

文章编号:1007-2780(2022)05-0573-08

一种视点均匀分布的桌面式光场显示系统

徐 斌, 于迅博*, 高 鑫, 桑新柱
(北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

摘要:基于视点分段式体像素的桌面光场显示系统具有正面观看视区以及 100° 超大视角,能够显示具有全视差的高质量三维图像。但是,该系统还存在所构建的视点在空间分布不均匀的问题,观看视区中间区域视点分布密集,两边区域视点分布稀疏,使得显示的三维图像出现透视关系不正确以及视点间的串扰等问题,影响显示质量。本文通过对系统视点的构建过程进行分析,发现造成视点分布不均匀问题的原因是系统采用的柱透镜存在像差,导致出射光线无法会聚于一点,而是形成一个弥散斑。因而,为了均匀系统视点分布,本文提出了采用对透镜进行光学优化的方法以减小像差,并设计了一种非球面透镜。最终通过实验验证了方法的可行性,系统视点分布的均匀度由 39.32% 提升至 98.39%,显示图像透视关系不正确以及视点间的串扰等问题得到了有效改善。

关键词:光场显示;电子沙盘;视点分布;非球面透镜

中图分类号: TN27 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2022-0041

Tabletop light field display system with uniform distribution of viewpoints

XU Bin, YU Xun-bo*, GAO Xin, SANG Xin-zhu

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications,
Beijing 100876, China)

Abstract: Tabletop light field display system based on views-segmented voxels can display high quality 3D images with frontal viewing area, 100° viewing angle and full parallax. However, the system also has the problem of nonuniform distribution of viewpoints. The central area of the viewing zone has dense distribution of viewpoints, and both marginal sides of the viewing zone has sparse distribution of viewpoints. Nonuniform distribution of viewpoints causes the incorrect perspective relations of the displayed 3D image and crosstalk between adjacent viewpoints. This paper performs analysis on the construction process of viewpoints and determines that the main reason for the nonuniform distribution of viewpoints is the aberration of the cylindrical lens used in the system which causes the emitted light rays not to converge at one point, but a diffuse spot. An aspheric lens is proposed and designed to optimize aberrations. Finally, the experiments are conducted to verify the correctness of the method. The uniformity

收稿日期:2022-01-30;修订日期:2022-03-07.

基金项目:国家自然科学基金(No. 62175015, No. 61905019, No. 62075016);中央高校基本科研业务费(No. 2021RC13)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 62175015, No. 61905019, No. 62075016);
Fundamental Research Funds for the Central Universities(No. 2021RC13)

*通信联系人, E-mail: yuxunbo@126.com

of the viewpoints distribution is increased from 39.32% to 98.39%, and the problems of incorrect perspective and crosstalk between viewpoints are effectively improved.

Key words: light field display; electronic sandbox; viewpoint distribution; aspheric lens

1 引言

不同于自由立体显示、集成成像显示等传统的三维显示方法,光场显示能够再现三维场景在空间中的光线分布,显示图像真实自然,是近年来三维显示领域研究的热点^[1-13]。光场显示通过构建体像素,并使体像素向不同方向发出携带有不同视点信息的光线,由此来表征三维物体上的发光物点。对于同一体像素,观看者在不同的观看位置能够接收到具有不同视点信息的光线。所有体像素发出的光线共同重构出三维物体的光场分布,从而再现真实自然的3D影像。近年来,得益于平板显示技术和地形渲染技术的进步,使实现基于海量数据的高分辨率三维电子沙盘成为了可能^[14-17]。电子沙盘的应用场景十分广泛,在军事部署、交通管制、地图导航、地理地形勘测等诸多领域都有着强烈的需求。通过在电子沙盘上显示高质量的三维地理地形图像,能够帮助使用者更加形象具体地判断地理结构和地形细节,从而有效提高工作的精确性以及效率。

