

文章编号:1007-2780(2022)05-0555-07

基于回返器和反射偏振片的分辨率增强 集成成像 3D 显示器

何 伟, 李 强, 郭兆达, 邓 欢*
(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:随着 3D 显示被应用到军事医疗等尖端领域, 高分辨率的 3D 图像变得尤为重要。然而, 集成成像的 3D 显示性能受制于 2D 显示屏的分辨率。为了突破 2D 显示屏的分辨率限制, 本文提出了基于回返器和反射偏振片的集成成像 3D 显示装置。该装置将显示器上的微图像阵列(elemental image array, EIA)通过反射型偏振片分离成偏振方向正交的两束光线, 回返器、四分之一波片和反射型偏振片分别将两束偏振光反射, 并沿着像素的对角线方向以 $\sqrt{2}/2$ 个像素错位叠加, 形成一个具有更小像素单元和更多像素数量的高分辨率 EIA。根据两个偏振 EIA 和叠加的高分辨率 EIA 之间的像素索引关系, 反向计算出偏振 EIA 的像素值。实验结果表明, 该系统不仅可以重构出高分辨率的 3D 图像, 还减弱了像素间的黑网格。

关键词:分辨率增强; 集成成像; 偏振复用; 回返器; 反射偏振片

中图分类号: TN27 **文献标识码:** A **doi:** 10. 37188/CJLCD. 2022-0017

Resolution-enhanced integral imaging 3D display using retro-reflector and reflective polarizer

HE Wei, LI Qiang, GUO Zhao-da, DENG Huan*

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

Abstract: High-resolution and high-quality 3D images are particularly important as 3D displays are applied to cutting-edge areas such as military and medicine. However, the 3D image quality of integral imaging is constrained by the resolution of the 2D display screen. To overcome the resolution limitation of 2D display screen, this paper proposed a high-resolution integral imaging 3D display using retro-reflectors and reflective polarizers. The elemental image array (EIA) is separated into two orthogonal polarized rays by the reflective polarizer. The retro-reflector, the quarter-wave retarding film and the reflective polarizer reflect the two polarized rays and superimposed them along the diagonal direction, and then generate a new EIA with smaller pixel pitch and higher pixel density. According to the pixel index relationships between the polarized EIA and the superimposed high-resolution EIA, the pixel values of polarized EIA are calculated backwards. The experimental results indicate that the proposed device can reconstruct high resolution 3D images and weaken the black grid between pixels.

收稿日期: 2022-01-14; 修订日期: 2022-02-04.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. U21B2034, No. 61775151)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U21B2034, No. 61775151)

*通信联系人, E-mail: huandeng@scu.edu.cn

Key words: resolution enhancement; integral imaging; polarization multiplexing; retro-reflector; reflective polarizer

1 引言

3D 显示能够真实地再现出物体的深度和视差信息,加强了观看者对三维物体的立体感知,是人类追求的终极显示方式。在医疗诊断、军事演练、工业设计和科学研究等领域有着重要的应用价值,不仅能够带来视觉沉浸感,更能够提高工作效率和专注力。但是传统的裸眼 3D 显示存在辐辏调节冲突的问题^[1-3],观察者长时间注视容易造成眩晕和视觉疲劳等不适感,严重影响了观看体验。因此,发展出了基于光场理论^[4-5]的真 3D 显示技术,主要包括全息显示技术^[6-7]、体 3D 显示技术^[8-9]和集成成像显示技术^[10-12],通过重构出真实场景的光场信息,克服了辐辏调节冲突并实现了自然的观看体验,从而吸引了研究者的广泛关注。集成成像显示技术具有结构简单,不需要相干光源,可以实现真彩色、准连续视差的 3D 图像等优点,被认为是最接近市场化的真 3D 显示技术之一。

