

## 基于光线追迹的 LED 裸眼三维显示技术准直性研究

侣同岭, 朴 燕, 李 敏

(长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 在 LED 集成成像裸眼三维显示中, LED 大屏幕的单个像素点的发散角很大, 使用平凸及双凸透镜, 图像的重构光线发散且相邻透镜单元间的像素串扰大, 导致立体场景再现的过程中图像不清晰, 影响重构三维图像的质量。根据光线追迹原理, 分析了 LED 集成成像的成像过程, 研究不同形状透镜阵列与 LED 集成成像相邻透镜单元间像素点间串扰的关系, 仅使用单个凹凸透镜有效地控制了重构光线的发散问题, 使通过透镜的重构光线更加汇聚准直, 光线平行出射, 有效地减小了相邻透镜间的像素串扰, 提高了成像质量。通过比较字母模型成像的仿真结果, 凹凸透镜非常适用于 LED 集成成像, 成像的效果优于其他形状透镜。

**关键词:** 集成成像; 透镜阵列; LED 大屏幕

**中图分类号:** TN141 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0603002

## Research on collimation of LED naked eye 3D display technology based on ray tracing

Si Tongling, Piao Yan, Li Min

(Academy of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In the integrated imaging naked eye 3D display based on LED, the divergence angle of the pixel point of LED large screen was very large. Flat convex and double convex lens are often employed. The reconstructed light of the image diverges and the pixel crosstalk between adjacent lens units was large, resulting in unclear images during the reproduction of the three-dimensional scene with the reduced imaging quality. The imaging process of integrated imaging based on LED was analyzed according to the principle of ray tracing. The relationship of crosstalk between different shapes of the lens array and adjacent lens units of LED integrated imaging was investigated. A single meniscus lens was used to effectively control the divergence of the reconstructed light. The reconstructed light passing through the lens was more convergent and collimated. The emergent rays through the lens becomes more parallel and the crosstalk between adjacent lens units was reduced effectively. By comparing the simulation result of the letter model, the meniscus lens was more suitable for LED integrated imaging. The imaging effect of the meniscus lens is better than that of the other lens.

**Key words:** integrated imaging; lens array; LED large screen

收稿日期: 2018-04-17; 修订日期: 2018-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(60977011); 吉林省科技计划项目(20180201091GX); 吉林省机器视觉智能装备与智能检测科技创新中心(20180623039TC)

作者简介: 侣同岭(1993-), 男, 硕士生, 主要从事立体成像方面的研究。Email: si\_tling@126.com

导师简介: 朴燕(1965-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事立体成像及数字视频图像处理方面的研究。Email: piaoyan@cust.edu.cn

## 0 引言

集成立体成像摆脱了传统立体成像需要佩戴辅助设备的束缚,引起国内外学者的广泛研究。其基本原理最初可以追溯到 1908 年,由 Gabriel Lippman 提出,利用微透镜阵列记录立体场景信息,根据光线追踪原理在显示端放置一个参数相同的微透镜阵列可以将原三维场景完整的重现出来,但由于当时的透镜工艺及采集设备的限制,所采集的图像质量低,且观看到的是一个物空间反转的三维图像<sup>[1]</sup>。

在集成成像的应用中,使用投影仪作为显示设备可以任意调节元素大小,便于与不同参数透镜阵列的耦合<sup>[2]</sup>,使用双目立体相机的实时集成成像拍摄系统简化元素图像的获取过程<sup>[3]</sup>。应用高折射率填充层和负折射率平凹透镜可以提高集成成像再现场景的可观察视角<sup>[4-5]</sup>。弯曲透镜阵列的使用可以提高再现场景的分辨率<sup>[6]</sup>。使用重叠微透镜阵列可以提高集成成像系统的再现景深<sup>[7]</sup>。透镜-针孔组合阵列的应用,解决了单一透镜阵列的阵列间隙透过的杂散光导致成像质量下降的问题,从而提高了成像质量<sup>[8]</sup>。此外,研究人员在集成成像三维重建的过程中可以进行目标的深度定位,同时去除目标前的障碍物<sup>[9]</sup>。

目前大多数学者主要研究基于液晶显示器(LCD)的集成成像获取,显示以及应用的技术,但是关于 LED 大屏幕在集成成像中应用的研究很少且不成熟。LED 大屏幕较普通液晶显示器具有亮度高,寿命长,屏幕大小面积方便可调且没有连接造成黑边现象,像素点发散角大等优点。文中根据光线追踪原理以及透镜参数对成像的影响,设计凹凸透镜提高 LED 大屏幕的像素点经过透镜发出光线的准直性,减小像素点间串扰对成像效果的影响,改善 LED 集成成像的显示效果。