基于光场显示存在的显著优势,国内外诸多科研团队都在研究将光场显示技术应用到三维电子沙盘显示上。理想的三维电子沙盘应该具有大观看视角和高分辨率,能够满足多人同时观看,且显示图像清晰自然,具有正确的空间几何关系。日本的Yoshida等人提出了一种基于投影光场显示的360°桌面三维显示系统,相比传统的投影光场显示系统,该方法通过在光路中加入柱面镜来构建虚拟环形投影仪阵列,从而显著提升了光源的数量,实现了360°可视区域的桌面光场显示^[18]。北京航天航空大学的王琼华教授团队提出了一种基于集成成像的时分复用型桌面光场显示系统,通过设计一种环形基元图像阵列的生成方法,将显示子区域从360个减小为10个,提升了渲染效率,实现了具有平滑运动视差的360°环形视区桌面光场显示^[19]。近期,我们团队采用定向背光、柱透镜光栅、光学偏折膜和全息功能屏实现了一种基于视点分段式体像素的全

视差桌面式光场显示系统^[20]。该系统具有100°大观看视角,能够显示具有正确空间遮挡关系的高分辨率地理地形图像,是实现三维电子沙盘的一个可靠方案。但是,该方法还存在所构建的视点在空间中分布不均匀的问题,在观看区域中间位置视点分布密集,在观看区域靠近边缘的位置视点分布稀疏,造成显示图像出现透视关系不正确,以及视点间的串扰等问题,影响显示质量,阻碍了系统的进一步应用。

为了解决视点分段式体像素桌面光场显示中的视点分布不均匀问题,本文对系统的视点形成过程进行了分析,发现造成视点分布不均匀的原因主要是系统所采用的柱透镜存在像差。因此可以采用对透镜进行光学优化的方法以抑制像差,从而均匀视点分布。最终,设计了一种非球面透镜以减小像差,并通过实验验证了所提出方法的正确性,系统视点分布的均匀度由39.32%提升至98.39%,显示图像透视关系不正确以及视点间的串扰等问题得到有效改善。

2 基本原理

2.1 基于视点分段式体像素的桌面光场显示系统的基本原理

为了对系统视点的形成过程有具体的认知,首先对基于视点分段式体像素的桌面光场显示系统的显示原理进行介绍。图1是系统的光路图,系统主要结构包括准直背光单元、柱透镜光栅(Lenticular Lens Array, LLA)、LCD显示屏、光学偏折膜(Direction Turning Diffuser, DTD)以及全息功能屏(Holographic Functional Screen, HFS)5部分。其中准直背光源位于结构的最下侧,为系统提供竖直向上的定向光。LCD上显示经过编码后的合成图像,柱透镜光栅反贴在LCD液晶屏的下面,用来对光线的方向进行控制。从背光发出的定向光线经过柱透镜后发生折射,方向发生改变,并向上方的焦点处进行会聚。同时,光线在经过LCD时会携带对应子像素上的

编码信息,从焦点处发出的不同方向的光线来自于不同的子像素,具有不同的颜色和强度信息,因而可以将其等效地看成是一个体像素点。体像素将在空间中重构物体的光场分布,其发出的不同方向的光线在空间中交汇。而在某些交汇点,观看者透过所有体像素将能够看到一幅完整的视差图像,这些交汇点即为视点。全息功能屏是一种定向扩散膜,通过定向激光散斑法制作而成,通过控制其上散斑的大小和形状,能够使光束在水平方向和竖直方向上以一定角度进行扩散^[21]。将全息功能屏放置在柱透镜光栅的焦平面上,也即体像素所在的平面上,能够使体像素发出的光线按照所设角度进行扩散,从而增大竖直观看视角,并使所构建的光场在水平方向上更加均匀连续,贴近原始光场。光学偏折膜由一个个三棱柱状的棱齿结构组成,能够使垂直入射的光线偏折一定角度出射。光学偏折膜在系统中位于LCD与全息功能屏之间,从LCD出射的光线经过光学偏折膜后将向设备前方发生偏折,所形成的体像素位置也将随之向前移动,并在设备的前方构建光场。相比原先在设备上方构建光场,在设备前方构建的光场更加符合人们的观看习惯。

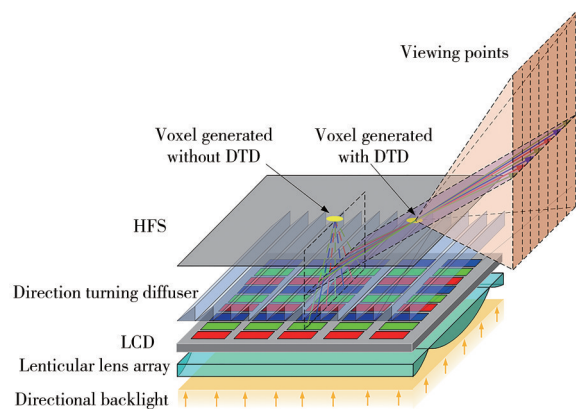


图1 基于视点分段式体像素的桌面光场显示系统的光路图

Fig. 1 Light path of the tabletop light field display system based on views-segmented voxels