尽管集成成像显示技术有很多优点,但是其显示性能存在相互制约的关系^[13],难以突破空间带宽积的限制。分辨率表征了再现图像的精细程度,直接影响重构 3D 图像的视觉效果。集成成像的观看分辨率主要由透镜阵列的空间分辨率^[14]和显示器的分辨率共同决定。随着现代制造工艺的进步,透镜的空间分辨率远大于显示器的分辨率,因此显示器的分辨率决定了 3D 图像分辨率的下限。一方面,显示器的像素尺寸越小,在空间中重构出的 3D 体素就越小,显示的内容越细致;另一方面,显示器的像素数量越多,对应的 3D 体素就越多,重构的 3D 图像越丰富。在提升集成成像 3D 图像分辨率方面,国内外学者做了较多的研究。在增加像素数量方面,康涅狄格大学提出了同步移动记录和显示透镜阵列的方法来增加对显示器的采样频率,进而提高像素数量^[15]。釜庆大学提出在透镜阵列前面增加一层动态掩模板,快速切换掩模板的位置,并配合 LCD 快速刷新片源,在空间中实现像素点的增加^[16]。东京大学设计了基于多台投影机的集成

成像显示系统,将两台投影机投影的片源通过光路折转系统转移到一个平面,实现像素数量的倍增^[17]。此外,还提出了基于旋转棱镜片的方法,在透镜阵列后面增加一个快速旋转的棱镜阵列,通过时分复用将像素数量增加到原来的 4 倍^[18]。此外还有一些通过空分复用或时分复用的方法改变定向背光的方向实现点光源的倍增,进而增加 3D 图像的体素^[19-22]。上述方法主要通过时分复用或空分复用技术,或者使用多台投影系统,来提升像素数量,对显示器的刷新率具有较高的要求,存在矫正困难等问题。在减小像素尺寸方面,西安大学通过在商用显示器上设计子像素掩模板,通过时分复用实现对子像素的控制,从而减小像素尺寸^[23]。台湾交通大学将显示器的每个像素分成 3 个子像素,实现像素尺寸的减小,并通过相应的子像素重组算法生成相应的 EIA,将分辨率提高为原来的 2.41 倍^[24]。北京邮电大学设计了一个分光棱镜阵列将显示器上特定的片源发出光线分成多数细光线,再将细光束错位叠加在一起形成更小的像素单元,进而实现分辨率的增强^[25]。如何在现有的商用显示器的基础上进一步减小像素尺寸并同时增加像素数量仍是一个挑战。

本文提出了一种使用回返器和反射偏振片来提高集成成像分辨率的方法。该方法通过偏振复用技术将 EIA 光线在空间中分离,并错位叠加形成高密度小像素点的高分辨率 EIA,并通过像素索引关系反向计算出显示器上 EIA 的像素值用作显示片源。该方法可根据显示器的参数灵活地调整片源的错位距离来匹配各种显示器尺寸,不需要复杂的机械运动和投影矫正,可有效减小像素尺寸并增加像素数量,突破 2D 显示屏的分辨率限制,实现 3D 图像分辨率的提升。

2 结构原理及片源生成方法

2.1 系统结构原理

本文提出了基于回返器和反射型偏振片的

高分辨率集成成像显示装置。装置结构和实际光路的俯视图如图1所示,主要由2D显示器、反射型偏振片、四分之一波片、回返器和透镜阵列组成,XY平面平行俯视平面,Z轴垂直XY平面。2D显示器在XZ面内以 45° 角放置,其像素对角线平行于X轴方向,反射型偏振片反射S光透射P光,其垂直于XY面,并与X轴成 45° 夹角。平板显示器发出的光线经过反射型偏振片1,被分成透射光路和反射光路,如图1(a)中红色箭头所示。在反射光路中,四分之一波片1的光轴与S偏振光的振动方向成 45° ,S偏振光经过四分之一波片1后变成左旋圆偏振光(left-hand circularly polarization, LCP),并向回返器1方向传播。回返器由角锥棱镜阵列构成,如图1(b)所示,每个角锥棱镜由3个相互正交的反射面组成,入射光线在3个反射面上依次反射,最后出射光线沿原入射光方向原路返回。由于每个角锥棱镜的尺寸为微米级,出射光线和入射光线的位置误差相对于像素尺寸来说可以忽略。由于入射光在回返器里面反射3次,存在半波损失,左旋圆偏振光变成右旋圆偏振光(right-hand circularly polarization, RCP),再次经过四分之一波片1后变成P偏振光。P偏振光透过两个反射型偏振片在显示器关于反射型偏振片1对称的位置上形成

