

基于可变孔径针孔阵列的集成成像 3D 显示

范 钧¹, 吴 非^{1,3}, 吕国皎^{1,2}, 赵百川^{1,2}, 邓 欢², 王琼华²

(1. 成都工业学院 电子工程学院, 四川 成都 611730; 2. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065;
3. 电子科技大学 光电科学与工程学院, 四川 成都 610054)

摘 要: 为了解决观看视角与光学效率的相互制约关系, 设计了一种基于可变孔径针孔阵列的集成成像 3D 显示器, 建立了 3D 成像模型, 通过几何光学推导观看视角以及光学效率的计算公式; 详细阐述了如何通过改变透光孔的孔径宽度来调节观看视角以及光学效率; 研制了基于可变孔径针孔阵列的集成成像 3D 显示样机, 通过液晶显示屏实现电控可变孔径针孔阵列, 通过实验验证了可以通过增大或者减小透光孔的孔径宽度来增大 3D 图像的亮度或者观看视角。

关键词: 集成成像; 可变孔径; 针孔阵列; 观看视角; 光学效率

中图分类号: TN141 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0603005

Integral imaging 3D display based on variable-aperture pinhole array

Fan Jun¹, Wu Fei^{1,3}, Lv Guojiao^{1,2}, Zhao Baichuan^{1,2}, Deng Huan², Wang Qionghua²

(1. College of Electronics Engineering, Chengdu Technology University, Chengdu 611730, China;

2. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: To resolve mutual restriction of viewing angle and optical efficiency, an integral imaging (II) 3D display based on a variable-aperture pinhole array was proposed. The imaging model of the II 3D display based on the variable-aperture pinhole array was established. The calculation formulas of the viewing angle and optical efficiency were obtained by using geometrical optics. How to adjust the viewing angle and optical efficiency by changing the aperture width of the pinhole was illustrated in detail. A prototype of the II display based on the variable-aperture pinhole array was developed. The variable-aperture pinhole array was electrically controlled by using a liquid crystal display screen. The experimental results prove that the viewing angle and optical efficiency of the 3D image were respectively enhanced by increasing and decreasing the aperture width of pinhole.

Key words: integral imaging; variable-aperture; pinhole array; viewing angle; optical efficiency

收稿日期: 2018-05-05; 修订日期: 2018-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(61535007, 61705022, 61775151); 四川省应用基础面上项目(2017JY0172)

作者简介: 范钧(1980-), 女, 副教授, 硕士, 主要从事三维显示方面的研究。Email: junfan@cdu.edu.cn

0 引言

“更真实地还原所见世界”一直是人们所追求的目标^[1]。因此,三维(Three-dimensional, 3D)显示成为继平板化和高清化之后显示领域的热点研究方向之一。1908年,法国物理学家、诺贝尔奖获得者 G. Lippmann 首次提出集成成像^[2]。它包含微图像阵列的拍摄和 3D 图像的显示两个部分:微图像阵列的拍摄是通过微透镜阵列对物空间场景成像,获取包含不同视角空间信息的微图像阵列;根据光路可逆原理,3D 图像的显示是通过微透镜阵列或者针孔阵列将微图像阵列中的信息还原到空间中,从而重建出物空间场景的全真 3D 图像。与其他 3D 显示相比,如眼镜式助视 3D 显示、头盔式助视 3D 显示、光栅 3D 显示、体 3D 显示和全息 3D 显示等,集成成像 3D 显示具有全视差、连续视点、适合多人观看、易于实现双视 3D 显示、无需助视设备相干光源等优点^[3-5]。因此,集成成像 3D 显示具有巨大的研究价值和广泛的应用前景,已经成为众多科研机构和跨国公司的重点研究对象之一^[6-8]。虽然近年来集成成像在显示技术与器件方面取得了长足的进步,但是微透镜阵列的制造成本和制造工艺仍然是阻碍基于微透镜阵列的集成成像 3D 显示广泛应用的主要因素之一。与微透镜阵列相比,针孔阵列的光学效率偏低。但是,基于针孔阵列的集成成像 3D 显示具有 3D 景深大、成本低廉、器件厚度薄、节距不受制作工艺限制和易于实现 3D/2D 转换等优点,因此仍然受到众多研究人员的关注^[9-12]。文中提出一种基于可变孔径针孔阵列的集成成像 3D 显示器件,通过调整针孔阵列的孔径宽度来改变显示器件的观看视角和光学效率,从而在视角优先和亮度优先两种模式之间进行切换,通过实验验证了所提方法的有效性。

1 理论分析

文中提出的集成成像 3D 显示器包括有机电致发光(Organic Light Emitting Diode, OLED)显示屏和液晶显示屏,如图 1 所示。OLED 显示屏用于显示微图像阵列,液晶显示屏用于实现可变孔径针孔阵列。可变孔径针孔阵列由透光孔和挡光区域组成,其中