此外,为了解决不同高度观看时的透视关系错误问题,还在此基础上设计了一种能够根据多个观看者的空间坐标划分独立视区的分割体像素,并提出了一种可为多个观看者同时提供全视

差光场显示的透视关系校正方法,填补了系统垂直视差的缺失。最终,该系统能够实现具有100°大视角、全视差、正确空间遮挡关系以及正面观看区域的桌面三维显示。

2.2 视点在空间中的分布

视点是视差图像在空间中形成的可正确观看的位置,观看者在视点位置处能够获得三维物体的一个对应2D侧面。由上文对系统原理的分析可知,系统通过在空间中构建体像素,并以此来表征三维物体上的发光物点,从而在空间中重构物体的原始光场。体像素发出的不同方向的光线具有不同的颜色和强度信息,对于同一体像素,观看者在不同的位置将接收到不同的信息。通过对在LCD上显示的合成图像进行编码,进而控制体像素发出光线所携带的信息,能够实现某些位置处,观看者透过所有体像素将能够看到一幅完整的视差图像,这些位置即为视点。视点是体像素发出光线在空间中到达的位置,因而可以根据体像素发出光线在空间中的分布,得到视点在空间中的分布,如图2所示。在图2中,为了简化说明,在系统中略去了光学偏折膜的作用,它会使所有视点的总体位置向设备前方发生偏移,从而形成正面的观看视区,但并不会影响视点间的水平相对位置,因而不会对视点分布均匀性产生影响。从背光发出的定向光线经过上方的透镜后发生折射,方向发生改变,并在经过LCD时携带上子像素中编码的视点信息。在理想透镜的情况下,光线将会聚于焦点处,所形成的体像素是一个理想的点,如图2(a)所示。图中 ΔW 是视点宽度, L 是系统的观看距离, d 是LCD与全息功能屏之间的距离, p 是柱透镜的节距, N 是一个透镜下子像素的数目,根据图中几何关系能够计算出:

$$\Delta W = \frac{pL}{Nd}, \quad (1)$$

因而,在理想透镜的情况下,所形成的体像素是一个理想的点,由于子像素宽度相等,在空间中所构建视点的宽度也相等,视点均匀分布。

但在实际情况中,由于透镜存在像差,使得准直光线经透镜折射后在定向扩散膜上无法完美地会聚成一个点,此时所形成的体像素将会是一个弥散斑的形状。从图2(b)中可以看出,由于光线在全息功能屏上不再会聚为一个理想的点,

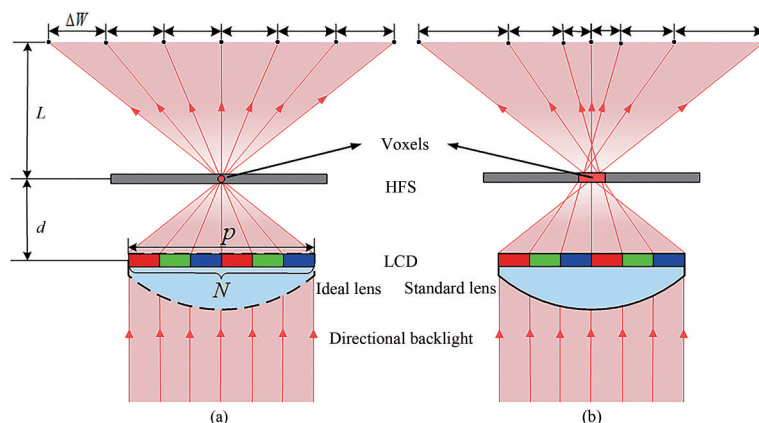


图2 视点在空间中的分布。(a)理想透镜下;(b)标准透镜下。

Fig. 2 Distribution of viewpoints under circumstances of (a) ideal lens and (b) standard lens.

