

基于多视差立体显示的数字合成全息技术研究

龙涛 钱可元

(清华大学深圳研究生院 半导体照明实验室, 广东 深圳 518055)

摘要 合成全息图利用多视差图像实现立体显示,并可通过分区曝光实现大面积制作。介绍了数字合成全息的原理及其实验系统,针对其制作过程中的两种图像采样方式,研究了图像的分割和重组原则。通过对单元全息图合成拍摄中图像重叠投影的分析,基于非成像光学理论设计制作了能实现这一功能的透镜,并借助光学软件对其进行了仿真。最后利用所设计的透镜进行了合成全息实验,结果表明,利用所设计的重叠投影透镜和适当的图像处理方法,能合成出轮廓清晰、立体感强的全息立体图。

关键词 全息;柱透镜;全息显示;数字图像处理

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP49.070901

Research on Digital Synthetic Holography Based on Multi-Parallax Stereo Display

Long Tao Qian Keyuan

(Laboratory of Semiconductor Lighting, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract Synthetic holography takes advantage of multi-parallax images to realize stereo display, and it can produce large area image through partition exposure. We describe the theory and system of digital synthetic holography and discuss the principle of the image division and recombination for two sampling modes. After analyzing the overlapped projection of the recombination image during the unit holograms exposure, we design an overlapped projecting lens based on nonimaging optics theory. The lens is simulated through optical design software. Finally we perform synthetic holography experiments with the lens. The results show that using the overlapped projecting lens and an appropriate image processing method, a clear-cut holographic stereogram with a strong three-dimensional sense can be obtained.

Key words holography; cylindrical lens; holographic display; digital image processing

OCIS codes 090.2870; 080.2740

1 引言

三维(3D)立体显示一直是人们研究的热点。在众多3D立体显示方案中,数字合成全息技术利用3D物体的二维(2D)视差图像来实现立体显示,原理上既利用了视差立体显示的思想,又利用了光学全息“可原物光衍射复现”的本质特点。结合当前的空间光调制技术和计算机图像处理技术,它理论上可以实现任意场景的大面积、真彩色、全视差立体显示^[1],在广告、展示等方面具有广阔的应用前景,成为世界各国研究的热点。

20世纪90年代,美国麻省理工学院的多媒体实验室开始致力于大面积、大视角的数字合成全息图的研究,并发表多篇论文论述了其技术难点和关键问题^[2~4]。合成全息图通常是将一个大面积全息图分成许多小单元来进行记录,在对每个小单元全息图进行拍摄时,需实现对图像物光光场的会聚,并保证会聚光场的均匀。利用普通柱透镜虽能实现光束的会聚,但不能使物光图像的不同部分重叠在一起,且无法保证会聚光

收稿日期: 2012-03-09; **收到修改稿日期:** 2012-04-07; **网络出版日期:** 2012-05-31

作者简介: 龙涛(1985—),男,硕士研究生,主要从事合成全息技术方面的研究。

E-mail: long.tao09@alum.sz.tsinghua.edu.cn

导师简介: 钱可元(1957—),男,研究员,主要从事光电子技术方面的研究。E-mail: qianky@sz.tsinghua.edu.cn

(通信联系人)

场的均匀性^[5]。利用复眼透镜可实现会聚光场的均匀,也满足物光图像重叠会聚的要求,但复眼透镜构造复杂,且像差的影响也较大^[6]。目前多是利用衍射光学元件(DOE)或全息光学元件(HOE)来进行全息图的拍摄^[7]。利用DOE小巧灵活的特点,再结合光学透镜可以得到大视场角的三维全息图,但DOE元件设计加工困难,且以这种元件拍摄的合成全息图多是基于单像素点来进行合成,为了保障合成全息图的分辨率,就要使每次曝光的单元全息图尺寸很小,这又使得拍摄完一幅大面积全息图的时间非常长。国内论述过自制HOE的方法^[8],但这种方式制作的元件实质是通过牺牲图像的分辨率来实现光场的均匀,不仅衍射效率低,且光场的会聚程度也受到限制,而光场的会聚程度直接决定着全息图的再现视场角。文献[9]提出利用线阵透镜来实现合成全息图的拍摄,也无法实现光束的有效会聚,视场角不可能大。

