

# 高分辨率多视点动态全息 3D 显示

许富洋<sup>1,2</sup>, 杨鑫<sup>3\*</sup>, 姚建云<sup>1,2</sup>, 刘子陌<sup>1,2</sup>, 宋强<sup>4</sup>, 李勇<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>浙江师范大学信息光学研究所, 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>北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

<sup>4</sup>珑璟光电 & 湖南大学微纳光学研究中心, 广东 深圳 518000

**摘要** 提出了一种高分辨率多视点动态全息 3D 显示方法, 观看视点位置变化时, 观看者能够看到连续变化的 3D 效果。在进行全息图计算时, 首先根据针孔阵列投影模型, 渲染 3D 动画中每一帧 3D 模型的光场图像序列; 然后从已渲染的多组光场图像序列中抽取对应视角信息的光场图像进行融合, 得到融合后的动态光场图像序列; 在进行全息图编码时, 以动态光场图像序列中的一帧图像作为物光振幅, 以来自于针孔的发散球面波的相位作为物光相位, 引入平面参考光进行编码, 得到一个单元全息图。由于每个单元全息图的计算是相互独立的, 因此在计算过程中使用并行加速计算, 实现了尺寸为 32 mm×32 mm、分辨率为 100000 pixel×100000 pixel 的高分辨率全息图, 其光场图像融合和全息编码的时间仅需 27 min。光学再现结果证明了该方法的可行性。所提出的高分辨率多视点动态全息 3D 显示方法在全息包装和 3D 广告等领域具有广泛的应用前景。

**关键词** 全息; 全息 3D 显示; 计算全息; 高分辨率全息; 动态全息显示; 光场图像渲染

**中图分类号** O438.1

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202148.0109001

## 1 引言

计算全息 3D 显示是基于波前再现的真 3D 显示技术。全息图可以看作是一个信息显示的窗口, 人眼通过该窗口可看到准确完整的 3D 场景。计算全息 3D 显示可满足人眼 3D 立体视觉感知的所有需求, 能够实现真实及虚拟 3D 场景的波前编码与再现, 具有独特的优点和很大的灵活性, 被认为是非常有潜力的 3D 显示技术<sup>[1-2]</sup>。

高分辨率计算全息图可通过激光直写<sup>[3]</sup>、投影曝光<sup>[4]</sup>和电子束刻蚀<sup>[5]</sup>等方式进行输出, 可实现大场景大视场角的全息 3D 显示。巨大计算量引起的较长计算时间是高分辨率全息 3D 显示应用亟需解决的重要问题。文献[6-8]提出了基于频域融合的高分辨率全息算法, 实现了高分辨率的全视差像面全息(尺寸为 30 mm×30 mm, 分辨率为 94340 pixel×94340 pixel)、彩色彩虹全息(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(尺寸为 47 mm×47 mm, 分辨率为 84000 pixel×84000 pixel), 所需要的计算时间分别

为 72 min、25 min 和 4 h<sup>[6-8]</sup>。基于频域融合的高分辨率全息算法在一定情况下可实现高分辨率全息图的快速计算, 但该方法对计算机内存需求很大, 较难实现更大尺寸的高分辨率全息图计算。全息图分块计算是解决大尺寸高分辨率全息计算的主要方法<sup>[9-11]</sup>。例如, 在文献[10]中, 全息图被分割为多个块单元, 利用每一块全息图中心点所对应视场角下的 3D 数据计算该单元全息图。该方法实现了尺寸为 20 mm×20 mm、分辨率为 20000 pixel×20000 pixel 的全息图, 对应的计算时间为 32.9 h。文献[11]将集成成像 3D 显示中的光场图像渲染<sup>[12]</sup>与全息编码相结合, 对高分辨率全息图进行了计算, 实现了尺寸为 64 mm×64 mm、分辨率为 200000 pixel×200000 pixel 的全息图, 对应的计算时间为 37 min。

上述高分辨率全息图仅能实现静态的 3D 显示, 即人眼从不同角度观看全息再现像时, 能够看到静态 3D 再现像对应视角的图像, 显示效果单一。为了能够实现更加丰富的全息 3D 显示效果, 本文在文献[11]的基础上, 提出了高分辨率多视点动态全息 3D 显示方法, 当人眼的观看位置变化时, 可看

