

doi: 10.3788/gzxb20164503.0322002

用于集成成像 3D 显示的曲面微透镜阵列设计与仿真

彭玉颜, 周雄图, 张永爱, 杨兰, 郭太良

(福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350002)

摘要:针对集成成像 3D 显示观看视场范围小的问题和微透镜之间间隙的杂散光干扰导致的显示质量下降问题, 提出了适合柔性显示及曲面显示器的曲面针孔/微透镜阵列结构. 采用 TracePro 光学仿真软件对基于曲面针孔/微透镜阵列的集成成像 3D 显示的记录和重构过程进行仿真, 结果显示: 在记录和重构阶段, 曲面针孔/微透镜阵列可以有效地减少透镜阵列之间杂散光引起的图像质量变差的问题; 当记录和重构阶段均用曲面/针孔微透镜阵列时, 记录三维物体的视角大, 获得重构图像的视场角也相对较高. 采用旋转接收屏法获取不同观看视角下的图像质量, 当曲面针孔/微透镜阵列的曲面度数为 30° 时, 重构图像质量最好.

关键词:集成成像; 3D 显示; TracePro; 微透镜阵列; 视场; 柔性显示; 图像重构

中图分类号: O435

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)03-0322002-6

Design and Simulation of Curved Microlens Array for Integral Imaging 3D Display

PENG Yu-yan, ZHOU Xiong-tu, ZHANG Yong-ai, YANG Lan, GUO Tai-liang
(School of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Integral imaging 3D display has a small field of view range, and the stray light between the microlens will cause degradation of reconstructed images. In view of these problems, this paper presents a pinhole/ microlens array structure with curved surface, which fits flexible display and curved surface display well. The parametric analysis of curved surface pinholes / microlens array according to the integrated imaging principle conducted, and the recording and reconstruction process of integrated imaging 3D display based on curved surface pinholes / microlens array was simulated with TracePro. The results show that, in the recording and reconstruction process, the quality of reconstructed image can be improved by the curved surface pinholes / microlens array structure. Concretely, a larger visual angle of three-dimensional objects is obtained in recording process and the field angle of reconstructed image is larger relatively. The quality of reconstructed images are accessed by rotating the receiving screen, and it is found that the best images can be obtained when the curved degree of the curved surface pinholes / microlens array is 30° .

Key words: Integral imaging; 3D display; TracePro; Microlens array; Field of view; Flexible display; Image reconstruction

OCIS Codes: 220.3620; 110.6880; 130.3120; 110.3010

0 引言

随着时代的进步, 信息显示技术朝着观看更加逼真、携带更加方便等方向发展, 因此, 三维(立体)显示、柔性显示等技术逐渐成为研究的热点. 目前, 三维显示

技术可以分为需要辅助设备的三维显示与裸眼三维显示技术两大类. 助视三维显示技术需借助立体眼镜等辅助设备, 观看舒适度差, 在一定程度上限制了其进一步的应用. 相对地, 裸眼三维显示技术摆脱了立体眼镜的束缚, 得到了广泛关注和研究^[1]. 现阶段, 根据是否

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61306071)、教育部博士点基金(No. 20133514120011)和福建省科技厅重点项目(No. 2013H0033)资助

第一作者: 彭玉颜(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光电显示技术. Email: yuyan_peng@sina.com

导师(通讯作者): 周雄图(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光电显示技术. Email: xtzhou@fzu.edu.cn

收稿日期: 2015-09-28; 录用日期: 2015-12-10

<http://www.photon.ac.cn>

存在显示机理和人眼视觉生理之间的矛盾,将3D显示分为助视/光栅3D显示和真3D(true 3D)显示两大类.真3D显示技术目前主要包括集成成像3D显示、体3D显示和全息3D显示等.其中,体3D显示技术由于缺乏高质量的电子芯片和机械器件,系统精度仍受到限制而导致数据输出与图像显示很难同步^[2];全息3D显示对于数据带宽的要求十分高,全息图案的实时记录和刷新,以及全息图的海量计算等科学问题还有待攻克^[3].