## 1 集成成像原理

集成成像显示系统的主要评价参数有:再现像的空间分辨率  $R$ ,在成像空间可以清晰分辨再现深度 DOF 和观察者可观看完整再现像的视角  $VA$ 。集成成像的显示原理如图 1 所示,CDP 和 MDP 分别为再现像中心平面和边界平面。 $p$  为透镜阵列间的

间隙, $g$  为屏幕与透镜阵列间的距离, $a$  为透镜阵列与再现像中心平面 CDP 间的距离。

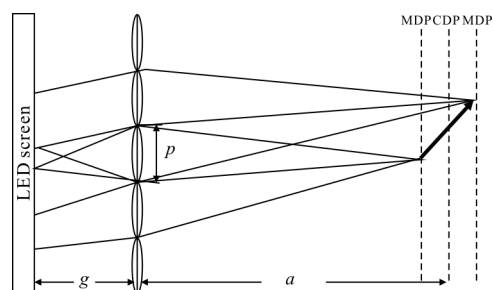


图 1 集成成像原理图

Fig.1 Schematic diagram of integrated imaging

其中, $g,f$  和  $a$  满足高斯公式(1):

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

式中: $f$  为单个透镜的焦距。

在集成成像的评价参数中,视场角  $VA$  由成像系统透镜阵列的参数决定,而分辨率  $R$  和再现深度 DOF 主要取决于再现平面的再现像光斑的尺寸,在基于 LED 大屏幕的集成成像系统中,单个像素经透镜阵列后发散,无法准确确定再现像光斑的大小,同时只有特定的观看位置可以观察到完整的 3D 场景再现像。球差的存在是导致像素点经透镜阵列后光线发散的重要因素。

## 2 LED 集成成像影响因素与仿真

如图 2 所示,球差是轴上固定点发出的同心光束经光学系统折射后,将不再是同心光束,不同高度的光线交于光轴的不同位置,相对于理想像点的位置有不同偏离。

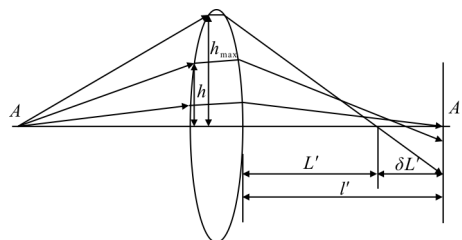


图 2 球差

Fig.2 Spherical aberration

球差  $\delta L'$  为:

$$\delta L' = L' - l' \quad (2)$$

单折射球面球差分布为:

$$S_l = \frac{nl \sin U (\sin I - \sin I') (\sin I' - \sin U)}{\cos \left[ \frac{1}{2} (I - U) \right] \cos \left[ \frac{1}{2} (I - U) \right] \cos \left[ \frac{1}{2} (I + I') \right]} \quad (3)$$

经变换化简后, 单球面透镜初级球差随曲率的变化关系:

$$\delta L' = \frac{1}{2} h^2 f' \left[ \frac{n+2}{n} \rho_1^2 - \frac{2n+1}{n-1} \varphi \rho_1 + \frac{n^2}{(n-1)^2} \varphi^2 \right] \quad (4)$$

焦距公式  $f$ :

$$f = \frac{nr_1 r_2}{(n-1)[n*(r_1 - r_2) + (n-1)d]} \quad (5)$$

式中:  $n$  为透镜材料的折射率;  $r_1$ 、 $r_2$  分别为透镜前后表面的半径;  $d$  为透镜的厚度。

根据焦距和球差分布公式, 对无限远物体或平行光成像, 曲率比满足以下条件时, 单透镜有最小球差<sup>[10]</sup>:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{4+n-2n^2}{n(1+2n)} \quad (6)$$

在光学系统中, 像方焦平面与物方无限远垂轴平面的像平面是一对共轭面, 故自物方无穷远轴外点发出的倾斜于光轴的平行光束经光学系统后必会聚于像方焦平面上一点, 根据光线可逆原理, 像方焦平面上一点发出的光束经光学系统后, 必为平行光束。球差越小则焦平面可唯一确定, 可以根据球差大小分析像素点光线追迹结果。

集成成像为可见光成像, 文中使用 LED 大屏幕的大小为 384 pixel×384 pixel, 大屏幕上单个像素的大小为 1.25 mm×1.25 mm, 每个像素点通过屏幕后的最大发散角为 170°, 透镜材质为亚克力, 材质的透光率为 92%, 在仿真实验中, 包括单个像素相邻透镜串扰仿真和透镜阵列对字母模型“E”的仿真, 在仿真过程中均使用单色光。

