

文章编号 1004-924X(2017)08-2130-09

## 集成成像系统中高填充率微透镜阵列的设计与加工

孟繁斐<sup>1,3</sup>, 步敬<sup>2,3\*</sup>

(1. 深圳大学 纳米光子学研究中心, 广东 深圳 518060;

2. 深圳大学 数学与统计学院, 广东 深圳 518060;

3. 南开大学现代光学所光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

**摘要:**针对目前微透镜设计与加工中存在的问题,本文提出了一种大尺寸、高填充率的微透镜阵列设计与加工方法,并成功应用于基于手机屏幕的三维集成成像显示系统。根据焦面模式下的集成成像原理,建立了透镜阵列参数与集成成像显示关键参数的关系,并设计了高填充率透镜阵列的孔径与焦距。采用超精密铣削方法加工出金属母板,通过纳米压印和图形转移复制的方法,在涂有UV固化胶的PET透明膜上得到了高填充率的微透镜阵列膜,并将其应用于基于手机显示屏的集成成像系统。测试结果表明,在5.7英寸全高清手机屏幕上,直接覆盖孔径为0.526 mm、焦距为2 mm、填充率为100%的透镜阵列,可以实现立体图像出屏距离达4 cm、视场角为12.5°的集成成像显示效果。系统的设计与透镜阵列的制作完全满足集成成像要求,裸眼观看立体图像清晰、逼真,系统集成度高,使用方便。

**关键词:**微透镜设计与加工;三维集成成像;微透镜阵列;高填充率;先进制造技术

**中图分类号:**O439;TN27 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172508.2130

## Design and fabrication for micro-lens array with high fill factor in integral imaging system

MENG Fan-fei<sup>1,3</sup>, BU Jing<sup>2,3,\*</sup>

(1. Nanophotonics Research Center, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. College of Mathematics and Statistics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

3. Key Laboratory of Optoelectronic Information Science & Technology of the Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

\* Corresponding author, E-mail: jingbu@szu.edu.cn

**Abstract:** Aimed at current problems in design and fabrication of micro-lens, a kind of design and fabrication method for micro-lens array with large size and high fill factor was introduced. It has been successfully applied to displaying system for 3D integral imaging based on phone screen. According to theory of integral imaging under focal-plane model, relation between parameter for micro-lens array and displaying key parameters of integral imaging was established, and aperture and focal length for lens array film with high fill factor were designed. Metal motherboard was processed by super-precision milling. Micro-lens array with high fill factor was obtained from PET transparent film coated

收稿日期:2017-02-17;修订日期:2017-05-02.

基金项目:国家973基础研究发展计划资助项目(No. 2010CB327702)

with UV photoresist through nano-imprinting lithography and pattern transfer reproduction, and it was applied to integral imaging system based on phone screen. Test results show that the stereo image out of the screen reaches 4 cm and the viewing angle is  $12.5^\circ$  by covering micro-lens array film with 0.526 mm aperture, 2 mm focal length, 100% filling ratio on a 5.7 inch full HD phone screen. Test results also show that the design for system and manufacturing of lens array fully satisfy requirements of integral imaging.

**Key words:** design and manufacturing of micro-lens array; 3D integral imaging; micro-lens array; high fill factor; advanced manufacturing technology

## 1 引言

三维立体显示技术近年来在日常生活中扮演着越来越重要的角色。无论是几年前的3D电影和3D电视还是现在的虚拟现实技术(Virtual Reality),立体显示都是其中的重要组成部分。然而,这两种技术都是基于双目视差原理的立体显示,观看时间过长易使观众产生头晕等不适症状。全息技术可以再现物体的波前,是一种“真三维”显示技术,可以改善上述问题。全息术虽然早在1947年就出现了<sup>[1]</sup>,但由于面临光源、色彩和刷新率等方面的问题,始终未能从实验室走出来<sup>[2]</sup>。另外一种“真三维”显示技术是集成成像技术,最早由G. Lippmann于1908年提出<sup>[3]</sup>。集成成像技术在记录和再现过程中使用同样的微透镜阵列,利用光路可逆原理呈现出物体真实的像。其不需要相干光源,且可以实时记录和再现动态三维场景。这些优势使得集成成像技术被认为是有可能最先走出实验室实现商业化的真三维显示技术。