集成成像(Integral Imaging, II)是一种基于全真三维光学成像的自由3D显示新方法,与其他立体显示技术相比,能够提供全视差、连续视点、全彩色的真三维实时立体图像;有效克服传统多视点自由立体显示出现的辐辏与焦点调节范围导致的视觉疲劳现象;与高清晰度电视兼容性较好,已成为3D显示领域中的重要研究课题^[4-6].但是,集成成像3D显示并没有达到能够量产化的地步,其仍然有许多问题需要克服,如图像分辨率低、景深小、观看视场角窄、视频显示从二维到三维转换困难等.其中,图像的分辨率和视场范围是实现量产过程中亟需解决的关键问题.南开大学现代光学研究所^[7]提出多级投影式集成成像显示系统的再现图像视场角为 $\pm 35^\circ$,是传统集成成像系统获得的视场角的2.92倍,拓展了视场角.文献^[8]通过遮挡元素图像实现奇偶列元素图像交替显示,或者改变透镜及系统结构,增大元素图像的有效面积,同时避免相邻元素图像间的串扰,可以增大系统的观看视场角.四川大学王琼华教授带领的团队^[9]采用会聚式集成成像3D拍摄和会聚式集成成像3D显示方式,增大了集成成像的3D观看视角.苟健等^[10]采用复合曲面反射层的双层微透镜阵列屏将观看空间角增大到 60° .Md. Ashraful Alam^[11]提出使用时分复用双向顺序投影方案和DEIGR算法增大观看视角的集成成像系统.

另一方面,曲面液晶显示器因为更符合人类的观看习惯也得到快速发展,从文献^[12]可知曲面显示已经成为了现代显示技术的一个强劲势头,与平板电视相比,曲面电视具有观看视角更广,符合人类眼球的球面特性等特点.而有机发光二极管(Organic Light-Emitting Diode, OLED)柔性显示也已经被众多学者研究并用于实际.因此曲面微透镜阵列既可以更加容易与未来曲面显示器或者柔性显示器兼容,也可以提高集成成像3D显示的观看视角^[13],具有巨大的应用前景.

微透镜阵列是集成成像中最主要的光学结构,是由参数完全相同的微透镜按照一定的规律排列而成.颜稳萍^[14]等也是从微透镜阵列的研究来提高显示系统的质量.集成成像的记录阶段和重构阶段是紧密联系在一起,两个阶段所采用的微透镜阵列中微透镜

的数目、微透镜的孔径、焦距、物距、像距等参数完全相同,才能显示出清晰的立体图像^[15].文献^[16]提出的针孔/透镜阵列可以有效减少透镜阵列之间的杂散光所引起的与图像无关的亮斑,所以本文从集成成像基本原理出发并迎合曲面显示技术的强劲趋势,提出曲面针孔/透镜阵列结构,提高集成成像3D显示图像的质量并拓宽集成成像3D显示的视场;并通过TracePro光学仿真软件对利用曲面针孔/透镜阵列的集成成像3D显示过程进行仿真分析.

1 集成成像原理和理论分析

集成成像技术是一种利用微透镜阵列来记录和再现三维场景的新型三维显示技术,它分为记录和再现两个过程.如图1,利用微透镜阵列记录3D场景在不同角度的3D信息生成不同方位视角的微小图像,称为图像元,所有的图像元组成了微图像阵列.重构过程是利用高分辨率2D显示器显示微图像阵列,再使用与记录时参数相同的微透镜阵列与之精密耦合,根据光路可逆原理,微透镜阵列把所有图像元像素发出的光线聚集还原,在微透镜阵列的前方或后方重建出与记录时的3D场景完全相同的3D图像.

