

基于计算全息的全视差合成全息研究

闫高宾, 于 佳, 刘惠萍, 阚凌雁, 王金城

(中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 文中进行了一种新型三维全息图的制作方法研究, 该方法基于计算全息原理, 与合成全息相结合, 实现激光三维全息图的直写打印制作。首先进行了菲涅耳计算全息图的实验, 表明计算全息与合成全息结合的可行性与合理性。然后根据合成全息原理与计算全息原理对三维模型进行采样和图像变换处理, 再计算出相应的菲涅耳计算全息图, 借助数字全息激光打印系统完成三维全息图的拍摄, 在激光下进行光学再现, 最后对再现结果进行了分析与讨论。

关键词: 计算全息; 菲涅耳衍射; 合成全息; 激光直写

中图分类号: O438 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2467-05

Full parallax stereo holography research based on CGH

Yan Gaobin, Yu Jia, Liu Huiping, Kan Lingyan, Wang Jincheng

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: A new method of making three-dimensional hologram by laser direct writing system was proposed, which was based on the principle of CGH and combined stereo holography. First, the experiment of fresnel computer generated hologram was conducted and the results demonstrated that it is feasible and rational to combine CGH with stereo holography. Then the three-dimensional model was sampled and the sampled image were processed by the principle of stereo holography and CGH. By digital holographic laser printing system, three-dimensional hologram was produced, which could be optically reproduced by laser, and the final results were analyzed and discussed.

Key words: computer generated holography; Fresnel diffraction; stereo holography; laser direct writing

收稿日期: 2014-12-17; 修订日期: 2015-01-03

作者简介: 闫高宾(1990-), 男, 硕士生, 主要从事计算全息方面的研究。Email: anjing224@163.com

导师简介: 于佳(1980-), 女, 讲师, 硕士生导师, 博士, 主要从事光全息与光信息处理方面的研究。Email: yujia2008ouc@126.com

0 引言

全息术是利用光的干涉和衍射原理,将物体发射的特定光波以干涉条纹的形式记录下来,并在一定条件下使其再现,形成原物体的立体像。由于记录了物体的全部信息(振幅和相位),因此称为全息术或全息照相^[1]。但由于全息图的拍摄对环境、稳定性等要求很高,因此在应用上受到很多的限制。计算机全息图是利用数字计算机来制作的全息图,它不需要实际物体,而是计算衍射光场的数学描述,输入计算机处理后,控制绘图仪输出或阴极射线显像管(CRT)显示而制成的全息图^[2]。1965年,在IBM工作的德国罗曼教授使用计算机和计算机控制的绘图仪制作了世界上第一幅计算全息图。1967年,巴里斯(D.P.Paris)把FFT算法应用到傅里叶变换全息图的计算中,大大减少了计算全息图的计算时间^[2]。由于计算全息图的制作完全由计算机完成,因此可以控制衍射光波的各因素,而产生理想的三维视觉效果或虚拟三维对象^[3]。但是计算全息在三维显示方面还存在诸多不便,如数据计算量庞大,三维物体的波面难以实现相应的获取,需要高分辨率的记录系统^[4]等,以至于目前难以实现商业推广应用。

合成全息是另一种特殊的全息图,它是将一组带有视差信息的二维图片,综合成为能显示三维图像信息的全息术^[1]。合成全息技术作为一种常用的三维显示方法,已经在防伪、包装等方面得到了广泛的应用,在科研领域也取得了很多成果。美国MIT实验室在90年代致力于发展数字合成技术,并制作了世界上第一幅大面积合成全息图^[5]。合成全息图制作需要采用双光束干涉拍摄,对环境的稳定性以及设备的性能要求很高,相应的先进技术与设备只有少数国家拥有,同时制作全息图的成本昂贵。

文中提出了新型激光直写制作全视差三维全息图的方法。该方法结合了计算全息与合成全息的优点,利用数字全息激光打印系统,使用激光单光束直写实现了三维全息图的制作。

1 原理

1.1 计算全息原理

计算全息图的制作和再现过程大致有以下五

步:(1)选择物体或波面的数学表达式并进行抽样处理,通常以图片格式存储的图像已经是一组离散数据,不必再作抽样处理。(2)计算物光在全息平面上的光场分布,在进行具体计算时,运用的是经典的标量波衍射理论,衍射坐标系如图1所示。

