

基于渐变线光源的高亮度集成成像 3D 显示

范 钧¹, 刘永志², 吴 非³

- (1. 成都工业学院 电子工程学院, 四川 成都 611730;
2. 火箭军装备部驻天津地区军事代表室, 天津 300308;
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亮度的相互制约关系,设计了一种基于渐变线光源的集成成像 3D 显示器,通过设置渐变线光源中每列线光源的宽度,优化微图像阵列中每列图像元的成像光路,建立了 3D 成像模型,通过几何光学推导了观看视角以及亮度的计算公式;研制了基于渐变线光源的集成成像 3D 显示实验装置,通过实验验证了可以在保持观看视角的前提下将 3D 图像的亮度提高为传统集成成像 3D 显示的 4.5 倍。

关键词: 集成成像; 渐变线光源; 观看视角; 亮度

中图分类号: TN141 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210058

High luminance integral imaging 3D display based on gradient line light source

Fan Jun¹, Liu Yongzhi², Wu Fei³

- (1. College of Electronics Engineering, Chengdu Technology University, Chengdu 611730, China;
2. Military Representative Office Rocket Army Equipment Department in Tianjin Area, Tianjin 300308, 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 luminance, a high luminance integral imaging display based on a gradient line light source was proposed. The light paths of the elemental images in the element image array were optimized by adjusting the widths of the line light sources in the gradient line light source. The imaging model of the integral imaging display based on the gradient line light source was established. The calculation formulas of the viewing angle and luminance were obtained by using geometrical optics. An experimental apparatus of the integral imaging display based on the gradient line light source was built. The experimental results prove that the luminance of the 3D image is 4.5 times of the conventional one without loss of the viewing angle.

Key words: integral imaging; gradient line light source; viewing angle; luminance

收稿日期:2021-01-18; 修订日期:2021-03-23

基金项目:国家自然科学基金(61705022);四川省科技厅应用基础面上项目(2019YJ0377);四川省科技厅量子工程重点项目(19MZGC0032)

作者简介:范钧,女,副教授,硕士,主要从事三维显示方面的研究工作。

0 引言

人们现实生活的世界是立体的,而传统的平面显示的图像却是二维的。还原真实所见世界的憧憬促使人们开始研究 3D 显示技术。目前被广泛应用的是基于人眼双目视差原理的助视 3D 显示以及光栅 3D 显示^[1]。但是,由于双目视差的显示机理与人眼视觉生理之间存在矛盾,观看者在长时间观看 3D 图像后会产生视疲劳^[2]。与助视 3D 显示和光栅 3D 显示不同,真 3D 显示在成像空间中直接再现出物体的 3D 像,因此真 3D 显示不会产生视疲劳。目前主流的真 3D 显示包括体 3D 显示、全息 3D 显示和集成成像 3D 显示。与体 3D 显示和全息 3D 显示相比,集成成像 3D 显示具有结构简单、无需特殊成像介质和相干光源以及数据量相对较少等优点^[3-7]。集成成像 3D 显示的诸多优点使其得到了飞速的发展,其在各方面的应用也随之传播开来:例如在 3D 电视娱乐、军事国防、医疗卫生等方面都有其广泛应用。近年来,集成成像也被应用于双视 3D 显示领域^[8-9]。因此,集成成像 3D 显示具有良好的研究意义,已经成为国内外科研人员的研究热点之一。

与基于微透镜阵列的集成成像 3D 显示相比,基于点光源的集成成像 3D 显示具有 3D 景深大、无深度翻转、节距不受制作工艺限制以及易于实现 3D/2D 转换等优点^[10]。但是基于点光源的集成成像 3D 显示存在 3D 图像亮度偏低等缺点。四川大学采用与背光源配套的反射型锥孔阵列增大 3D 图像的亮度^[11]。而反射型锥孔阵列的制作和对准均存在较大困难。成都工业学院通过实时调节孔径宽度来调节观看视角以及图像亮度,以满足不同观看模式的需要^[12]。但该方法无法同时实现宽视角和高亮度,无法满足多人观看时的高亮度需求。通过舍弃垂直视差,基于线光源的集成成像 3D 显示可以显著增大 3D 图像的亮度和分辨率^[10],但是观看视角与图像亮度仍然存在限制关系。文中提出一种基于渐变线光源的高亮度集成成像 3D 显示器件,通过合理设置每列线光源的宽度,优化每列图像元的成像光路,在保持观看视角的前提下显著增大 3D 图像的亮度,通过实验验证了所提方法的有效性。

