

文章编号:1007-2780(2013)06-0855-05

用于集成成像的针孔/微透镜组合阵列设计与仿真

周雄图, 陈恩果, 姚剑敏, 徐 胜, 曾祥耀, 林金堂, 张永爱, 郭太良*

(福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350002, E-mail:xtzhou@fzu.edu.cn)

摘 要: 集成成像 3D 显示是一种利用微透镜阵列进行三维信息记录和重现的技术, 针对集成成像 3D 显示过程中, 微透镜之间间隙导致的杂散光引起干扰以及微透镜所成像之间的串扰导致的重构图像质量下降原因, 采用针孔阵列的不透光部分来屏蔽杂散光, 构建了针孔/微透镜组合阵列结构。根据集成成像原理, 分析针孔/微透镜组合阵列的参数, 并利用 Tracepro 光学软件对集成成像 3D 显示过程进行仿真, 结果显示: 在记录和重构阶段, 针孔/微透镜组合阵列都能有效减少通过微透镜之间间隙的杂散光引起的与成像无关的亮斑, 提高图像显示质量; 当记录阶段和重构阶段均采用针孔/微透镜组合阵列时, 得到的重构图像质量最好。

关 键 词: 光学设计; 集成成像 3D 显示; 针孔阵列; 微透镜阵列

中图分类号: O435; TN27 文献标识码: A DOI: 10.3788/YJYXS20132806.0855

Design and Simulation of Combined Pinholes/Microlens Array for Integral Imaging

ZHOU Xiong-tu, CHEN En-guo, YAO Jian-min, XU Sheng,

ZENG Xiang-yao, LIN Jin-tang, ZHANG Yong-ai, GUO Tai-liang*

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China, E-mail:xtzhou@fzu.edu.cn)

Abstract: Integral imaging is a display technology which captures and displays three-dimensional (3D) information using microlens array, stray light from the intervals between the elemental lens and crosstalk between the elemental images might affect the quality of the reconstructed image. This paper presents a combined pinholes/microlens array, in which the pinholes array was used to reduce the stray light. The parameters were designed and analyzed according to the principle of integral imaging, and the 3D display process was simulated using Tracepro. The results show that the presence of pinholes array reduces remarkably the light spots irrelevant to the imaging during both the pickup and reconstruction of images. Especially, when the pickup lens and reconstructed lens were both pinholes/microlens array, the reconstructed image with the highest quality was obtained.

Key words: optical design; integral imaging 3D display; pinholes array; microlens array

1 引 言

三维 (Three-Dimensional, 3D) 显示器件已

经走入寻常百姓家庭, 并且市场需求强劲, 发展势头迅猛。然而, 从技术角度来看, 3D 显示仍然处于研发阶段, 各种新的 3D 显示方案正在完善和

收稿日期: 2013-05-04; 修订日期: 2013-06-06

基金项目: 国家“863 计划”课题 (No. 2012AA03A301); 教育部博士点基金 (No. 20133514120011); 福建省教育厅项目 (No. JK2012001)

作者简介: 周雄图 (1982—), 男, 福建晋江人, 博士, 讲师, 主要从事光电显示技术的研究。

* 通信联系人, E-mail: gtl_fzu@hotmail.com

改进当中。现阶段,3D 显示主要有视差立体显示、全息立体显示和集成成像立体显示等 3 种实现方法。其中,视差立体显示由于左右眼的会聚点和双眼调节角度不重合、多视点图像之间的串扰、以及三维图像的景深动态变化等,长时间观看会产生视觉疲劳和不适感^[1]。全息立体显示通过相干光重建三维场景,能无损的获取和重建全部的三维信息,但是全息影像技术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^[2-3]。

