

文章编号:1004-4213(2010)03-0518-5

全视差合成全息图的激光直写拍摄*

郭春华,于佳,王金城,韩正英,王添,杨宇

(中国海洋大学 信息科学与工程学院,山东 青岛 266100)

摘要:为了实现可白光下再现的全视差拼接合成全息图,结合图像处理技术、合成全息图的原理,提出一种激光直写拍摄技术.实验得到了具有 57° 的较大观察视场的数字合成全息图,并实现了 $1 \times 1 \text{ m}^2$ 大面积拼接.

关键词:合成全息;全视差;激光直写;图像处理

中图分类号: O436

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103903.0518

0 引言

自 20 世纪 90 年代起,制作大面积全视差合成全息图成为世界各国显示全息研究的热点之一^[1-4]. 美国 MITmedia 实验室的 Michael A. Klug^[5] 提出了一种可用于全视差合成全息图的电脑合成技术,发表了一种可用于控制图像清晰度的优化照明技术. 波士顿的 Adam B Kropp^[6] 以扫描线为基础提出一种可快速生成全视差合成图像数据的计算机图形算法. 烟台师范学院的陈建农^[7] 提出一种利用正弦光栅的色散特性,两步法制作全视差彩虹全息的方法. 目前,国内显示全息方面,尤其是大面积合成显示全息图仍然处于研发阶段,落后于世界先进水平. 就此,本文提出了一种拍摄合成全息图的激光直写技术,也可以说是一种三维合成全息图的激光打印技术. 这种技术利用合成全息图自动拍摄装置,结合图像处理技术和计算机自动控制技术,不必制作母全息图,用激光打点一次完成白光再现合成三维(动态)全息图的制作. 利用这种技术还可以将一幅全息图分割成若干单元分别制作,然后再拼接复原成一幅大面积显示全息图,从而解决了超大面积全息图制作的种种困难,并且大大降低了制作成本. 而且,与国外图像处理时所运用的光线跟踪等复杂算法相比,本文所采用的方法简单快捷,更容易实现.

1 激光直写技术的原理

合成全息是通过多对物体进行多角度记录,获取一组满足视差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成为一张全息照片,实现原物体立体感的三维显示技术^[8]. 与用实物拍摄的

全息图不同,合成全息图的立体感不是由于原三维物光波的波前再现,而是来源于一系列二维图像叠加形成的体视对集合.

1.1 合成全息二步法拍摄原理

目前国内合成全息图制作多采用两步法^[9],如图 1. 采用两步法制作,即先拍摄合成菲涅尔全息图母版,再翻拍成白光再现全息图.

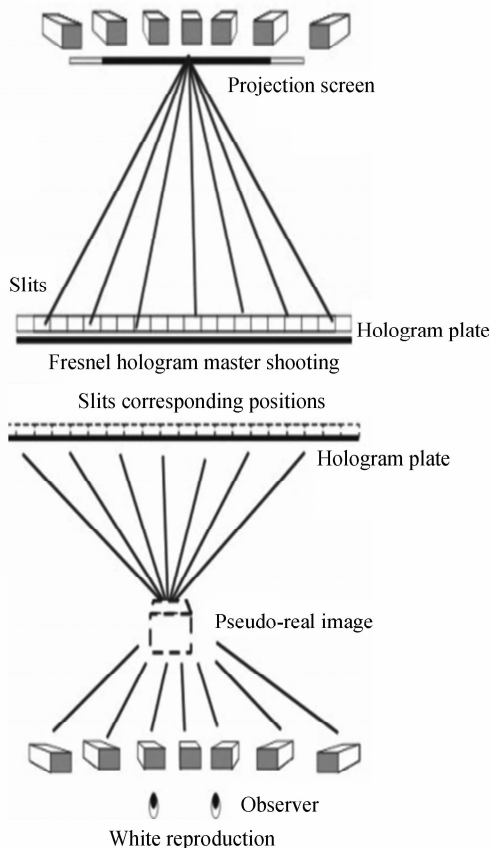


图 1 两步法合成全息原理图

Fig. 1 Two-step holographic stereography

其缺点主要有两点:首先过程复杂,无法实现自动化生产.更重要的是,两步法拍摄的全息图在观察时,其母版菲涅尔全息图的像会形成一个观察窗口,

* 国家高技术研究发展计划(2006AA09Z230)资助

Tel:0532-66781853

Email:ziyao222@163.com

收稿日期:2009-10-23

修回日期:2009-11-09

只有观察者在此窗口内才能看到完整的图像,而窗口大小,即原母版大小,受限于大口径的透镜、大面积的全息干版等因素,因而难以实现大视角再现.对拼接方法制作的大面积全息图而言,要求每一幅单元全息图都要有很大视角,能够使各个单元全息图共有较大的观察视场.