在仿真实验中, 使用光学设计软件 TracePro 在透镜的材质和焦距相同( $f=2.26$  mm)的情况下, 分别对不同形状的透镜进行光线追迹仿真, 其中, 双凸透镜两面均凸起, 厚度大于其它透镜, 凹凸透镜的参数根据配曲法得到( $r_1=1$  mm,  $r_2=5.65$  mm)。实验中, 以无限远物点为参考, 使用平行光对透镜的球差进行测量。透镜的大小均为  $\varphi 1.25$  mm, 表 1 中记录了三种透镜的曲率和厚度参数。

表 1 透镜参数

Tab.1 Lens parameters

Shape	Front surface radius /mm	Rear surface radius /mm	Thickness/mm
Double convex lens	2.1	-2.1	0.4
Plano convex lens	1.15	0	0.2
Meniscus lens	1	5.65	0.2

将两个透镜相邻排布, 单个像素点分别放置在三种不同透镜的焦平面上, 像素点设置弧度为  $\frac{17}{18}\pi$  的半球, 保证像素的发散角为 170°, 发光光线设置为垂直表面发射, 选择波长为 0.6  $\mu\text{m}$  的单色光线, 每个像素点光线总数设置为 1 000 条, 对三种不同形状的透镜进行仿真, 分析像素点间的串扰。

使用透镜阵列对字母模型分别使用三种不同形状透镜进行仿真。在焦距相同的情况下, 凹凸透镜前后表面的曲率半径根据曲率配比公式得到, 分别为  $r_1=6.9$  mm,  $r_2=39$  mm, 透镜厚度  $d=1.8$  mm, 透镜的大小为  $\varphi 10$  mm, 在 TracePro 中设计透镜并进行光线追迹仿真。

如图 3 所示为字母模型仿真结构示意图, 整个仿真过程包括集成成像系统的采集和再现过程, 采集记录面设置为全透过, 接收通过透镜阵列对字母模型记录的信息, 同时作为显示面为透镜阵列提供采集信息, 遮光板表面设置为全吸收, 滤去成像过程中多余的杂散光, 透镜阵列为大小为 4×4, 字母模型表面设置为朗伯(Lambertian)发光场型, 表面光源设置光线为 100 000 条, 再现记录面用于记录再现后的光线信息<sup>[9]</sup>。

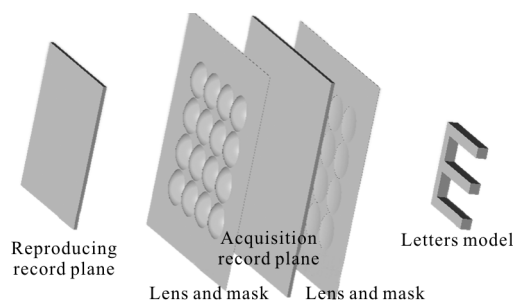


图 3 仿真结构示意图

Fig.3 Simulation structure diagram

### 3 结果分析

图 4(a)~(c)分别为使用双凸,平凸,凹凸透镜对 LED 单个像素显示过程中相邻透镜进行光线追迹的仿真结果图。LED 像素点的发散角为固有属性,在透镜的大小和焦距一定的情况下,像素点散射到每个透镜上的光线相同,即临近透镜分布的串扰光线数量相同。

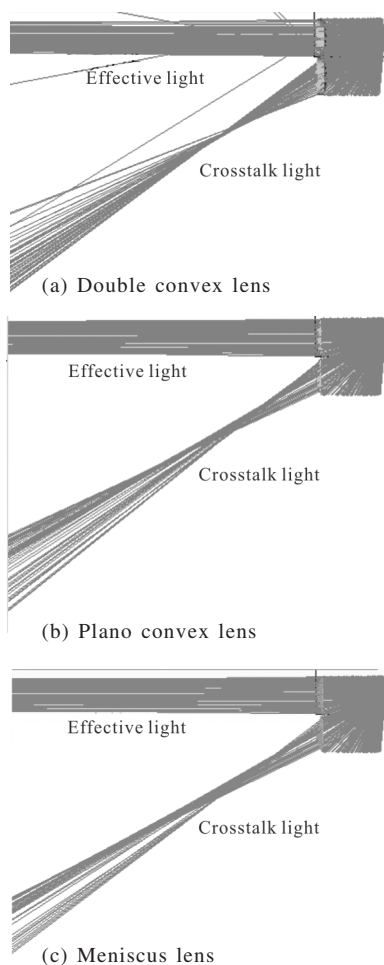


图 4 单像素相邻透镜仿真

Fig.4 Single-pixel adjacent lens simulation

由图 4 的比较可知,通过凹凸透镜后的有效光线较其他两种形状的透镜在均匀性,平行性上更加完美,且没有多余的杂散光,光线更加汇聚准直。

表 2 记录了不同形状透镜参数的对比,包括三种透镜的球差,透光率和串扰范围。结合图 4 对不同形状透镜分析比较:凹凸透镜在三种形状透镜中对无限远物点成像球差最小,单个像素点入射光线的