P偏振分量的EIA;同理,在透射光路中,P偏振光经过四分之一波片2和回返器2变成S偏振光,再由反射型偏振片2反射,在显示器关于反射型偏振片2对称的位置形成S偏振分量的EIA。P偏振分量和S偏振分量EIA将错位叠加,如图1(c)所示,图中的每个小方格的长度是像素对角线的长度,为 $\sqrt{2}d$,其中 d 是像素节距。P偏振分量EIA由显示屏光线先被反射偏振片1反射,再透过间距为 Δt 的两个反射偏振片产生,如绿色光线所示。而S偏振分量EIA由显示器光线先透过两个反射偏振片,再由反射偏振片2反射而产生,如蓝色光线所示。P偏振分量EIA和S偏振分量EIA沿对角线方向存在 Δr 的位移,其中 $\Delta r = \sqrt{2}\Delta t$ 。通过控制两个反射偏振片的垂直间距 Δt 为 $(1/2)d$,使得两个偏振EIA沿对角线方向的相对位移 Δr 为 $(\sqrt{2}/2)d$,分解到水平和竖直方向上的相对位移均为 $1/2$ 个像素,叠加之后的像素尺寸为原来的 $1/4$,从而形成尺寸更小、密度更高的像素点。经过透镜阵列实现光线的方向性调制,最终在空间中重构出尺寸更小数量更多的体素,从而提高3D图像的分辨率。