1.2 激光直写合成全息原理

针对这些问题,在合成全息图原理的基础上提出激光直写拍摄技术,即将一幅二维图像经过全息衍射元件压缩,直接记录在合成全息图一个矩孔上,如图 2(a).

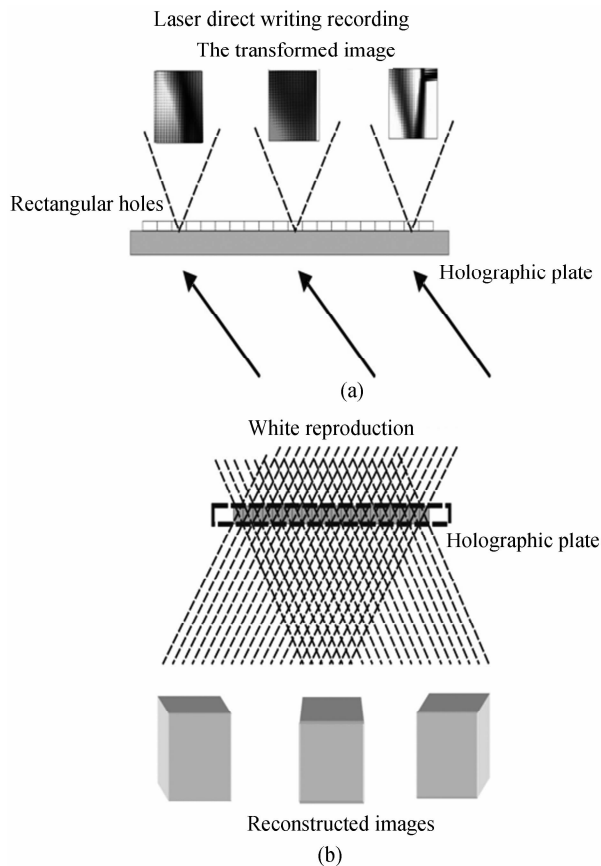


图 2 激光直写合成全息原理图

Fig. 2 Laser direct writing holographic stereography

由图 2(b)可以看出,记录在干板上的是经过信息压缩变换的点像.全息图再现时,当人眼紧贴全息图时可看到原二维图像,而位于观察距离,如明视距离 25 cm,或大型全息图观察距离 1 m 以上时,从每一个矩孔只能看到每个“点”不完整的一小块图像,无法满足观察时原物波前再现要求.为此,必须对合成全息图所用的二维图像进行相应的变换.目的是使得变换后的图像用于拍摄合成全息图,再现时,即使每一“点”再现时某一角度只能看到一小部分图像信息.综合整个全息图,仍可看到满足合成立体要求的完整图像,同时,有一个较大的观察视场,满足大型全息图的显示要求,如图 3.

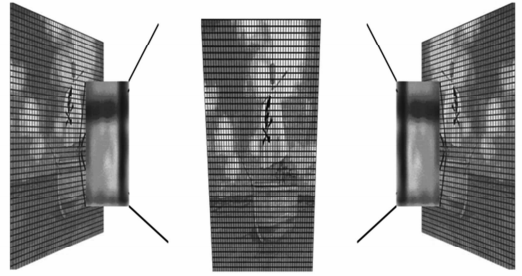


图 3 编码图像再现时像点信息组合,实现合成立体效果的示意图

Fig. 3 Sketch of every dot showing only a bit of the image while whole images are put together

将经过图像处理后的二维图像序列按采样时的角度记录到全息干板相应的点上.白光再现时,当观察者在适当位置观察再现像时,双眼看到的来自不同“点”的两幅平面图像,这两幅图像形成的体视对在人脑中的合成效果形成了观察者的立体感觉,从而得到原物体某一角度的再现.从图 3 可以看出观察者在不同位置将会看到原物体不同角度的立体再现像,从而获得视觉上的立体效果.

