

激光与光电子学进展

超多视点的大视角光场三维显示方法

杨乐^{*}, 任石青, 焦冬秀, 耿小芬, 申建强

山西传媒学院融媒技术学院, 山西 晋中 030013

摘要 针对传统自由立体显示技术视点数目少和视角窄的问题, 提出一种超多视点的大视角光场三维(3D)显示方法。基于集成成像全视差光场构建原理, 该方法利用大节距的非连续柱透镜阵列(DLLA)以特定的水平方向角将基元图像(EI)中所有平面像素发出的光线进行水平调制, 在大视角范围内构建出水平方向密集排列的超多视点。此外, 对 DLLA 进行光学成像优化设计以抑制像差, 保证高质量 3D 成像。在实验部分, 利用分辨率为 1280 pixel×720 pixel 的 54 inch (1 inch=2.54 cm) 发光二极管(LED)显示器实现了视角为 42.8°、视点数目为 100 的水平光场 3D 显示效果, 且 3D 成像的畸变率为 2.23%, 呈现的 3D 影像具有连续的运动视差和自然的深度信息表达, 这些结果验证了本文方法的优越性和可行性。

关键词 成像系统; 光场三维显示; 超多视点; 大视角

中图分类号 TN27

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2011003

Light Field Three-Dimensional Display with Super Multiple Viewpoints and Large Viewing Angle

Yang Le^{*}, Ren Shiqing, Jiao Dongxiu, Geng Xiaofen, Shen Jianqiang

College of Media Technology, Communication University of Shanxi, Jinzhong, Shanxi 030013, China

Abstract In order to solve the problems of insufficient viewpoints and narrow viewing angle of the traditional autostereoscopic display technology, a light field three-dimensional (3D) display method with super multiple viewpoints and large viewing angle is proposed. Based on the principle of reconstructing full-parallax light field for integral imaging, the discrete lenticular lens array (DLLA) with a large pitch is used in the proposed method to horizontally modulate the light rays, which emit from pixels of the elemental image (EI), with specific horizontal direction angles to integrate viewpoints in space. As a result, super multiple viewpoints densely arranged in the horizontal direction are reconstructed within a large viewing angle. In addition, the DLLA is optimized for optical imaging to suppress aberrations and ensure high-quality 3D imaging. In the experiment, a 54-inch (1 inch = 2.54 cm) light-emitting diode (LED) display with a resolution of 1280 pixel×720 pixel is used to achieve a horizontal light field 3D display effect with 42.8° viewing angle and 100 viewpoints, and the distortion rate of 3D imaging is 2.23%. The presented 3D image with continuous parallax of motion and natural expression of depth information verifies the superiority and feasibility of the proposed method.

Key words imaging systems; light field three-dimensional display; super multiple viewpoints; large viewing angle

OCIS codes 110.2990; 100.6890; 120.2040

1 引言

裸眼三维(3D)显示技术可以使观众无需佩戴

眼镜就可以观看到 3D 影像, 其拥有高自由度的立体视觉观看体验, 更符合人眼对外界真实场景的观看体验, 因而近些年来成为学术界与工业界研究的

收稿日期: 2020-12-02; 修回日期: 2021-01-15; 录用日期: 2021-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(61705014)、山西传媒学院高层次人才工作计划项目(2020027)

通信作者: *yangle@bupt.edu.cn

热点。裸眼 3D 显示技术包括自由立体显示技术^[1-7]、集成成像技术^[8-9]、桌面式光场显示技术^[10-11]等。自由立体显示技术因装置结构简单、成本低, 目前是市面上唯一被商用的裸眼三维显示技术。然而, 传统自由立体显示技术有视点数目不足与视角窄的问题, 这两个问题制约其进一步发展和应用。视点数目不足会使所呈现出的 3D 影像运动视差不连续^[12-13]和深度信息表达不自然^[14-15]。视角窄会导致观看自由度受限, 极大影响立体视觉体验。因此, 近些年许多专家和学者对增大自由立体显示技术的视角和视点数目进行了研究。

在增大视点数目的研究方面, 一种有效的方法是将柱透镜光栅倾斜摆放在液晶显示器前, 通过将纵向子像素转化为水平方向视点来增加视点数目^[16-17]。然而, 这种方法受所使用柱透镜节距的限制, 视点数目的增加有限, 并且也无法实现大视角。通过提升可转化为空间视点的平面像素资源总量来增加视点数目的方法是另外一种重要的思路^[18]。该方法可使用若干具有高分辨率的投影仪组成投影阵列, 再利用控光结构对光线进行调制, 实现密集视点的构建^[19-21]。然而, 该思路的显示装置调试困难, 并且 3D 影像会有亮度不均匀的问题。

为了扩大视角, 显示装置使用人眼跟踪设备动态刷新视锥角内的视点, 有效实现了大观看视角^[22-24]。然而, 这种增大视角的方法不能支持多人观看。合适地设计系统参数, 可拼接由投影仪阵列^[25]或指向性背光光源^[26-27]配合柱透镜阵列形成