透光孔的孔径宽度可以根据不同的应用场景改变。

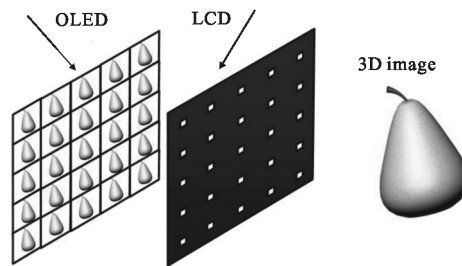


图 1 基于可变孔径针孔阵列的集成成像 3D 显示器结构图

Fig.1 Structure diagram of integral imaging 3D displayer based on a variable-aperture pinhole array

微图像阵列和可变孔径针孔阵列均包含 $m \times n$ 个单元,其中水平方向上 m 个单元,垂直方向上 n 个单元。 p 是微图像阵列与可变孔径针孔阵列的节距, w_1 和 w_2 分别为透光孔的水平和垂直孔径宽度, l 为观看者与可变孔径针孔阵列的间距, g 为微图像阵列与可变孔径针孔阵列的间距。由图 2 和图 3 可以得到基于可变孔径针孔阵列的集成成像 3D 显示器的水平观看视区宽度 D_1 和垂直观看视区宽度 D_2 分别为:

$$D_1 = \frac{(p-w_1)l}{g} - (m-1)p \quad (1)$$

$$D_2 = \frac{(p-w_2)l}{g} - (n-1)p \quad (2)$$

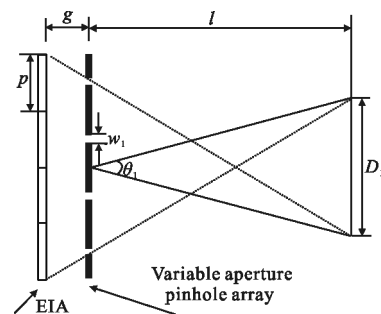


图 2 基于可变孔径针孔阵列的集成成像 3D 显示器的水平观看视角

Fig.2 Horizontal viewing angle of the integral imaging 3D displayer based on a variable-aperture pinhole array

基于可变孔径针孔阵列的集成成像 3D 显示器的水平观看视角 θ_1 和垂直观看视角 θ_2 分别为:

$$\theta_1 = 2\arctan \left[\frac{p-w_1}{2g} - \frac{(m-1)p}{2l} \right] \quad (3)$$

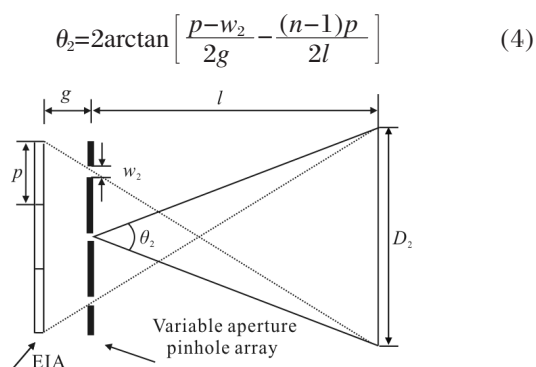


图 3 基于可变孔径针孔阵列的集成成像 3D 显示器的垂直观看视角

Fig.3 Vertical viewing angle of the integral imaging 3D displayer based on a variable-aperture pinhole array

基于可变孔径针孔阵列的集成成像 3D 显示器的光学效率 φ 可由下式得到:

$$\varphi = \frac{w_1 w_2}{p^2} \quad (5)$$

根据公式(3)~(5)可知,增大微图像阵列与针孔阵列的节距可以增大水平和垂直观看视角,但是会降低光学效率。但是,在实际应用中,微图像阵列的节距是由 3D 拍摄阶段的设备参数所决定的。因此,3D 显示阶段的微图像阵列与针孔阵列的节距往往是固定的。减小透光孔的水平 and 垂直孔径宽度同样可以增大水平和垂直观看视角,但是会降低光学效率。即,在不改变微图像阵列和针孔阵列节距的前提下,只需要改变透光孔的孔径宽度即可实现观看参数的改变。因此,当观看人数较少时,可以增大透光孔的水平孔径宽度来增大 3D 图像的亮度;当观看人数较多时,可以减小透光孔的水平孔径宽度来增大 3D 图像的水平观看视角。

集成成像 3D 显示器的最佳观看距离是显示器高度的 3 倍^[5]。因此,根据公式(1)和(2)可以得到透光孔的最大水平孔径宽度 W_H 和最大垂直孔径宽度 W_V 分别为:

$$W_H = p - \frac{(m-1)g}{3n} \quad (6)$$

$$W_V = p - \frac{(n-1)g}{3n} \quad (7)$$

透光孔的孔径宽度过大会影响图像的 3D 效果,透光孔的孔径宽度过小会影响图像的亮度。在不超过透光孔的最大孔径宽度前提下,可变孔径针孔阵

列中透光孔的孔径宽度一般在针孔节距的 10%~30% 范围内变化。

2 实验验证

搭建了基于可变孔径针孔阵列的集成成像 3D 显示器样机验证上述理论,其参数如表 1 所示。OLED 显示屏与液晶显示屏的分辨率均为 1 920×1 080,像素尺寸均为 0.063 mm。