1 理论分析

集成成像 3D 显示模式可以分为实模式、虚模式

和聚焦模式三种。在实模式的集成成像 3D 显示中,3D 图像是凸出显示屏的;在虚模式的集成成像 3D 显示中,3D 图像是凹进显示屏的;基于线光源的集成成像 3D 显示处于聚焦模式,它可以在显示屏的两侧分别成 3D 像。因此,基于线光源的集成成像 3D 显示具有较强的深度感。如图 1 所示,基于传统线光源的集成成像 3D 显示的主视区是微图像阵列中所有图像元的成像区域的公共部分。基于传统线光源的集成成像 3D 显示器的观看视角 θ 和亮度 L 为^[10,12]:

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

$$L = \frac{Cw}{p} \quad (2)$$

式中: p 为图像元的节距; w 为线光源的宽度; m 为微图像阵列中图像元的数目; g 为线光源与图像元的间距; l 为观看距离; C 为 2D 显示时的亮度。由公式 (1) 可知,在基于传统线光源的集成成像 3D 显示中,3D 图像的观看视角与线光源的节距成正比,与线光源的宽度成反比。由公式 (2) 可知,在基于传统线光源的集成成像 3D 显示中,3D 图像的亮度与线光源的节距成反比,与线光源的宽度成正比。因此,虽然可以通过减小线光源的节距或增大线光源的宽度来增大 3D 图像的亮度,但是会降低 3D 图像的观看视角。

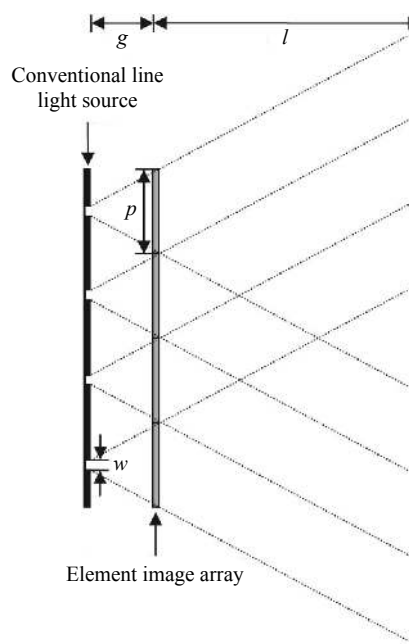


图 1 基于传统线光源的集成成像 3D 显示器参数图

Fig.1 Parameter of the integral imaging 3D display based on a conventional line light source

文中提出的高亮度集成成像 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 2 所示。OLED 显示屏平行放置于液晶显示屏后方, 且对应对齐。OLED 显示屏用于生成渐变线光源, 液晶显示屏用于显示微图像阵列。

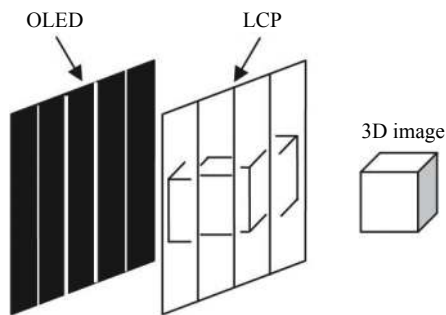


图 2 基于渐变线光源的集成成像 3D 显示器结构图

Fig.2 Structure diagram of the integral imaging 3D display based on a gradient line light source

如图 3 所示, 渐变线光源中线光源的数目等于微图像阵列中图像元的数目。渐变线光源中线光源的节距等于微图像阵列中图像元的节距。每个线光源的中心均与对应图像元的中心对应对齐。每个线光源发出的光线均照亮与其对应的图像元, 在观看视区内重建 3D 像素。

与传统线光源不同, 渐变线光源中线光源的宽度

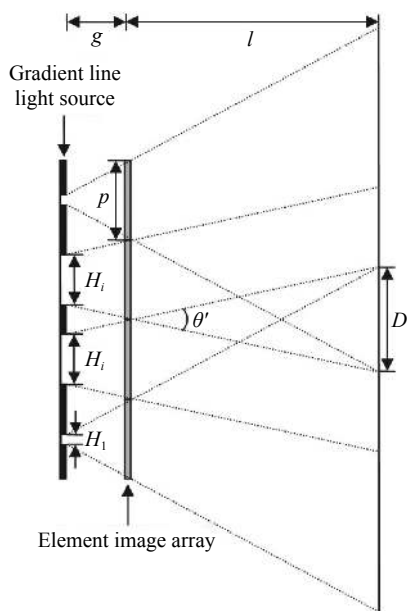


图 3 基于渐变线光源的集成成像 3D 显示器的原理和参数图

Fig.3 Principle and parameter of the integral imaging 3D display based on a gradient line light source