2.2 EIA生成方法

为了能够正确重建出3D图像,需要根据叠

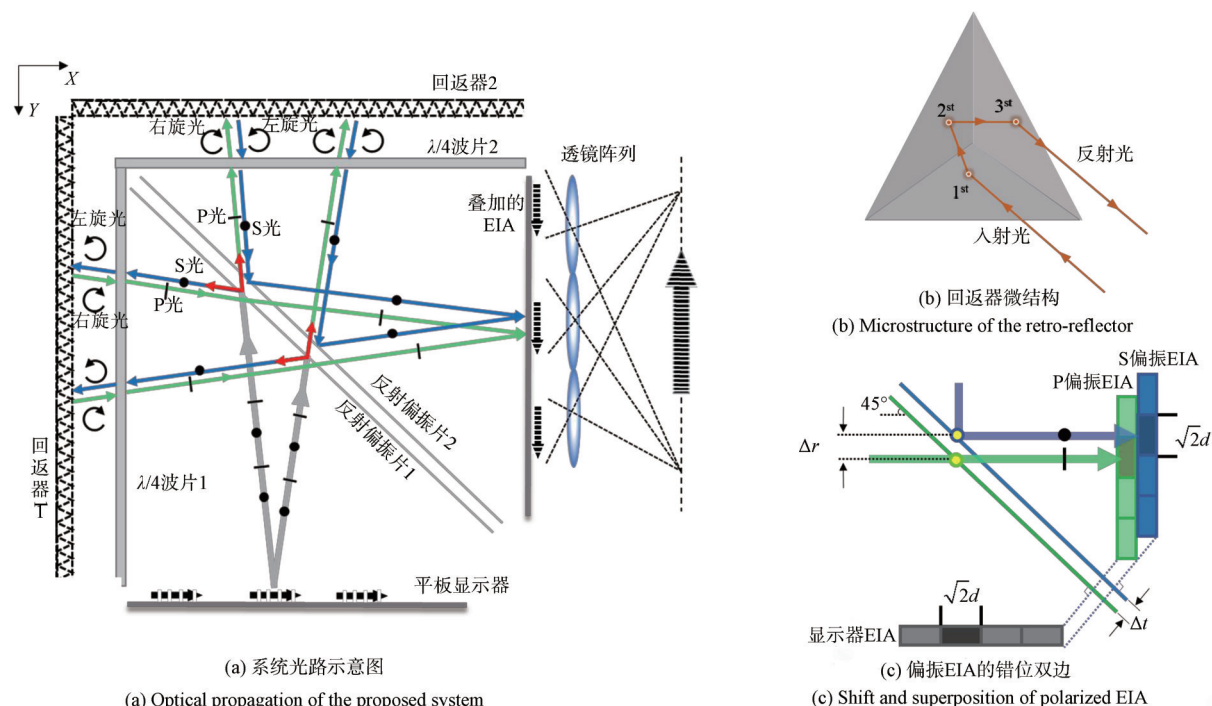


图1 所提出分辨率增强集成成像系统的结构图

Fig. 1 Structure diagram of the proposed resolution-enhanced integral imaging system

加后的高分辨率 EIA 和偏振 EIA 之间的像素关系,反向计算出偏振 EIA 的像素值。两个偏振 EIA 的像素与高分辨率 EIA 的像素索引关系如图 2 所示,假设平板显示器的像素数为 $n \times n$,经过反射型偏振片分离出的灰度值相同的两个偏振 EIA,像素数均为 $n \times n$,并在水平和竖直方向上均有半个像素的相对位移。 $S_{(i,j)}$ 和 $P_{(i,j)}$ 分别代表 S 偏振 EIA 和 P 偏振 EIA 的像素值,下标 i 和 j 是两个偏振 EIA 的坐标索引。P 偏振 EIA 的每个像素都与 S 偏振 EIA 上坐标相邻的 4 个像素叠加,形成 4 个更小的像素。因此,高分辨率 EIA 的像素值 $H_{(u,v)}$ 和两个偏振 EIA 的像素关系可用公式 (1) 表示:

$$H_{(u,v)} = \begin{cases} S_{(i,j)} + P_{(i,j)} & u=2i-1, v=2j-1 \\ S_{(i+1,j)} + P_{(i,j)} & u=2i, v=2j-1 \\ S_{(i,j+1)} + P_{(i,j)} & u=2i-1, v=2j \\ S_{(i+1,j+1)} + P_{(i,j)} & u=2i, v=2j \end{cases}, (1)$$

其中: u 和 v 是高分辨率 EIA 的坐标索引,根据公式 (1) 可知, $P_{(i,j)}$ 与 $S_{(i,j)}$, $S_{(i+1,j)}$, $S_{(i,j+1)}$ 和 $S_{(i+1,j+1)}$ 4 个像素叠加形成新的 4 个小像素,因此,叠加后的像素总数为 $4n^2 - 4n + 1$,接近显示屏像素数的 4 倍。为了能够叠加形成目标高分辨率 $H_{(u,v)}$,需要计算出偏振 EIA 的像素值,根据 $H_{(u,v)}$ 与 $S_{(i,j)}$ 和 $P_{(i,j)}$ 的像素索引关系,可以反向计算出 $S_{(i,j)}$ 或

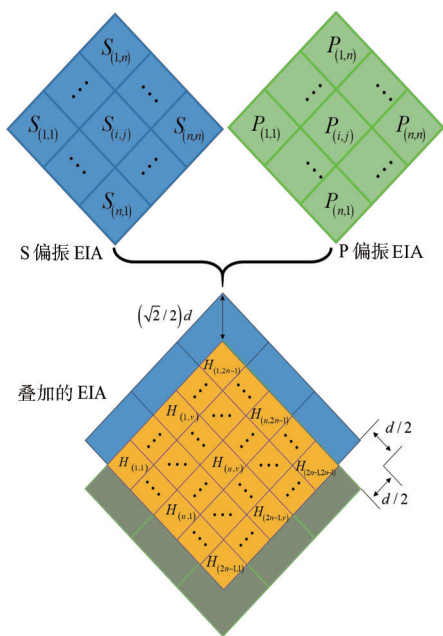


图 2 像素索引关系

Fig. 2 Relationship of the pixel index

$P_{(i,j)}$ 的像素值。由于反射偏振片对光线亮度有一半的损失,反向计算出的 $S_{(i,j)}$ 或 $P_{(i,j)}$ 的像素值需乘以 2 倍,即获得显示屏上待显示的 EIA。