使得上述的几何关系不再适用,视点宽度不再相等,视点分布不均匀。而且,根据斯涅尔折射定律,透镜对边缘光线的偏折能力更强,使得越靠近视区边缘,视点宽度将越大,视点在观看视区中间区域分布密集,边缘区域分布稀疏。

由以上分析可知,由于透镜成像有像差,定向光经柱透镜折射后无法会聚为一点,导致系统的视点分布不均匀,中间密集,两边稀疏。但是,在采集视差图像时所采用的相机阵列是等间隔的,这会使得视点位置和相机位置在空间中不重合,观看者在视点位置处所看到的视差图像并不是在该位置采集获得的,而是有一定的角度差异,从而导致显示图像出现透视关系不正确的问题,影响观看者对所显示物体空间结构的判断。

上文根据单个像素分析了系统视点在空间中的分布,图3给出了多个像素共同构建视点的过程,图中用红、绿、蓝3种颜色的光束表示

子像素发出的光线。在理想透镜的情况下,如图3(a)所示,视点宽度 ΔW 相等,不同透镜下子像素发出的光线在观看平面上的分布能够完美重合,如图中每个视点区域都有单一的颜色,观看者在视点处将能够看到一幅干净且完整的视差图像。但在实际情况中,由于透镜成像有像差,使得视点宽度 ΔW 不再相等,不同透镜下子像素发出的光线在观看平面上的分布不再重合,而是会有混叠,造成视点间的串扰。如图3(b)中的视点区域不再只是单一的颜色,而是会有多种颜色,观看者看到的图像也不再是一张完整的视差图像,而是由多个相邻视差图像混叠而成,造成显示图像清晰度下降。

2.3 采用透镜像差优化的视点均匀化方法

由上文的分析可知,由于透镜像差的影响,使得光线无法会聚于一点,造成基于视点分段式体像素桌面光场显示系统的视点分布不均匀,引

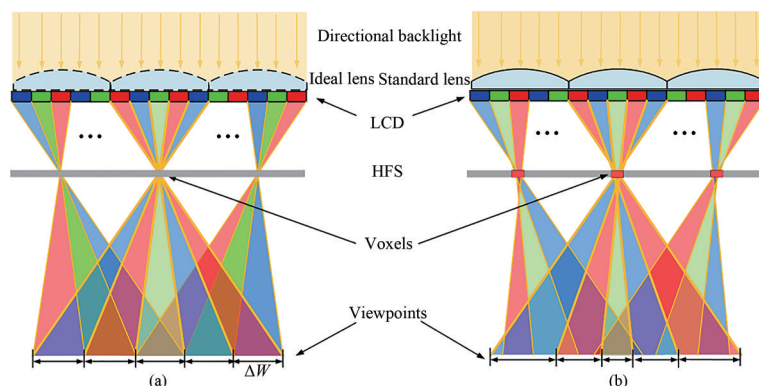


图3 (a)理想透镜下系统的视点构建过程;(b)标准透镜下系统的视点构建过程。

Fig. 3 Construction process of viewpoints under circumstances of (a) ideal lens and (b) standard lens.

起显示图像透视关系不正确以及视点间的串扰等问题,影响显示质量。

由于视点分布不均匀是透镜像差导致的,因而可以通过对透镜进行光学优化以减小像差,使光线均匀出射。对于传统的球面光学系统,为了优化像差,需要设计结构复杂、具有多个镜片的复合透镜。采用非球面对透镜面型进行优化,能够避免复杂的透镜结构,并且减小透镜数量。式(2)给出了偶次非球面的表达式:

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

(2)

其中: $c = 1/r_0$,是非球面基准面的曲率, r_0 是基准

面的曲率半径; k 是非球面的圆锥系数; $\alpha_2, \alpha_4, \alpha_6 \dots$ 是非球面的高阶系数。为了获得理想的优化结果,将透镜前表面设为偶次非球面,采用阻尼最小二乘法对初级像差和其他高阶像差进行迭代优化,计算出最优的结果。

图 4 所示为优化后透镜的光路图和结构图,透镜的节距 p ,厚度 d ,以及玻璃的折射率 n 都在图中标出,非球面的参数由表 1 给出。从光路图中可以看出,经过优化后,定向光线经过透镜折射后基本能够会聚于一点。图 5 给出了优化前透镜和优化后非球面透镜的点列图,弥散斑均方根半径从 $66.640\text{ }\mu\text{m}$ 减小为 $0.404\text{ }\mu\text{m}$,非球面透镜的像差得到了极大抑制。