本文通过分析单元全息图合成拍摄过程中图像的重叠投影过程,基于非成像光学理论设计制作了重叠投影透镜来实现这一功能,并利用所制作的透镜实验得到了理想的全息立体图。

2 合成全息的原理及系统

合成全息图是将许多视差图像记录在同一块全息干板上来实现立体显示,并将一个大面积全息图分成许多小的单元,通过依次对这些小单元全息图进行曝光来合成一幅完整的大面积全息图。

合成全息图分为水平视差和全视差两种,本文仅涉及水平视差,即只利用水平视差图像来合成全息立体图。设有一全息干板 D ,要在其上再现出一个立体图像 d ,可以将 D 分割为 n 个小单元 $D_1、D_2、D_3、\dots、D_n$ 进行记录,对应的图像 d 也应分为 $d_1、d_2、d_3、\dots、d_n$ 共 n 个部分,且与 n 个单元全息图一一对应。对 D_i 单元,三维立体感是依靠双目视差原理产生的,需使 D_i 向不同的视场方向再现出不同的图像,根据全息的特点,就需将不同的图像同时从其各自对应的方向投影到 D_i 单元上,并和参考光相干被同时记录。

如图1所示,设 D_i 向不同方向再现的图像为 $d_{i1}、d_{i2}、d_{i3}、\dots、d_{im}$,那么可以将这 m 个图像块拼合成一幅新图像进行记录。记录时需将图像中不同的图像块重叠投影到 D_i 上,为使人在无论在何处看到的图像都具有三维立体感,应保证相邻图像块的视角间隔小于人双眼对全息图的视角差,同时为保证再现的立体像具有一定的连续性, m 的值通常较大。但在进行曝光拍摄时,需利用空间光调制器[液晶空间光调制器(SLM)或数字微镜(DMD)等]显示拼接后的图像,由于SLM像素的限制,单元 D_i 的大小通常选为 $1\sim 2$ mm。

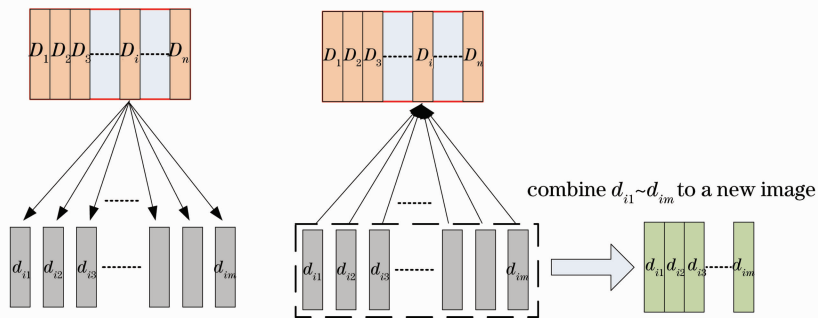


图1 合成全息原理图

Fig. 1 Principle of synthetic holography

进行单元全息图拍摄的关键,就是要利用某种重叠投影透镜将 d_{i1} 到 d_{im} 这 m 个图像块重叠投影到 D_i 单元上,并保证投影光场的均匀,而常规柱透镜是无法实现对各图像块投影成像的。光束的会聚角越大,全息图再现的视场角就会越大。

进行数字合成全息图拍摄的光路^[10]如图2所示,He-Ne激光器发出的激光通过半透半反镜后被分成两束,然后各经过一扩束准直系统得到两束较理想的扩束平行光,一束作为参考光,从全息干板的背面入射到干板上;另一束透过SLM,SLM由计算机控制显示拼接后的图像,作为物光。成像透镜先将SLM上显示的图像进行放大成像,再由柱透镜将图像的不同部分重叠投影到全息干板上,干板前后均设置光学孔径隔挡杂散光,其狭缝小孔和单元全息图尺寸匹配。每曝光一次,全息干板移动一定的距离进行下一个单元全息图的拍摄。