集成成像(Integral Imaging, II)是一种介于裸眼双目视差立体显示与全息立体显示之间的真三维立体显示技术,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;能够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;能与现有高清晰度电视有很好的兼容性等优点,已成为 3D 显示领域中的重要研究课题^[4-7]。然而,当前集成成像 3D 显示仍然存在一些问题:如图像分辨率低、景深范围小、视角窄以及不能进行 2D/3D 显示模式的转换等。其中,图像分辨率低,显示质量不好更是实现其产业化亟需解决的关键科学技术问题。国内外学者对提高集成成像 3D 显示的图像分辨率进行了广泛地研究,如文献[8]通过准直透镜、附加微透镜阵列、重构微透镜阵列和空间光调制器构成的集成成像显示系统来提高 3D 图像的分辨率。国内西安电子科技大学的王晓蕊教授课题组通过新的插值算法^[9]和基于微扫描的三维集成成像技术^[10]来改善三维成像的纵向分辨率,从而提高显示质量。

微透镜阵列是集成成像 3D 显示系统中最为关键的光学器件,其制作工艺比较复杂,文献[11]采用柱透镜阵列和狭缝光栅阵列组合来替代微透镜阵列,取得一定效果,但图像质量有待进一步提高。现有研究大多从成像系统和图像处理方面上提出解决思路,对微透镜阵列的结构和加工精度所导致的图像质量降低因素考虑较少。事实上,由于系统设计需要或者微透镜阵列加工精度不够高等原因,获取微透镜阵列和重构微透镜阵列中微透镜之间无法实现无缝结合,微透镜之间间隙通过的杂散光引起干扰以及微透镜所成像之间的串扰将严重导致集成成像图像质量的降低,是影响集成成像 3D 显示质量的一个不容忽视的问

题。本文在传统集成成像原理的基础上,提出一种针孔阵列和微透镜阵列结合的组合微透镜阵列结构,来提高集成成像 3D 显示的图像质量,并通过 Tracepro 软件对组合微透镜阵列结构的图像显示质量进行仿真分析。

2 集成成像原理和理论分析

集成成像 3D 显示技术是一种利用两个微透镜阵列分别实现三维目标立体信息记录和立体图像重构显示的图像技术。在记录阶段,记录微透镜阵列中不同位置的微透镜记录下三维目标不同空间角度的信息,在记录和重构中最主要的光学结构是微透镜阵列,一般两个阶段的微透镜阵列参数完全一致,重构过程是记录过程的逆过程。集成成像 3D 显示原理如图 1 所示,在图像获取过程中,微透镜阵列作为摄影物镜,根据几何光学原理,就会在其共轭面成一个像。在重构过程中,微透镜阵列作为投影物镜,根据光路可逆,每个微单元图像通过相应的微透镜成像,最后融合成一幅视角连续并含有三维信息的集成像。在图 1 中,微透镜的直径为 w ,焦距为 f ,AB 为三维目标, y' 为获取的微单元图像大小, y 为重现场景的大小, g 为重现时的物距, L 为像距, θ 为微单元透镜的视场角。根据透镜公式和图 1 中的几何关系可以得到:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{L} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

$$y = 2L \tan \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

$$\frac{y}{y'} = \frac{L}{g} \quad (3)$$

综合上述分析可知, y 为已知三维目标,由公式(1)~(3)可得其余参数的比例关系,但有多种

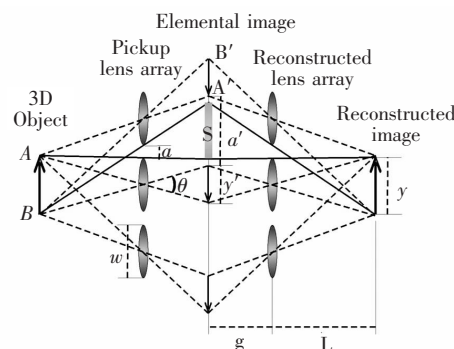


图 1 集成成像原理示意图

Fig. 1 Scheme of integral imaging

参数组合, 可根据显示器件的基本参数和显示观看的应用要求来确定取值, 实现高质量的集成成像 3D 显示。

3 针孔/微透镜组合阵列设计

在实际应用过程中, 微透镜阵列中的微透镜一般不会无缝结合。对于圆形微透镜, 相邻微透镜之间存在一部分间隙, 如图 2(a) 所示。由于微透镜阵列一般是加工在透明基板上, 相邻透镜之间间隙就会造成在微单元图像获取和重构时, 出现与成像无关的亮斑, 如图 1 中的 S 所示, 使得 3D 显示图像质量严重下降。近年来, 研究学者^[12-13]采用 3ds max 等软件或摄影机阵列代替微透镜阵列进行图像获取, 虽然可以避免由于相邻微透镜间隙造成的杂散光干扰和光学仪器造成的成像偏差, 然而, 在图像重构时, 仍无法避免相邻微透镜间隙造成的影响。