2 实验过程

实验首先进行图像变换,然后利用数字合成全息拍摄系统实现激光直写拍摄技术,拍摄全视差合成全息图.

2.1 图像预变换

图像变换分两个步骤,首先进行水平方向的变换,然后进行竖直方向变换,此二过程可交换先后顺序.在变换之前,需要对采样得到的原始图像进行编号,将采样得到的所有二维图像编组为一个二维图像阵列,维数为 $I \times J$,每一幅图像编号为 X_{ij} , $i(=1, 2, \dots, I)$ 对应水平方向的位置, $j(=1, 2, \dots, J)$ 对应竖直方向,每一幅图像 X_{ij} 维数相同,为 $M \times N$,即图像的像素数为 $M \times N$.

在水平方向变换过程中,将水平方向维数为 M 的 X_{ij} 以向量的方式表示为 $X_{ij} = (x_{ij1}, x_{ij2}, x_{ijk}, \dots, x_{ijM})$,其中向量 x_{ijk} 是一个 N 阶向量,表示图像矩阵 X_{ij} 中第 k 列像素,因此,此时 $X_{ij} = (x_{ij1}, x_{ij2}, x_{ijk}, \dots, x_{ijM})$ 是由 M 个像素列拼成的一幅二维图像.水平方向变换的过程是:从 $(x_{ij1}, x_{ij2}, \dots, x_{ijk}, \dots, x_{ijM})$ 中提取某一像素列、从全部二维图像阵列中提取 I 个像素列,组成一幅新图像,例如,当 $j=1$,提取 $X_{11}, X_{21}, \dots, X_{I1}$ 中的每一个第 1 列,依次排列为 $(x_{111}, x_{111}, x_{111}, \dots, x_{111})$,组成新图像矩阵,记为 Y_{11} ;提取 $X_{11}, X_{21}, \dots, X_{I1}$ 中的每一个第 2 列,依次排列为 $(x_{112}, x_{212}, x_{312}, \dots, x_{I12})$,组成新图像矩阵, Y_{12} ;依次类推,直到得到 $Y_{1M} = (x_{11M}, x_{21M}, x_{31M}, \dots, x_{I1M})$.此时得到一组新的二维图像序列, $Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1M}$.对每一

个 $j=1, 2, \dots, J$, 重复以上步骤, 则可得到 J 组新的二维图像序列. 图像阵列的水平变换可以表示为

$$\begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1J} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{J1} & X_{J2} & \dots & X_{JJ} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1M} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{J1} & Y_{J2} & \dots & Y_{JM} \end{pmatrix}$$

竖直方向的变换原理和水平方向变换过程类似, 在竖直方向变换过程中, 将竖直方向维数为 N 的 Y_{ij} 以向量的方式表示为 $Y_{ij} = (y_{ij1}, y_{ij2}, y_{ij3}, \dots, y_{ijN})^T$, T 表示对矩阵进行转置, 其中向量 y_{ijk} 是一个 M 阶水平向量, 表示图像矩阵 Y_{ij} 中第 k 行像素, 因此, 此时 $Y_{ij} = (y_{ij1}, y_{ij2}, \dots, y_{ijk}, \dots, y_{ijN})^T$ 是由 N 个像素行拼成的一幅二维图像. 竖直方向变换的过程是: 从 $(y_{ij1}, y_{ij2}, \dots, y_{ijk}, \dots, y_{ijN})^T$ 中提取某一像素行, 从全部图像二维阵列中提取 J 个像素行, 组成一幅新图像, 具体过程和水平方向变换类似, 直到得到一组新的二维图像序列, $Z_{M1}, Z_{M2}, \dots, Z_{MN}$. 图像阵列的竖直变换可以表示为

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1J} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{M1} & Y_{M2} & \dots & Y_{MJ} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{M1} & Z_{M2} & \dots & Z_{MN} \end{pmatrix}$$

此时的图像阵列将适用于合成全息图的拍摄.

原始图像序列由软件生成, 像素数 $500 \times 500 \text{ px}^2$, 见图 4, 经变换后的新图像见图 5.