得益于近20年微电子工业和先进制造技术的高速发展,CCD和显示屏的分辨率都有了很大的提升;先进制造技术中兴起的单点金刚石精密切削和纳米压印等技术也使得加工高质量的透镜阵列成为可能<sup>[4]</sup>。最近20年关于集成成像的研究成果非常丰富<sup>[5-9]</sup>,各国研究人员针对其分辨率<sup>[10-13]</sup>、视场角<sup>[14-16]</sup>、景深<sup>[17-21]</sup>、串扰<sup>[22]</sup>等问题,提出了各种各样的改进方法,使得集成成像的显示效果有了一定的提升。微透镜阵列是集成成像系统中最关键的部分,也是对显示效果影响最明显的器件,而以上提到的研究忽略了这一点。本文针对影响集成成像系统显示质量最重要的参数(再现像位置、视场角、分辨率),合理设计微透镜

阵列参数,并尝试与先进制造技术相结合,提出利用单点金刚石切削与紫外固化压印技术,制作出100%填充率和高均匀性的微透镜阵列膜。

## 2 集成成像系统关键参数的设计

### 2.1 再现像位置

图1为集成成像再现过程焦面模式原理图。利用Autodesk 3ds Max软件将制作的元素图像阵列显示在显示器上,其与微透镜阵列距离正好是透镜阵列的焦距,故称焦面模式。由于可以同时透镜阵列前后再现像,故可获得较大的景深,立体效果比较强烈,所以本文使用焦面模式再现。

以在屏幕前端再现实像为例。图1中,透镜的孔径为 $d$ ,透镜阵列与元素图像阵列平面的距离即为焦距 $f$ 。设元素图像阵列上有两个同名点 $A_1$ 和 $A_2$ ,分别在第 $k$ 个和第 $k+m$ 个元素图像阵列中,对应第 $k$ 个和第 $k+m$ 个透镜。两个同名点发出的光线在 $A'$ 交汇,此点就是记录时对应的物点 $A$ 。通过图中几何关系可得:

$$\frac{l}{l+f} = \frac{md}{P}, \quad (1)$$

式中 $l$ 是重构点 $A$ 与透镜阵列面的距离,可写成:

$$l = \frac{mdf}{P-md}, \quad (2)$$

在使用3ds Max软件进行模拟记录的过程中<sup>[23]</sup>,每个相机记录了一个视角的图像,而元素图像是通过对各视角图像进行抽样编码获得的,所以两个相邻视角图像中,同名点的间距就是

$$P = md + \frac{d}{n}, \quad (3)$$

式中 $n$ 为一个方向上相机的个数, $d/n$ 其实就是显示屏一个像素的尺寸。把 $P$ 带入 $l$ 中就可得:

$$l = \frac{nP-d}{d} f. \quad (4)$$

所以,只要得到相应同名点间距  $P$ ,就可以得到最终重构图像的位置  $l$ 。获取同名点间距是集成成像记录过程的相关内容,详见文献[23]。对于再现过程,微透镜孔径  $d$  和焦距  $f$  影响着再现像的位置。

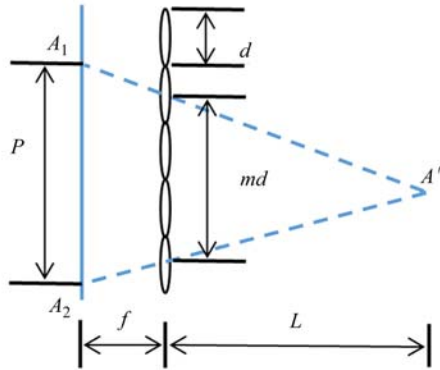


图 1 焦面模式再现像位置

Fig. 1 Position of reconstructed image in focal-plane model

## 2.2 视场角

视场角是指可看到没有分裂和跃变的三维图像的角度范围,如图 2 所示。设  $\Omega$  为视场角,使用焦面模式再现像时,透镜阵列平面到显示面板的平面距离即为焦距  $f$ ,单透镜的孔径为  $d$ ,则有如下关系:

$$\tan \frac{\Omega}{2} = \frac{d}{2f} \quad (5)$$

如果超出这个角度,观看者将会看到相邻元素图像出射的光线,导致图像跃变。从式(5)可见,透镜阵列的孔径和焦距也影响着视场角,所以合理设计透镜阵列的孔径和焦距将会对观看者观看范围产生重要影响。