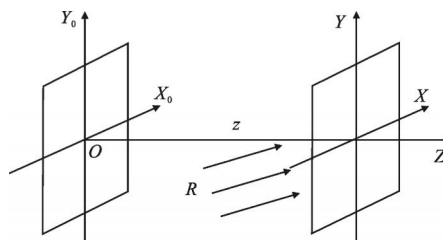


图1 菲涅耳衍射坐标系

Fig.1 Fresnel diffraction coordinate system

设物光在物平面的复振幅为 $O(x_0, y_0, 0)$, 衍射距离为 z , 在全息面上经过衍射的物光复振幅为 $O(x, y, z)$, 则由菲涅耳积分公式知:

$$O(x, y, z) = \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} O(x_0, y_0, 0) \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda z} [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0 \quad (1)$$

参考光为一平行光,其复振幅表示为:

$$R(x, y) = \exp(-jk y \sin \theta) \quad (2)$$

式中: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为传播矢量; θ 为参考光倾斜角度。全息面光场分布为:

$$U(x, y) = O(x, y, z) + R(x, y) \quad (3)$$

全息图记录的是光强分布^[6], 相对应的光强分布为:

$$I(x, y) = |U(x, y)|^2 = |O(x, y, z)|^2 + |R(x, y)|^2 + O(x, y, z)R(x, y)^* + O(x, y, z)^*R(x, y) \quad (4)$$

(3)把全息面光场分布编码成透过率变化,而透过率函数与全息面光强成正比。对计算得到的光强分布进行归一化,生成计算全息图图像。(4)把透过率变化通过高分辨率设备绘制出来,文中实验通过数字全息激光打印系统将计算全息图微缩成小单元,激光直写光刻于全息干板。(5)搭建实验所需的光路,全息干板垂直轴与平行光夹 θ 角度,可在设定衍射距离 z 处再现原物光。

1.2 激光直写合成全息原理

合成全息的基本制作方法将三维物体采样得到的一组二维图像序列,该序列的每一幅二维图像进

行变换处理,记录在全息干板上的一点,所有的点组成一个完整的图像。再现观察时,干板上每一点看作一个观察窗口,人眼紧贴全息图窗口时可看到该窗口所记录一幅二维图像,位于设计的远离窗口的观察距离时,只能观察到每个窗口的一部分二维图像,而必须通过所有观察窗口的图像信息组合,人眼才能看到一幅完整二维图像,图 2 给出了一维水平视差的情况,全视差同理。

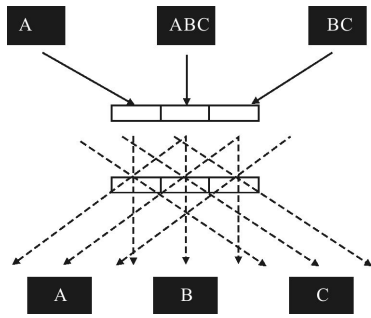


图 2 合成全息图的记录与再现

Fig.2 Recording and playback of synthetic hologram

因此,首先对二维图像组进行变换重组^[7]。将二维图像组视为二维矩阵,矩阵维数为 $M \times N$,每一幅图像编号 X_{mn} 。水平变换重组以第一行图像为例,从 $(X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1n}, \dots, X_{1N})$ 中每一幅图像提取相同位置相同像素数的竖条并按照顺序组成一幅新图像,记为 Y_{1j} 。依次类推,得到一组新的二维图像序列: $(Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1j})$ 。二维图像组的水平变换重组可表示为:

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1N} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{M1} & X_{M2} & \dots & X_{MN} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1j} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{M1} & X_{M2} & \dots & X_{Mj} \end{bmatrix} \quad (5)$$

竖直方向的变换重组过程与水平方向的变换重组过程类似,以第一列图像为例,从 $(X_{11}, X_{21}, \dots, X_{m1}, \dots, X_{M1})$ 中每一副图像提取相同位置相同像素数的横条并按照顺序组成一幅新图像,记为 Z_{k1} 。依次类推,得到一组新的二维图像序列: $(Y_{11}, Y_{21}, \dots, X_{k1})$ 。二维图像组的竖直变换重组可表示为:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1j} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{M1} & Y_{M2} & \dots & Y_{Mj} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1j} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{k1} & Z_{k2} & \dots & Z_{kj} \end{bmatrix} \quad (6)$$