的具有不同方位角的多个子视区, 从而获得大视角的可观看区域, 但这种方法会面临系统调试困难、可靠性低、3D 显示亮度不均匀的问题。

为了有效增加视点数目的同时增大视角, 本课题组基于集成成像原理, 利用大节距的微针孔单元阵列(MPUA)作为控光结构去覆盖大尺寸的基元图像(EI), 并以特定的水平方向角把 EI 中全部像素发出的光线进行水平调制, 使 EI 中的像素全部用于水平视点的构建, 在大视角范围内形成水平方向密集排列的视点^[28]。然而, MPUA 的光能利用率低, 会使 3D 影像亮度不足, 因此这种显示方法的应用场景严重受限。此外, 由于 MPUA 在垂直方向上为对发光二极管(LED)显示器像素的非竖向贯穿结构, 因此 LED 像素中以竖向排布的红、绿、蓝三色灯珠会被微针孔不均匀遮挡, 使 3D 影像出现色彩失真。为解决这两个问题, 本文提出使用非连续柱透镜阵列(DLLA)对 LED 显示器像素进行水平调制, 在实现大视角、超多视点显示的同时, 使 3D 影像亮度得到明显提升并消除色彩失真。相比 MPUA, 使用 DLLA 可使控光结构理论上的光能利用率从 1.37% 提升为 20%, 并且消除 3D 影像由于色彩失真出现的彩虹纹。

2 基本原理

2.1 非连续柱透镜阵列实现像素的水平化调制

本文方法的显示装置由 LED 显示器、DLLA 和全息功能屏(HFS)组成, 如图 1 所示。系统中使用

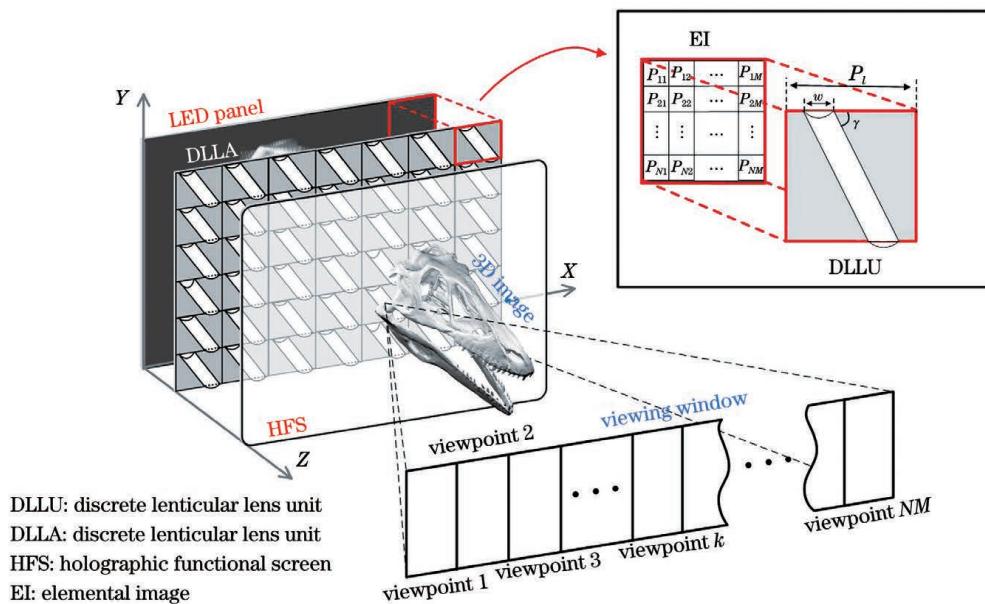
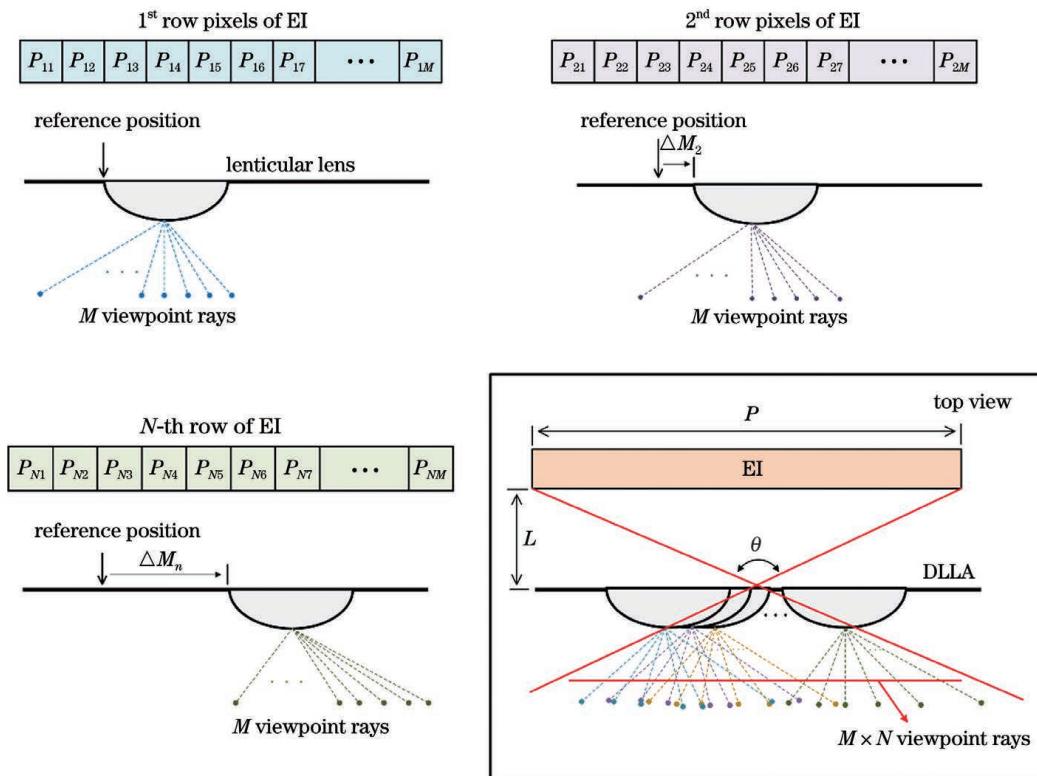