收稿日期: 2020-07-23; 修回日期: 2020-08-10; 录用日期: 2020-08-17

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: holooptics@buaa.edu.cn

到连续变化的 3D 图像。进行全息图计算时,针对一个 3D 动画不同时刻的 3D 模型,使用针孔阵列投影模型计算其光场图像序列;从所计算的多组光场图像序列中提取对应视角信息的光场图像进行融合,形成了动态光场图像序列;对动态光场图像序列中的每个图像进行编码,得到一个单元全息图,对所有动态光场图像进行编码即可得到完整的全息图。在进行全息图编码时,以动态光场图像序列中的一个光场图像作为物光振幅,以对应针孔的发散球面波的相位作为物光相位,引入离轴参考光进行直接编码,得到一个单元全息图。各个单元全息图的计算是相互独立的,可使用并行加速计算来减少计算时间。提出的高分辨率多视点动态全息 3D 显示方法丰富了全息 3D 显示的效果,在全息包装和 3D 广告等领域具有重要的应用价值。

## 2 基本原理

### 2.1 基于光场图像渲染的全息图算法

图 1 为基于光场图像渲染的全息算法原理示意图。其中,  $P_h$  为针孔阵列,包含多个针孔;  $P_{h,i}(x_{ph,i}, f)$  为  $x$  方向上的第  $i$  个针孔,其  $x$  坐标和  $z$  坐标分别为  $x_{ph,i}$  和  $f$ ;  $H$  为全息面;  $o_{bj}$  为 3D 物体;每个针孔对应的视场角均为  $\theta_x$ ,其视场角投影在全息面  $H$  上的区域为该针孔的单元全息图,称为 hogel; 3D 物体向该针孔进行投影得到的单元光场图像,称为 EI(Elemental Image),  $E_i$  为  $x$  方向上第  $i$  个针孔对应的光场图像。每个单元全息图或

单元光场图像在  $x$  方向上的宽度为  $w_h$  或  $w_e$ ,满足  $w_h = w_e$ 。两个针孔之间的距离设置为  $w_h$ ,在此种情况下,两个相邻的光场图像之间无重叠。

全息图的计算分为光场图像渲染和全息图编码两步。对于一个指定的针孔如  $P_{h,i}(x_{ph,i}, f)$ ,位于其视场角  $\theta_x$  范围内的 3D 物体向该针孔进行投影,在全息面的交叠区域形成单元光场图像。如图 1 所示,  $A, B$  为针孔  $P_{h,i}(x_{ph,i}, f)$  对应的视场边界线与 3D 物体  $o_{bj}$  的两个交点,记为  $P_A(x_A, z_A)$  和  $P_B(x_B, z_B)$ 。3D 物体  $o_{bj}$  中  $P_A(x_A, z_A)$  和  $P_B(x_B, z_B)$  之间的 3D 物体向该针孔进行投影得到投影图像  $E_i$ ,则物体上一点  $P(x, z)$  与投影点  $R(x_r)$  的关系可以表示为

$$x_{r,i} = f \frac{x - x_{ph,i}}{z} + x_{ph,i}, \quad (1)$$

式中:  $x_{ph,i}$  为第  $i$  个针孔的  $x$  方向坐标;  $x_{r,i}$  为对应的光场图像的投影坐标,满足:

$$x_{ph,i} - f \tan\left(\frac{\theta_x}{2}\right) \leq x_{r,i} \leq x_{ph,i} + f \tan\left(\frac{\theta_x}{2}\right). \quad (2)$$

当给定  $y$  方向上针孔点的视场角  $\theta_y$  以及针孔坐标  $y_{ph,j}$  时,在  $y$  方向上的投影点坐标可表示为

$$y_{r,j} = f \frac{y - y_{ph,j}}{z} + y_{ph,j}, \quad (3)$$

式中:  $y_{r,j}$  为  $y$  方向上第  $j$  个光场图像的投影坐标,满足:

$$y_{ph,j} - f \tan\left(\frac{\theta_y}{2}\right) \leq y_{r,j} \leq y_{ph,j} + f \tan\left(\frac{\theta_y}{2}\right), \quad (4)$$