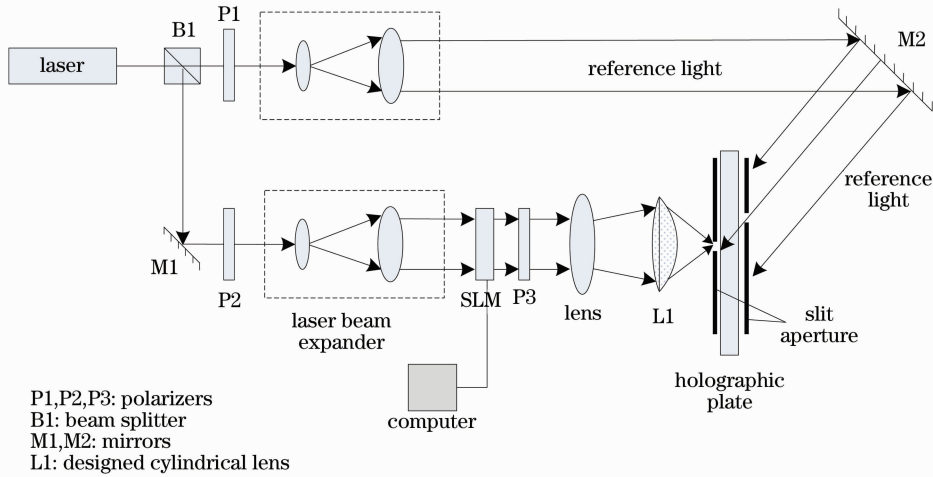


图2 合成全息图的拍摄系统

Fig. 2 Imaging system of synthetic holography

3 视差图像的采样和重组

制作合成全息图首先要对一个3D模型从不同的角度进行采样,得到其不同视角的一组2D图像。采样有多种不同的方式,例如沿直线等距离采样或沿圆周等角度采样,而采样位置决定着全息图的再现观察范围。采样之后,接着要对得到的视差图像进行分割重组,在进行图像重组时,为保证最终再现像不失真,应根据每个图像块相对全息图的投影方向来选择图像块,以单元全息图 D_i 为例,在生成 D_i 对应的图像 $d_{i1} \sim d_{im}$ 时,应根据 $d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}, \dots, d_{im}$ 相对于 D_i 的入射角来选择其对应的采样图像。下面对直线和圆周两种采样方式下图像的重组分别进行说明。

对于直线采样情形,如图3所示,设采样点距全息干板的距离为 h_2 ,全息干板宽 D ,被等分成 n 个小单元 D_1, D_2, \dots, D_n ,每个单元宽 D/n 。对其中第 i 个单元 D_i 而言,其对应的图像为 d_i ,根据前面的分析可知, d_i 由 m 个窄条图像块 $d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}, \dots, d_{im}$ 拼接而成,然后被成像透镜放大成像在干板前距干板 h_1 处, h_1 处放置柱透镜将不同图像块重叠投影到 D_i 单元,由于 $d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}, \dots, d_{im}$ 各图像块相对于 D_i 的入射角是确定的,且该入射角对不同的单元不变,可整体考虑,设为数组 deg :

$$\text{deg} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_m],$$

式中 θ_k 是 d_i 中的第 k 个图像块 d_{ik} 相对 D_i 的入射角。在图3中连接 D_i 和 d_{ik} 中点并延长交于采样直线上一点 l_j ,则 l_j 的位置为

$$l_j = \tan \theta_k \cdot h_2 + D_i. \quad (1)$$

这样可确定 d_i 的第 k 条图像块 d_{ik} 应该取自在 l_j 处采样图像的第 i 条图像块(此处假设已将每个采样图像都等分成了 n 条,与全息干板上的 n 个单元对应)。通常 l_j 点不会正好对应某个采样点,而是介于两个采样拍摄点之间,例如图中的 l_{k-1} 和 l_k ,这时可以利用 l_{k-1} 和 l_k 点的采样图像通过线性插值得到 l_j 点的图像,也可以采取就近原则,从 l_{k-1} 和 l_k 中选择更接近 l_j 点的采样图像作为 l_j 点的图像。

圆周采样的情况基本类似,只是计算方法稍有不同,如图4所示。因为现在是等角度采样,所以必须计算出 l_j 点所对应的采样角度。设采样圆周的半径为 R ,各角度标注如图4所示,则有