图 1 基于 DLLA 的光场三维显示装置

Fig. 1 Configuration of proposed light field 3D display device based on DLLA

LED 显示器加载基元图像阵列(EIA)来提供携带 3D 光场颜色和强度信息的平面像素。DLLA 由一系列非连续柱透镜单元(DLLU)组成,而 DLLU 由不透光的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料和倾斜的柱透镜组成。DLLA 的透光率为 w/P_i ,其中 w 为 DLLU 中倾斜柱透镜的口径, P_i 为 DLLA 的节距。EI 中全部像素发出的光线被其对应的 DLLU 水平调制,在空间中形成密集的水平视点光线,这些光线具有特定方向、强度、颜色信息。从所有 EI 中出射的水平视点光线可在空间中会聚,构成水平方向密集排列的视点。也就是说,本方法区别于集成成像,把 EIA 的所有像素都转化为水平方向排列的视点,这样就在水平方向增加了有效视点的数目,实现具有连续运动视差和自然深度信息的 3D 显示效果。此外,DLLU 的柱透镜在竖直方向上是贯穿 EI 的竖向连续结构,不会对 LED 像素中红、绿、蓝三色灯珠发出的光线出现不均匀遮挡,从而可保证 3D 影像不会出现色彩失真。在该装置中,全息功能屏的作用是对光场波前进行再调制^[29-30],消除 DLLA 不透光部分对 3D 影像形成的视野盲区。

假设 EI 包含 N 行、 M 列像素,其分辨率为 $N \text{ pixel} \times M \text{ pixel}$, P_{nm} ($n = 1, 2, \dots, N$; $m = 1,$



$2, \dots, M$) 表示第 n 行、第 m 列像素。如图 2 所示,覆盖 EI 中每行像素的柱透镜部分相对于这行像素为一个独立的柱透镜,这些像素与柱透镜边缘有不同的距离,并且 EI 中不同行的像素与其相对应柱透镜部分的边缘具有不同的距离,如 ΔM_n ($n = 1, 2, \dots, N$)。因此,EI 中像素发出的光线可以被倾斜的柱透镜调制到不同的水平方向上,在水平方向上形成具有不同水平方向角的 $M \times N$ 束视点光线。每个 DLLU 都可以水平调制 EI 像素发出的光线,形成视点光线,这些光线在空间中会聚,形成具有水平视差的 $N \times M$ 个视点。因此,使用 DLLA 后,把 LED 显示器全部像素资源用于对水平视点的构建上,实现了超多视点的水平光场 3D 显示。此外,DLLA 的节距决定了单个 DLLU 所覆盖的像素横向范围,即 EI 的水平宽度。该宽度决定了水平光场 3D 显示的视角 θ :

$$\theta = 2\arctan(MP/2L), \quad (1)$$

式中: P 为 LED 显示器像素的宽度; MP 为 EI 的水平宽度; L 为非连续柱透镜阵列和 LED 显示器的距离。由(1)式可知,EI 的水平宽度越大,视角越大。因此本文设计了大节距的 DLLA 以获得大 EI 水平宽度。这样,在实现超多视点的同时,也可实现大的观看视角。

图 2 EI 配合 DLLU 产生视点光线的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of construction of viewpoint light rays with EI and DLLU

基于 DLLA 的水平光场采集和重建原理示意图如图 3 所示。在光场采集阶段, 使用相机阵列中以水平方向排列的相机簇采集景物水平方向不同的侧面角度信息。在光场重建阶段, EI 中的每个像素发出的光线经过柱透镜后以不同水平方向角出射, 这些光线与其他 EI 出射的光线会聚形成超多视点, 从而构建出原始景物的水平光场。在竖直方向上, 对于 EI 中每个像素, 柱透镜不具有调制散射光线的能力, 因此像素发出的散射光线以原竖直方向角从柱透镜出射, 观察者在竖直方向上只能看到唯一的视点信息。图 3 中相机阵列采集的视差序列图转化为加载在 LED 显示器上的 EIA 的像素映射数学关系与文献[28]一致, 其与 DLLA 中柱透镜的倾斜角度和 EI 的分辨率有关, 这种像素映射方法是基于光线追迹算法的。