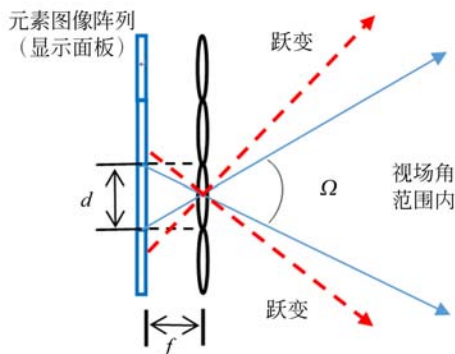


图 2 焦面模式视场角范围

Fig. 2 Viewing angle in focal plane mode

## 2.3 分辨率

在焦面模式下,集成成像系统的中心深度平面在无穷远处,如图 3 所示,从显示屏出射的发散光经过透镜阵列后均平行出射,则再现像像点的尺寸将会与透镜孔径相同,为  $d$ 。则像的空间分辨率  $R$  可表示为:

$$R = \frac{1}{d} \quad (6)$$

可见孔径越小,得到的像越细腻,但是从公式(5)可知,孔径小将会导致视场角较小。此外也会导致视角数更少,从而使得立体图像显得不够真实。视角数取决于记录过程的相机数,与再现像出屏距离(公式(4))有着内在联系。所以对于集成成像系统的设计,需要权衡视场角、分辨率和视角数几个参数,以最终的观看感受作为设计目标。

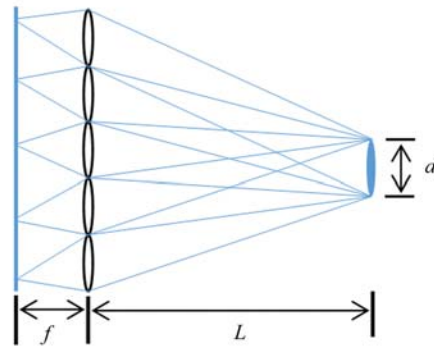


图 3 焦面模式空间分辨率

Fig. 3 Spatial resolution in focal-plane model

本文选用目前主流的智能手机屏幕作为参考,设计透镜阵列显示参数。显示器为 5.7 英寸 Super AMOLED 显示器,分辨率为  $1\,920 \times 1\,080$ ,约为 384dpi。经过多次试验,考虑立体图像的分辨率和三维感,选择  $8 \times 8$  个视角数,则每个正方形球透镜孔径设计为  $525.6 \mu\text{m} \times 525.6 \mu\text{m}$ ,空间分辨率为 1.9 line/mm。考虑到金刚石切削母版和压印复制的制作难度,浮雕图形深宽比不易过大,即透镜焦距不宜过小,最终将焦距设计为 2 mm。则由公式(5)知,微透镜阵列焦距和透镜孔径决定了集成成像系统的设计视场角为  $\arctan(525.6 \mu\text{m} / 2\,000 \mu\text{m}) \approx 14.7^\circ$ 。

随着微电子工业的发展,商业显示设备的分辨率等指标将会继续提升。从本节的讨论中可见,继续缩小显示器的像元尺寸将会使设计具有更大的自由度。例如,根据(6)式知,若不改变微

透镜的孔径  $d$  和焦距  $f$ , 则每个透镜下覆盖的像素数就会增加, 立体图像将有更多的视角数, 观察者也将会看到更加实在细腻的立体图像; 反之, 若保持视角数不变, 可呈比例地缩小  $d$  和  $f$ , 立体图像的分辨率将随着显示器分辨率的提升而相应提高。除了观察者最在意的图像质量和分辨率, 设计者还可根据公式(4)和(5)来调整再现像位置和视场角等参数。