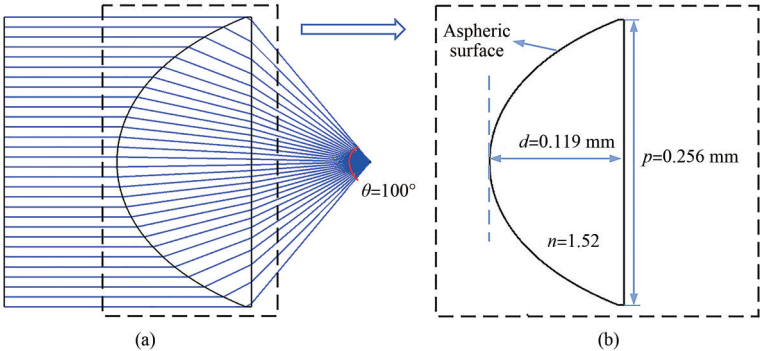


图 4 优化后非球面透镜的(a)光路图和(b)结构图。
Fig. 4 (a) Light path of the optimized aspheric lens; (b) Structure of the optimized aspheric lens.

表 1 优化后透镜非球面的参数

Tab. 1 Parameters of aspheric surfaces in the optimized lens

	r/mm	k	α_2	α_4	α_6
Aspheric surface	0.039	-0.956	-7.608	-25.820	314.171

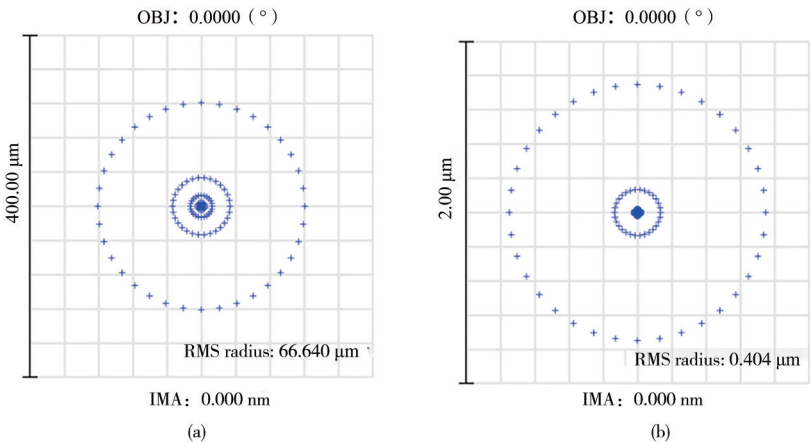


图 5 (a)优化前透镜的点列图;(b)优化后非球面透镜的点列图。
Fig. 5 (a) Spot diagram of the standard lens; (b) Spot diagram of the optimized aspheric lens.

3 实验验证

为了验证上述利用透镜像差优化方法来均匀系统视点分布的有效性,对改进前和改进后的桌面光场显示系统进行了光强对比实验。系统所采用的 LCD 尺寸为 81.28 cm (32 in)、分辨率为 7 680×4 320,所采用的柱透镜光栅节距为 0.256 mm、焦距为 0.184 mm。

实验在暗室环境下进行,在实验时通过修改在 LCD 上显示的合成图,使其每次只点亮一个位置的视点图像,其他位置的视点图像填黑,用照度计依次测量并记录下每个视点在空间中的光强分布。以系统观看视区的中央为原点,图 6 为根据实验数据绘制的在观看视区右侧 400~650 mm 区域内的系统空间光强分布曲线。从图中可以看出,单个视点的光强近似为正态分布。以每条曲线中光强最大的位置作为视点位置,可以看出,在改进前的系统中,随着观看位置逐渐接近视区边缘,相邻视点间的间距也随之增大。而在采用了所设计非球面透镜的改进后系统中,在观看范围内,视点间隔都近似相等。