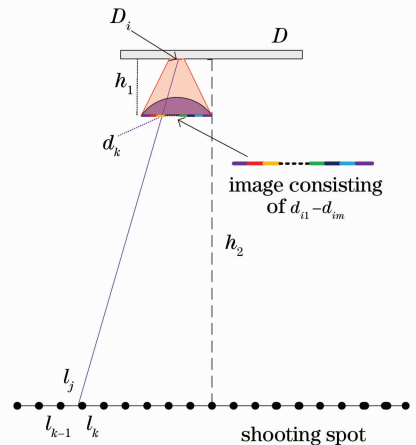


图3 沿直线采样时重组图像块的选择

Fig. 3 Selection of the image blocks when sampling the scene along a line

$$\arcsin(D_i \cos \theta_j) / R = \theta_i, \quad (2)$$

$$\theta_k = \theta_i + \theta_j, \quad (3)$$

可得

$$\theta_k = \arcsin(D_i \cos \theta_j) / R + \theta_j. \quad (4)$$

所以, d_i 的第 k 条图像块 d_{ik} 应该取自于在角度 θ_k 处采样得到的 2D 图像的第 i 条图像块。

4 重叠投影透镜的设计和仿真

在合成全息图的拍摄中,需利用某种柱透镜将 $d_{i1} \sim d_{im}$ 各图像块重叠投影到一处,要根据图像块数对透镜曲面进行分段设计。

在图 2 所示的数字合成全息图拍摄系统中,激光透过 SLM 后所携带的图像信息,先经成像透镜放大成像,然后才被重叠投影透镜会聚投影到全息干板上。由于 SLM 像素尺寸的限制,激光透过 SLM 后会衍射出多级衍射图像。为消除不同级衍射图像的影响,可在图像的频谱面上设置小孔进行滤波,只让 0 级图像通过,根据傅里叶光学知识,该面就是成像透镜的后焦面,如图 5 所示。物光图像经过小孔后的传播行为可按几何光学进行近似,实验也证实,在小孔后不同的距离处放置投影屏均可以得到清晰的像。在其后 23 cm 处,测得像面宽 3.6 cm,据此可以估算出 0 级图像的发散角约 9° ,如图 6 所示。

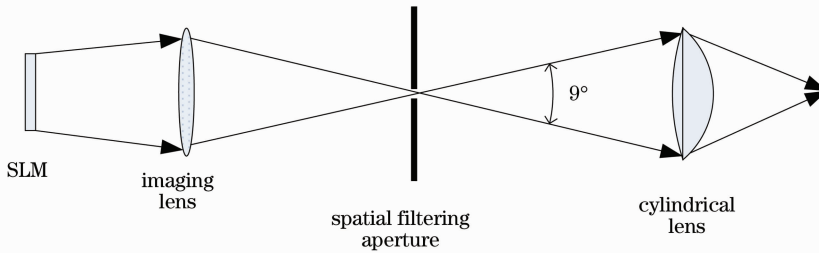


图 5 使用空间滤波小孔后物光图像的传递光路

Fig. 5 Propagation of the objective image after using a spatial filtering aperture

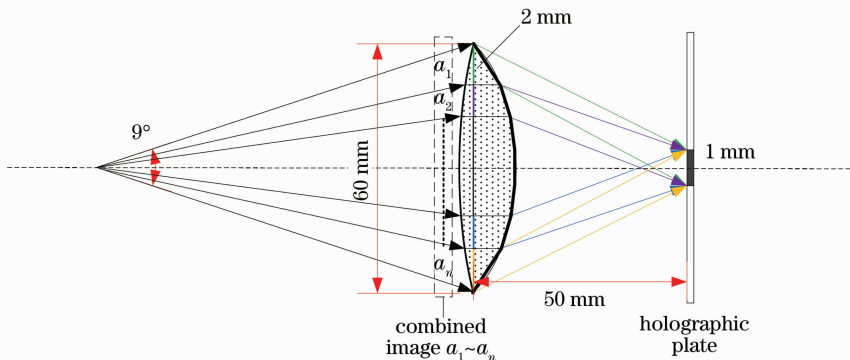


图 6 柱透镜原理示意图

Fig. 6 Principle of cylindrical lens

根据实际系统中所成图像的大小设定柱透镜尺寸为 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 。由于图像具有 9° 的发散角,可将透镜前表面设计为曲面,用于对发散物光进行准直;后表面为柱状曲面,只需对其横截面曲线进行设计。图 6 为透镜俯视图,其后表面曲线沿水平方向被均分成 30 段,每段宽 2 mm,而单元全息图宽 1 mm,为此需分别设计每段曲线,使其能将各自对应的图像块投影到其后 1 mm 宽的单元全息图上,全息图距透镜