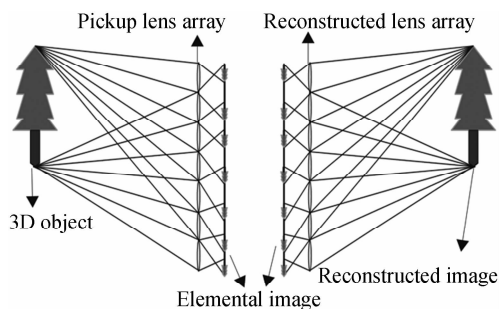


图1 集成成像原理

Fig. 1 Scheme of integral imaging

集成成像系统的显示性能一般由观看视场角(Field of View, FOV)、分辨率、再现深度三个参数来评价.图2为显示阶段分辨率及再现深度系统示意图^[2].观看视场角 α 、分辨率 R 、再现深度 D 及其三者之间的关系分别为

$$\tan \frac{\alpha}{2} = P_0 \cdot 2g \quad (1)$$

$$R = \frac{1}{P_{\text{CDP}}} = \frac{g}{C \cdot P} = \frac{g}{C} R_d \quad (2)$$

$$D = 2 \frac{g}{P} \cdot P_0 \quad (3)$$

$$R^2 \cdot D \cdot \tan \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{P} \quad (4)$$

式中, P_0 为微单元图像尺寸(也是微透镜单元尺寸)、 g 是微透镜阵列和微单元图像阵列之间的距离、 P 为显示器器件单一像素的大小、 P_{CDP} 为显示器器件上大小为 P 的像素通过透镜阵列在中心深度平面(Central

Depth Plane, CDP)上形成的像素的大小、 C 为 CDP 与微透镜阵列之间的距离、 R_d 为显示器的分辨率。根据单一变量原则,由式(1)、(3)可知较大尺寸的微透镜单元通光口径可以提供更理想的再现深度提高视场角,但由式(2)可知会降低分辨率。因此视场角、再现深度和分辨率是三个如式(4)一样相互制约的显示参数。

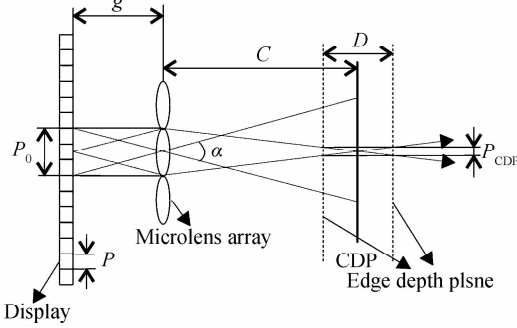


图2 重构阶段分辨率及再现深度系统示意图
Fig.2 Resolution, depth of reconstructed in reconstruction phase

微透镜阵列是集成成像系统最重要的光学结构,但是在实际应用中,由于观看方向与透镜成一定角度,物体经过透镜后成像的位置不一定会落于焦点处,而是稍大于焦点。图3为透镜元视场角分析图, O 为透镜的光心, A 为透镜的焦点。将透镜偏转 θ ,主光轴 OA 也随着偏转 θ 变为 OC ,取 $OC=OA$ 并经过 C 画垂直于 OC 的线交于 OA ,交点 B 即为透镜偏转 θ 后的聚焦点。由图可知,当光线平行于光轴 OA 入射时,偏转了 θ 的透镜得到的视场角 β 比未偏转的透镜得到的视场角 α 要小,故当入射光线平行于透镜光轴时获取的视场角比入射光线与透镜光轴成 θ 关系时要大,即当入射光线平行于透镜光轴时最大,为透镜的观看视场角 α ;又由于三维物体发出的光线是多方向的,图4(a)为利用透镜元制成的平面微透镜阵列的视场角分析图,由透镜元的视场角分析可知,当光线平行于透镜光轴入射时,微透镜阵列所获取的视场角对于平面微透镜阵列情况来说就是最大的,与透镜元获取的视场角是一致的,为 α 。由于三维物体发出的光线是多方向的,故当入射至每一个透镜元的光线都平行于该透镜元的光轴时,对于该曲面而言,得到的视场角是最大的。图4(b)是曲面微透镜阵列视场角分析图(多方向的入射光线未画出),视场角大于 90° ,与图4(a)对比,曲面微透镜阵列系统的视场角比平面微透镜阵列得到的视场角要大。