从两边向中心逐渐增大。因此, 微图像阵列中图像元的成像区域宽度从中心向两边逐渐增大。通过合理设置渐变线光源左半部分线光源的宽度, 可以使得位于显示屏左半部分的图像元成像区域的右边缘均重合。通过合理设置渐变线光源右半部分线光源的宽度, 可以使得位于显示屏右半部分的图像元成像区域的左边缘均重合。即: 基于渐变线光源的集成成像 3D 显示的主视区是位于微图像阵列中心的两个图像元成像区域的公共部分。由图 3 可知, 渐变线光源中第 i 列线光源的宽度 H_i 为:

$$\begin{cases} H_i = H_1 + \frac{2gp}{l} \left(\frac{m}{2} - i \right) & 1 \leq i \leq \frac{m}{2} \\ H_i = H_1 + \frac{2gp}{l} \left(i - \frac{m}{2} - 1 \right) & \frac{m}{2} < i \leq m \end{cases} \quad (3)$$

式中: H_1 为渐变线光源中第一列线光源的宽度。由图 2 可得, 基于渐变线光源的集成成像 3D 显示器的观看视区宽度 D 为:

$$D = \frac{(p - H_1)l}{g} - (m - 2)p \quad (4)$$

基于渐变线光源的集成成像 3D 显示器的观看视角 θ' 和亮度 L' 为:

$$\theta' = 2 \arctan \left[\frac{p - H_1}{2g} - \frac{(m - 2)p}{2l} \right] \quad (5)$$

$$L' = \sum_{i=1}^m \frac{CH_i}{mp} \quad (6)$$

式中: H_i 为渐变线光源中第 i 列线光源的宽度。

由公式 (5) 和 (6) 可知, 与基于传统线光源的集成成像 3D 显示器相同, 文中提出的集成成像 3D 显示器的亮度与渐变线光源中所有线光源的宽度成正比; 与基于传统线光源的集成成像 3D 显示器不同, 文中提出的集成成像 3D 显示器的观看视角仅与渐变线光源中第一列线光源的宽度成反比。渐变线光源中线光源的宽度从两边向中心逐渐增大, 因此可以在保持观看视角的前提下显著增大 3D 图像的亮度。更进一步地, 可以根据实际需求, 合理设置渐变线光源中第一列线光源的宽度, 同时实现宽视角和高亮度集成成像 3D 显示。

2 实验验证

搭建了基于渐变线光源和传统线光源的集成成像 3D 显示实验装置验证所提理论的有效性, 如图 4 所

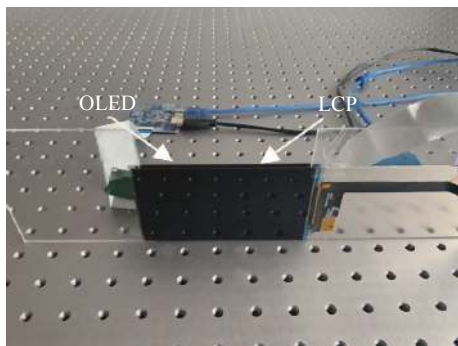


图 4 集成成像 3D 显示实验装置

Fig.4 Experimental equipment of the integral imaging 3D display

示。OLED 显示屏与液晶显示屏的分辨率均为 1920×1080 ，像素尺寸均为 0.063 mm ，两者的间距为 5 mm 。

实验采用计算机程序生成微图像阵列代替了微透镜阵列的 3D 拍摄过程。在 3Ds MAX 中设置多个虚拟相机来对 3D 场景“11”进行 3D 拍摄，按照几何光学原理建立数学模型，由计算机来完成 3D 拍摄，获得如图 5 所示的微图像阵列。微图像阵列中图像元的数目为 16，图像元的节距为 3.78 mm 。渐变线光



图 5 微图像阵列

Fig.5 Element image array

源中第一列线光源的宽度和传统线光源中线光源的宽度均为 0.126 mm 。根据公式 (1) 计算得到，渐变线光源中第 1~16 列线光源的宽度分别为 0.126 、 0.252 、 0.378 、 0.504 、 0.63 、 0.756 、 0.882 、 1.008 、 1.008 、 0.882 、 0.756 、 0.63 、 0.504 、 0.378 、 0.252 、 0.126 mm 。