3 实验验证

在实验中,我们利用 3Ds Max 软件搭建了 3D 场景,通过 OpenGL 建立虚拟相机阵列来代替透镜阵列渲染光场图像,将采集到的光场图像合成目标高分辨率 EIA,根据公式 (1) 反向计算出偏振 EIA 的像素值,进而获得显示器上待显示的 EIA。图 3 为搭建的分辨率增强集成成像 3D 显示实验装置,其中 2D 显示屏为 iPad 2019,其分辨率为 $2150 \text{ pixels} \times 1620 \text{ pixels}$,像素节距为 0.096 mm ,将其在 XZ 面内旋转 45° 放置,使其像素的对角线方向平行于光学平台方向。透镜阵列中透镜节距为 1 mm ,焦距为 3.3 mm ,透镜元为方形无间隙紧密排布,透镜个数为 100×100 。透镜阵列位于叠加的高分辨率 EIA 右侧 3.5 mm 处,为了将其与 EIA 匹配,将其在 YZ 平面内旋转 45° 放置。反射型偏振片的工作波长在 $420 \sim 750 \text{ nm}$ 之间,在可见光范围内对 S 偏振光的反射率基本维持在 88% ,对 P 偏振光透过率基本在 90% ,避免了色差对图像质量的影响。两个反射偏振片中间加入一个 0.048 mm 的透明薄膜,用于控制 S 偏振光和 P 偏振光的偏移量,反射型偏振片的光轴与四分之一波片的光轴夹角为 45° 。四分之一波片的工作波长为 $400 \sim 750 \text{ nm}$,保证了在可见光范围内具有正确的相位延迟。

使用多个彩色气球和上下两个紫色矩形框作为 3D 模型,在模型中将最前面的粉色气球和最后面的黄色气球间距设置为 15 mm ,模型排布

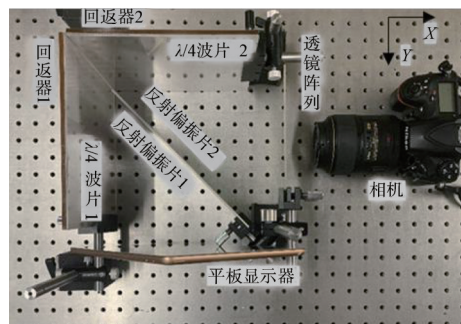


图 3 实验装置图

Fig. 3 Configuration of the experimental setup

的侧视图和对应的EIA如图4所示,3D图像的中心深度平面位于透镜阵列前57.75 mm处。将相机聚焦在中心深度平面的位置,观察重构图像细节处的分辨率来证明所提方法的可行性和有效性。图5对比显示了使用传统集成成像方法和本文所提出的方法重构的3D图像。图5(a)是基于传统集成成像方法重构的3D像,其中的黑色线条是显示器的黑色网格经过透镜阵列放大后形成的。图5(b)是使用本文提出的方法重构的3D像,可以看到叠加后的像素网点更小且密度增加,同时减轻了像素间的黑网格问题,亮度更加均匀,从而提高3D图像的质量。虽然分辨率有所提高,但是图像的边缘存在光晕,这主要是由掠入射到回返器上的光造成的,未来可通过准直器控制光束的发散角来改善这种情况^[26]。图5中重建的3D图像上半部分有些模糊,这是由于相机仅聚焦在中心深度平面的位置,其他深度的图像处于离焦状态。