分析可知,微透镜参数会对微单元图像及其重构图像的质量产生直接的影响。各个参数之间存在着紧密的联系,应根据实际需要来调整各参数。

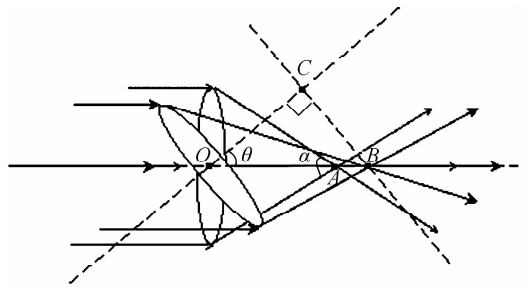


图3 透镜元视场角分析图
Fig.3 FOV of microlens

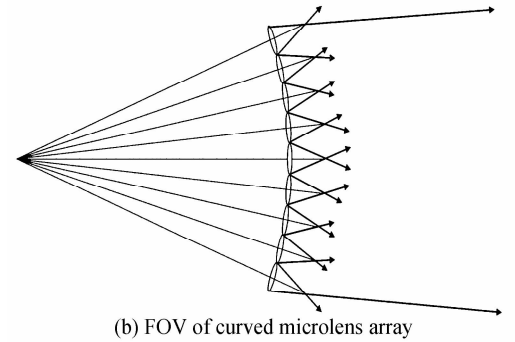
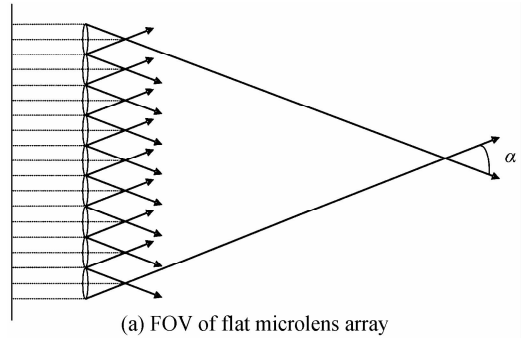


图4 视场角分析图
Fig.4 FOV

2 针孔/微透镜曲面阵列设计

集成成像的视场角与微透镜阵列的成像过程有着直接的联系,传统的微透镜阵列获得的重构图像视角小,增加重构图像视场角的最简单的方法是增加微单元图像的面积。然而,在实际应用中,微单元图像面积的增加会导致分辨率的下降故而不能无限制的增加。因此,针对重构图像视场角,本文采用曲面微透镜阵列代替传统的平面微透镜阵列来提高重构图像的视场角。如图5所示,曲面微透镜阵列将微透镜阵列排列成曲面。又由文献[16]可知,为了避免微透镜阵列间的间隙造成图像质量下降,可以采用增加与曲面微透镜阵列的孔径、面弯曲率完全一致的曲面针孔阵列来屏蔽该杂散光,贴合得到针孔/微透镜组合曲面阵列,每个微孔的直径等于或略小于微单元透镜的直径,且两者中心重合。

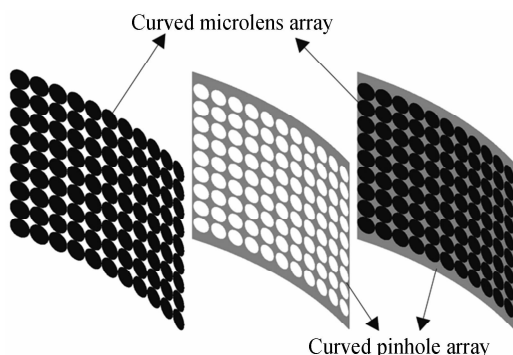
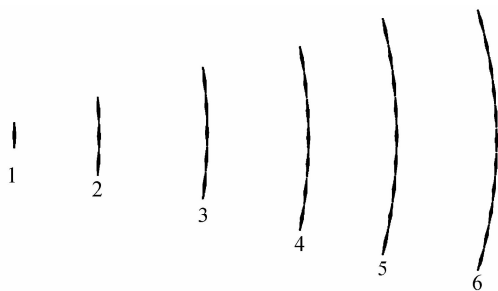