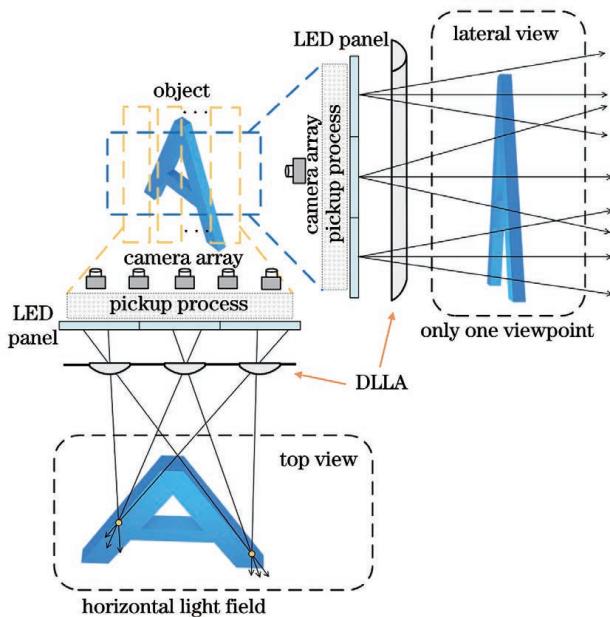


图 3 基于 DLLA 的水平光场构建原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of horizontal light-field formation with DLLA

为消除 DLLA 不透光部分对再现 3D 影像产生的视野盲区, 使用 HFS 对光场波前进行再调制。全息功能屏的重要参数之一为扩散角, 其对光场波前的再调制作用范围是 DLLA 出射光线分布的视场角区域, 调制的原理如文献[30]所述。针对不同控光器件的不同结构, 设计合适的全息功能屏扩散角, 使出射光场的光线分布覆盖器件的不透光部分, 以波前再调制的方式消除 3D 影像的视野盲区。全息功能屏的波前再调制本质上是对三维显示装置所还原出的采样光场信息的补充, 使再调制后的光场信息连续平滑。DLLA 为水平方向排列的周期控光结

构, 若所设计的全息功能屏具有合适的水平扩散角, 则可以消除 3D 影像的视野盲区, 其原理如图 4 所示。全息功能屏的水平扩散角由 DLLA 的节距和柱透镜口径所决定:

$$\phi_h = \phi_2 - \phi_1 = 2\arctan\left(\frac{P_l}{2d}\right) - 2\arctan\left(\frac{w}{2d}\right), \quad (2)$$

式中: w 为柱透镜的口径; d 为 DLLA 和 HFS 的摆放距离。全息功能屏垂直扩散角理论上应设计为 0, 然而因为仅对光线进行水平方向的扩散会导致 3D 影像在两个方向上的锐度相差较大, 恶化 3D 显示的效果, 因此选择了小垂直方向扩散角的全息功能屏来均衡 3D 影像的整体锐度。

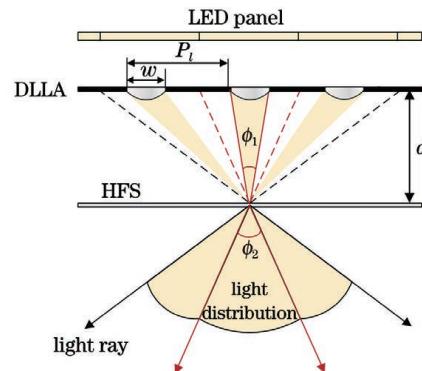


图 4 HFS 消除 DLLA 产生 3D 影像视野盲区的原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of eliminating blind area of 3D image generated by DLLA with HFS

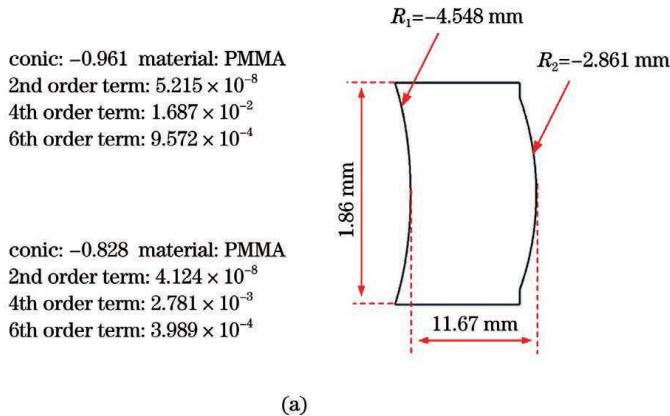
2.2 光学优化

当 DLLA 的节距增大, 该控光结构中的柱透镜视场角相应增大, 处于视场角边缘的光线具有较大的像差。本文所设计的 DLLA 具有大节距, 因此这种控光结构会有严重的像差, 严重恶化再现 3D 影像的质量。为解决这个问题, 本文进一步对 DLLA 进行光学设计优化来有效抑制像差。设计 DLLA 中的柱透镜为非球面双面型光学结构, 在优化的过程中可对抑制像差的面型进行快速、准确的计算, 以获得满足需求的像差抑制效果。非球面面型公式为

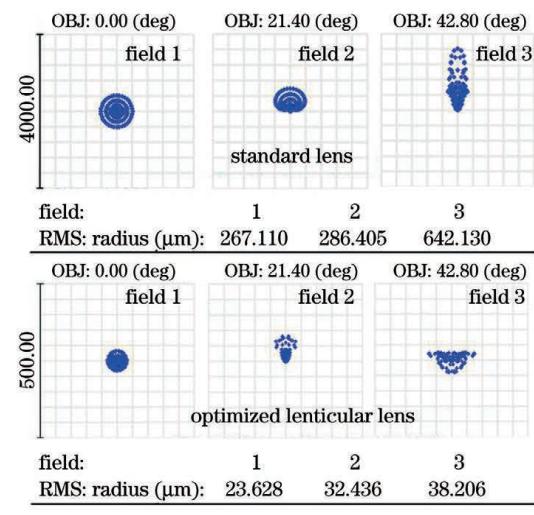
$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_2r^2 + \alpha_4r^4 + \alpha_6r^6 + \dots, \quad (3)$$

