

# 基于傅里叶合成全息彩色全息制作方法

王姣姣 于 佳 刘惠萍 程 凯 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** 提出了一种新型的傅里叶变换彩色编码彩虹合成全息图的自动化制作方法。根据数字合成全息原理和角度分区假颜色编码技术,三维模型经过图像处理得到拍摄图像并由空间光调制器显示。利用傅里叶变换全息光路和大数值孔径的物镜,在谱面上形成点元。借助计算机设定程序和运动控制系统,自动逐点干涉打印,实现大幅面大视角的彩色编码彩虹全息图的制作。

**关键词** 全息;合成全息;傅里叶变换;图像处理;干涉直写

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0209001

## Method of Color Holographic Stereogram Generation Based on Fourier Transformation

Wang Jiaojiao Yu Jia Liu Huiping Cheng Kai Wang Jincheng

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

**Abstract** An automatic method of making color coded synthesized Fourier transform hologram is proposed. The images of the three-dimensional model are processed by the principle of synthesized holography and the pseudo color coding method. The processed images are displayed by a spatial light modulator (SLM). The light, through the SLM and the Fourier transform optical path and the lens with a large numerical aperture, forms a point pixel on the spectrum plane. By a computer and the program control systems, a large-format color-coded large-viewing angle rainbow hologram is produced pixel by pixel automatically.

**Key words** holography; synthetic holography; Fourier transformation; image processing; interference direct writing

**OCIS codes** 090.1705; 090.1995; 100.3175

## 1 引 言

数字全息打印技术是当前三维显示研究领域的前沿。美国麻省理工学院<sup>[1]</sup>、日本东京工业大学<sup>[2-3]</sup>、亚利桑那大学<sup>[4-5]</sup>、美国斑马影像公司<sup>[6]</sup>相继利用数字合成全息打印技术实现了幅面可扩展的彩色全息打印输出<sup>[7]</sup>。

数字全息打印技术多数基于合成全息技术,它解决了传统全息图像难以记录和再现运动物体的问题。从20世纪90年代的合成全息图像的三步法到一步法,在自动化生产和大视角方面有了明显的进步<sup>[8]</sup>。计算机科学和图像处理技术的成熟更是推动了全息技术数字化的发展,计算机控制系统和空间光调制设备的应用使得拍摄点阵全息图成为可能,数字合成全息应运而生<sup>[9-10]</sup>。数字点阵合成全息是将物体的信息以点阵的方式记录,用照明光源再现时,所有记录点共同作用,再现出原有物体信息,实现三维图像全息显示<sup>[11-12]</sup>。

傅里叶全息记录的是物光波的频谱,而不是物本身,大部分的低频物体的频谱非常集中。傅里叶全息由于体裁受限,多用计算全息计算三维模型,逐点计算衍射光场的傅里叶变换,干涉记录生成全息图。当模型较大时,数据计算量庞大,难以获取相应三维物体的波面<sup>[13]</sup>,以至于目前难以实现商业推广应用。本文不需要计算三维模型,而是通过现有的三维软件自动输出一系列二维图像序列,再对二维图像序列进行变换重组和颜色调制,拍摄出彩虹合成全息图。该傅里叶全息和合成全息相结合的方法,突破了傅里叶全息的

收稿日期: 2015-07-16; 收到修改稿日期: 2015-09-12

作者简介: 王姣姣(1990—),女,硕士研究生,主要从事三维成像方面的研究。E-mail: sdhdwj@163.com

导师简介: 于 佳(1980—),女,讲师,硕士生导师,主要从事激光全息和立体显示方面的研究。

E-mail: yujia2008ouc@126.com(通信联系人)

记录方法和合成全息二步法的人为操作,可以简便快捷地实现彩虹合成全息图自动化制作。

本文基于数字点阵合成全息的思想,借助傅里叶全息图的光路,自动逐点干涉打印,无需再现透镜,实现了白光再现、彩色编码彩虹全息图的制作;并结合大数值孔径的物镜,实现大视场的立体显示。