式中:  $i, j$  分别为单元光场图像在  $x$  和  $y$  方向上的序号。假如全息图的尺寸为  $W \times L$ ,单元全息图的尺寸为  $w_h \times l_h$ ,则单元光场图像在  $x$  和  $y$  方向上的数目为  $I = \frac{W}{w_h}$  和  $J = \frac{L}{l_h}$ ,那么  $i$  为 1 到  $I$  之间的整数,  $j$  为 1 到  $J$  之间的整数。

当获得了第  $(i, j)$  个单元的投影坐标后,光场图像  $E_{i,j}(x_{r,i}, y_{r,j})$  可以表示为

$$E_{i,j}(x_{r,i}, y_{r,j}) = A_p, \quad (5)$$

式中:  $A_p$  为 3D 物点  $P(x, y, z)$  的振幅。从针孔的角度来分析,单元光场图像是球面波在全息面上的振幅,该球面波是对应针孔发出的光线所形成的。以发散球面波的相位作为光场图像的相位,即

$$\varphi_{i,j}(x_{r,i}, y_{r,j}) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \sqrt{(x_{r,i} - x_{ph,i})^2 + (y_{r,j} - y_{ph,j})^2 + f^2} \right], \quad (6)$$

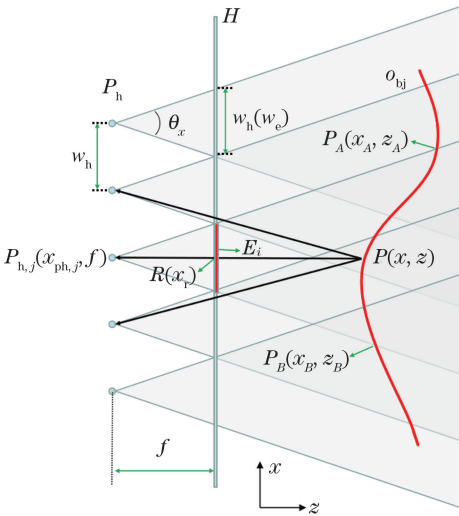


图 1 基于光场图像渲染的全息算法原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of holographic algorithm based on light field image rendering

式中:  $\lambda$  为光源波长。以离轴平面波作为参考光,第  $(i, j)$  个单元全息图可以表示为

$$H_{i,j}(x_{r,i}, y_{r,j}) = E_{i,j}(x_{r,i}, y_{r,j}) \cos[\varphi_{i,j}(x_{r,i}, y_{r,j}) - \frac{2\pi}{\lambda} y_{r,j} \sin(\theta_{\text{ref},y})], \quad (7)$$

式中:  $\theta_{\text{ref},y}$  为平面波在  $y$  方向上与  $z$  轴的夹角。

通过上述光场图像渲染方法,可得到一个静态 3D 物体的多个单元光场图像,对其分别进行编码,得到单元全息图,能够实现高分辨率静态 3D 显示的效果<sup>[11]</sup>。

## 2.2 高分辨率多视点动态全息算法

为了实现不同观看视点下的连续 3D 动画效果,需建立 3D 动画时间序列与视角序列的映射关系。设计了图 2 所示的新的计算模型,其中  $o_{\text{bj},t_1}$  和  $o_{\text{bj},t_2}$  为 3D 动画模型在两个时刻的 3D 数据,  $\nu_1$  和  $\nu_2$  为两个张角均为  $\Delta\theta_x$  且角度范围不重叠的两个视角范围。在光场图像渲染过程中,每个针孔均以视角  $\nu_1$  渲染得到全息面上的一组光场图像,同时以视角  $\nu_2$  渲染得到另一组光场图像,融合其在全息面上的物理位置,得到的光场图像序列即为所述的动态光场图像序列。采用等分视场角的方式得到行动态光场图像序列:将视场角  $\theta_x$  平均分割为  $N$  份,则  $\Delta\theta_x = \frac{\theta_x}{N}$ ,其中  $N$  为 3D 模型动画的帧数。从而可按照时间序列与视角序列对应的方式渲染构建全息面上的动态光场图像序列。