按照上述原理,在制作计算全息图时预先对原

始二维图像序列进行变换重组,则制作出的全息图可实现图像的合成再现。

2 实验过程

2.1 数字全息激光打印系统

实验所用设备为实验室自主研制开发的数字全息激光打印系统,系统光路部分如图 3 所示。激光器为 405 nm 蓝光半导体激光器,功率为 300 mW,准直透镜焦距约为 50 mm,空间光调制器型号为 FSLM-HD70-A/P,调制方式为振幅型调制,像素数为 1920×1080 ,像元大小为 $8 \mu\text{m}$,经微缩镜头后,单像素成像大小为 $0.3 \mu\text{m}$ 。

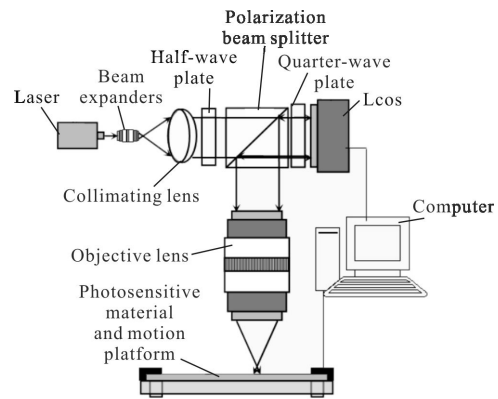


图 3 数字全息激光打印系统结构示意图

Fig.3 System structure diagram of digital holographic laser printing

2.2 菲涅耳计算全息图的制作与再现

为验证方法的可行性,实验以一幅文字图片作为物体,像素数为 3600×3600 。设定光源波长 λ 为 632 nm,图片实际尺寸为 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$,菲涅耳衍射距离 z 为 30 cm,参考光波与 y 方向夹 5° 倾斜角,计算过程用 MATLAB 编程实现,得到一幅菲涅耳计算全息图。将该计算全息图切分为 6 行 6 列,共 36 幅小图像。通过数字全息激光打印系统,每次将一幅小图像显示在空间光调制器上,曝光拍摄时通过微缩镜头将小图像刻印在全息干板上,结合控制运动平台的走位与空间光调制器显示图像的切换,经多次拍摄后得到一副拼接完整的计算全息图,计算全息图实际大小约为 $1.1 \text{ mm} \times 1.1 \text{ mm}$ 。对计算全息图进行光学再现,在距全息干板 30 cm 处,得到光学再现图,如图 4 所示。文字大小为 $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$,计算得到其衍射角度约为 28° 。

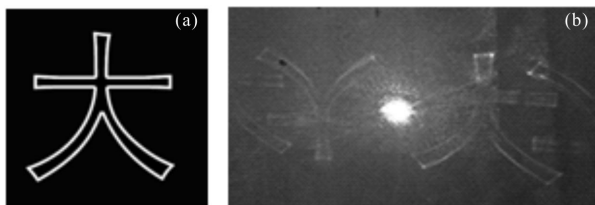


图 4 原始图片与光学再现图

Fig.4 Original image and its optical reconstruction

观察光学再现图可知,成功的再现出边缘清晰的原始图像,实现了菲涅耳计算全息图的制作。全息图上的每一个单元点可作为一个衍射光锥,将图像的视差变化信息携带于该光锥中,就可以与合成全息相结合来制作三维全息图。

2.3 二维图像组的变换重组

文中使用 3Dmax 软件对制作的立方体多角度采样,采样间隔角度为 1° ,取 10 幅相邻的立方体采样图像组成原始二维图像序列,单幅图像大小为 $3\ 600 \times 3\ 600$ 。根据合成全息原理对二维图像序列进行变换重组,得到处理后的新二维图像序列。原始三维图像序列如图 5 所示。经过变换重组后的新图像序列如图 6 所示。

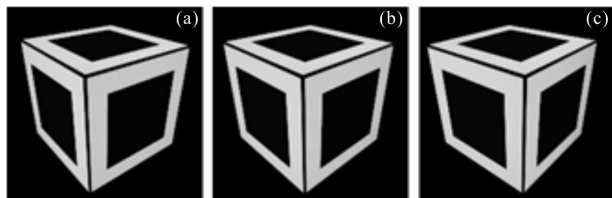


图 5 原始图像(其中 3 幅)