## 2 基本原理

图像处理的自动化过程如图1所示。计算机形成的三维模型经过程序控制,自动采样得到一系列二维图像序列,并做变换重组得到二维拍摄图像。其中,变换重组原理包括数字合成原理和角度分区假彩色编码的原理。

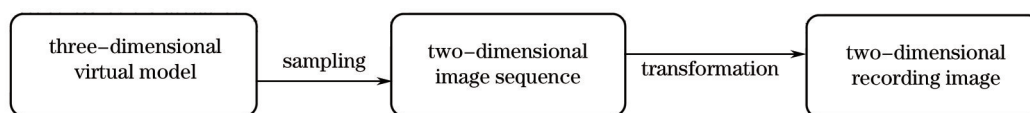


图1 图像处理流程图

Fig.1 Procedure of image processing

### 2.1 数字合成全息的原理

全息术可以记录与再现真实的三维物体,但记录条件严格,且不能记录大型物体或室外景物。即使采用激光记录动态物体,还是会受到激光功率和相干长度的限制,合成全息图的出现解决了这一问题。合成全息是对物体进行多角度记录,获取一组满足体视对关系的二维图像序列,利用全息摄影技术和双眼视差原理合成一张全息照片,实现原物体立体感的三维显示技术<sup>[4]</sup>。数字合成全息是以空间光调制器代替胶片作为二维图像的载体。

如图2所示,要使全息干板  $H$  再现出立体图像  $I$ ,可将  $H$  分割为  $n$  个单元分别记录,  $I$  也应分为  $n$  个部分,且与  $n$  个单元全息图对应。对于  $H_i$  单元,立体感由双目视差原理产生,需使  $H_i$  向不同的视场方向再现出不同的图像  $I_{i1}, I_{i2}, I_{i3}, \dots, I_{im}$ , 根据全息的特点,需将这  $m$  个图像同时从其各自对应的方向重叠投影到  $H_i$  上,并与参考光干涉记录。为使各处看到的图像都具有立体感,应保证相邻图像块的视角间隔小于人的双眼视差,同时为保证立体像具有连续性,通常  $m$  取值较大。在进行曝光拍摄时,需利用空间光调制器显示处理后的图像。

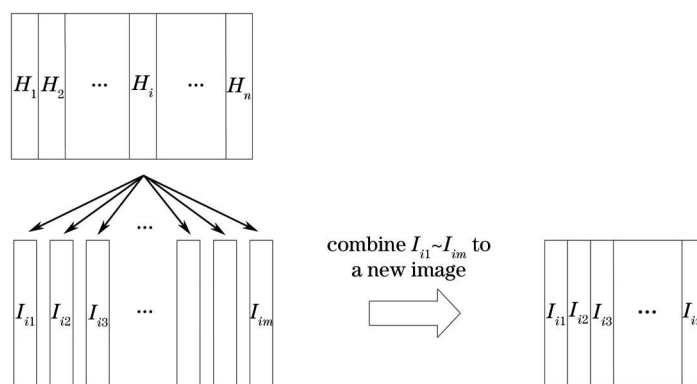


图2 数字合成全息原理图

Fig.2 Principle of digital holographic stereogram

### 2.2 角度分区假彩色编码的原理

基于彩虹全息原理,用角度分区编码方法合成彩色再现像。光栅记录公式为:

$$d(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) = \lambda_0, \quad (1)$$

式中  $\lambda_0$  为激光波长,  $d$  为光栅常数,如图3(a)所示。

如图3(b)所示,对光栅衍射公式  $d(\sin \alpha \pm \sin \beta) = k\lambda$ , 取观察角为零,即  $k=1, \beta=0$  得:

$$d \sin \alpha = \lambda. \quad (2)$$

如图4所示,不同位置的物光与参考光形成不同的夹角  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  记录,  $\lambda_0$  一定的情况下将得到不同的光栅常数  $d_1, d_2, d_3$ , 再现时看到三种颜色叠加的假彩色全息图。若设计的恰好是三原色,可得到原物体的彩色再现。