### 3 高填充率微透镜阵列膜的制作与测试

#### 3.1 母版的制作与图形转移

考虑切削制作难度, 母版设计为负透镜。由于幅面较大, 材料选为比较软的 H62 黄铜。使用美国 Moore 公司 NanotechCR350FG 超精密单点金刚石车床, 采用超精密铣削的方法制作。如图 4 所示。机床分辨率在 1 nm 以下, PV 面型精度低于 2  $\mu\text{m}$ , 采用天然金刚石刀口, 球头刀口半径为 20~30 nm, 铣削时表面粗糙度 Ra 可达到 10 nm。



图 4 微透镜阵列膜母版

Fig. 4 Mother board of microlens array film

图形转移流程如图 5(彩图见期刊电子版)所示, 首先在铜质金属负透镜阵列母版(图 5(a))浇铸 PDMS, 固化后成为 PDMS 正透镜阵列头版, 如图 5(b)所示。剥离 PDMS 头版后, 在其上电镀柔性金属镍板子版, 如图 5(c)所示。利用柔性镍版, 采用单线辊印的方法, 在涂有 UV 固化胶的 PET 透明膜上进行紫外固化压印, 如图 5(d)所示。固化后, 脱膜, 微透镜阵列膜制作完成。

此种工艺加工的是平凸透镜, 考虑到加工难度, 凸透镜一面设计为普通球面, 紫外固化胶折射率约为  $n=1.5$ , 则根据平凸透镜公式



(a)金属母版

(a) Metal mother board



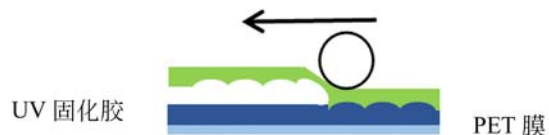
(b)PDMS 复制头版

(b) Duplicating mother board with PDMS



(c)电铸复制金属 Ni 柔性子版

(c) Electroforming flexible Nickel mold



(d) 线辊印

(d) Roller printing



(e) 获得微透镜阵列膜

(e) Obtaining microlens array film

图 5 图形转移流程示意

Fig. 5 Schematic diagram of pattern transfer

$$f = \frac{R}{n-1}, \quad (7)$$

得到球的半径应为  $R=1\ 000\ \mu\text{m}$ , 再根据基本的几何关系, 设微透镜矢高为  $h$ , 半径为  $r$ , 则有:

$$f = \frac{h^2 + r^2}{2h(n-1)}, \quad (8)$$

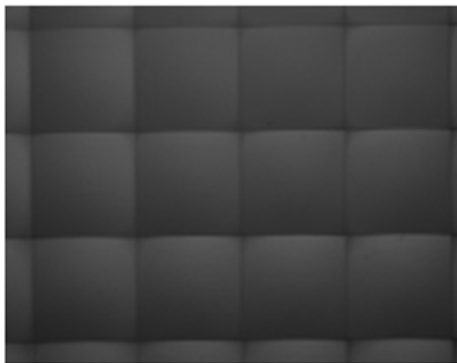
根据第二部分孔径设计结果知, 正方形微透

镜的横向孔径  $d=2r=525.6\ \mu\text{m}$ , 可得横向矢高  $h=35.1\ \mu\text{m}$ .

### 3.2 微透镜阵列膜的测试

#### 3.2.1 成像能力与单透镜面型

首先对微透镜阵列膜与焦斑平面进行测试。结果如图 6(a)所示,从显微镜照片可见,透镜阵列表面规则整齐,填充率达 100%。100%的填充率可保证透镜阵列覆盖显示屏所有像素,使得所有像素参与集成成像。