图5 针孔/微透镜组合曲面阵列示意图

Fig. 5 Curved pinhole/microlens array

其中, 曲面微透镜阵列模型设计过程如图 6(a) 所示(俯视图, 以 30° 为例), 建立一列微透镜阵列, 复制并相对于最近邻的微透镜阵列向两侧平移且偏转 3° , 重复 5 次后即可形成 30° 的曲面, 曲面针孔阵列设计过程也是如此. 图 6(b) 为接收屏转动的过程示意图, 首先建立一个平面接收屏, 接着以 Z 轴为旋转轴相对于该接收屏复制并旋转 10° , 如此重复可获得不同角度接收屏的设置, 通过该方法即可表示观看者在不同观看视角下获得的图像观看效果. 传统的微透镜阵列是一种平面结构, 所能记录的场景范围较窄, 降低了视差立体感. 采用曲面微透镜阵列拍摄物体时, 其所能记录的场景范围大, 获得的重构图像的视场角也相对较高.



(a) The process of designing microlens model



(b) The process of turning receiving screen

图6 微透镜阵列模型设计与接收屏转动过程
Fig. 6 The process of designing microlens model and turning receiving screen

集成成像 3D 显示系统的设计, 主要是对物距、像距、焦距、微透镜孔径、透镜厚度、曲率半径、透镜材料、微透镜阵列数目、针孔阵列厚度等参数进行确定. 由现有显示器出发来确定曲面针孔/微透镜的尺寸, 再结合

人的视觉特性和观看习惯来确定像距(即观看距离); 文中结合文献[17]中的无串扰集成成像 3D 显示系统及仿真过程中调试得到最适合的参数如表 1.

表 1 针孔/微透镜组合曲面阵列和集成成像系统参数
Table 1 Parameters of curved pinhole/microlens array and integral imaging system

Lens and Imaging System	Parameters
Number of Lens	11×9
Focal Length/mm	24.44
Aperture/mm	5
Shape of Lens	Circle
Material	PMMA
Object Distance(g)/mm	192.20
Image Distance(g)/mm	27.80
the Radius of Curvature/mm	25.25
Thickness of Pinhole Array/mm	0.2

3 仿真分析

利用 TracePro 光学仿真软件对运用针孔/微透镜组合曲面阵列集成成像系统进行模拟仿真验证, 利用表 1 数据设计如图 7 所示的仿真模型, 系统结构由三维物体、记录部分的针孔/微透镜组合曲面阵列、曲面扩散屏、重构部分的针孔/微透镜组合曲面阵列和平面记录屏阵列组成. 其中, 同一个仿真系统中, 为了使得整个系统的记录与重构阶段每个期间参数的高度匹配, 所有曲面的度数一致; 其中曲面针孔/微透镜阵列为在图 5 的基础上增大针孔阵列的边缘以遮挡非记录范围内的三维物体发出的光线而建立起来的针孔/微透镜组合曲面阵列.

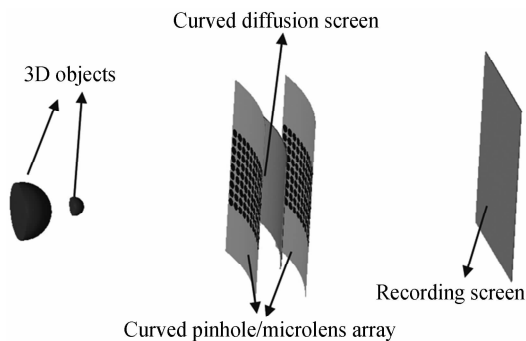


图7 集成成像仿真系统

Fig. 7 The simulation system of integrated imaging

三维物体为两个大小不一的半球, 面对记录部分的针孔/微透镜组合曲面阵列的面设置为表面光源; 记录部分和重构部分的针孔/微透镜组合曲面阵列光学参数是完全一致的, 仿真针孔/微透镜组合曲面阵列时, 将针孔阵列的各个面的属性都设置成全吸收 (Perfect Absorber); 扩散屏在分析记录阶段时设置为光线全吸收, 进行记录三维物体的信息, 而在重构阶段将其设置为光线全通过, 即把记录阶段得到的信息显