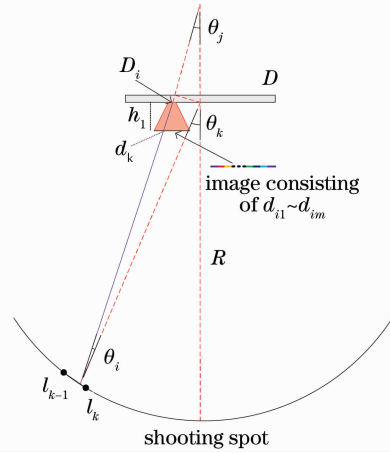


图 4 沿圆周采样时重组图像块的选择

Fig. 4 Selection of the image blocks when sampling the scene along an arc

50 mm。透镜加工时所选材料为有机玻璃,其对 He-Ne 激光的折射率为 1.4896。

由于物光的轴对称性,透镜的前表面可设计成旋转曲面,参照图 7 所示坐标系,设 $L1, L2, L3$ 是由点光源发出的 3 条光线,经透镜前表面折射后变为平行光,3 条光线在到达 y 轴时光程相等,据此可以列出前表面上任意 1 点 (x, y) 所满足的方程:

$$\sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{(b-x)^2 + y^2} + n_1 x, \quad (5)$$

式中 $n = 1.4896$ 为材料折射率, $a = 30$ mm, $b = a/\tan 4.5^\circ$ 。

令 $c = \sqrt{a^2 + b^2}$, (5) 式可以化简为

$$y^2 = (n_1^2 - 1)x^2 - 2(n_1 c - b)x + (c^2 - b^2). \quad (6)$$

这是一种双曲线方程,所以其前表面为旋转双曲面。

在对后表面曲线进行设计时,利用光线追迹的方法,使每段 2 mm 宽曲面都能将光线折射到其后 1 mm 宽的全息单元上,并保证光线的均匀分布。可在两边各均匀取样 100 个点,通过样点的一一对应来进行光线追迹,并通过迭代计算出各样点的坐标值,然后将计算出的样点导入 3D 计算机辅助设计(CAD)软件生成柱面曲线,进而建立柱透镜的 3D 模型。

利用 TracPro 软件对柱透镜进行光学仿真的结果如图 8 所示。由于对称性,只对透镜右上角 1/4 区域进行了仿真,仿真图像为入射在透镜端面上的 8 个小箭头,每个箭头尺寸 2 mm × 2 mm,间隔 2 mm,经过柱透镜后在其后 50 mm 远处会聚,会聚所得的图像如图 8(b)所示。为了看清图像细节,像面探测器的尺寸设定为透镜尺寸的 1/4,即 30 mm × 30 mm。

