

基于光孔阵列的集成成像三维显示方法

刘 尧 邓 欢 罗成高 王琼华

(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要 集成成像较小的再现深度一直都限制着集成成像的发展和应用, 针对此问题提出了一种增大集成成像再现深度的方法。该方法在微透镜阵列与显示屏之间附加一个光孔阵列, 利用光孔阵列限制显示屏上像素发出光线的发散角, 从而有效地增大集成成像的再现深度。对集成成像的再现原理进行了深入分析, 讨论了光孔直径与集成成像再现深度的关系。采用 ASAP 光学模拟软件对所提方法和传统方法进行了模拟对比实验, 实验结果显示当光孔直径占透透镜元节距的 64% 时, 所提方法的再现深度是传统集成成像再现深度的 1.5 倍, 实验结果验证了理论推导的正确性。

关键词 成像系统; 再现深度; 光孔阵列; 微透镜阵列; 三维显示

中图分类号 TN141 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0910004

An Integral Imaging Three Dimensional Display Method Based on Aperture Stop Array

Liu Yao Deng Huan Luo Chenggao Wang Qionghua

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract The performance of integral imaging three-dimensional (3D) display is limited by the limited depth-of-field. A method for enhancing the depth-of-field of integral imaging is proposed. This method adds an aperture stop array in the conventional integral imaging system, and the aperture stop array is used to limit the divergence angle of each pixel in the display panel. The principle of integral imaging is analyzed and the relationship between the size of aperture stop and the depth-of-field is studied in detail. Both the proposed method and conventional method are simulated by optical design software ASAP, and the simulation results show that the depth-of-field of the proposed method is 1.5 times of the conventional method when the aperture stop diameter accounts for 64% of the pitch micro-lens. The experimental results verify the correctness of the theoretical analysis.

Key words imaging systems; depth-of-field; aperture stop array; micro-lens array; three-dimensional display

OCIS codes 100.6890; 110.1220; 110.2990; 080.363

1 引 言

伴随着科学技术的不断发展, 裸视三维 (3D) 显示逐渐成为显示领域的一个研究热点。现阶段, 裸视 3D 显示主要有光栅 3D 显示、集成成像 3D 显示、体 3D 显示, 全息 3D 显示等^[1-4], 其中集成成像 3D 显示以其全视差、连续视点、无视疲劳等诸多优点而备受关注^[5-7]。集成成像最早是由 Lippmann^[8] 于 1908 年提出, 是一种利用微透镜阵列来记录和再现

空间 3D 场景的真 3D 显示技术。

在集成成像的记录和再现阶段都要使用到微透镜阵列, 由于微透镜阵列的特殊结构^[9], 以及拍摄器件和显示器件的分辨率有限等诸多因素, 集成成像还存在一系列的缺点和不足: 如 3D 图像的深度反转、观看视角小、分辨率低、再现深度小等问题^[10-12]。再现深度 (DOF) 是指中心深度平面 (CDP) 附近 3D 图像的厚度, 即 3D 图像前后边缘深

收稿日期: 2014-04-22; 收到修改稿日期: 2014-05-08

基金项目: 国家 863 计划 (2012AA011901, 2012AA03A301)、四川省科技计划 (2013GZ0018, 2013TD0002)

作者简介: 刘 尧 (1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事集成成像显示方面的研究。E-mail: 844875758@qq.com

导师简介: 王琼华 (1969—), 女, 博士, 教授, 主要从事信息显示方面的研究。E-mail: qhwang@scu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: huandeng@scu.edu.cn

度平面(MDP)之间的距离。针对再现深度小这一问题,研究人员对其进行了大量的研究,并提出了一系列行之有效的解决方法。2003年,Jang等^[13]提出了利用不同焦距、不同节距的透镜元组成复合微透镜阵列来增大再现深度,利用不同参数的透镜元形成不同的中心深度平面,通过合理的参数设计使得不同的再现深度区间彼此连接,从而增大再现深度,但同时也减小了3D分辨率。2007年,Castro等^[14]提出在传统透镜元前面添加一个不对称的相位掩膜来增大再现深度,相位掩膜不仅可以聚集光的能量,还能够阻止特定频率的光波通过透镜元,使得在同一成像平面上的衍射斑比不加相位掩膜时的衍射斑小很多,从而改善像的质量,增大再现深度。2012年,张蕾等^[15]提出了一种投影式集成成像显示系统,该系统通过一个辅助透镜来减小每个像素的发散角,使得在非中心深度平面上的弥散斑半径减小,从而增大再现深度,但该方法只适用于投影式显示系统。在前人研究的基础上,本文提出了一种基于光孔阵列的集成成像3D显示方法,该方法在微