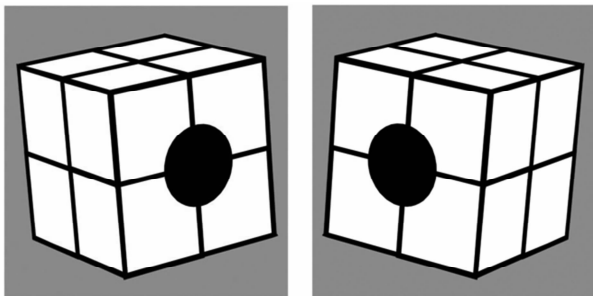


图 4 由计算机生成原始图像序列(其中二幅)

Fig. 4 Examples of original series of images of a cube



图 5 经图像变换处理后用于拍摄的图像序列(其中五幅)

Fig. 5 Images being pre-distortion transformed while not yet being segmented in horizontal rows

2.2 合成全息实验

实验采用数字微反射镜 DMD 作为空间光调制器^[10], 将图像投射于空间作为物光, 经过自制全息

光学元件(Holographic Optical Element, HOE)会聚于矩孔位置, 同时参考光来自全息干板另一面, 单光束以 45° 角左右投射到矩孔上, 保持两束光光程差约为 0(全息光学元件的制作方法将另文叙述). 干板前后均有挡板, 挡板中心为矩孔, 调整矩孔大小使其与图像会聚点的尺寸相同(大约为 $1 \times 1 \text{ mm}^2$). 使用计算机控制移动干板、改变输出图像、控制快门曝光的协调运作, 自动完成全息图的激光直写记录. 光路示意图如图 6(1. 激光器; 2. 反射镜; 3. 分束镜; 4. 扩束镜; 5. 准直透镜; 6. DMD 空间光调制器; 7. 成像镜头; 8. 全息光学元件(HOE); 9. 矩孔; 10. 自动走位全息干板架).

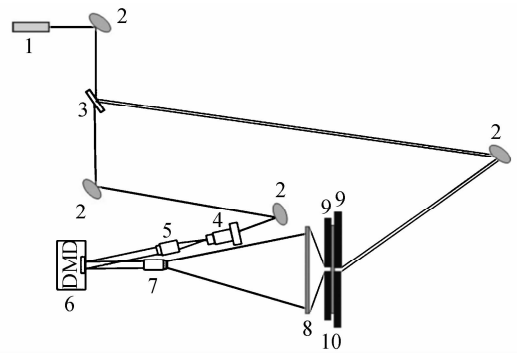


图 6 实验光路图

Fig. 6 Sketch of optics of laser direct writing stereogram experiment setup

3 实验结果及分析

实验所采用的激光器为氦氖激光器, 功率 70 mW, 记录材料为银盐干板. 干板上下左右移动步长设定为 1 mm, 曝光 50×50 次, 每个点曝光时间 3 s, 最终得到全息图尺寸为 $5 \times 5 \text{ cm}^2$. 全息图的照片如图 7.



图 7 实验拍摄的全视差全息图照片

Fig. 7 Four photos of the full parallax stereogram recorded in this experiment

前文提到两步法制作大面积拼接合成全息图, 再现时其视场张角(以水平方向为例)会受到母版的限制, 如图 8, 假设由两块宽度为 10 cm 的单元全息图拼合而成一幅大面积合成全息图, 对应的单元母版宽度为 20 cm, 单元全息图和单元母版距离为 25 cm, 经计算可知, 该合成全息图的公共视场角为 23° , 较为狭小.

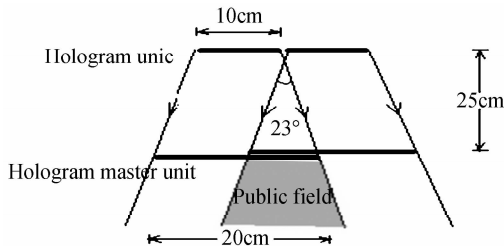


图8 两步法公共视场分析

Fig. 8 Public field of two-step holographic stereography

而用激光直写方法制作大面积拼接合成全息图,如图9,所拍摄单幅图像大小大约为 $5 \times 5 \text{ cm}^2$,距离干板为5 cm,则该图像的视场张角(以水平方向为例)经计算为 57° 。当拍摄多幅合成全息图时,其公共视场角保持不变,为 57° ,可见激光直写方法的视场角远优于二步法。对此张角进行分析,当人站在距离干板1 m处观察此全息图时,其公共视场宽度达到了1 m,该视场宽度可以基本满足各种要求。同时还可以通过修改基础实验数据从而得到更大的视场张角。