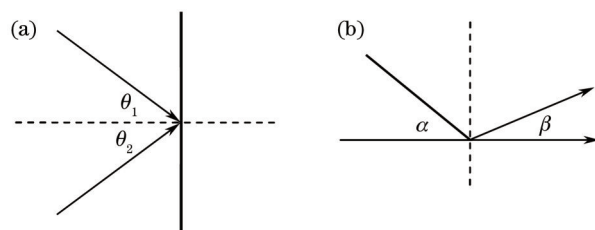


图3 光栅记录和衍射示意图。(a) 光栅记录; (b) 光栅衍射

Fig.3 Schematic for recording and reconstruction of grating. (a) Recording; (b) diffraction

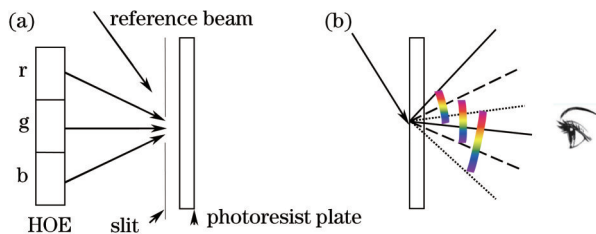


图4 三通道彩色信息记录与再现示意图。(a) 记录; (b) 再现

Fig.4 Schematic for three-channel color information. (a) Recording; (b) reconstruction

使用波长 $\lambda_0=532\text{ nm}$ 的半导体激光器。选定 $\theta_{r1}=\theta_{g1}=\theta_{b1}=45^\circ$ ,则 $\alpha=45^\circ$ 。采用1931CIE- $\text{RGB}$ 标准,选取三原色为: $\lambda_r=700\text{ nm}$ , $\lambda_g=546.1\text{ nm}$ , $\lambda_b=435.8\text{ nm}$ 。代入(1)式和(2)式得:

$$\begin{cases} \theta_{r2} = -9.77^\circ \\ \theta_{g2} = -1.05^\circ, \\ \theta_{b2} = 8.98^\circ \end{cases} \quad (3)$$

即为角度分区彩色编码方法所需的角速度。

### 3 实验与结果

#### 3.1 光路设计与实现

该系统基于合成全息和颜色编码原理,以傅里叶全息光路为基本光路,对物光进行微缩和傅里叶变换,在谱面上干涉,逐点自动化打印全息图,其结构示意图如图5所示。给定一个经计算机形成的虚拟三维物体,经图像处理程序自动生成二维图像,由空间光调制器显示。物光携带空间光调制器的图像信息,经过傅里叶变换,在全息干板平面上形成极小的傅里叶谱面的点元。参考光与物光位于全息干板同一侧,夹角约为 $45^\circ$ ,经过双远心透镜组整形,形成与物光点元等大的光斑,在全息干板上与物光干涉,通过运动控制系统