当对视场角进行连续分割时,相邻视角渲染的光场图像在全息面上是相邻的,但不同视角下的光场图像的分辨率有所差异,故计算时复杂度有所提

高。为了便于验证所提出方法的可行性,在实际计算中,采用直接对单元光场图像进行分割的方式,融合得到动态光场图像。光场图像上的每个像素点与其所对应的视角的关系为

$$\begin{cases} \theta_{r,x} = \arctan\left(\frac{x_{r,i} - x_{\text{ph},i}}{f}\right) \\ \theta_{r,y} = \arctan\left(\frac{y_{r,j} - y_{\text{ph},j}}{f}\right) \end{cases}, \quad (8)$$

式中:  $\theta_{r,x}$  和  $\theta_{r,y}$  为针孔  $P_{h,i}(x_{\text{ph},i}, f)$  发出的光的传播方向。由于光场图像序列的周期性,单元光场图像的分割必然导致视角序列的周期性分割,从而使得对应视角的 3D 动作仅在所设计的视角方向上可见,当观察视角发生连续变化时,人眼将感受到连续变化的 3D 显示效果。

多视点动态全息算法的实现步骤分为三步。

1) 按照 2.1 节中的光场图像渲染方法渲染 3D 动画模型每一帧的光场图像序列,总共渲染的图像数为  $I \times J \times N$ 。

2) 从已渲染的光场图像序列中,抽取对应视角的光场图像进行融合,得到动态光场图像序列。在光场图像融合时,使用图像本身的坐标系,其中第  $(i, j)$  个动态单元光场图像  $E'_{i,j}$  的合成方法如图 3 所示,  $E_{i,j,f_m}$  表示第  $n$  帧 3D 光场图像序列中的第  $(i, j)$  个光场图像。  $E'_{i,j}$  和第  $f_m$  帧动画图像沿着  $x$  方向被均匀分割为  $N$  份,其中第  $n$  份图像在  $x$  方向的坐标范围为  $C_n = (n-1)\Delta c + 1 : n\Delta c$ , 假设光场

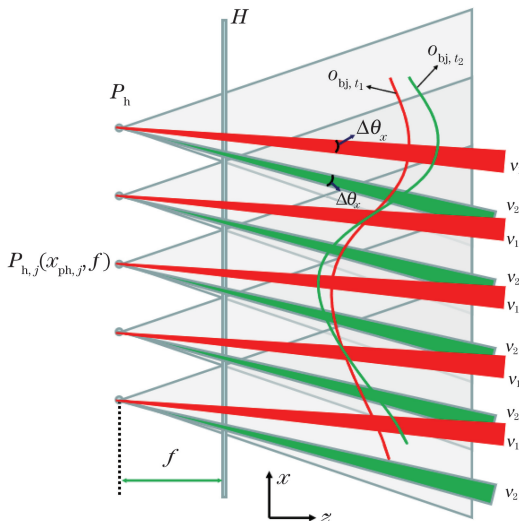


图 2 多视点动态全息图计算模型

Fig. 2 Multi-view dynamic hologram calculation model

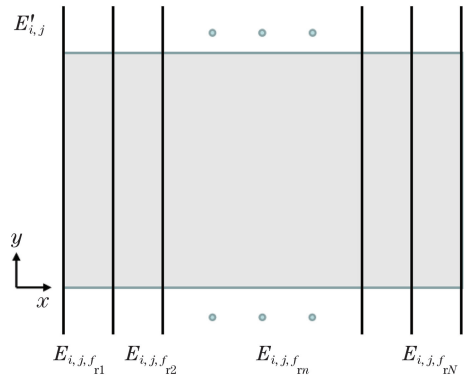


图 3 动态单元光场图像融合原理示意图

Fig. 3 Principle diagram of dynamic unit light field image fusion

图像的采样间隔为  $\delta$ , 则分割单元的像素数  $\Delta c = \frac{\omega_h}{N\delta}$ 。将第  $f_m$  帧动画图像中的第  $n$  份分割图像数据赋值给动态单元光场图像  $E'_{i,j}$  对应的分割单元, 即

$$E'_{i,j}(\sim, C_n) = E_{i,j,f_m}(\sim, C_n), \quad (9)$$

式中: “ $\sim$ ”表示图像数组在  $y$  方向上不进行分割重组。将所有帧动画图像的分割单元数据赋值给动态光场图像对应的单元, 即可融合得到完整的动态单元光场图像。