式中: c 为顶点曲率半径; r 为径向坐标; k 为圆锥系数; $\alpha_2, \alpha_4, \alpha_6$ 为非球面系数。利用(3)式对 DLLA 进行像差抑制优化设计, 本文使用阻尼最小二乘法来优化柱透镜的初级像差和高阶像差, 最终经优化得到的非球面双面型柱透镜结构示意图如图 5(a) 所示。仿真得到的点列图表明, 在视场角分别为

0°、21.4° 和 42.8° 时, 非球面双面型柱透镜的弥散斑均方根半径均明显小于标准柱透镜, 如图 5(b) 所示。



(a)



(b)

图 5 光学优化设计结果。(a)优化像差的非球面双面型柱透镜结构;(b)弥散斑优化对比

Fig. 5 Results of optical optimization design. (a) Designed structure of aspheric double-sided lenticular lens with optimized aberration; (b) comparison of spot diagrams of standard lenticular lens and optimized lenticular lens

3 实验结果与分析

基于 MPUA 的光场 3D 显示原型装置的主要参数如表 1 所示, 基于 DLLA 的光场 3D 显示原型装置的主要参数如表 2 所示。两原型装置所再现的 3D 影像均具有 42.8° 视角、100 个视点, 都实现了超多视点的大视角光场 3D 显示效果。不同的是, 使用 DLLA 作为控光结构解决了本课题组原先使用 MPUA 产生的低光能利用率问题和再现 3D 影像出

现色彩失真的问题^[24]。图 6 为基于 DLLA 的光场 3D 显示原型装置的实物图。图 7 为基于 DLLA 与基于 MPUA 的光场 3D 显示效果对比图。通过比较 3 个观看角度的显示效果, 可以看出使用 DLLA 的光场 3D 显示效果克服了由于使用 MPUA 出现的色彩失真, 消除了 3D 影像的彩虹纹。此外, 光场 3D 显示装置控光结构的光能利用率理论上可从 1.37% 上升到 20%, 提升至约 14.6 倍。使用亮度计在视区范围内分别测试使用两种控光结构的显示

表 1 基于 MPUA 的光场 3D 显示原型装置的参数

Table 1 Parameters of light field 3D display prototype based on MPUA

Principal component	Parameter	Value
LED display	Screen size /inch	54 (diagonal)
	Resolution /pixel	1280 (horizontal) × 720 (vertical)
	Pitch /mm	9.30
	Minor axis length of micro-pinhole /mm	0.183
MPUA	Major axis length of micro-pinhole /mm	0.826
	Horizontal distance between adjacent pinholes /mm	1.071
	Included angle between line connecting pinholes in PU and vertical line /(°)	39.6
	Distance between LED panel and MPUA /mm	16.332
EI	Resolution /pixel	10 (horizontal) × 10 (vertical)
	Horizontal diffused angle /(°)	0.907
	Vertical diffused angle /(°)	1.35
	Distance between HFS and MPUA /mm	400
HFS		

表 2 基于 DLLA 的光场 3D 显示原型装置的参数

Table 2 Parameters of light field 3D display prototype based on DLLA

Principal component	Parameter	Value
LED display	Screen size /inch	54 (diagonal)
	Resolution /pixel	1280 (horizontal) \times 720 (vertical)
DLLA	Pitch /mm	9.30
	Aperture of lenticular lens /mm	1.86
	Slant angle of lenticular lens /($^{\circ}$)	11.31
EI	Distance between LED panel and DLLA /mm	11.87
	Resolution /pixel	10 (horizontal) \times 10 (vertical)
	Horizontal diffused angle /($^{\circ}$)	1.42
HFS	Vertical diffused angle /($^{\circ}$)	1.35
	Distance between HFS and DLLA /mm	300
Camera array	Number of cameras	100
	Interval between cameras /mm	18.02
	Field of view of camera /($^{\circ}$)	14.75
	Resolution of camera /pixel	1280 (horizontal) \times 720 (vertical)