透镜阵列的前面添加一个光孔阵列来减小像素光线的发散角,从而有效地增大集成成像的再现深度。

2 原 理

传统的集成成像3D显示方法原理如图1(a)所示。 f, p 分别为透镜元的焦距和节距。假设人眼所能接受的最大弥散斑直径为 s 。根据文献[16]并结合图1(a)可得传统集成成像显示方法的再现深度(F_{DOF})为

$$F_{\text{DOF}} = 2 \frac{sl}{p}, \quad (1)$$

式中 g, l 分别为显示面板到微透镜阵列和微透镜阵列到中心深度平面的距离,它们之间满足高斯公式:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f}, \quad (2)$$

传统集成成像显示方法的观看视角为

$$\alpha = 2\arctan\left(\frac{p}{2g}\right). \quad (3)$$

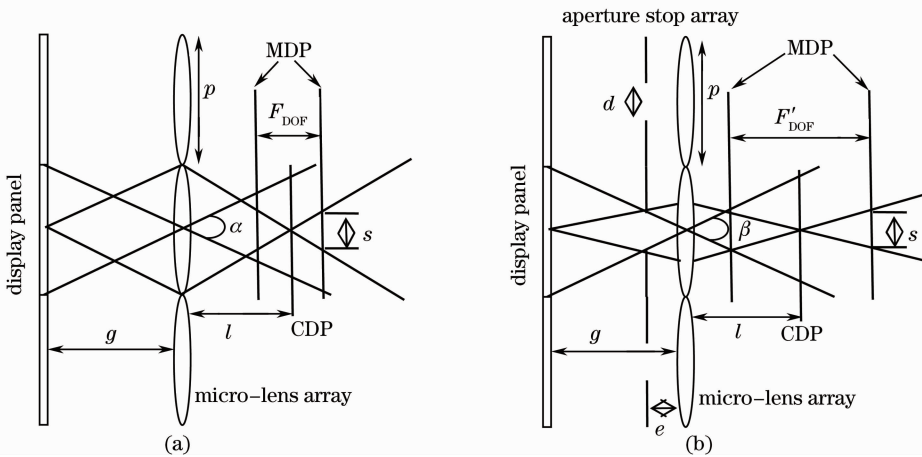


图1 集成成像3D显示方法原理示意图。(a)传统方法;(b)基于针孔阵列的方法

Fig. 1 Structure of an integral 3D imaging method. (a) Conventional method; (b) based on aperture

提出的基于光孔阵列的集成成像3D显示方法的原理如图1(b)所示。 d 和 e 分别为光孔的直径和光孔与微透镜阵列之间的距离。可得提出的集成成像的再现深度(F'_{DOF})和观看视角分别为

$$F'_{\text{DOF}} = 2 \frac{sl(g-e)}{gd}, \quad (4)$$

$$\beta = 2\arctan\left(\frac{d}{2e}\right). \quad (5)$$

比较(1)式和(4)式,当光孔阵列中光孔的直径和光孔阵列到微透镜阵列的距离满足关系式

$$d \leq \frac{p(g-e)}{g}. \quad (6)$$

此时 $F'_{\text{DOF}} \geq F_{\text{DOF}}$,即本文提出方法的再现深度比传统方法的再现深度大。

比较(3)式和(5)式,当光孔与透镜元之间的距离与光孔直径满足关系式:

$$d \geq \frac{ep}{g}. \quad (7)$$

此时 $\beta \geq \alpha$,考虑到显示屏上图像元的限制,观看视角仍为 α ,与传统集成成像方法的观看视角一样。

在不考虑光散射和光吸收的情况下,提出的集成成像显示方法的光透射率为

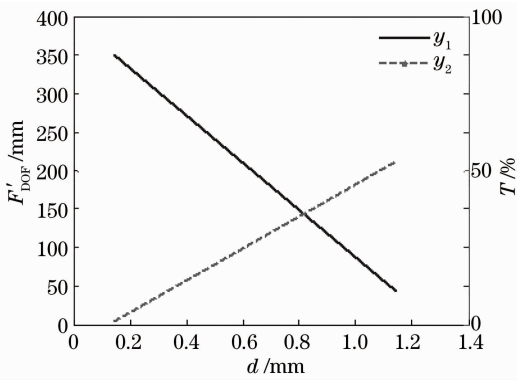
$$T = \frac{d^2}{p^2} \times 100\% \quad (8)$$

用数字模拟来验证光孔直径与再现深度、光透射率之间的关系。所用参数如表 1 所示,由(6)、(7)式得 d 的取值范围为 0.143~1.427 mm。数字模拟结果如图 2 所示。

表 1 数字模拟参数

Table 1 Digital simulation parameters

Parameters	Values /mm
p	1.57
g	5.5
s	0.5
e	0.5

图 2 F'_{DOF} 和 T 随 d 变化的曲线Fig. 2 F'_{DOF} and T with different d

从图 2 可以看出,采用提出的方法,随着光孔直径 d 的逐渐减小再现深度随之增大,光透射率随之减小。也就是说在所提方法中再现深度和光透射率之间是相互制约的,需要根据具体的应用要求适当的选取参数。在不考虑光透射率的情况下,本文提出的集成成像显示方法在所给参数下的再现深度可高达 349 mm。

3 实验和分析

为了验证本文提出方法的正确性和有效性,采用 ASAP 光学模拟软件对提出的方法和传统方法进行对比光学模拟实验。在光学模拟实验中,为了保证增加再现深度的同时光透射率不受到显著地影响,取光孔直径 $d=1$ mm,系统其余的参数如表 1 和表 2 所示。由理论计算公式可知,在此参数条件下,提出的方法和传统方法的再现深度的理论值分别为 50 mm 和 35 mm,提出方法的理论光透射率为传统方法理论光透射率的 41%。

表 2 光学模拟参数

Table 2 Optical experiment parameters

Specifications	Characteristics
Lens shape	Square
Lens number	10(H)×10(V)
f /mm	5

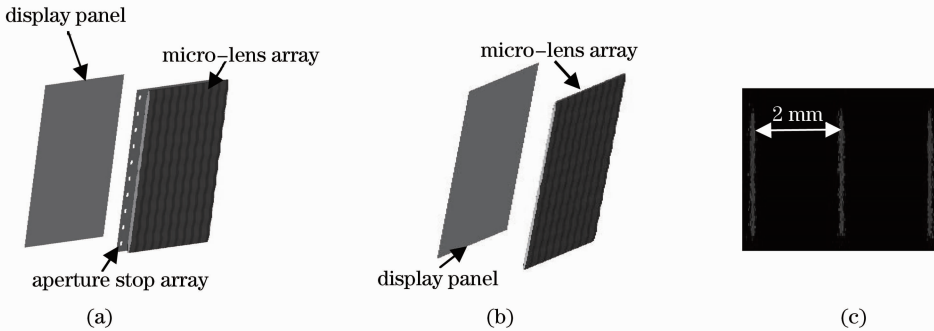


图 3 (a) 所提结构; (b) 传统结构; (c) 线光源

Fig. 3 (a) Proposed system; (b) conventional system; (c) line light source

在 ASAP 软件中根据前面所讨论的参数对本文提出的方法和传统方法进行建模,分别如图 3(a) 和 (b) 所示。光学模拟实验中的三维场景用同一水平面上三个等间距的线光源代替,相邻线光源之间的距离为 2 mm,如图 3(c) 所示。对两种方法的模型分别进行光线追迹,在不同的深度平面上用探测器接收,得到不同深度平面上的三维再现像,如图 4(a)、(b) 所示。