3) 获得第  $(i, j)$  个动态单元光场图像  $E'_{i,j}$  后, 用其替换(5)式中的单元光场图像  $E_{i,j}$ , 编码成第  $(i, j)$  个单元全息图。对所有的单元光场图像进行上述计算, 可最终得到高分辨率多视点动态全息图。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 全息图的计算、实验及结果

图4所示为不同坐标系下3D模型与全息图的位置关系, 3D模型的尺寸为  $18.8 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 17 \text{ mm}$ , 对应的完整点云数据模型包含  $4.06 \times 10^5$  个物点。物体中心到全息面  $H$  的距离为  $15 \text{ mm}$ , 全息图的尺寸  $W \times L = 32 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$ 。全息图计算时, 设置虚拟针孔阵列到全息面的距离  $f = 0.25 \text{ mm}$ ,  $x$  和  $y$  方向的视场角分别为  $\theta_x = 50^\circ$  和  $\theta_y = 20^\circ$ , 单元光场图像的长和宽分别为  $w_e = w_h = 2f \tan(\frac{\theta_x}{2}) = 0.23 \text{ mm}$  和  $l_e = l_h = 2f \tan(\frac{\theta_y}{2}) = 0.09 \text{ mm}$ 。单元光场图像的块数为  $I = \frac{W}{w_h} = 139$  和

$J = \frac{L}{l_h} = 355$ 。全息图编码时使用的参考光角度为

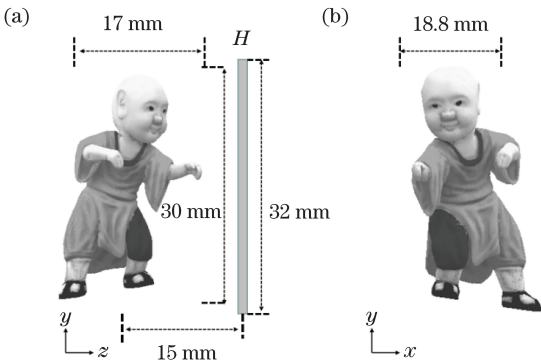


图4 不同坐标系下3D模型与全息图的位置关系。

(a)  $y-z$ ; (b)  $x-y$

Fig. 4 Position relationship between 3D model and hologram in different coordinate systems. (a)  $y-z$ ; (b)  $x-y$

$\theta_{ref,y} = 25^\circ$ , 波长  $\lambda = 532 \text{ nm}$ 。所设计的简单3D动画为: 在  $x$  方向上, 3D模型在  $-25^\circ$  到  $25^\circ$  范围内旋转, 帧数  $N = 50$ 。光场图像渲染时, 单元全息图的像素间隔在  $x$  和  $y$  方向上的设置相同,  $\delta = 1 \mu\text{m}$ , 则单元图像的分辨率为  $88 \text{ pixel} \times 233 \text{ pixel}$ 。从而通过第一步渲染50帧3D动画得到了  $355 \times 139 \times 50$  张光场图像序列。动态光场图像分割后的一个子块的分辨率为  $88 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ , 即  $\Delta x = 5$ 。全息图的像素尺寸由全息输出设备决定, 为  $\delta_h = 0.318 \mu\text{m}$ , 单元全息图的分辨率为  $283 \text{ pixel} \times 733 \text{ pixel}$ 。全息图总分辨率为  $100464 \text{ pixel} \times 101887 \text{ pixel}$ 。

在上述计算中, 光场图像渲染时的像素尺寸和全息图的像素尺寸不同, 当得到融合后的动态单元光场图像后, 对其进行插值, 使得插值后新的动态单元光场图像的分辨率与单元全息图的分辨率相同, 然后进行单元全息图的编码计算。