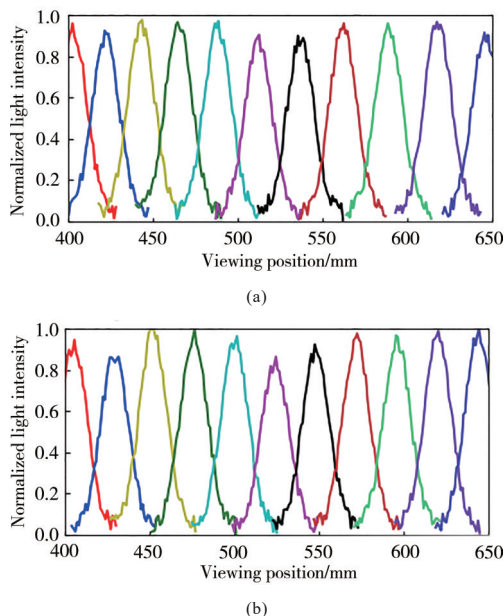


图 6 系统的光强分布曲线。(a)在标准透镜情况下;(b)在优化后非球面透镜情况下。

Fig. 6 (a) Light intensity distribution within the 400~650 mm viewing area with standard lens; (b) Light intensity distribution within the 400~650 mm viewing area with optimized aspheric lens.

为了对视点分布情况进行定量分析,引入了视点均匀度的概念,计算公式如式(3)所示:

$$\text{Uniformity} = 1 - \frac{\sigma_{\Delta D_{\text{measured}}}}{\Delta D_{\text{ideal}}}, \quad (3)$$

其中, ΔD_{ideal} 是视点分布均匀情况下相邻视点间的间距, $\sigma_{\Delta D_{\text{measured}}}$ 是实验测量得到的相邻视点间间距的标准差。计算得到,相比原始系统,在采用所设计非球面透镜的改进后系统中,视点均匀度由 39.32% 提升至 98.39%,基本实现了视点均匀分布。

图 7(a)是分别在观看视区左 50°、中间 0°和右 50°观看视角下由虚拟相机采集获得的都市地理图像。将这些视差图像编码为合成图像后显示在采用标准透镜的原始系统上,图 7(b)是拍摄得到的实拍图,图 7(c)是在采用非球面透镜的改进后系统上显示获得的实拍图。为了直观地对比改进前和改进后的效果,将这两组图像分别与

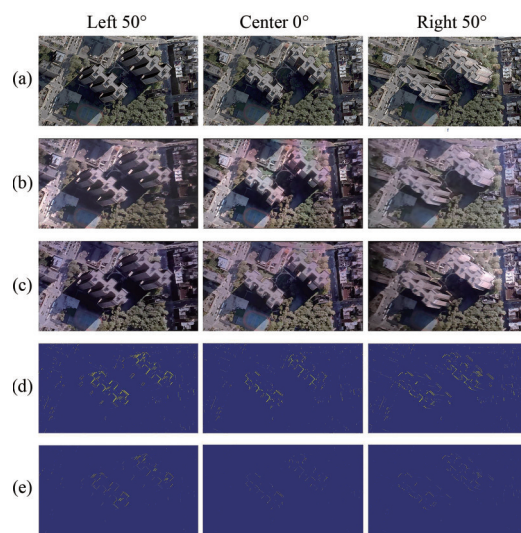


图 7 不同角度下拍摄获得的都市地形图像。(a)虚拟相机采集图像;(b)在原始系统上拍摄获得的实拍图;(c)在采用非球面透镜的改进后系统上拍摄获得的实拍图;(d)图 7(a)和图 7(b)进行相减处理后得到的效果图;(e)图 7(a)和图 7(c)进行相减处理后得到的效果图。

Fig. 7 Images of city terrain from different perspectives. (a) Original images captured by the camera; (b) Images obtained on the original system with standard lens; (c) Images obtained on the improved system with aspheric lens; (d) Images obtained after the subtraction processing of Fig. 7 (a) and Fig. 7 (b); (e) Images obtained after the subtraction processing of Fig. 7 (a) and Fig. 7 (c).