文中采用针孔阵列和微透镜阵列组合, 利用针孔阵列不透光部分挡住穿过微透镜阵列中相邻透镜之间间隙的光线, 而针孔阵列的小孔(透光部分)形状与微透镜阵列的透镜一致, 尺寸等于透镜尺寸, 且两者中心重合, 使得通过透镜的光线同时能通过针孔阵列, 从而对图像进行记录和重构。针孔光栅与针孔/微透镜组合阵列的示意图如图 2(b)、(c) 所示。

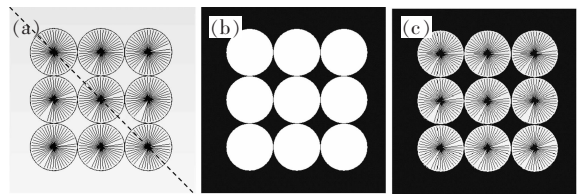


图 2 针孔/微透镜组合阵列示意图。(a)单一微透镜阵列,(b)针孔阵列,(c)针孔/微透镜组合阵列。
Fig. 2 Scheme of combined pinholes/microlens array. (a) microlens array; (b) pinholes array; (c) combined pinholes/microlens array.

集成成像 3D 显示系统的设计, 主要是对系统中微透镜阵列的尺寸, 微透镜的尺寸、焦距和个数, 微透镜阵列与微单元图像的间距等参数进行确定。首先根据 3D 显示观看的应用需求, 确定用于显示微单元图像阵列的显示器尺寸和组合透镜阵列尺寸; 随后结合人眼的视觉特性要求确定最佳观察距离 L (即图像重构时的像距); 最后根

据理论计算或模拟仿真得出最佳的微透镜参数(焦距、孔径等)和 3D 显示系统参数。文中根据文献[14]中的无串扰集成成像 3D 显示系统的参数进行仿真分析, 具体微透镜参数和 3D 显示系统参数如表 1 所示。

表 1 透镜和集成成像系统参数
Table 1 Parameters of microlens array and integral imaging system

Lens and imaging system	Parameters
Number of lens	9×9
Focal length /mm	19.64
Aperture /mm	5
Shape of lens	Circle
Material	PMMA
Object distance (g) /mm	16.84
Image distance (g) /mm	117.8

4 仿真分析

为了验证组合微透镜阵列在提高图像显示质量的效果, 采用 Tracepro 光学软件构建仿真系统, 仿真结构模型示意图如图 3 所示。仿真系统由 3D 目标物、记录微透镜阵列、扩散屏幕、重构微透镜阵列以及观察屏组成。其中, 3D 目标物为“F”字母物体, 面对记录微透镜阵列的一面全部设置为发光源。记录微透镜阵列和重构微透镜阵列的光学参数一致, 仿真单一微透镜阵列时, 非微透镜部分设置成光线全透过属性; 仿真针孔/微透镜组合阵列时, 非微透镜部分设置成光线全吸收属性(即针孔光栅的不透光部分), 针孔光栅小孔的孔径与微透镜孔径相等。扩散屏幕在记录阶段