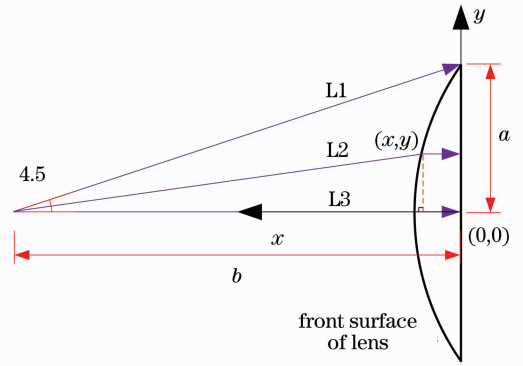


图 7 柱透镜前表面曲线图

Fig. 7 Front surface of the cylindrical lens

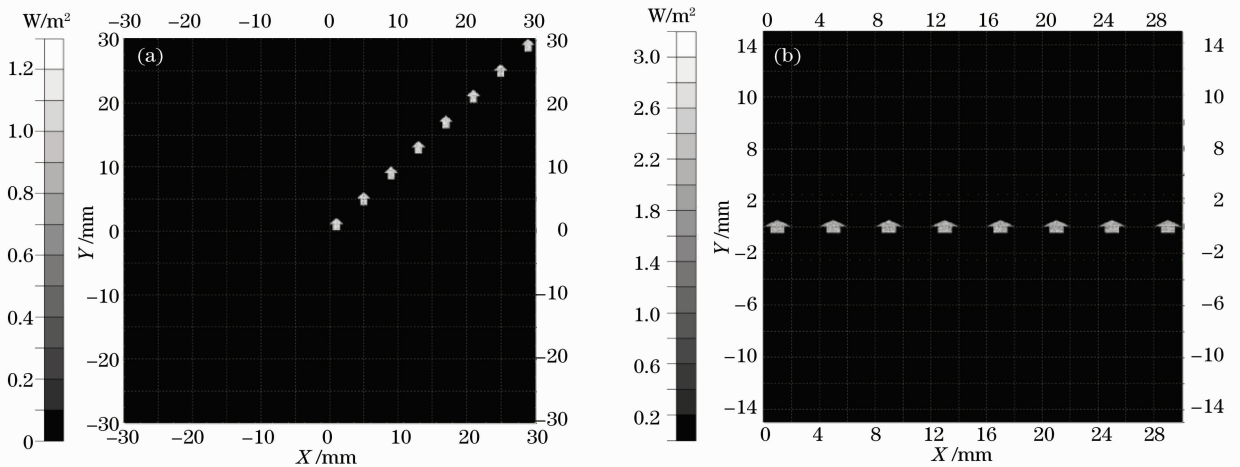


图 8 对柱透镜光学仿真的结果。(a)柱透镜前端面上的像;(b)经过柱透镜会聚后的像

Fig. 8 Optical simulation results of the cylindrical lens. (a) Image on the front surface of the cylindrical lens;

(b) image after convergence by the cylindrical lens

5 合成全息实验过程及结果

利用所设计的重叠投影透镜进行合成全息图制作的实验过程如下。1)进行 2D 视差图像的采样。为简便起见,可利用 CAD 软件先建立一个 3D 立体模型,然后渲染输出其一组水平视差图像,实际实验中是建立了一个椅子的模型,并从 80° 视场范围沿圆周等角度采样得到 160 幅不同的 2D 图像,采样角度间隔为 0.5° 。2)对得到的 2D 图像进行处理和分割。根据全息干板所划分的单元数将每幅图像等分成 40 份,并转换成灰度图。3)对分割的图像进行重组。根据前面所述图像重组原则,生成 40 幅新图像,每幅图像由 30 个图像块

组成,并调整其大小使之与 SLM 的像素匹配。4)将得到的新图像序列依次通过 SLM 输出来进行单元全息图的曝光拍摄。每幅图像都被透镜会聚投影到全息干板上,形成一条 1 mm 宽的像,参考光从干板的背面斜入射,干板前后设置 1 mm 宽的狭缝挡板。5)每曝光一次,全息干板移动 1 mm 进行下一次曝光拍摄。虽然有 40 幅图像,但因前后有 15 幅图像没有图像信息,所以只需拍摄 25 次得到整个反射全息图。

最终得到的合成全息图如图 9 所示,整个全息图宽 25 mm,由 25 条 1 mm 条纹组成,最右边特意设置了一条 1 mm 宽的线作为参照,整个图像观察视场范围约 30° ,同理论设计结果一致。改变观察角度能看到椅子连续转动,立体感很强。由于是反射体全息图,在室内白光下即可见到椅子清晰的 3D 轮廓,衍射效率较高,图 9 是从 3 个不同视场方向看到的图像。