表 1 基于可变孔径针孔阵列的集成成像 3D 显示器样机的参数

Tab.1 Parameters of the integral imaging 3D display prototype based on a variable-aperture pinhole array

Parameters	p/mm	g/mm	l/mm	m	n
Values	1.89	2	500	48	27

计算机软件 3Ds MAX 建立虚拟 3D 场景“SC”,设置虚拟相机阵列拍摄,并进行深度翻转转换获得如图 4 所示的微图像阵列。

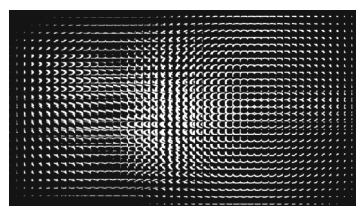


图 4 微图像阵列

Fig.4 Element image array

当透光孔的水平 and 垂直孔径宽度均为 0.504 mm 时,重建的不同角度的 3D 图像如图 5 所示,分别从左 14°和右 14°两个方向观察到清晰无串扰的“SC”,测得 3D 图像的亮度为 21.4 cd/m²。当透光孔的垂直孔径保持 0.504 mm,水平孔径宽度减小到 0.252 mm 时,重建的 3D 图像如图 6 所示,水平观看视角则增

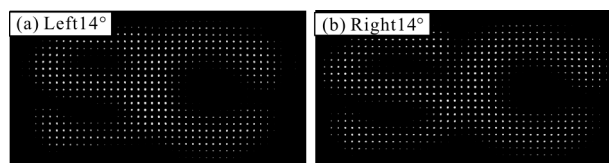


图 5 透光孔的水平孔径宽度为 0.504 mm 时不同角度的图像
Fig.5 Different perspective images with 0.504 mm horizontal aperture width

大到了 40°, 而 3D 图像的亮度则降低为 10.9 cd/m²。

上述光学成像实验结果验证了只需要改变透光孔的孔径宽度就可以改变集成成像 3D 显示器的观看参数。

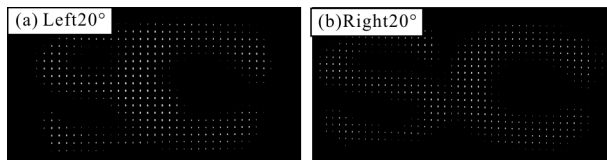


图 6 透光孔的水平孔径宽度为 0.252 mm 时不同角度的图像

Fig.6 Different perspective images with 0.252 mm horizontal aperture width

3 结论

文中设计了一种基于可变孔径针孔阵列的集成成像 3D 显示器, 详细阐述了如何通过改变透光孔的孔径宽度来改变集成成像 3D 显示器的观看参数, 研制了基于可变孔径针孔阵列的集成成像 3D 显示器样机。通过实验验证了, 当观看人数较少时, 可以增大透光孔的孔径宽度来增大 3D 图像的亮度; 当观看人数较多时, 可以减小透光孔的水平孔径宽度来增大 3D 图像的水平观看视角。

参考文献:

[1] Wang Qionghua. 3D Display Technology and Device [M]. Beijing: Science Press, 2011: 1-2. (in Chinese)
王琼华. 3D 显示技术与器件[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1-2.

[2] Lippmann G. La photographie integrale [J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1908, 146: 446-451.

[3] Kwon K C, Erdenebat M U, Alam M A, et al. Integral imaging microscopy with enhanced depth-of-field using a spatial multiplexing [J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2072-2083.

[4] Wang Qionghua, Ji Chaochao, Li Lei, et al. Dual-view integral imaging 3D display by using orthogonal polarizer array and polarization switcher [J]. *Optics Express*, 2016, 24(1): 9-16.

[5] Wu Fei, Deng Huan, Luo Chenggao, et al. Dual-view integral imaging three-dimensional display [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(20): 4911-4914.

[6] Kyoji M, Noriaki S. Full-color digitized holography for large-scale holographic 3D imaging of physical and nonphysical objects[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(1): A150-A156.

[7] Yan Zhiqiang, Yan Xingpeng, Jiang Xiaoyu, et al. Computational integral imaging reconstruction of perspective and orthographic view images by common patches analysis [J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21887-21900.

[8] Wang Tonghao, Liu Bingqi, Huang Fuyu, et al. Reasonable benefit value of the parameters of the parallel infrared binocular stereo system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0904004. (in Chinese)
汪同浩, 刘秉琦, 黄富瑜, 等. 平行式红外双目立体系统各参数合理效益取值 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 0904004.

[9] Schwarz A, Wang J G, Shemer A, et al. Lensless three-dimensional integral imaging using variable and time multiplexed pinhole array [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1814-1817.

[10] Park J H, Hong K, Lee B. Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging [J]. *Applied Optics*, 2010, 48(34): 77-94.

[11] Choi H, Cho S W, Kim J, et al. A thin 3D-2D convertible integral imaging system using a pinhole array on a polarizer [J]. *Optics Express*, 2006, 14(12): 5183-5190.

[12] Kim Y, Kim J, Kim Y, et al. Thin-type integral imaging method with an organic light emitting diode panel [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(27): 4927-4934.