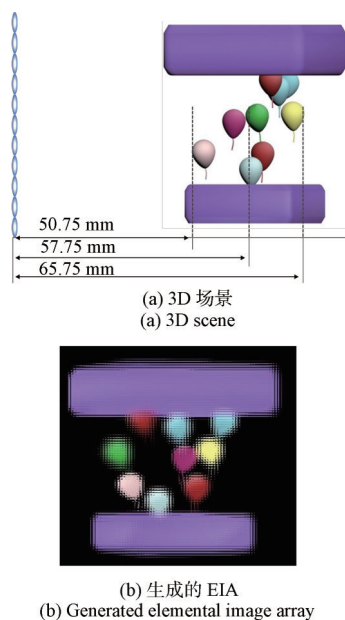


图4 3D场景和生成的EIA

Fig. 4 3D scene and generated elemental image array

为了验证重构3D图像的视差效果,以及不同深度气球的清晰再现效果,采用大景深的光圈进行拍摄,图6展示了从不同方向观看到的3D图像,观看视角为 16° ,黄色矩形框中展示了水平和垂直方向上的运动视差,不仅所有深度的气球都能够被清晰地重建,而且没有出现明显的畸变。

因此,所提方法能有效地提高3D图像的分辨率。

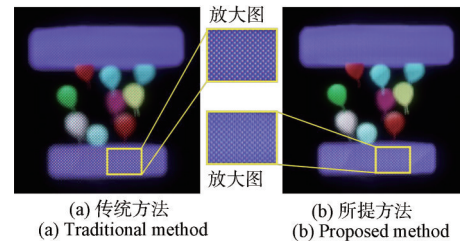


图5 光学重构的3D图像对比

Fig. 5 Comparison of reconstructed 3D images

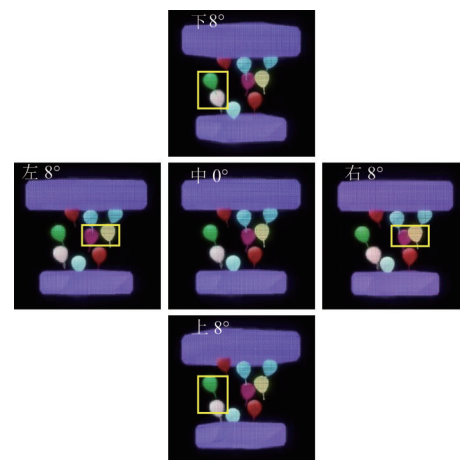


图6 重构3D图像的不同视图

Fig. 6 Different perspectives of reconstructed 3D images

4 结 论

本文分析了影响集成成像分辨率的主要因素,透镜阵列分辨率和显示器分辨中较小的一个决定了集成成像系统的分辨率上限,且显示器的像素尺寸对重构图像的分辨率影响较大。基于此,本文提出了使用回返器和反射型偏振片实现偏振复用的方法,该方法能够有效减小像素尺寸,同时增加像素的数量,提高了整个系统的空间带宽积。实验表明,通过所提出的方法增加了3D图像的分辨率,改善了显示器的黑网格效应,图像亮度更加均匀,提升了重建3D图像的质量。所提方法不会损失观看视角和景深,同时不需要复杂的机械结构,可以通过控制两个反射型偏振片的距离灵活地匹配各种像素尺寸的平板显示器,能够突破现有显示器的分辨率极限,尤其适用于大像素点的显示器。

参 考 文 献 :