(a) 透镜阵列显微镜图片

(a) Microscope image of microlens array



(b) 透镜阵列焦斑平面

(b) Focal spot plane of microlens array

图 6 微透镜阵列膜与焦斑平面

Fig. 6 Microlens array film and focal plane image

从图 6(b)的焦平面显微图片可见焦斑排列整齐,聚焦效果非常好。此外用透镜阵列对掩模版上的字母 N 成像,测试其成像能力,如图 7 所示。

本文利用 DEKTAK 8 表面轮廓仪测量透镜表面轮廓,结果如图 8 所示,其中实线为测量结果,虚线为拟合的标准圆曲线,可见两者高度一致,结果证明阵列中单个透镜为标准球透镜。



图 7 微透镜阵列膜对字母“N”成像

Fig. 7 Imaging of microlens array film on letter 'N'

拟合圆的半径是 1.014 mm,按照折射率  $n=1.5$  计算,由平凸透镜公式可知,焦距  $f=2.028\ \text{mm}$ ,与设计值误差为 1.4%。

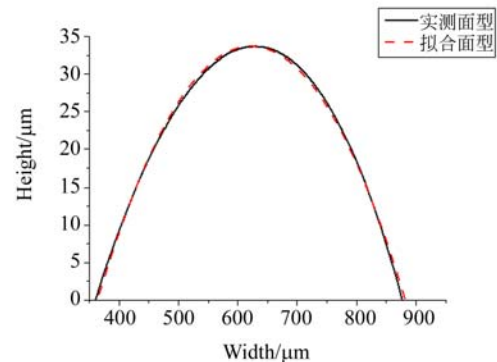


图 8 微透镜面型

Fig. 8 Surface profile of a single microlens

#### 3.2.2 均匀性

作为集成成像系统中最关键的器件——透镜阵列,其不仅需要有良好的单透镜成像能力,还需要在较大幅面内保持参数的一致性,对其质量要求要比单透镜的更加苛刻,因此对制作工艺的要求更高。为了分析制作出的微透镜阵列膜的均匀性能否达到集成成像的要求,本文对微透镜阵列的整版均匀性进行了测试。

利用 DEKTAK8 对相邻小范围内的透镜面型做测试,结果如图 9 所示,结果显示出了高度的一致性。但是从图中也可以发现,其透镜阵列矢高基本在  $33\ \mu\text{m}$  左右,与设计值  $35.1\ \mu\text{m}$  有  $2\ \mu\text{m}$  的制作误差。因此,对于整版的横向矢高和孔径,本文随机选取 25 处进行测量。需要指出的是,以上测量的是经过多次图形转移后的微透镜阵列膜成品。此外,本课题组还测量了 10 组头版的矢高

和孔径(为尽量减少轮廓仪金属探针对头版的伤害)。这是因为头版是从母版直接复制下来的,它可直接反映母版的形状。微透镜阵列膜和头版的测量结果总结于表 1。

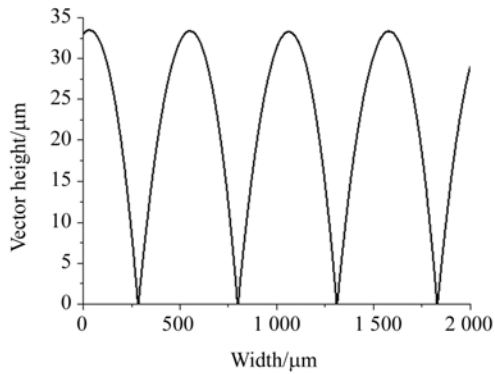


图 9 小范围内的微透镜阵列膜实测面型

Fig. 9 Surface profile of micro-lens array measured in a small range

表 1 微透镜阵列膜和母版面型测量结果

Tab. 1 Measurement results of mirolens array film and mother board profile (μm)

测量目标	测量量	最大值	最小值	平均值
微透镜阵列膜	矢高	37.8	33.1	34.2
	孔径	519	512	515.8
头版	矢高	33.9	33.2	33.6
	孔径	516	510	514