在观看距离 300 mm 处，分别从不同的观看角度拍摄基于渐变线光源和传统线光源的集成成像 3D 显示实验装置，如图 6 和图 7 所示。在左 $15^\circ \sim$ 右 15° 之

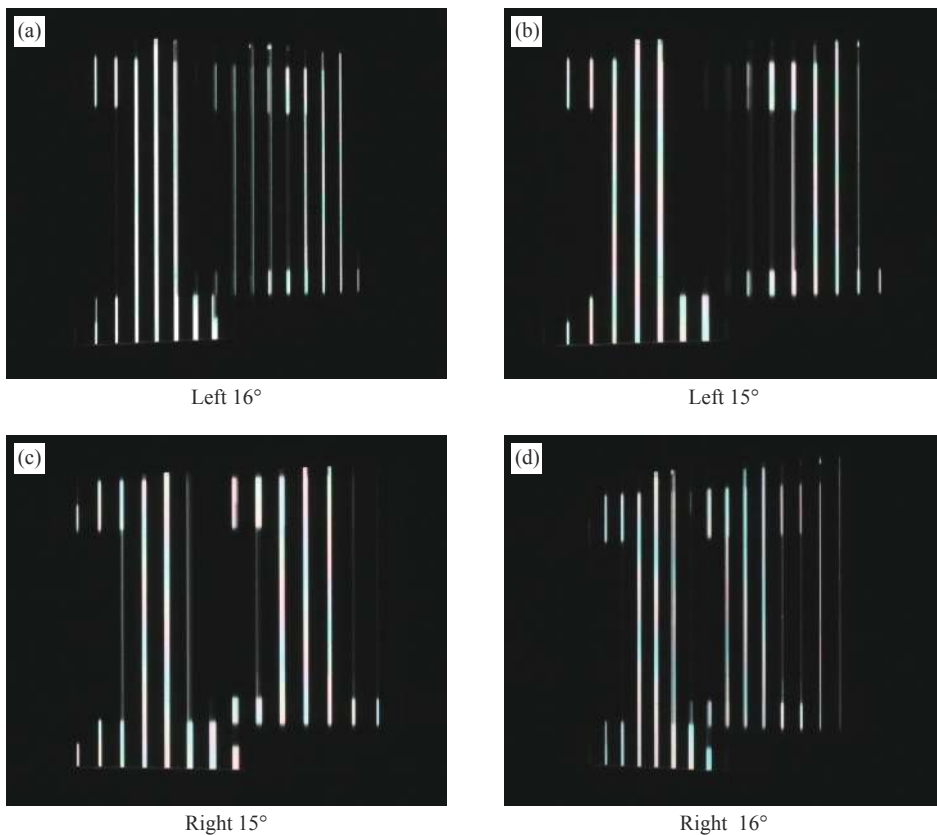


图 6 基于渐变线光源的集成成像 3D 显示实验装置不同角度的图像

Fig.6 Different 3D images viewed in the integral imaging 3D display based on a gradient line light source