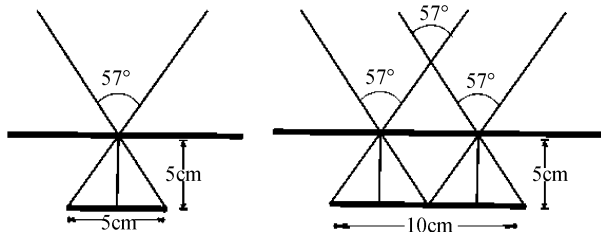


图9 激光直写全息图公共视场分析

Fig. 9 Public field of laser direct writing stereogram

4 结论

本文提出的激光直写制作大视场全视差合成全息图的方法,借助数字图像处理技术,采用简单光路,实现了合成全息图的完全自动化拍摄,同时记录了物体的全视差信息,获得视差显著的再现像。实验证明该方法更有利于全息图的自动化、产业化生产,是一种十分可行的全息显示技术。对解决国内大面积大视场合成全息图全自动拍摄问题,赶上世界前沿大面积合成显示全息图商业化生产和商业化应用的进程,具有现实的意义。

参考文献

- [1] HAINES K, HAINES D. Computer graphics for holography [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, January, 1992; 37-46.
- [2] MICHAEL W H. The generalized holographic stereogram[D]. Submitted to the Media Arts and Sciences Section, School of Architecture and Planning in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Visual Studies at the Massachusetts Institute of Technology, 1991; 13-15.
- [3] WANG Yuan-yuan, WANG Hui, REN Zhi-jun, *et al*. Research of the computer generated dynamic rainbow hologram[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1018-1021. 王媛媛, 王辉, 任志君, 等. 动态数字彩虹全息显示的研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(7): 1018-1021.
- [4] WEI Tao, ZHU Jian-hua, CHEN Li-gong, *et al*. Digital holographic display based on digital micromirror device and quality enhancement of its reconstructed image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 952-956. 魏涛, 朱建华, 陈立功, 等. 基于 DMD 的数字全息显示及其再现像质增强[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 952-956.
- [5] MICHAEL A K. Optics for full-parallax holographic stereogram[C]. *SPIE*, 1997, **3011**: 10-20.
- [6] HALLE M W, KROPP A B. Fast computer graphics rendering for full parallax spatial displays[J]. Spatial Imaging Group, MIT Media Laboratory Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA 02139.
- [7] CHEN Jian-nong. Two step rainbow holography with whole parallax[J]. *Optical Technique*, 2000, **26**(3): 275-280. 陈建农. 全视差二步彩虹全息[J]. *光学术*, 2000, **26**(3): 275-280.
- [8] YU Mei-wen. Optical holography and its applications [M]. Beijing: Beijing Insitute 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.
- [9] YING Chao-fu, MA Li-hong, WANG Hui. Digital holograms with large viewing angle[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(1): 87-91. 应朝福, 马利红, 王辉. 大视角数字全息的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 87-91.
- [10] WANG Jin-cheng, GUO Huan-qing, LANG Hai-tao. A system of digital synthetic generated hologram[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(7): 740-745. 王金城, 郭欢庆, 郎海涛, 等. 数字合成全息系统[J]. *光电子 • 激光*, 2002, **13**(7): 740-745.

Laser Direct Writing of Full-parallax Synthetic Hologram

GUO Chun-hua, YU Jia, WANG Jin-cheng, HAN Zheng-ying, WANG Tian, YANG Yu
(College of Information Science and Engineering, Ocean University, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: For making white reproduction, large viewing zone, full-parallax synthesis holograms, the direct writing method is put forward. Based on the digital image processing technology and the principle of stereogram hologram, the experiment produced a hologram with a large viewing zone of 57° . And holograms have achieved a $1 \times 1 \text{ m}^2$ large-scale splicing.

Key words: Stereogram; Full-parallax; Laser direct writing; Image processing



GUO Chun-hua was born in 1985. Now she is pursuing her M. S. degree at Department of Physics, Ocean University of China. Her main research interests focus on the holography and three dimensional display.



WANG Jin-cheng was born in 1955. He received the M. S. degree from Department of Physics, Qingdao University in 1982. Now, he is a professor at Ocean University of China. His main research interests focus on optical holography and color information processing.