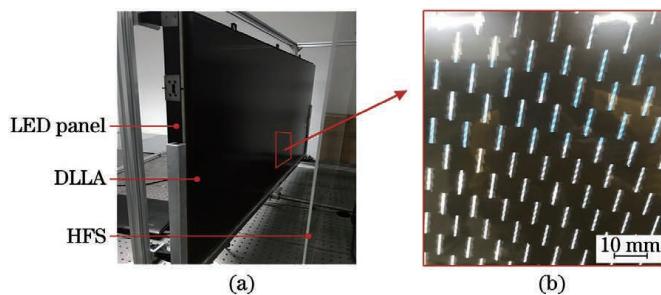
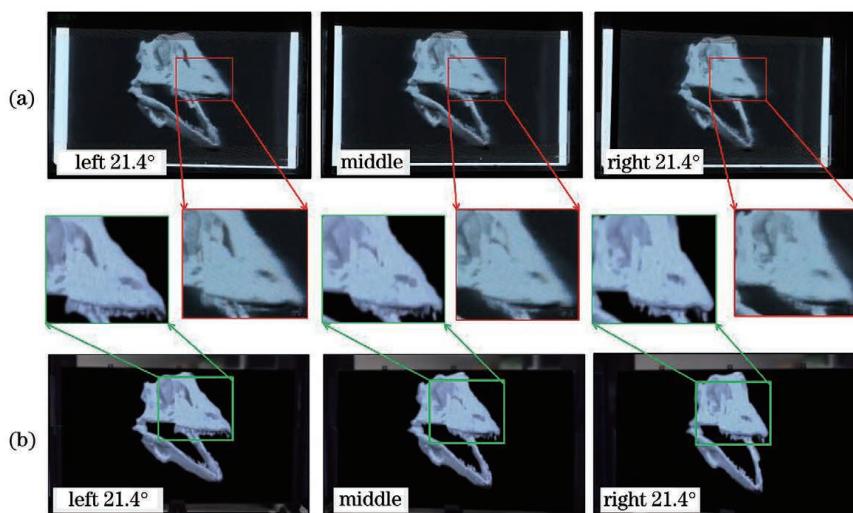


图 6 基于 DLLA 的光场 3D 显示原型装置和 DLLA 的实物局部结构放大图。(a)基于 DLLA 的光场 3D 显示原型装置的实物图;(b) DLLA 的实物局部结构放大图

Fig. 6 Light field 3D display prototype based on DLLA, and enlarged view of partial structure of DLLA. (a) Light field 3D display prototype based on DLLA; (b) enlarged view of partial structure of DLLA

图 7 使用两种控光结构的光场 3D 显示效果对比。(a)使用 MPUA 的显示效果;(b)使用 DLLA 的显示效果
Fig. 7 Comparison of display effects obtained by using two light-controlled components. (a) Display effect obtained by using MPUA; (b) display effect obtained by using DLLA

亮度, 测试结果如图 8 所示。图 8(a)为使用 MPUA 的显示亮度测试结果, 图 8(b)为使用 DLLA 的显示

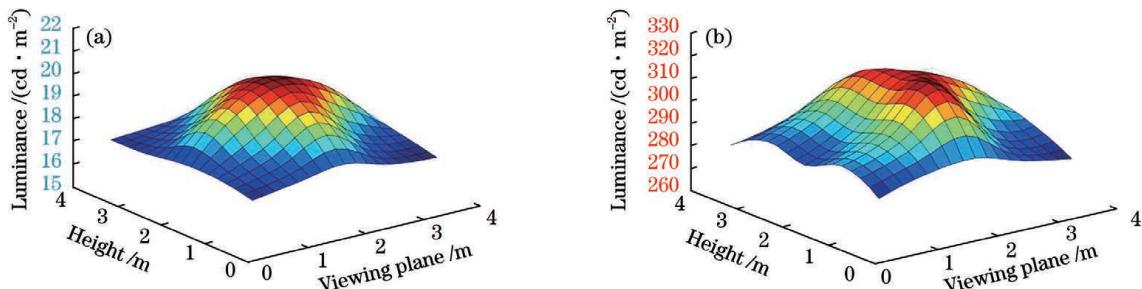


图 8 使用两种控光结构的显示亮度对比。(a)使用 MPUA 的显示亮度;(b)使用 DLLA 的显示亮度

Fig. 8 Comparison of display luminance obtained by using two light-controlled components. (a) Display luminance obtained by using MPUA; (b) display luminance obtained by using DLLA

为验证经过光学优化设计后的 DLLA 可以明显地抑制 3D 成像畸变, 进行了如下实验。用水平排列的相机阵列采集校正板的光场信息, 如图 9(a)所示。分别使用标准柱透镜和优化后的非球面双面型柱透镜来装配 DLLA, 再使用这两种 DLLA 再现校正板的 3D 影像, 通过对比再现 3D 影像的网格畸

亮度测试结果。由测试结果可以得出, 使用 DLLA 再现 3D 影像的亮度明显高于使用 MPUA 的亮度。

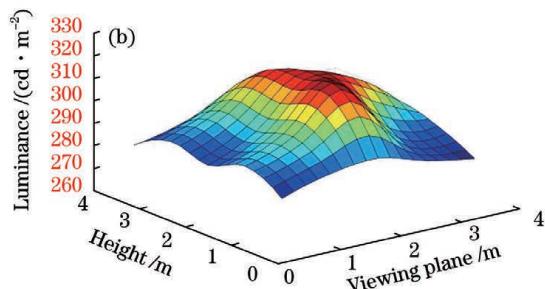


图 8 使用两种控光结构的显示亮度对比。(a)使用 MPUA 的显示亮度;(b)使用 DLLA 的显示亮度

变图评估成像畸变。实验结果如图 9(b)所示, 使用标准柱透镜装配的 DLLA 的畸变率为 14.80%, 而使用非球面双面型柱透镜装配的 DLLA 的畸变率为 2.23%, 由此可验证优化像差后的 DLLA 可以明显抑制像差, 从而保证高质量的 3D 显示效果。