Fig.5 Original image

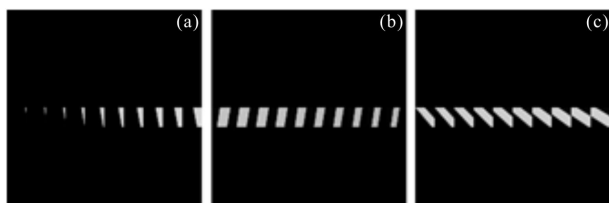


图 6 变换重组后图片(其中 3 幅为例)

Fig.6 Images after transformation and restructuring

3 实验结果

对新图像序列中的每一幅图片进行计算,根据菲涅耳计算全息图的实验数据,对新图像进行计算时使用了同样的参数设置,图 7 给出了菲涅耳计算全息图其中的 3 幅。

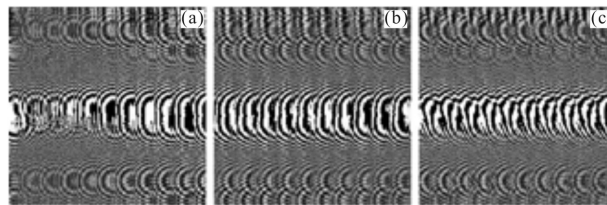


图 7 计算全息图(其中 3 幅)

Fig.7 Computer generated holograms

对每一幅计算全息图进行分割拍摄,拍摄后得到的计算全息图大小约为 $1.1\text{ cm} \times 1.1\text{ cm}$ 。将拍摄得到的全息干板进行光学再现,得到再现图像,如图 8 所示。光学再现时全息干板垂直轴与平行光夹 5° 倾斜角,在距离干板 30 cm 处观察到连续变化立体图像,再现角度约为 28° 。

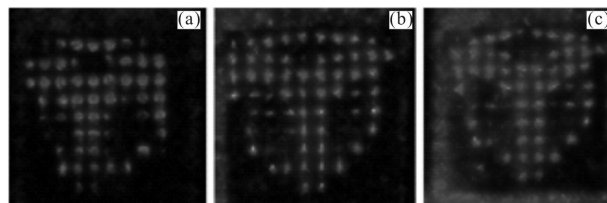


图 8 光学再现图(其中 3 幅)

Fig.8 Optical reconstruction

4 结论

文中提出了一种将计算全息与合成全息相结合制作三维全息图的新方法,并制作了一张三维全息图,光学再现结果证明将计算全息与合成全息相结合是一种可行的制作三维全息图的方法,对于实现全息图的商业化应用与生产具有现实的意义。从实验结果可以看出,目前的实验还存在分辨率不够,存在噪声,单元全息图尺寸还需要减小等问题,相信随着程序算法的优化与技术设备的进步,问题会得到逐步解决,该方法会得到更加广泛的应用。

参考文献:

- [1] Yu Meiwen. Optical Holography and Information Processing [M]. Beijing: Defense Press, 1984. (in Chinese)
于美文. 光学全息及信息处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [2] Yu Zuliang, Jin Guofan. Computer Generated Hologram [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984. (in Chinese)
虞祖良, 金国藩. 计算机全息图 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1984.

- [3] Ting -Chung Poon, Virginia Tech. Digital Holography and Three Dimensional Display[M]. Berlin: Springer, 2005: 1-3.
- [4] Li Fazhi, Zheng Ligong, Yan Feng, et al. Optical testing method and its experiment on freeform surface with computer-generated hologram [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1052-1056. (in Chinese)
黎发志, 郑立功, 闫锋, 等. 自由曲面的 CGH 光学检测方法与实验[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1052-1056.
- [5] Michael W Halle, Stephen A Benton, Michael A Klug, et al. Ultragram: a generalized holographic stereogram [C]// Practical Holography V. International Society for Optics and Photonics, 1991: 142-155.
- [6] Zhang Hongke, Tang Chunming, Yu Xiang, et al. Suppression of the Zero-order image in digital off-axis holography based on Gaussian kernel function [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 44(1): 90-93. (in Chinese)
张洪科, 汤春明, 于翔, 等. 基于高斯核函数离轴数字全息零级像的抑制[J]. 红外与激光工程, 2014, 44(1): 90-93.
- [7] Guo Chunhua, Yu Jia, Wang Jincheng, et al. Laser direct writing of full-parallax synthetic hologram [J]. *Photon Journal*, 2010(3): 518-521. (in Chinese)
郭春华, 于佳, 王金城, 等. 全视差合成全息图的激光直写拍摄[J]. 光子学报, 2010(3): 518-521.