由表 1 可见,头版的均匀性要好于最后的微透镜阵列膜成品,这在矢高上反映的非常明显,而孔径的变化趋势基本一致。因此可以认为均匀性的破坏是在图形转移过程中引入的。

下面把微透镜阵列膜整个幅面分成 6 个区域,测量各个区域的焦距,每个区域测量了 10 次,取平均值。测量结果见图 10。从整版的分区焦距测试结果可见,焦距值成一定的区域性分布,作者认为这应该是紫外固化压印过程中引入的误差所致。计算得到焦距的不均匀度为 8.2%。

在本文的应用中,微透镜阵列幅面较大,其均匀性是影响微透镜阵列质量的关键。在图 5 所示的图形转移过程中,任何一步都对最后的质量有着重要影响。单点金刚石切削金属母版时应快速、连贯、一刀完成,以减少金属氧化对面型和均匀度的影响。在图形复制过程中,压力的精确控

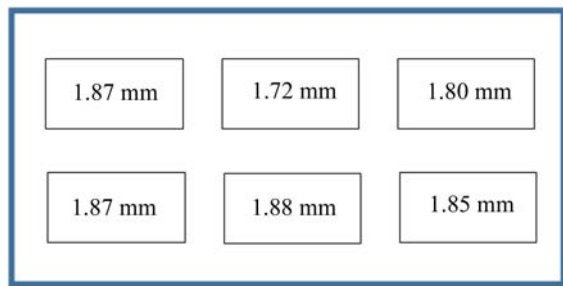


图 10 微透镜阵列膜整版焦距分布

Fig. 10 Focal length distribution of microlens array film

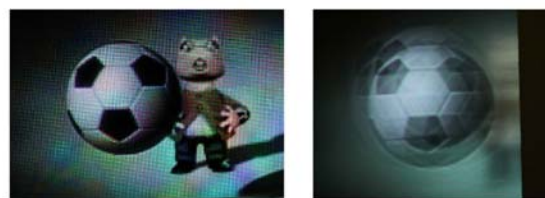
制和稳定性将直接影响图形转移准确度和透镜阵列的均匀性。通过分析认为,表 1 中最后成品面型和头版面型的差别(矢高与孔径)是由复制过程中的软膜压印引入的,图 10 的焦距区域性分布则是由压力的不稳定性引起的。

以上就是对透镜阵列膜面型和均匀性的测试和讨论。对于其是否能达到集成成像的使用要求,以及是否能完成立体成像任务,还需要通过集成成像演示实验来做最后的验证。

## 4 集成成像演示实验

### 4.1 出屏距离的验证实验

本文利用 3ds Max 软件制作了 3 张出屏 2~4 cm 的元素图像阵列图片,用于测试其集成成像能力,如图 11 所示。其中足球所在位置依次为 2,3,4 cm。右图均为用磨砂玻璃屏在相应位置截取的像。从图中可见,在出屏 4 cm 处也能呈现出非常清晰的像,这说明通过设计和制作集成成像系统及微透镜阵列膜,能得到屏幕外 4 cm 处清晰的像,立体成像能力出色。



(a) 出屏 2 cm 的图片及其集成像截屏

(a) Stereo image when football is reconstructed at 2 cm away from screen



(b) 出屏 3 cm 的图片及其集成像截屏

(b) Stereo image when football is reconstructed at 3 cm away from screen



(c) 出屏 4 cm 的图片及其集成像截屏

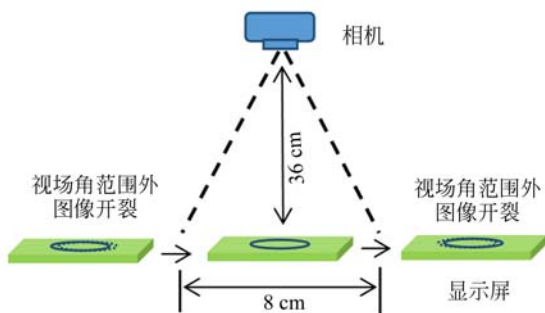
(c) Stereo image when football is reconstructed at 4 cm away from screen

图 11 立体图像与出屏距离的验证实验

Fig. 11 Stereo images and demonstration experiments when football is reconstructed at different positions