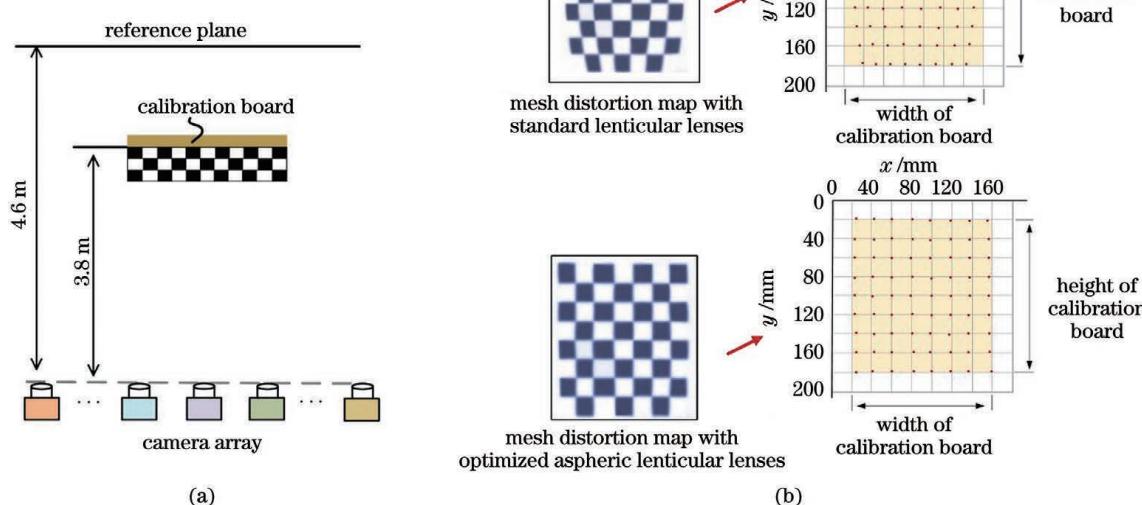


图 9 对 DLLA 进行光学优化后的畸变分析。(a)用相机阵列采集校正板光场的示意图;(b)使用标准透镜和非球面双面型柱透镜装配两种 DLLA 的 3D 成像畸变对比

Fig. 9 Distortion analysis of optimized DLLA. (a) Schematic diagram of acquisition of light field from calibration board using camera array; (b) comparison of 3D imaging distortions of DLLAs assembled using standard lens and aspheric double-sided lenticular lens

在显示原型装置的 42.8° 视角范围内, 所显示的 3D 影像具有连续平滑的运动视差。在距离显示器 4.6 m 处从 5 个不同方向对再现的 3D 影像进行拍摄, 拍摄效果如图 10 所示, 其中图 10(a)表示的

是从左侧 21.4° 的拍摄效果;图 10(b)表示的是从左侧 10.7° 的拍摄效果;图 10(c)表示的是从正面的拍摄效果;图 10(d)表示的是从右侧 10.7° 的拍摄效果;图 10(e)表示的是从右侧 21.4° 的拍摄效果。

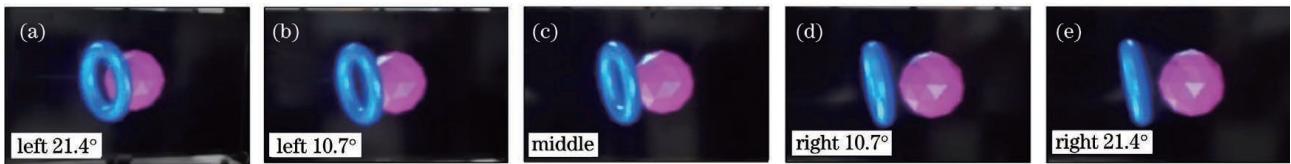


图 10 在 42.8° 视区范围内从不同角度拍摄的 3D 影像效果。(a) 左 21.4° 视角; (b) 左 10.7° 视角; (c) 中 0° 视角; (d) 右 10.7° 视角; (e) 右 21.4° 视角

Fig. 10 Views of 3D image from different directions within 42.8° viewing zone. (a) Angle: left 21.4°; (b) angle: left 10.7°; (c) angle: middle 0°; (d) angle: right 10.7°; (e) angle: right 21.4°

4 结 论

提出一种超多视点的大视角光场 3D 显示方法,该方法是实现具有大视角、超多视点的大尺寸裸眼 3D 显示的理想方法。大尺寸裸眼 3D 显示的垂直视差往往得不到充分的利用,本方法基于集成成像全视差光场构建方法,利用大节距 DLLA 使全部平面像素用于水平视差的构建。在可转化为 3D 信息的平面分辨率资源有限的条件下,该方法极大提高了平面分辨率的利用率,实现大视角的同时构建出超多水平视点。考虑到使用大节距的 DLLA 会出现较大的像差,因此对 DLLA 进行光学优化设计,以非球面双面型的柱透镜装配非连续柱透镜阵列,实现了对 3D 成像像差的明显抑制。此外, DLLA 具有可接受的光能利用率,并且其为竖向光线贯穿结构,可使 LED 显示器像素三色光均匀出射。在验证实验中,搭建的显示原型装置可实现视角为 42.8°、视点数目为 100、畸变率为 2.23% 的高质量 3D 光场显示效果,并且 3D 影像无色彩失真,实验结果证明了本文方法的可行性和优越性。