示给重构过程;记录屏设置为光线全吸收,负责分析集成成像最后的显示结果,通过观察记录屏的照度图可以量化分析集成成像的效果.根据表 1 进行集成成像系统参数的设置,将建立好的三维物体、透镜阵列以及记录屏、扩散屏按参数放置在相应的位置.最后,进行光线追迹,利用朗伯体发射可以分析扩散屏和记录屏所得到的集成成像的记录阶段与重构阶段的结果.

为了体现其所改善的效果,将曲面针孔/微透镜阵列集成成像仿真系统与传统集成成像系统(平面微透镜阵列)从不同角度获得的重构图进行比较.图 8 为接收屏分别在 0° 、 10° 、 20° 、 30° 处的重构图.由图可以明显看出,采用曲面针孔/微透镜阵列集成成像仿真系统和传统集成成像系统得到的重构图两个半球的相对位置都随接收屏位置(观看角度)的变化而变化,表明通过设置不同角度接收屏位置可以很好地获得不同观看角度下的重构图像.对于传统模式,随着视场角变大,重构图像变得越来越不清晰;而采用曲面针孔/微透镜阵列所成图像随视场角变大,影响不是很明显.在相同视角下,采用曲面针孔/微透镜阵列集成成像仿真系统比采用传统集成成像系统得到的重构图像更加清晰,特别是在较大观看视角(如 30°)下,采用传统集成成像系统无法观看到完整的重构图像,而采用曲面针孔/微透镜阵列集成成像仿真系统仍然可以获得完整清晰的重构图像.结果表明,本文方法得到的视场角比传统集成成像系统的视场角要大,仿真结果与理论分析一致.

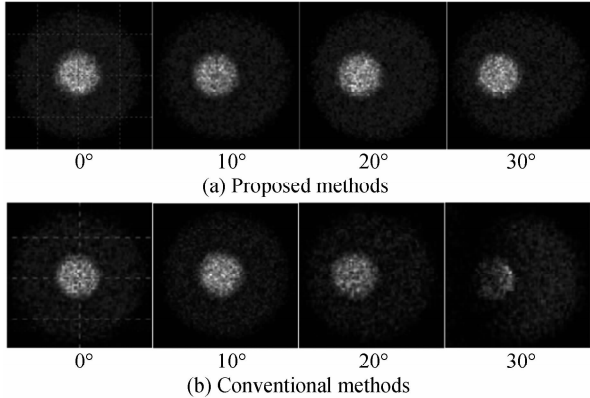


图 8 集成成像不同视角下的观测结果
Fig. 8 The reconstructed images with different viewing angles

视场角变化大小主要与透镜的焦距和曲面度数有关,又由于在微透镜阵列其他参数不变的情况下,曲面度数的增大会使得接收到的光线总数减少进而影响重构图像的质量,故而曲面的度数并不是越大越好,还需要结合重构图的质量进行分析,为此进行了多组仿真模拟分析发光源经过曲面针孔/微透镜阵列集成成像系统得到的重构图.为了验证曲面度数、视场角、重构图三者之间的关系,选择从 10° 依次增大曲面角度进行仿真,仿真结果如图 9 所示,曲面角度分别为 10° 、 20° 、

30° 、 40° 、 50° 、 60° 的曲面针孔/微透镜阵列系统仿真得到重构图.由图 9 可知,在本文的多组仿真模拟中,随着曲面度数的增大,两个半球的相对位置逐渐变大,即视场角逐渐变大;但是由于曲面度数的增加使得接收到的光线变少,所以接收屏接收到的图像变得模糊.由图可知,当曲面度数为 30° 时,接收面接收到的光线数目最多(图 10 为 20° 到 40° 记录屏接收到的光线的总数),得到的视场角较大且重构图质量较好.当曲面度数大于 30° 时,虽然视场角继续增大,但是接收屏接收到的图像质量变差.因此,本文集成成像系统中,当曲面针孔/微透镜阵列的曲面度数为 30° 时,获得的重构图图像综合性能最好.