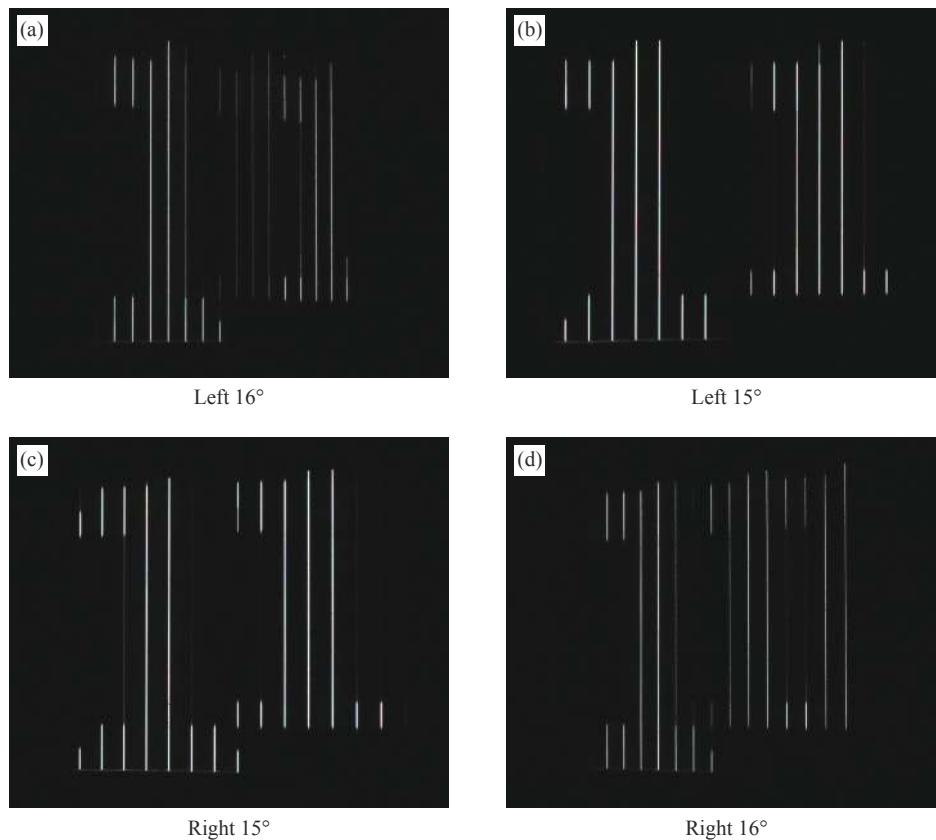


图 7 基于传统线光源的集成成像 3D 显示实验装置不同角度的图像

Fig.7 Different 3D images viewed in the integral imaging 3D display based on a conventional line light source

间,基于渐变线光源和传统线光源的集成成像 3D 显示实验装置均能呈现清晰无串扰的 3D 图像“11”,且两个数字“1”的相对位置随着观看视角的变化而变化,即重建的 3D 图像“11”具有良好的水平视差。从左 16°和右 16°两个方向观测基于渐变线光源和传统线光源的集成成像 3D 显示实验装置,两个数字“1”均出现重影等串扰现象。上述实验结果证明,当渐变线光源中第一列线光源的宽度等于传统线光源的宽度时,基于渐变线光源和传统线光源的集成成像 3D 显示的观看视角相同。在左 15°的方向上测得基于渐变线光源和传统线光源的集成成像 3D 显示重建 3D 图像的亮度分别为 45.2 cd/m² 和 10.1 cd/m²。即在观看视角相同的前提下,基于渐变线光源的集成成像 3D 显示的亮度是基于传统线光源的集成成像 3D 显示的亮度的 4.5 倍。

上述实验结果验证了基于渐变线光源的集成成像 3D 显示器件在保持观看视角的前提下显著增大 3D 图像的亮度。

3 结 论

文中设计了一种基于渐变线光源的高亮度集成成像 3D 显示器,详细阐述了如何设置渐变线光源中各个线光源的宽度,从而改变图像元的成像光线,研制了基于渐变线光源的集成成像 3D 显示实验装置。通过实验验证了基于渐变线光源的集成成像 3D 显示器件在保持观看视角的前提下显著增大 3D 图像的亮度。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] Wang Qionghua. 3D Display Technology and Device[M]. Beijing: Science Press, 2011: 203-206. (in Chinese)
- [3] Zhang Hanle, Deng Huan, Ren Hui, et al. Method to eliminate pseudoscopic issue in an integral imaging 3D display by using a transmissive mirror device and light filter [J]. *Optics Letters*,

- 2020, 45(2): 351-354.
- [4] Ma Shitu, Lou Yimin, Hu Juanmei, et al. Enhancing integral imaging performance using time-multiplexed convergent backlight [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(10): 3165-3173.
- [5] Zhang Wanlu, Sang Xinzhu, Gao Xin, et al. A flipping-free 3D integral imaging display using a twice-imaging lens array [J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 32810-32822.
- [6] Li Henan, Wang Shigang, Zhao Yan, et al. 3D view image reconstruction in computational integral imaging using scale invariant feature transform and patch matching [J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24207-24222.
- [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] Wu Fei, Zhao Baichuan, Liu Zesheng, et al. Dual-view integral imaging display using a polarizer [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(19): 5785-5787.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Deng Huan, Wang Qionghua, Wu Fei, et al. Cross-talk-free integral imaging three-dimensional display based on a pyramid pinhole array [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(4): 173-176.
- [12] Fan Jun, Wu Fei, Lv Guojiao, et al. Integral imaging 3D display based on variable-aperture pinhole array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0603005. (in Chinese)