- [1] EMOTO M, NIIDA T, OKANO F. Repeated vergence adaptation causes the decline of visual functions in watching stereoscopic television [J]. *Journal of Display Technology*, 2005, 1(2): 328-340.
- [2] DENG H, WANG Q H, LUO C G, *et al.* Accommodation and convergence in integral imaging 3D display [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2014, 22(3): 158-162.
- [3] CHEN C, DENG H, ZHONG F Y, *et al.* Effect of viewpoints on the accommodation response in integral imaging 3D display [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 7000414.
- [4] ORTH A, CROZIER K B. Light field moment imaging [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(15): 2666-2668.
- [5] WANNER S, GOLDLUECKE B. Globally consistent depth labeling of 4D light fields [C]//*Proceedings of 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Providence: IEEE, 2012: 41-48.
- [6] SMALLEY D E, NYGAARD E, SQUIRE K, *et al.* A photophoretic-trap volumetric display [J]. *Nature*, 2018, 553(7689): 486-490.
- [7] HIRAYAMA R, MARTINEZ PLASENCIA D, MASUDA N, *et al.* A volumetric display for visual, tactile and audio presentation using acoustic trapping [J]. *Nature*, 2019, 575(7782): 320-323.
- [8] TAY S, BLANCHE P A, VOORAKARANAM R, *et al.* An updatable holographic three-dimensional display [J]. *Nature*, 2008, 451(7179): 694-698.
- [9] PAN Y J, LIU J, LI X, *et al.* A review of dynamic holographic three-dimensional display: algorithms, devices, and systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(4): 1599-1610.
- [10] LIPPMANN G. La photographie integrale [J]. *Comptes-Rendus Academie des Sciences*, 1908, 146: 446-451.
- [11] 王琼华, 邓欢. 集成成像 3D 拍摄与显示方法 [J]. 液晶与显示, 2014, 29(2): 153-158.
WANG Q H, DENG H. 3D pickup and display method of integral imaging [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(2): 153-158. (in Chinese)
- [12] JAVIDI B, CARNICER A, ARAI J, *et al.* Roadmap on 3D integral imaging: sensing, processing, and display [J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 32266-32293.
- [13] MIN S W, KIM J, LEE B. New characteristic equation of three-dimensional integral imaging system and its applications [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(1L): L71-L74.
- [14] BURCKHARDT C B. Optimum parameters and resolution limitation of integral photography [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1968, 58(1): 71-76.
- [15] JANG J S, JAVIDI B. Improved viewing resolution of three-dimensional integral imaging by use of nonstationary micro-optics [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(5): 324-326.
- [16] OH Y, SHIN D, LEE B G, *et al.* Resolution-enhanced integral imaging in focal mode with a time-multiplexed electrical mask array [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 17620-17629.
- [17] LIAO H E, IWAHARA M, HATA N, *et al.* High-quality integral videography using a multiprojector [J]. *Optics Express*, 2004, 12(6): 1067-1076.
- [18] LIAO H, DOHI T, IWAHARA M. Improved viewing resolution of integral videography by use of rotated prism sheets [J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 4814-4822.
- [19] KIM Y, KIM J, KANG J M, *et al.* Point light source integral imaging with improved resolution and viewing angle by the use of electrically movable pinhole array [J]. *Optics Express*, 2007, 15(26): 18253-18267.
- [20] WANG Z, WANG A T, MA X H, *et al.* Resolution-enhanced integral imaging display using a dense point light source array [J]. *Optics Communications*, 2017, 403: 110-114.
- [21] YANG L, SANG X Z, YU X B, *et al.* Viewing-angle and viewing-resolution enhanced integral imaging based on time-multiplexed lens stitching [J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 15679-15692.
- [22] MA S T, LOU Y M, HU J M, *et al.* Enhancing integral imaging performance using time-multiplexed convergent backlight [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(10): 3165-3173.
- [23] CHEN Y J, WANG X R, ZHANG J L, *et al.* Resolution improvement of integral imaging based on time multiplexing sub-pixel coding method on common display panel [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 17897-17907.

- [24] QIN Z, CHOU P Y, WU J Y, *et al.* Resolution-enhanced light field displays by recombining subpixels across elemental images [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2438-2441.
- [25] GAO X, SANG X Z, ZHANG W L, *et al.* Viewing resolution and viewing angle enhanced tabletop 3D light field display based on voxel superimposition and collimated backlight [J]. *Optics Communications*, 2020, 474: 126157.
- [26] TENG T C, LAI W C. Optimization of an optical film for highly collimating the emerging light [J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(4): 386-394.

作者简介:



何 伟(1994—),男,江苏徐州人,硕士研究生,2019年于常熟理工学院获得学士学位,主要从事集成成像3D显示方面研究。E-mail: 78744804@qq.com



邓 欢(1985—),女,四川内江人,博士,教授,2012年于四川大学获得博士学位,主要从事裸眼集成成像3D显示、AR显示和光场显示方面的研究。E-mail: huandeng@scu.edu.cn