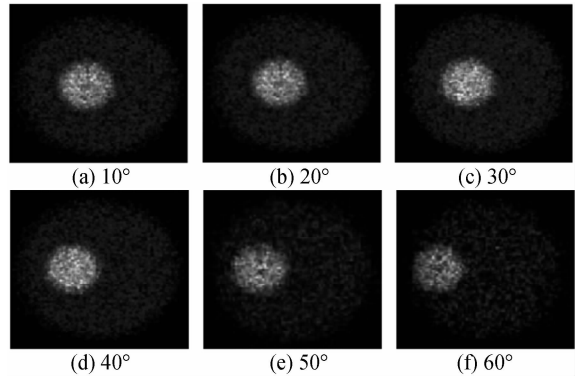


图 9 各种角度的曲面针孔/微透镜阵列集成成像系统得到的重构图

Fig. 9 The reconstruction figure of curved pinhole/microlens array integrated imaging system with various angles

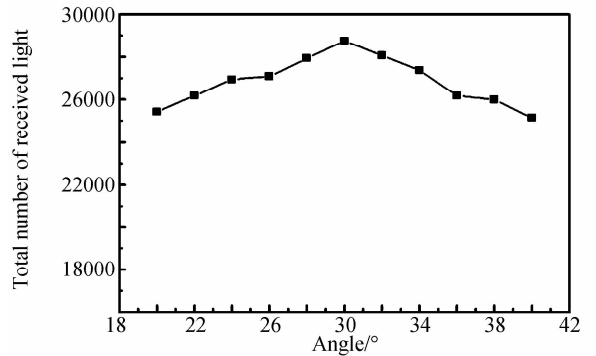


图 10 记录屏接收的光线总数 ($20^\circ \sim 40^\circ$)

Fig. 10 The total number of the received light in receiving screen ($20^\circ \sim 40^\circ$)

4 结论

本文提出了一种曲面组合微透镜阵列来提高集成成像 3D 显示的视场角.首先通过理论分析,得出使用曲面微透镜阵列可以在微透镜数目相同的情况下获得更广的视场角,从而获得更加全面的物体三维信息.采用 TracePro 光学仿真软件对曲面针孔/微透镜阵列集成成像 3D 显示系统进行了对比仿真,分析比较了平面

微透镜阵列与曲面微透镜阵列在不同视场角下的重构图像效果。仿真结果表明:采用曲面针孔/微透镜阵列可以增加重构图像的视场范围,从而表明了曲面微透镜阵列可以提高重构图像的视场角,在曲面度为 30° 左右得到的视场角是较大的,重构图像的质量也是较好的。