根据光学模拟实验结果可以看出,在两种集成

成像显示方法的中心深度平面上都能够看到清晰的再现像,如图 4(a)、(b) 中 0 mm 所表示的再现像。从图 4(a) 可以看出,在传统方法中,离中心深度平面 13 mm 处,能清晰地分辨再现像,而在离中心深度平面 15 mm 处三个线光源的再现像相互重叠,完全不能分辨出再现像,由于 3D 像在中心深度平面的前后具有近似相同的深度,说明传统集成成像显示方法的再现深度为 30 mm。从图 4(b) 中可以看出,在提出的集成成像显示方法中,不仅 15 mm 处,

再现像能够清晰分辨,在离中心深度平面 20 mm 处,仍然能够分辨出三个线光源的再现像,而在离中心深度平面 23 mm 处三个线光源的再现像开始重叠,不能够被分辨出来。模拟实验结果表明提出集成成像显示方法的再现深度为 46mm,是传统集成成像显示方法的 1.5 倍。实验结果和理论值之间的偏差是由于像差等因素造成的。

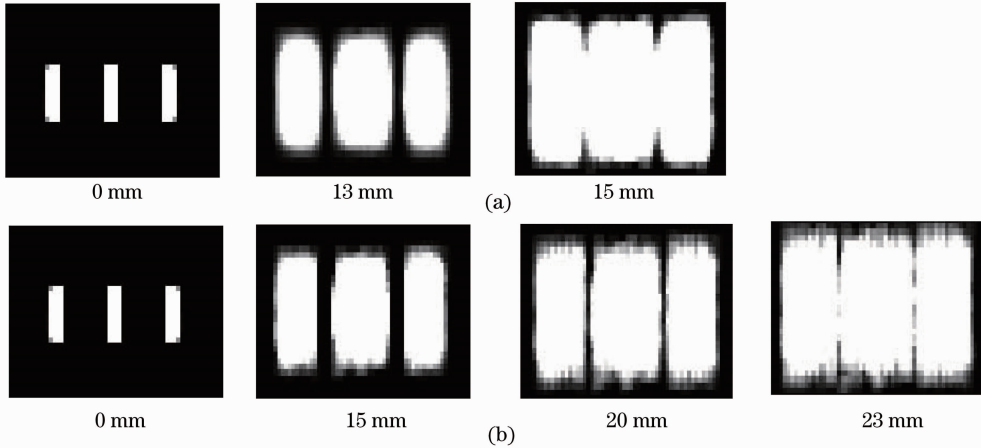


图 4 不同再现深度的再现像。(a)传统方法;(b)所提方法

Fig. 4 Reconstructed images on different plans. (a) Conventional method; (b) proposed method

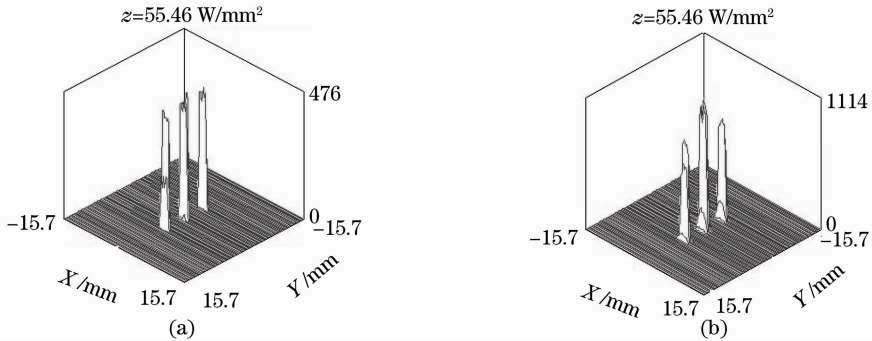


图 5 辐照度的比较图。(a)所提方法;(b)传统方法

Fig. 5 Irradiance distribution. (a) Proposed method; (b) conventional method

光学模拟实验结果很好的验证了提出的方法能在一定程度上增大集成成像的再现深度。

4 结 论

提出了一种基于光孔阵列的集成成像 3D 显示方法。详细地分析了光孔阵列中光孔的直径与再现深度的关系。并在 ASAP 光学软件中对提出的方法和传统方法进行了对比光学模拟实验,实验结果显示,当光孔的直径为 1 mm 时,提出的集成成像显示方法的再现深度是传统方法再现深度的 1.5 倍。当光孔直径进一步减小时,还能更大程度地增大集成成像的再现深度。所提方法的光透射率减小问题,可通过增大显示面板的发光强度来解决。提出