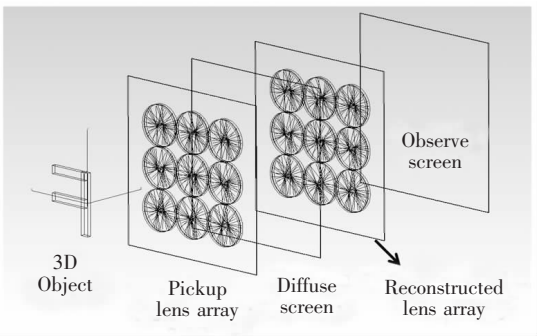


图 3 集成成像仿真系统结构图
Fig. 3 Simulating system structure of integral imaging

设置成全吸收,充当记录屏;在重构阶段设置成具有 99%透过的扩散属性,充当显示面板,将记录阶段记录的微单元图像阵列直接提供给重构阶段使用。观察屏设置成光线全吸收属性,并通过软件观察其照度分布。

在进行集成成像系统参数的设置时,首先根据表 1 微透镜参数和公式(4)计算出微透镜的曲率半径,并建立微透镜阵列模型;然后,根据表 1 集成成像系统参数,分别确定 3D 目标物、记录微透镜阵列、扩散屏幕、重构微透镜阵列以及观察屏的位置。最后,指定 3D 目标物发光面的光学属性,采用朗伯体发射,进行光线追迹,分别观察和分析扩散屏幕和观察屏所得到的记录微单元图像和重构图像。

$$\frac{1}{f} = \frac{2(n-1)}{r} \quad (4)$$

仿真结果表明,通过微透镜阵列与针孔阵列的结合能有效解决微透镜之间间隙导致的杂散光对集成成像图像的干扰。图 4 为记录阶段,有无结合针孔阵列对获取微单元图像质量的影响,从图中可以看出,当没有组合针孔阵列,使用单一微透镜阵列时,在记录面(扩散屏)内出现很多与成像无关的亮斑(图 4a),证实了我们前面所分析的微透镜之间间隙导致的杂散光对集成成像图像的

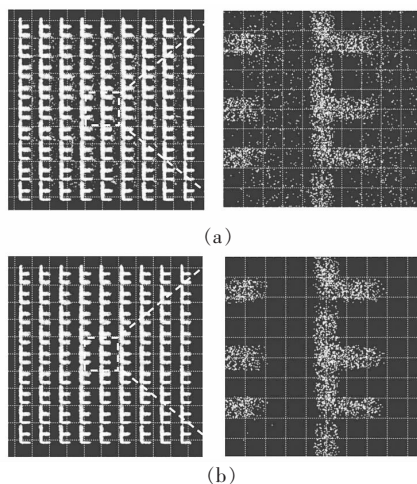


图 4 仿真系统记录的微单元图像。(a)使用单一微透镜阵列获取的图像;(b)使用针孔/微透镜阵列获取的图像。

Fig. 4 Elemental images captured by the simulating system. (a) Elemental images captured using microlens array; (b) Elemental images captured using combined pinholes/microlens array.

干扰,这些亮斑大大降低图像显示质量,并将对后续的重构图像产生影响。而当使用针孔/微透镜组合阵列时,几乎看不到与成像无关的亮斑,针孔阵列的加入有效提高了微单元图像的质量。

对于重构图像质量研究,我们分为 3 种情况来考察:(1)记录和重构阶段均使用单一微透镜阵列;(2)记录阶段使用针孔/微透镜组合阵列,而重构阶段使用单一微透镜阵列;(3)记录和重构阶段均使用针孔/微透镜组合阵列;对应的重构图像分别如图 5(a)、(b)、(c)所示。从图中可以看出,当记录和重构阶段均使用单一微透镜阵列,由于记录的微单元图像本身质量就不好,再用于重构,得到的重构图像质量更差,出现了大量与成像无关的斑点,严重影响重构图像质量。在实际应用中,虽然采用摄影机阵列或图像软件获取微单元图像用于 3D 图像重构,可获得近于理想的微单元图像阵列,用这样高质量的微单元图像阵列进行 3D 重构,如果使用单一微透镜阵列,由于杂散光影响,仍然无法获得高质量的重构图像;在仿真中,我们采取记录阶段使用针孔/微透镜组合阵列,而重构阶段使用单一微透镜阵列,获得的重构图像比情况(1)有所改善,但仍然存在很多杂散光斑点,如图 5(b)所示。当记录和重构阶段均使用针孔/微透镜组合阵列,重构图像质量有了很大的改善,大部分杂散光被针孔光栅的不透光部分屏蔽,只存在少量的与成像无关的亮斑,这种情况下,亮斑可能由于微单元图像的光线通过与之不对应的微透镜形成的。仿真结果表明,在记录和重构阶