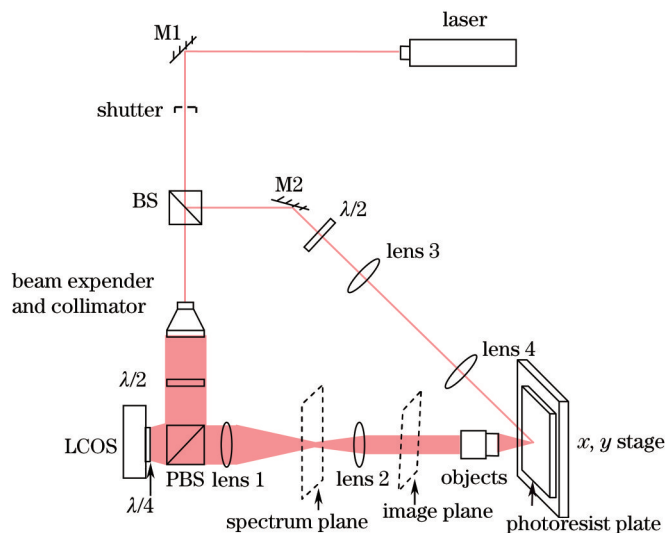


图5 全息干涉打印光路示意图

Fig.5 Schematic for holographic printing experiment

控制干板的精确移动和快门的开合,逐点打印形成一幅全息图,实现傅里叶变换彩虹全息图的记录。

实验室采用波长为 532 nm 的半导体激光器(型号为 MSL-F),功率为 500 mW,激光出射后经分束镜分成物光和参考光。物光经扩束准直后照射到反射式液晶空间光调制器(LCOS)上。其中,扩束镜倍数为 20 倍,准直透镜焦距为 300 mm。LCOS(型号为 FSLM-HD70-A/P)的像元大小为 8.4  $\mu\text{m}$ ,像素数为 1920 pixel $\times$ 1080 pixel,对比度为 2000:1,其像素和对比度均比 LCD 的要好。携带图像信息的物光依次经过透镜 1、透镜 2 和物镜,完成由物面到谱面,再到像面,最后到谱面的变换,同时完成多次微缩,最终在全息干板平面形成很小的谱面光点。使用显微物镜来实现大数值孔径,即大会聚角的谱面记录光点,以实现再现时的大视角,所用显微物镜(100X Mitutoyo Plan Apo Infinity-Corrected Long WD Objective)放大倍数为 100 倍,入瞳小,因此需要多级图像微缩,数值孔径 NA 为 0.7,对应张角理论值为 88.86°,由于光能分布的特点,实际值约为 60°~65°,也可实现再现大视角与较强的立体感。参考光经透镜 3 和透镜 4 微缩,也在全息干板平面形成与物光等大的光点。考虑到 LCOS 和偏振分光棱镜(PBS)的偏振特性,加入了  $\lambda/2$ 、 $\lambda/4$  波片,以使物光和参考光保持同样的偏振性,从而干涉。运动控制器在计算机设定的程序控制下控制快门的脉冲时序、LCOS 的图像变换和精密二维平台的移动,在全息干板上逐点打印,记录图像信息。

实验中采样图像共 90 帧,拍摄图像为 900 pixel $\times$ 900 pixel,记录光点直径约为 0.45 mm,记录点数为 8100 个,单幅曝光时间为 140 ms。

### 3.2 实验结果

拍摄到的数字合成全息图幅面大小约为 40.5 mm $\times$ 40.5 mm,在白光下再现的结果如图 7(a)所示,与采样图像[图 6(b)]相比,还原了原始模型的三维效果以及一定的颜色信息。再现时,全息图左右旋转有视差变换,在较大视角范围内可以实现很好的三维立体显示。

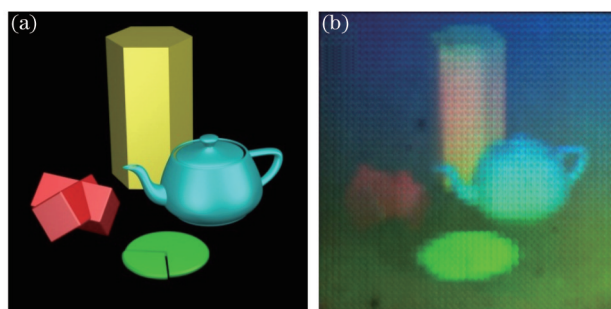


图 6 实验结果图。(a) 三维模型; (b) 再现图像

Fig.6 Reconstruction result. (a) three-dimensional model; (b) reproduced image

## 4 分析与讨论

当观察角度变化时,再现图像并不能完全准确地还原原始模型的颜色信息,如图 7(a)所示,这是彩虹全息图固有的特点,即衍射光的颜色随衍射角度的变化而变化造成的。同时,再现全息图的视角还是不够理想,如图 7(b)所示,当角度变化较大时,边角处会出现较暗的区域。