图5所示为计算得到的一个单元全息图。该单元全息图实际上是动态单元光场图像振幅调制的球面波与离轴平面波干涉得到的全息图, 这就是(5)式的物理意义所在。

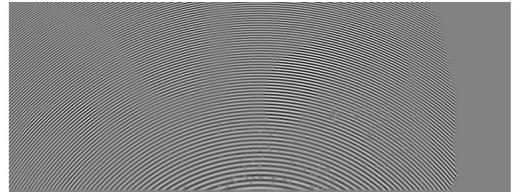


图5 计算得到的一个单元全息图

Fig. 5 Unit hologram obtained by calculation

全息图计算时使用了一个内存为16G, 硬盘容量为1000GB的计算机, 其中央处理器的型号为I7-9750H, 6核心12线程。使用matlab编程实现算法, 计算时开启6个线程进行并行计算以减少计算时间。光场图像渲染时间约为4.6h, 而光场图像融合及全息图编码的计算时间约为27min。全息图计算完成后, 通过自行开发的软件, 利用  $600 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$  单元对全息图进行分割和组合。然后, 使用自行研制的全息图输出系统<sup>[6-8,11]</sup>, 在光刻胶板上按单元序列进行逐行微缩曝光, 经后续化学处理后即得到高分辨率多视点动态全息图。图6为打印的高分辨率多视点动态全息图。

全息图再现时, 手机的闪光灯作为白光光源在全息图之后进行照明, 全息图固定于干板夹上, 使用位于一维导轨上的工业相机拍摄再现像。图7所示为所使用的工业相机及其拍摄的再现像结果。图7(a)

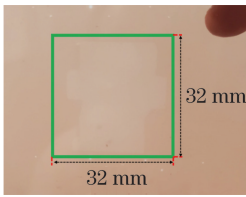


图 6 打印的高分辨率全息图

Fig. 6 Printed high-resolution hologram

所示为所使用的工业相机;图 7(b)、(c)所示为在中间视角下,相机分别聚焦于全息图和3D再现像时的拍

摄结果。可以看出,当相机聚焦于全息图时,再现现象模糊,而全息图上附着的灰尘清晰可见。当相机聚焦于3D再现像时,3D再现像变得清晰,而全息图由于离焦而变得模糊。说明所述方法可重构出3D光场图像。图 7(d)、(e)所示分别为相机位于左侧和右侧两个视点时拍摄到的3D再现像。可以看出,当观看视点变化时,人眼可以感受到3D模型连续旋转的3D动画效果。由于使用的工业相机性能问题及光刻胶的显示衍射效率较低,拍摄效果比实际观察的效果差,但从效果来看,已经实现了基本的实验预期。

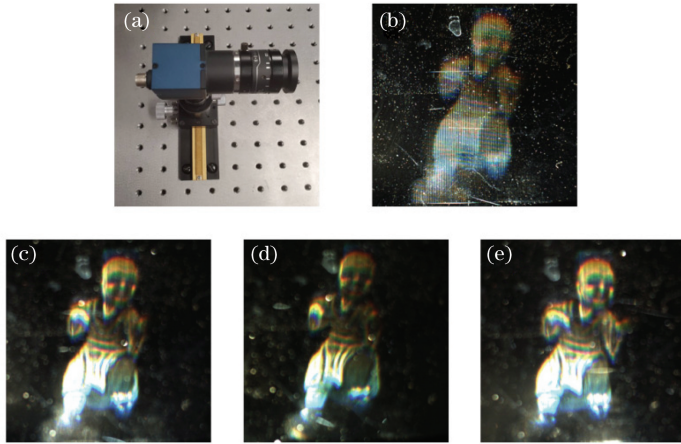


图 7 使用的拍摄相机及再现像。(a)位于一维导轨上的 USB 工业相机;(b)相机聚焦于全息面上时中间视角下的再现像;(c)相机聚焦于3D再现像上时中间视角下的再现像;(d)左视角下的再现3D像;(e)右视角下的再现3D像

Fig. 7 Adopted camera and reconstructed images. (a) USB industrial camera on one dimensional guiding rail; (b) reconstructed image in middle view angle when camera focusing on hologram; (c) reconstructed image in middle view angle when camera focusing on 3D image; (d) reconstructed 3D image in left view angle; (e) reconstructed 3D image in right view angle