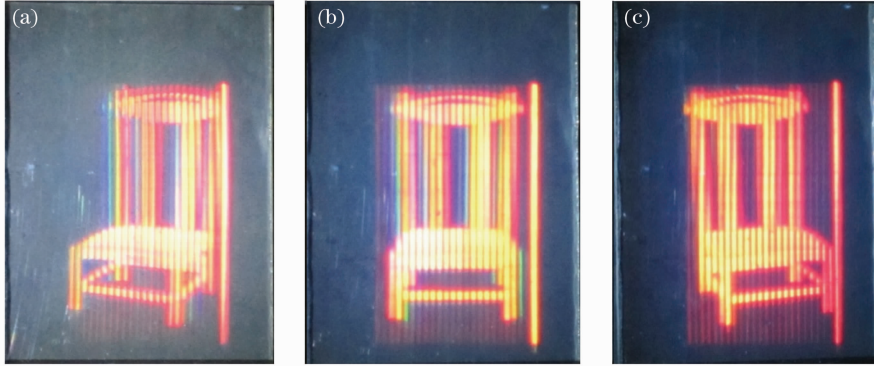


图 9 实验图片。(a)~(c)分别是 -15° 、 0° 、 15° 三个视场方向看到的像

Fig. 9 Experimental results. (a)~(c) Different parallax images from the -15° , 0° and 15° angle of view

从图中看到各单元像模糊、不同像之间还存在间隙等问题,是由透镜加工误差所引起的。由于当前设计的每个单元全息图只有 1mm 宽,对透镜曲面加工的精度要求较高,而在透镜加工中所选用的机械加工精度还远没达到该要求,导致实际制作的透镜和仿真设计的结果存在较大的误差。

6 结 论

基于图像块进行合成全息图的拍摄关键在于实现拼接后图像的重叠投影,而现有的光学元件无法实现这一功能,为此通过光学设计制作了图像重叠投影透镜,并利用所制透镜拍摄出了理想的合成全息图。相对于 DOE 或是透镜阵列,该透镜不仅制作简便,且光能利用率更高,理论上图像分辨率也更高。由于机械加工精度的限制,制作出的透镜还存在较大误差,致使每个单元全息图的光场分布不均匀,相邻单元之间还存在一定的缝距,这是需要进一步优化和改进的地方。

目前本实验只进行了水平视差的设计,且由于有机玻璃折射率的限制,所制透镜焦距还不够短,导致其对光场的会聚角不够大,接下来将考虑多透镜组合来增大光束的会聚角,并进行全视差真彩色全息图的合成制作。相对于传统的全息技术,数字合成全息技术必将在建筑规划设计、军事应用、广告展示等立体显示领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 S. A. Benton. Experiments in holographic video imaging [C]. *SPIE*, 1991, **1600**: 82~95
- 2 M. W. Halle, S. A. Benton, M. A. Klug *et al.*. The ultragram: a generalized holographic stereogram[C]. *SPIE*, 1991, **1461**: 142~155
- 3 M. W. Halle. Holographic stereograms as discrete imaging systems [C]. *SPIE*, 1994, **2176**: 73~84
- 4 M. A. Klug, Arno Klein, Wendy Plesniak *et al.*. Optics for full-parallax holographic stereogram[C]. *SPIE*, 1997, **3011**: 10~20
- 5 Masahiro Yamaguchi, Hideaki Endoh, Toshio Honda *et al.*. High-quality recording of a full-parallax holographic stereogram with a digital diffuser[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(2): 135~137
- 6 Jia Wenwu, Wang Yuefeng, Huang Feng *et al.*. Effects of aberration on performance of fly's eye integrator [J]. *Laser &*

Optoelectronics Progress, 2010, **47**(11): 110801

贾文武, 汪岳峰, 黄 峰 等. 像差对复眼透镜光束整形性能的影响分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(11): 110801

7 M. A. Klug. Display applications of large-scale digital holography[C]. *SPIE*, 2002, **4737**: 142~149

8 Xiao Qiujun, Yu Jia, Wang Jincheng *et al.*. Holographic optical element for holographic stereography [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(Suppl.): 67~68

肖秋菊, 于 佳, 王金城 等. 一种用于制作数字合成全息图的光学全息元件[J]. *光学技术*, 2007, **33**(Suppl.): 67~68

9 Lou Yimin, Wang Hui, Jin Hongzhen *et al.*. Computer assistant synthetic holography using lens array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1): 125~128

楼益民, 王 辉, 金洪震 等. 计算机辅助透镜阵列合成全息术的研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1): 125~128

10 Wang Jincheng, Guo Huanqing, Lang Haitao *et al.*. A system of digital synthetic generated hologram [J]. *J. 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