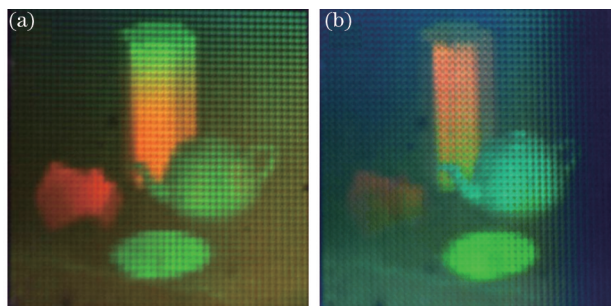


图 7 观察角度变化时的再现图像。(a) 观察角度上下变化; (b) 观察角度左右变化

Fig.7 Reconstruction results when the observing angle changes. (a) Observing angle changes vertically; (b) observing angle changes horizontally

## 5 结 论

提出了一种白光再现傅里叶变换彩色编码彩虹全息图的自动化制作方法。基于数字点阵合成全息的思想,借助傅里叶全息图的光路,在运动控制系统和计算机程序控制下,在谱面逐点干涉打印,无需再现透镜,就能实现白光再现、彩色编码彩虹全息图的制作。结合大数值孔径的物镜,实现了全息图的大视场的立体显示。使用本方法的程序和系统,给出一个经计算机形成的虚拟三维模型,即可自动生成全息图。自动化制作过程为生产大面积的彩色编码彩虹数字全息图提供了一种有效途径。

## 参 考 文 献

- 1 M A Klug, A Klein, W Plesniak, *et al.*. Optics for full-parallax holographic stereograms[C]. SPIE, 1997, 3011: 78-88.
- 2 M Yamaguchi, H Higuchi, R Kojima, *et al.*. Evaluation of light-ray reproducibility in full-parallax holographic stereogram[C]. Digital Holography and Three Dimensional Imaging, 2007: DTuA4.
- 3 S Maruyama, Y Ono, M Yamaguchi. High-density recording of full-color full-parallax holographic stereogram[C]. SPIE, 2008, 6912: 69120N.
- 4 S Tay, P A Blanche, R Voorakaranam, *et al.*. An updatable holographic three-dimensional display[J]. Nature, 2008, 451(7179): 694-698.
- 5 P A Blanche, A Bablumian, R Voorakaranam, *et al.*. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer [J]. Nature, 2010, 468(7320): 80-83.
- 6 T H Jeong, R J Ro, R W Aumiller. Return of the leith-upatnieks transmission hologram[C]. SPIE, 2000, 4149: 390-396.
- 7 Lou Yimin, Chen Linsen, Wei Guojun, *et al.*. Method and system of three-dimensional laser printing based on consecutive spatial frequency modulation[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209009.  
楼益民, 陈林森, 魏国军, 等. 基于连续变频技术的三维图像激光打印方法与系统[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209009.
- 8 Guo Chunhua, Yu Jia, Wang Jincheng, *et al.*. Laser direct writing of full-parallax synthetic hologram[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(3): 518-521.  
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, 39(3): 518-521.
- 9 Yu Jia, Wang Yang, Liu Huiping, *et al.*. Development and status quo of digital stereogram[J]. Laser Journal, 2005, 26(2): 1-2.  
于 佳, 王 杨, 刘惠萍, 等. 数字合成全息图的发展和现状[J]. 激光杂志, 2005, 26(2): 1-2.
- 10 Yang Yu. One-Step Pseudo Color Digital Stereogram[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011: 4-7.  
杨 宇. “激光直写”大面积拼接透射彩色数字合成全息图的制作方法[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011: 4-7.
- 11 Yang Xin, Li Yong, Wang Hui, *et al.*. Reconstruction of computer generated true color rainbow holograms by filtering in frequency domain [J]. Chinese J 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.
- 12 Y T Li, T J Wang, S N Yang, *et al.*. Theoretical and experimental study of dot matrix hologram[C]. SPIE, 1998, 3559: 121-129.
- 13 Jin Hongzhen, Lou Yimin, Wang Hui, *et al.*. Integral color hologram of virtual 3D object generated by integral photography[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1304-1309.  
金洪震, 楼益民, 王 辉, 等. 基于集成照相术制作虚拟三维物体彩色全息图的新方法[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1304-1309.
- 14 Yu Meiwen. Optical Holography and Its Applications[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996: 487.  
于美文. 光全息学及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 487.

栏目编辑: 刘丰瑞