### 3.2 分析及讨论

采用所提出的高分辨率多视点动态全息计算方法,能够在观察位置变化时实现连续3D动画变化效果。由于所设计的图像与全息图的距离较近,白光照明所产生的色散仍可被接收,因此可使用白光LED照明。3D模型与全息面的最远距离约为25 mm,再现效果显示,人眼能够看到清晰的图像。从而可以推测,当设计的物体尺寸在±25 mm的深度范围内时,均可清晰再现。

全息图计算时,使用的全息图位于针孔阵列和物体之间,且以发散球面波作为相位。当针孔位于全息图与物体之间时,以会聚球面波作为相位进行全息图的计算也是可行的。在所给出的实验中,仅在一个方向上实现了人眼观看连续3D动画变化,在图像融合时,将另一个方向的视点变化考虑在内也是可行的。给出的实验仅仅为简单的横向旋转的

动画效果,对于复杂的3D动画效果,也可通过所提方法来实现。

在实验中,使用的3D模型为建模得到的3D模型,仍可以通过结构光3D检测<sup>[13-15]</sup>等技术直接获取现实环境中的3D场景的数据,并用于高分辨率多视点动态全息图的计算以实现真实场景全息3D显示。

在光场图像渲染时,为了操作方便,直接渲染了50组光场图像序列,通过融合形成了一组动态光场图像以用于全息图的计算。这种方法存在计算冗余的问题,设计更加巧妙的计算方法来优化光场图像渲染的过程并减少光场图像渲染时间是我们之后的工作。在实验中,所计算的全息图尺寸较小,仅为32 mm×32 mm,后期我们将采用该方法实现更大尺寸的高分辨率多视点动态全息图的计算以促进其实用化。

## 4 结 论

在前期基于光场图像渲染的高分辨率全息算法研究的基础上,提出了高分辨率多视点动态全息 3D 显示方法,给出了 3D 动画的时间序列与多视角渲染的映射方法,在视点连续变化时实现了人眼观看连续动态变化的 3D 图像。所提出全息图计算方法对计算机的内存要求低,动态光场图像融合及全息编码计算速度快。所实现的高分辨率多视点全息 3D 显示丰富了计算全息 3D 显示的效果,有望应用于全息包装和 3D 广告等领域。

## 参 考 文 献

- [1] Yaras 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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Blinder D, Shimobaba T. Efficient algorithms for the accurate propagation of extreme-resolution holograms[J]. *Optics Express*, 2019, 27(21): 29905-29915.
- [11] 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.
- [12] 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): 030819.
- [13] Zhang H L, Deng H, Li J J, et al. Integral imaging-based 2D/3D convertible display system by using holographic optical element and polymer dispersed liquid crystal[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(2): 387-390.
- [14] Zuo C, Zhang X L, Hu Y, et al. Has 3D finally come of age?: an introduction to 3D structured-light sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303001.
- [15] 左超, 张晓磊, 胡岩, 等. 3D 真的来了吗?——三维结构光传感器漫谈[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 0303001.
- [16] Zhang Q C, Wu Z J. Three-dimensional imaging technique based on Gray-coded structured illumination[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303004.
- [17] 张启灿, 吴周杰. 基于格雷码图案投影的结构光三维成像技术[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 0303004.
- [18] Li Y, Zhang G H, Ma L H, et al. Review of dynamic three-dimensional surface imaging based on fringe projection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303005.
- [19] 李勇, 张广汇, 马利红, 等. 条纹投影动态三维表面成像技术综述[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 0303005.

# High-Resolution Multiview Dynamic Holographic 3D Display

Xu Fuyang<sup>1,2</sup>, Yang Xin<sup>3\*</sup>, Yao Jianyun<sup>1,2</sup>, Liu Zimo<sup>1,2</sup>, Song Qiang<sup>4</sup>, Li Yong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China;*

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Researching Optical Information Detecting and Display Technology in Zhejiang Province, Jinhua, Zhejiang 321004, China;*

<sup>3</sup>*School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;*

<sup>4</sup>*Lochn Optics & Micro/Nano Photonics Research Center of Hunan University, Shenzhen, Guangdong 518000, China*