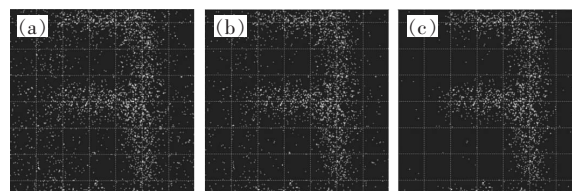


图 5 仿真系统重构图像。(a)记录和重构阶段均使用单一微透镜阵列;(b)记录阶段使用单一微透镜阵列,重构阶段均使用针孔/微透镜组合阵列;(c)记录和重构阶段均使用针孔/微透镜组合阵列。

Fig. 5 Reconstructed images obtained by the simulating system. (a) Microlens array was used in the pickup and reconstruction; (b) Pinholes/microlens was used in the pickup, microlens array was used in the reconstruction; (c) Pinholes/microlens was used in the pickup and reconstruction.

段,针孔/微透镜组合阵列能有效减少杂散光引起的图像干扰,很好地改善重构图像质量。

5 结 论

微透镜之间间隙导致的杂散光引起干扰以及微透镜所成像之间的串扰将导致集成成像重构图像质量下降。文章提出采用针孔阵列的不透光部

分来屏蔽杂散光,构建了针孔/微透镜组合阵列结构。Tracepro 光学软件仿真结果显示,在记录和重构阶段,针孔/微透镜组合阵列都能有效减少微透镜之间间隙通过杂散光引起的与成像无关的亮斑,提高图像质量。当记录阶段和重构阶段均采用针孔/微透镜组合阵列时,得到的重构图像质量最好。

参 考 文 献:

- [1] 张兴,郑成武,李宁,等. 液晶材料与3D显示[J]. 液晶与显示,2012,27(4):448-455.
- [2] Tomoyoshi S, Atsushi S, Nobuyuki M, *et al.* Electroholographic display unit for three-dimensional chip for holography and reflective LCD panel [J]. *Optics Express*, 2005, 13(11):4196-4201.
- [3] Tay S. An updatable holographic three dimensional display [J]. *Nature*, 2008, 451:694-698.
- [4] 伍春洪,游福成,杨扬. 一种基于三维全景图像的深度测量方法 [J]. 中国图像图形学报,2006,11(4):563-569.
- [5] Wu C H, McCormick M, Aggoun A. Depth mapping of integral images through viewpoint image extraction with a hybrid disparity analysis algorithm [J]. *J. Display Technology*, 2008, 4(1):101-108.
- [6] 王红霞,伍春洪,杨扬,等. 记录分辨率对Ⅱ三维重建分辨率的影响 [J]. 计算机科学,2009,36(5):279-281.
- [7] Xu J, Gui H, Ji F, *et al.* Multi-viewing points 3D digital display using integral imaging [J]. *Proceeding of SPIE*, 2007, 6832: R1-R10.
- [8] Park J H, Kim J, Kim Y. Resolution-enhanced three-dimension/two-dimension convertible display based on integral imaging [J]. *Optics Express*, 2005, 13(6):1875-1884.
- [9] Wang X R, Guo Q. Enhancing computational integral imaging performance using an interpolation method based on non-zero-pixel derivation [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(20):3997-4003.
- [10] Wang X R, Hua H. Theoretical analysis for integral imaging performance based on micro-scanning of a microlens array[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(5):449-451.
- [11] Wang X H, Deng H, Jiao T T, *et al.* Imitating micro-lens array for integral imaging [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(5):512-514.
- [12] 焦甜甜,王琼华,李大海,等. 基于3DS MAX的集成成像研究[J]. 液晶与显示,2008,23(5):621-624.
- [13] 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,2011,16(9):2050-2056.
- [14] 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.