动时,会看到彩虹色变化的效果,这表明通过衍射可形成清晰的高分辨率 3D 再现像,也验证了本方法的可行性。

3.2 分析及讨论

通过单元线全息图平面与狭缝的空间关系直接

映射得到位于全息图平面与狭缝之间的虚拟针孔坐标,进而用该虚拟针孔进行单元光场图像的渲染并用于单元线全息图的编码。实际映射时,可采用单元线全息图平面边界点与狭缝边界点相交连线的方式获取虚拟针孔坐标,此时,全息图位于虚拟针孔与狭缝之间,需要映射的球面波为虚拟针孔的发散球面波。

彩色彩虹全息图通过狭缝限制 y 方向的色模糊,使用 y 方向上的高频参考光在该方向上的色散实现彩色 3D 显示,因此, y 方向的视角角很小, x 方

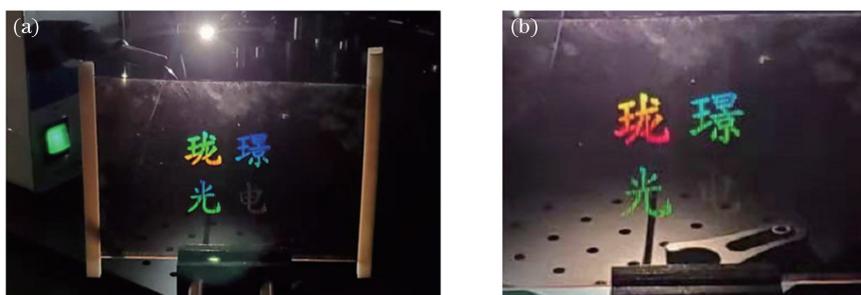


图 7 两个不同视角的再现图像。(a)第一个视角;(b)第二个视角

Fig. 7 Reproduced images of two different viewing angles. (a) First perspective; (b) second perspective

向上的视场角较大。虚拟狭缝的长度越长,则单元线全息图在 x 方向的尺寸越大,但狭缝过长可能会导致栅栏效应^[6]。因此,实验中使用互不重叠的单元线全息图拼接得到完整全息图。除了减少单元线全息图的尺寸外,也可通过单元线全息图重叠叠加方式进行计算,但计算量较大。

在全息图光学再现时,使用了一个点光源进行照明,导致再现像比严格使用平面波白光照明时较小,但实际观看时仍能清晰观察到两个深度的彩色图像。光学再现结果的颜色与实际设计的颜色之间存在色差,原因是人眼瞳孔观察到了多频率的光谱成分,且该色差与光源的光谱分布有关,不同的白光照明的颜色也有所差别。通过优化照明光源,并采用更准确的颜色空间转换关系得到计算机集成彩色彩虹全息图的振幅,可提升彩色显示的质量^[15-16]。

在计算全息图时,使用了两个深度的文字作为 3D 模型,实际中可通过结构光 3D 信息获取物体的 3D 点云数据^[17-18],也可用本方法实现复杂 3D 物体的全息彩色再现。后续光场图像渲染及编码也可通过 GPU 进行加速计算,使用 C++ 语言进行编程有望进一步提升计算速度。

4 结 论

在前期研究的基础上,提出了一种基于光场图像渲染的计算机集成彩色彩虹全息图快速计算方法,并通过光学再现实现了彩色全息 3D 显示。给出了全息图平面分割与虚拟狭缝情况下,每个虚拟针孔坐标的计算方法及单元光场图像渲染方法。通过并行加速计算得到了高分辨率计算机集成彩色彩虹全息图,并通过光学实验实现了彩色 3D 显示,验证了本方法的可行性,为计算机集成彩色彩虹全息 3D 显示在全息包装、3D 广告等方面的应用提供了新思路。

参 考 文 献

- [1] Yaraş F, Kang H, Onural L, et al. 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, et al. Digitized holography: modern holography for 3D imaging of virtual and real objects [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(34): H278-H284.
- [4] Wang Z, Cao L C, Zhang H, et al. Three-dimensional display based on volume holography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0909003. 王靖, 曹良才, 张浩, 等. 基于体全息的三维显示方法 [J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0909003.
- [5] 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, 万琳, 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.
- [6] Yang X, Xu F Y, Zhang H B, et al. High-resolution hologram calculation method based on light field image rendering [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(3): 819.
- [7] 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.
- [8] Xu F Y, Yang X, Yao J Y, et al. High-resolution multi-view dynamic holographic 3D display [J]. *Chinese Journal of Laser*, 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.
- [9] 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.

- [10] Yamaguchi T, Yoshikawa H. High resolution computer-generated rainbow hologram [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(10): 1955.
- [11] 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.
- [12] 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半周视彩色彩虹全息 [J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0309001.
- [13] Pan F Y, Burge J. Efficient testing of segmented aspherical mirrors by use of reference plate and computer-generated holograms .I. theory and system optimization [J]. *Applied Optics*, 2004, 43 (28): 5303-5312.
- [14] Freese W, Kämpfe T, Rockstroh W, et al. Optimized electron beam writing strategy for fabricating computer-generated holograms based on an effective medium approach [J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8684-8692.
- [15] Shi Y L, Wang H, Wu Q, et al. Color transmission analysis of color computer-generated holography [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(20): 4768-4774.
- [16] 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.
- [17] Lu M T, Su X Y. Vertical measurement method for structured light three-dimensional profilometry based on phase shifting and modulation ratio [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0704003.
卢明腾, 苏显渝. 基于相移与调制比的结构光三维面形垂直测量方法 [J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0704003.
- [18] Yang P B, Deng L J, Chen Y, et al. Three-dimensional shape measurement of highly reflective objects based on structured light [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0204004.
杨鹏斌, 邓林嘉, 陈元, 等. 基于结构光的高反物体三维形貌测量方法 [J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0204004.