### 4.2 视场角的验证

本文对此系统产生的视场角范围进行了测量,如图 12(彩图见期刊电子版)所示。固定相机位置,使屏幕在水平滑轨上从左向右移动,以足球像为参照,从开裂的像刚好变清晰起记录位置,一直向右移动,直到再次出现开裂像时终止,并记下终止位置。屏幕横向移动 8 cm,相机与屏幕的垂直距离为 36 cm,则由公式(5)可得视场角为



(a) 视场角测量装置示意图

(a) Schematic diagram of viewing angle measurement



(b) 视场角左边界以外、视场角以内和右边界以外的像  
(b) Image outside the left boarder, image inside and the one outside right boarder of viewing angle

图 12 视场角的测量实验

Fig. 12 Measurement experiment of viewing angle

$\arctan(8\text{cm}/36\text{cm})=12.5^\circ$ ,与理论值  $14.7^\circ$  相近。

图中可见红绿蓝三色图像,主要是由于精确调整透镜阵列使其处于焦面模式,并在无穷远处对屏幕三基色成像所致,在正常使用过程中可使透镜阵列和显示屏距离稍大于焦距,即可使图像颜色正常。

通过设计集成成像系统以及设计与制作微透镜阵列膜,可以在主流智能手机屏幕吸附微透镜阵列膜上观看到逼真的立体图像,如图 13 所示。



图 13 手机屏幕上的立体图像

Fig. 13 Stereo image on a mobile phone screen

### 5 结 论

针对目前集成成像系统成像效果不理想、无法达到商业化要求的缺点,本文提出改善集成成像系统关键器件——微透镜阵列的显示效果的设计方法。首先介绍了集成成像系统中影响显示效果的几个关键参数及微透镜阵列参数的设计方法。然后尝试利用先进制造技术中单点金刚石切削与紫外固化压印方法制作出幅面为 5.7 英寸具有 100% 填充率的微透镜阵列膜。最后利用微透镜阵列膜与主流的智能手机屏幕相连,即得到良

好的裸眼立体显示效果。实验中得到 4 cm 范围清晰像的出屏距离,视场角为 12.5°,出色地完成了集成成像任务,立体图像清晰逼真,系统集成度高,使用简单方便,可达到商业化级别。

#### 参考文献:

- [1] GABOR D. A new microscopic principle [J]. *Nature*, 1948, 161(4098):777.
- [2] BLANCHE P A, BABLUMIAN A, VOORA-KARANAM R, *et al.*. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer [J]. *Nature*, 2010, 468(7320): 80-83.
- [3] LIPPMANN G. Epreuves reversibles donnant la sensation du relief [J]. *J. Phys. Theor. Appl.*, 1908, 7(1): 821-825.
- [4] 申溯, 张小峰, 张家银, 等. 一种紫外固化微纳结构拼版装置及拼版工艺, 中国:CN103226288A[P]. 2013.  
SHEN S, ZHANG X F, ZHANG J Y, *et al.*. A kind of ultraviolet curing micronano structure imposition device and puzzle technology, China:CN 103226288A[P]. 2013. (in Chinese)
- [5] JEN T H, SHEN X, YAO G, *et al.*. Dynamic integral imaging display with electrically moving array lenslet technique using liquid crystal lens[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18415-18421.
- [6] CARNICER A, JAVIDI B. Polarimetric 3D integral imaging in photon-starved conditions [J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6408-6417.
- [7] JAVIDI B, SOLA-PIKABEA J, MARTINEZ-CORRAL M. Breakthroughs in photonics 2014: recent advances in 3-D integral imaging sensing and display[J]. *IEEE Photon. J.*, 2015, 7(3): 1-7.
- [8] WANG J G, XIAO X, HUA H, *et al.*. Augmented reality 3D displays with micro integral imaging [J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(11): 889-893.
- [9] 焦小雪, 赵星, 杨勇, 等. 基于相机阵列的三维集成成像记录系统[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1653-1660.  
JIAO X X, ZHAO X, YANG Y, *et al.*. Pick-up system for three-dimensional integral imaging with camera array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1653-1660. (in Chinese)