参 考 文 献

- [1] Lü G, Wang Q H, Wang J, et al. Multi-view 3D display with high brightness based on a parallax barrier[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(12): 121101.
- [2] Li X F, Wang Q H, Tao Y H, et al. Crosstalk reduction in multi-view autostereoscopic three-dimensional display based on lenticular sheet [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(2): 021001.
- [3] Sakamoto K, Kimura R, Takaki M. Parallax polarizer barrier stereoscopic 3D display systems [C]// Proceedings of the 2005 International Conference on Active Media Technology, 2005. (AMT 2005), May 19-21, 2005, Kagawa, Japan. New York: IEEE Press, 2005: 469-474.
- [4] Johnson R B, Jacobsen G A. Advances in lenticular lens arrays for visual display [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5874: 587406.
- [5] Urey H, Chellappan K V, Erden E, et al. State of heart in stereoscopic and autostereoscopic displays [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(4): 540-555.
- [6] Hong J, Kim Y, Choi H J, et al. Three-dimensional display technologies of recent interest: principles, status, and issues [J]. Applied Optics, 2011, 50(34): H87-H115.
- [7] Zhao W X, Wang Q H, Wang A H, et al. Autostereoscopic display based on two-layer lenticular lenses [J]. Optics Letters, 2010, 35(24): 4127-4129.
- [8] Li M, Piao Y, Deng L J. Spatial resolution of naked eye three-dimensional integral imaging display based on LED screen[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(6): 061004.
李敏, 朴燕, 邓莉巾. 基于 LED 屏裸眼三维集成成像显示技术的空间分辨率研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(6): 061004.
- [9] Shi X, Ai L Y, Yu M, et al. Full-parallax three-dimensional display based on light field camera [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0711005.
石肖, 艾灵玉, 于森, 等. 基于光场相机的全视差三维显示[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0711005.
- [10] Xia X X, Liu X, Li H F, et al. A 360-degree floating 3D display based on light field regeneration [J]. Optics Express, 2013, 21(9): 11237-11247.
- [11] Li W, Li H F, Xu L, et al. Suspended three-dimensional display haptic interaction based on leap motion [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0915004.
李炜, 李海峰, 徐良, 等. 基于体感检测器件的悬浮真三维显示力触觉交互[J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0915004.
- [12] Sang X Z, Yu X B, Zhao T Q, et al. Three-dimensional display with smooth motion parallax [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209011.
桑新柱, 于迅博, 赵天奇, 等. 具有平滑运动视差的三维显示技术 [J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209011.

- [13] Sang X Z, Yu X B, Chen D, et al. Research progress on three-dimensional optical display technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 050006.
桑新柱, 于迅博, 陈锋, 等. 三维光显示技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 050006.
- [14] Huang H K, Hua H. Systematic characterization and optimization of 3D light field displays [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 18508-18525.
- [15] Zhou X X, Su C, Li H F, et al. Research on monocular focusing characteristic for horizontal light field three-dimensional display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0912001.
周欣鑫, 苏忱, 李海峰, 等. 水平光场三维显示单目聚焦特性研究 [J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0912001.
- [16] van Berkel C, Clarke J A. Characterization and optimization of 3D-LCD module design [J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3012: 179-186.
- [17] Yu X B, Sang X Z, Chen D, et al. Autostereoscopic three-dimensional display with high dense views and the narrow structure pitch [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(6): 060008.
- [18] Takaki Y, Nago N. Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display [J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 8824-8835.
- [19] Lee J H, Park J, Nam D, et al. Optimal projector configuration design for 300-Mpixel multi-projection 3D display [J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26820-26835.
- [20] Zhao T Q, Sang X Z, Yu X B, et al. High dense views auto-stereoscopic three-dimensional display based on frontal projection with LLA and diffused screen [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(1): 011001.
- [21] Xia X X, Zhang X Y, Zhang L, et al. Time-multiplexed multi-view three-dimensional display with projector array and steering screen [J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15528-15538.
- [22] Huang T Q, Han B X, Zhang X R, et al. High-performance autostereoscopic display based on the lenticular tracking method [J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20421-20434.
- [23] Yang L, Sang X Z, Yu X B, et al. A crosstalk-suppressed dense multi-view light-field display based on real-time light-field pickup and reconstruction [J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34412-34427.
- [24] Yoon K H, Kang M K, Lee H, et al. Autostereoscopic 3D display system with dynamic fusion of the viewing zone under eye tracking: principles, setup, and evaluation [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(1): A101-A117.
- [25] Yu X B, Sang X Z, Gao X, et al. Dynamic three-dimensional light-field display with large viewing angle based on compound lenticular lens array and multi-projectors [J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 16024-16031.
- [26] Liu B Y, Sang X Z, Yu X B, et al. Time-multiplexed light field display with 120-degree wide viewing angle [J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35728-35739.
- [27] Du J Y, Sang X Z, Yu X B, et al. Large viewing angle floating three-dimensional light field display based on the spatial data reconstruction (SDR) algorithm [J]. *Optics Communications*, 2020, 475: 126229.
- [28] Yang L, Sang X Z, Yu X B, et al. Demonstration of a large-size horizontal light-field display based on the LED panel and the micro-pinhole unit array [J]. *Optics Communications*, 2018, 414: 140-145.
- [29] Sang X Z, Fan F C, Jiang C C, et al. Demonstration of a large-size real-time full-color three-dimensional display [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(24): 3803-3805.
- [30] Yu C X, Yuan J H, Fan F C, et al. The modulation function and realizing method of holographic functional screen [J]. *Optics Express*, 2010, 18(26): 27820-27826.