## Abstract

**Objective** Holographic 3D display has gained considerable attention owing to its ability to completely reproduce the wavefront information of a 3D scene. To reconstruct a real and virtual 3D scene, computer-generated hologram (CGH) is found to be more flexible than optical holography. The CGH has two main branches, namely, the dynamic holography reconstructed by liquid crystals on silicon (LCoS) and the static high-resolution holography realized by photolithography. However, due to the large pixel size and low-resolution, dynamic holographic 3D display based on LCoS can only achieve a small field of view and small display size, thus limiting its application. High-resolution CGH can be calculated and printed using photolithography and copied for mass production. However, the computational time is a big challenge. To overcome this challenge, holography is regarded as an information encoding method, which is employed to encode light-field images, thereby significantly reducing the calculation time. Moreover, high-resolution holography can only reproduce a static 3D image, indicating that the viewer can see the perspective information of the 3D image from different angles, but with a static 3D image. Thus, more vivid holographic 3D display needs to be realized. In this study, multiview dynamic holographic 3D display is proposed by coding the dynamic light-field images fused from multiple rendered light-field images via 3D animation. In this new display, the viewer can see a 3D dynamic image when the viewpoint changes.

**Methods** In the hologram calculation, the sequence of the light-field image of each frame of the 3D model in the 3D animation was first rendered according to the pinhole array projection model. Then, the light-field images that correspond to the view angle information were extracted from the rendered multiple sets of light-field image sequences and fused to achieve the fused dynamic light-field image sequence. In the hologram coding, the frame of images in the dynamic light-field image sequence was taken as the object light amplitude, and the phase of the diverging spherical wave coming from the pinhole was taken as the object light phase. In addition, the plane reference light was used to obtain a unit hologram. Since the calculation of the dynamic light-field image and each unit hologram are independent of each other, we used parallel acceleration in the calculation process. Light-field image fusion and holographic coding of a high-resolution hologram with a size of 32 mm × 32 mm and a resolution of 100000 pixel × 100000 pixel only took 27 min.

**Results and Discussion** A 3D model with a size of 18.8 mm × 30 mm × 17 mm containing  $4.06 \times 10^5$  object points was employed for high-resolution hologram calculation. The distance between the 3D model and the hologram plane was 17 mm, and the 3D animation was rotated horizontally, including 50 frame. The 355 × 139 × 50 light-field images of the 3D animation were first calculated, and the 355 × 139 dynamic light-field images fused from the rendered light-field images were then utilized for hologram calculation. The high-resolution hologram with a size of 32 mm × 32 mm and a resolution of 100000 pixel × 100000 pixel is calculated and printed using our holographic output system. The dynamic light-field image fusion and hologram calculation only took 27 min. In the hologram reconstruction, a white LED light from a mobile phone was used to illuminate the hologram at the back of the hologram at a proper distance and illumination angle. A USB camera on a one-dimensional rail was used to take pictures of the hologram. When the camera was focused on the holographic plane, the holographic plane became clear, whereas the reproduced 3D image became blurred. When the camera was focused only on the 3D-reproduced image, the reproduced image became clear, whereas the holographic plane became blurred. This phenomenon indicates that the proposed display can realize the 3D light-field reconstruction. By moving the camera, the reproduced images of the other two perspectives were taken. Based on the results, we can infer that the 3D image actions are different in different perspectives. In the actual view, human eyes can see the continuously changing 3D animation by changing the viewpoints.

**Conclusion** High-resolution multiview dynamic holographic 3D display is realized based on the direct coding of dynamic light-field images. To produce the dynamic light-field images from the 3D animation, the mapping relationship between the viewpoints and the time sequence of 3D animation is established. The proposed 3D display is vivid with a dynamic 3D display from different viewpoints. The calculation method is also found to be effective. Although the display is a monochromatic 3D display, the color 3D display can be achieved using the combination of the color rainbow holographic method and the proposed method here. This will be the focus of our future work. Moreover, a large hologram can be produced for a more complex 3D animation to improve the practicality of the proposed method.

**Key words** holography; holographic 3D display; computer-generated holography; high-resolution hologram; dynamic holographic display; light-field image rendering

**OCIS codes** 090.1760; 090.2870; 090.4220