## 6 致谢

感谢苏州大学陈林森教授和申溯副研究员在紫外固化压印方面提供的大力支持。

- [10] KWON K C, JEONG J S, ERDENEBAAT M U, *et al.*. Resolution-enhancement for an orthographic-view image display in an integral imaging microscope system [J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(3): 736-746.
- [11] PIAO Y, XING L, ZHANG M, *et al.*. Resolution enhanced computational integral imaging reconstruction by using boundary folding mirrors [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2016, 20(3): 363-367.
- [12] DENG H, LUO C G, WU F, *et al.*. Analysis on pixel number of elemental image in integral imaging 3D display[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 128: 83-92.
- [13] 焦小雪, 赵星, 杨勇, 等. 基于最佳记录距离的三维集成成像光学获取技术[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11): 2805-2811.  
JIAO X X, ZHAO X, YANG Y, *et al.*. Optical acquiring technique of three-dimensional integral imaging based on optimal pick-up distance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2805-2811. (in Chinese)
- [14] JEONG J, YEOM J, JANG C, *et al.*. Viewing characteristics improved integral imaging system using holographic printing technique[C]. *Applied Industrial Optics: Spectroscopy, Imaging and Metrology*, *Optical Society of America*, 2015: JT5A. 1.
- [15] SHEN X, MARTINEZ-CORRAL M, JAVIDI B. Extended view angle integral imaging 3D display using smart pseudoscopic-to-orthoscopic conversion with head tracking[C]. *3D Image Acquisition and Display: Technology, Perception and Applications*, *Optical Society of America*, 2016: TW1A. 3.
- [16] 张雷, 杨勇, 赵星, 等. 多级投影式集成成像三维显示的视场角拓展[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1): 1-6.  
ZHANG L, YANG Y, ZHAO X, *et al.*. En-

- hancement of viewing angle of multi-stage projection-type integral imaging 3D display [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 1-6. (in Chinese)
- [17] LATORRE-CARMONA P, JAVIDI B, LEMASTER D A. Three-dimensional visualization of long range scenes by photon counting mid-wave infrared integral imaging[J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(11): 908-912.
- [18] SHEN X, WANG Y J, CHEN H S, *et al.*. Extended depth-of-focus 3D micro integral imaging display using a bifocal liquid crystal lens[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 538-541.
- [19] SCHWARZ A, WANG J, SHEMER A, *et al.*. Lensless three-dimensional integral imaging using variable and time multiplexed pinhole array[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1814-1817.
- [20] 杨勇, 徐于萍, 赵星, 等. 基于同名点间距变换的三维显示参数匹配[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 1084-1089.  
YANG Y, XU Y P, ZHAO X, *et al.*. Parameter matching of three dimensional display based on space of corresponding image point transformation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 1084-1089. (in Chinese)
- [21] 张雷, 杨勇, 赵星, 等. 基于小发散角的投影式集成成像三维显示再现深度的拓展[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1159-1165.  
ZHANG L, YANG Y, ZHAO X, *et al.*. Enhancement of field depth for projection-type integral imaging three-dimensional display based on small diverging angle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1159-1165. (in Chinese)
- [22] 袁小聪, 徐于萍, 杨勇, 等. 基于相机阵列获取元素图像的集成成像抗串扰参数设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2050-2056.  
YUAN X C, XU Y P, YANG Y, *et al.*. Design parameters of elemental images formed by camera array for crosstalk reduction in integral imaging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2050-2056. (in Chinese)
- [23] 谢宏斌. 利用相机阵列合成元素图像的集成成像三维显示方法研究[D]. 天津:南开大学, 2013.  
XIE H B. *Research on three-dimensional display of integral imaging based on the elemental images generated from view images captured by camera array* [D]. Tianjin: Nankai University, 2013. (in Chinese)

#### 作者简介:



孟繁斐(1988—),男,天津人,博士研究生,主要从事集成成像与微纳米尺度制造方面的研究。E-mail: joaquin126@126.com



步敬(1964—),女,天津人,硕士,实验师,主要从事光学微细加工以及激光元件应用研究。E-mail: jingbu@szu.edu.cn