参考文献

- [1] XU Yin. Light field transformation and reconstruction in three dimensional integral imaging displays[D]. Xi'an: Engineering of Electronic Science and Technology School of Xi'an University, 2013:1-126.
徐茵.集成成像三维显示光场转换与重构方法研究[D].西安:西安电子科技大学工学系,2013:1-126.
- [2] 王琼华.3D显示技术与器件[M].北京:科学出版社,2011:2-245.
- [3] TAY S, BLANCHE P A, VOORAKARANAM R, et al. An updatable holographic three-dimensional display[J]. *Nature*, 2008, **451**(7179): 694-698.
- [4] WANG Yu, CHEN Dian-ren, PU Yan, et al. Computational reconstructed three-dimensional image based on disparity information[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11):2968-2971.
王宇,陈殿仁,朴燕,等.基于视差信息的三维图像的计算机重构[J].光子学报,2009,**38**(11):2968-2971.
- [5] JIAO Tian-tian, WANG Qiong-hua, LI Da-hai, et al. Computer-generated integral imaging based on 3DS MAX[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, **23**(5):621-624.
焦甜甜,王琼华,李大海,等.基于3DMAX的集成成像研究[J].液晶与显示,2008,**23**(5):621-624.
- [6] WANG J, SUENAGA H, LIAO H, et al. Real-time computer-generated integral imaging and 3D image calibration for augmented reality surgical navigation[J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2015, **40**: 147-159.
- [7] ZHANG Lei, YANG Yong, ZHAO Xing, et al. Enhancement of viewing angle of multi-stage projection-type integral imaging 3D display[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(1):1-6.
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.
- [8] ZHAO Xing, WANG Fang, YANG Yong, et al. Research progress of display performance of integral three dimensional imaging three-dimensional display system[J]. *Chinese Optics*, 2012, **5**(3):209-221.
赵星,王芳,杨勇,等.集成成像三维显示系统显示性能的研究进展[J].中国光学,2012,**5**(3):209-221.
- [9] DENG Huan, LI Shu-li, WU Fei, et al. Toed-in integral imaging with enhanced 3D viewing angle[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(1):1-6.
邓欢,李述利,吴非,等.增大3D观看视角的会聚式集成成像[J].光学精密工程,2014,**22**(1):1-6.
- [10] GOU Jian, YIN Sao-yun, DENG Qi-ling, et al. Design of motion parallax stereoscopic display system based on bilayer microlens array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4):1-4.
苟健,尹韶云,邓启凌,等.基于双层微透镜阵列的移动视差式立体显示屏[J].光子学报,2014,**43**(4):1-4.
- [11] ALAM M A, KWON K C, PIAO Y L, et al. Viewing-angle-enhanced integral imaging display system using a time-multiplexed two-directional sequential projection scheme and a DEIGR algorithm[J]. *Photonics Journal, IEEE*, 2015, **7**(1): 1-14.
- [12] YI Ding. "Surface TV show performance evaluation norms" released[J]. *Appliances*, 2014, **12**(12):44-45.
一丁.《曲面电视显示性能评价规范》发布[J].电器,2014,**12**(12):44-45.
- [13] OSHIMA Y, TAKAHASHI H, YAMADA K. Wide viewing angle three-dimensional display using curved HOE lens array [C]. IS&T/SPIE Electronic Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2013: 86481N-86481N-9.
- [14] YANG Wen-ping, GUO Zhen-ning, LIN Jie-ben, et al. Design of double freeform-surface lens with large view angle for uniform illumination of the near-filed[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(1):1-6.
颜稳萍,郭震宁,林介本,等.实现近场均匀照明的双自由曲面大角度透镜设计[J].光子学报,2015,**44**(1):1-6.
- [15] CAO Bao-zhu. Research on the stereoscopic display technology of integral imaging based on LCD[D]. Xi'an: Engineering of Electronic Science and Technology School of Xi'an University, 2011:1-70.
曹保柱.基于LCD的集成成像立体显示技术研究[D].西安:西安电子科技大学工学系,2011:1-70.
- [16] ZHOU Xiong-tu, CHEN En-guo, YAO Jian-min, et al. Design and simulation of combined pinholes/microlens array for integral imaging[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, **28**(6):856-860.
周雄图,陈恩果,姚剑敏,等.用于集成成像的针孔微透镜组合阵列设计与仿真[J].液晶与显示,2013,**28**(6):856-860.
- [17] LI Da, ZHAO Xing, YANG Yong, et al. Non-flipping reconstruction system design and implementation in three dimensional integral imaging[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2012, **23**(1):35-40.
黎达,赵星,杨勇,等.三维集成成像中无串扰显示系统的设计与实现[J].光电子激光,2012,**23**(1):35-40.