原始的采集图像进行相减处理,图7(d)和图7(e)是处理后得到的效果图。显示的图像与原始采集图像差别越大,在效果图上建筑的轮廓也会越明显。对比后能够发现,在采用非球面透镜的改进后系统中,显示图像更加接近原始图像,显示图像透视关系不正确以及视点间的串扰等问题得到了有效抑制。

4 结 论

在基于视点分段式体像素的桌面光场显示系统中,存在视点分布不均匀的问题,会导致显

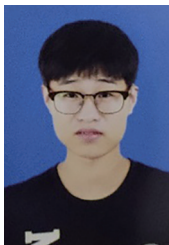
示的三维图像出现透视关系错误,以及视点间的串扰等问题,影响显示质量。本文对系统的视点构建过程进行分析,发现造成视点分布不均匀的原因主要是透镜存在像差,使得光线无法会聚于焦点处,而是在像面形成一个弥散斑。通过对透镜进行光学优化,设计了一种非球面透镜,有效抑制了像差,提升了出射光线的均匀度。最终,通过实验验证优化后的系统成功提升了视点分布的均匀性,系统视点分布的均匀度由39.32%提升至98.39%,显示图像透视关系不正确以及视点间的串扰等问题得到了明显改善,提高了系统的显示质量。

参 考 文 献:

- [1] BLANCHE P A. Holography, and the future of 3D display [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2: 28.
- [2] BALRAM N, TOŠIĆ I. Light-field imaging and display systems [J]. *Information Display*, 2016, 32(4): 6-13.
- [3] LIU X, LI H F. The progress of light-field 3-D displays [J]. *Information Display*, 2014, 30(6): 6-14.
- [4] MA Q G, CAO L C, HE Z H, *et al.* Progress of three-dimensional light-field display [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(11): 111001.
- [5] HUANG H K, HUA H. Systematic characterization and optimization of 3D light field displays [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 18508-18525.
- [6] SANG X Z, GAO X, YU X B, *et al.* Interactive floating full-parallax digital three-dimensional light-field display based on wavefront recomposing [J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8883-8889.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] WETZSTEIN G, LANMAN D, HIRSCH M, *et al.* Compressive light field displays [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2012, 32(5): 6-11.
- [10] CHEN D, SANG X Z, YU X B, *et al.* Performance improvement of compressive light field display with the viewing-position-dependent weight distribution [J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29781-29793.
- [11] WETZSTEIN G, LANMAN D, HIRSCH M, *et al.* Tensor displays: compressive light field synthesis using multi-layer displays with directional backlighting [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(4): 80.
- [12] WEN J, YAN X P, JIANG X Y, *et al.* Integral imaging based light field display with holographic diffusor: principles, potentials and restrictions [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27441-27458.
- [13] YU X B, SANG X Z, GAO X, *et al.* 360-degree tabletop 3D light-field display with ring-shaped viewing range based on aspheric conical lens array [J]. *Optics Express*, 2019, 27(19): 26738-26748.
- [14] XIONG J H, WU S T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications [J]. *eLight*, 2021, 1: 3.
- [15] KANG H Y, SIM Y, HAN J H. Terrain rendering with unlimited detail and resolution [J]. *Graphical Models*, 2018, 97: 64-79.
- [16] ZHAIR, LUK, PAN W G, *et al.* GPU-based real-time terrain rendering: design and implementation [J]. *Neurocomputing*, 2016, 171: 1-8.
- [17] EVANGELIDIS K, PAPADOPOULOS T, PAPATHEODOROU K, *et al.* 3D geospatial visualizations: animation and motion effects on spatial objects [J]. *Computers & Geosciences*, 2018, 111: 200-212.

- [18] YOSHIDA S. Virtual multiplication of light sources for a 360°-viewable tabletop 3D display [J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 32517-32528.
- [19] XING Y, XIA Y P, LI S, *et al.* Annular sector elemental image array generation method for tabletop integral imaging 3D display with smooth motion parallax [J]. *Optics Express*, 2020, 28(23): 34706-34716.
- [20] 董昊翔, 于迅博, 金秋, 等. 一种基于视点分段式体像素的具有 100° 正面观看视角的桌面式光场显示系统[J]. *中国激光*, 2022, 49(4): 0409001.
- DONG H X, YU X B, JIN Q, *et al.* Tabletop 3D light-field display with 100° frontal viewing angle based on views-segmented voxels [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(4): 0409001. (in Chinese)
- [21] 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.

作者简介:



徐 斌(1998—),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,2020年于北京邮电大学获得学士学位,主要从事三维光场显示方面的研究。E-mail: xb1998@bupt.edu.cn



于迅博(1988—),男,辽宁铁岭人,博士,副教授,2016年于北京邮电大学获得博士学位,主要从事三维显示与新型显示技术方面的研究。E-mail: yuxunbo@126.com