图 5(a)、(b)分别表示提出的集成成像显示方法和传统集成成像显示方法在中心深度平面处再现像的辐照度。从图中可以看出提出的集成成像显示方法和传统集成成像显示方法的再现像中最大的辐照度分别为 476 W/mm^2 和 1114 W/mm^2 ,所提集成成像显示方法的辐照度降低为传统集成成像显示方法辐照度的 43%。

的方法提升了集成成像的再现深度,且结构简单,容易实现,为集成成像的实际应用提供了更广阔的前景。

参 考 文 献

- 1 王琼华. 3D 显示技术与器件[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- 2 Yao Zhenning, Li Haifeng, Liu Xu, *et al.*. An analysis of omnidirectional 3D display system based on scanning LED [J]. Acta optica Sinica, 2011, 31(12): 1233003.
- 姚振宁, 李海峰, 刘旭, 等. 基于 LED 扫描的全景三维显示系统研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1233003.
- 3 Liu Xu, Li Haifeng. Spatial three dimensional display based on the light-field reconstruction [J]. Acta optica Sinica, 2011, 31(9): 0900121.
- 刘旭, 李海峰. 基于光场重构的空间三维显示技术 [J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900121.
- 4 Bai Xiaohui, Wan Lin, Ren Yaping, *et al.*. Reflection

- holography for three-dimensional display based on computer-generated holography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(5): 591–595.
- 拜晓慧, 万琳, 任亚萍, 等. 利用反射全息实现计算全息三维显示 [J]. *光子学报*, 2012, 41(5): 591–595.
- 5 J H Park, K Hong, B Lee. Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(34): H77–H94.
- 6 J Y Son, S H Kim, D S Kim, *et al.*. Image-forming principle of integral photography [J]. *J Disp Technol*, 2008, 4(3): 324–331.
- 7 X Xiao, B Javidi, M Martinez Corral, *et al.*. Advances in three-dimensional integral imaging: sensing, display, and applications [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(4): 546–560.
- 8 G Lippmann. La photographie integral [J]. *Comptes-Rendus Acad Sci*, 1908, 146: 446–451.
- 9 Zhou Xiongtu, Chen Enguo, Yao Jianmin, *et al.*. Design and simulation of combined pinholes/microlens array for integral imaging [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(6): 855–859.
- 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): 855–859.
- 10 Jiao Xiaoxue, Zhao Xing, Yang Yong, *et al.*. Elemental images correction of camera array pick-up for three-dimensional integral imaging [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0309001.
- 焦小雪, 赵星, 杨勇, 等. 基于三维集成成像相机阵列获取的元素图像校正 [J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0309001.
- 11 Yazhou Wang, Qionghua Wang, Dahai Li, *et al.*. Crosstalk-free integral imaging display based on double plano-convex micro-lens array [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(6): 061101.
- 12 L Zhang, Y Yang, X Zhao, *et al.*. Enhancement of depth-of field in a direct projection-type integral imaging system by a negative lens array [J]. *Opt Express*, 2012, 20(23): 26021–26026.
- 13 J S Jang, B Javidi. Large depth-of-focus time-multiplexed three-dimensional integral imaging by use of lenslets with nonuniform focal lengths and aperture sizes [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(20): 1924–1926.
- 14 A Castro, Y Frauel, B Javidi. Integral imaging with large depth of field using an asymmetric phase mask [J]. *Opt Express*, 2007, 15(16): 10266–10273.
- 15 Zhang Lei, Yang Yong, Zhao Xing, *et al.*. Enhancement of field depth for projection-type integral imaging three-dimensional display based on small diverging angle [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1159–1165.
- 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拓展 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1159–1165.
- 16 S W Min, J Kim, B Lee. New characteristic equation of three-dimensional integral imaging system and its applications [J]. *Jpn J Appl Phys*, 2005, 44(2): L71–L74.

栏目编辑：张浩佳