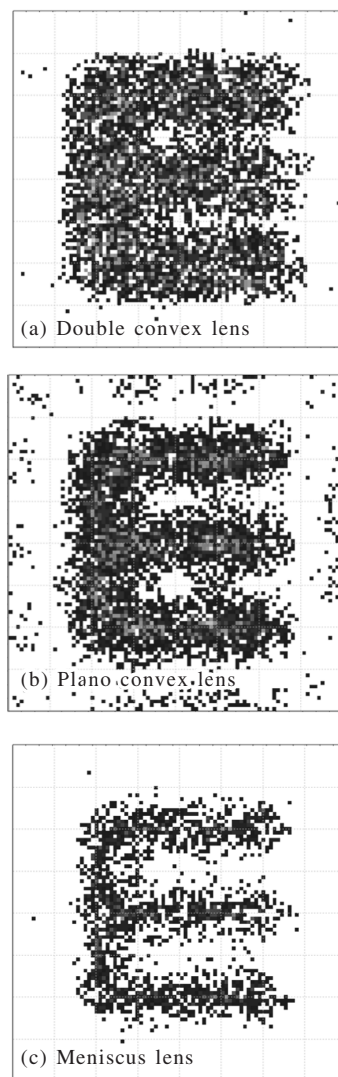
透光率最高,同时通过透镜后的串扰光线分布的范围最小,只有 12.18°,且串扰光线分布的角度较其余两种透镜偏移大,在成像距离远的情况下,对成像效果的影响更小。

表 2 不同透镜参数比较

Tab.2 Comparison of different lens parameters

Shape	Spherical aberration /mm	Transmittance	Crosstalk range/(°)
Double convex lens	0.32	86.8%	21.06-36.87
Plano convex lens	0.25	90.6%	24.32-39.15
Meniscus lens	0.11	91.6%	25.41-37.59

图 5(a)~(d)分别为不同透镜对字母模型光线追迹的仿真结果图与原字母模型图,仿真过程中,再现记录面设置为全吸收。图中不同颜色的光点代表光通量不同。



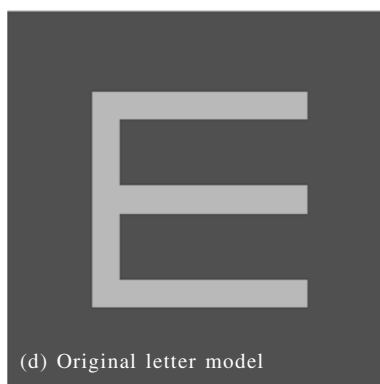


图 5 仿真结果示意图

Fig.5 Simulation result diagram

对图 5 的仿真结果分析:双凸透镜再现图形基本有字母“E”的轮廓,光线在正确的区域内分布杂散,且再现记录面上光点的光通量相差较大。平凸透镜再现图形字母“E”轮廓较清晰,光线在整个记录面上的杂散光最多,在正确区域的光通量分布依旧不均匀。凹凸透镜再现图形与原字母模型基本一致,整个记录面上的杂散光很少,且在字母模型的区域内,光通量分布较均匀,与原字母模型比例一致。

在聚焦模式( $g=f$ )下,集成成像的显示过程为深度信息优先显示,再现像的分辨率取决于再现像光斑  $S_{max}$  的大小,在使用凹凸透镜进行成像时,每一个像素点经过透镜后均为直径大小的平行光,分辨率为:

$$R = \frac{1}{S_{max}} = \frac{1}{\phi} \quad (7)$$

式中: $\phi$  为透镜的直径大小,将分辨率定义为 1 in (1 in=2.54 cm)内像素的个数,则文中使用凹凸透镜集成成像再现像的分辨率为  $R=2.54$  ppi。

使用凹凸透镜集成成像场景再现的深度:

$$DOF = 2 \times \frac{g}{\phi} \times P \quad (8)$$

式中: $g$  为透镜与 LED 大屏幕的距离; $P$  为透镜阵列中透镜的间隙,则场景再现的深度:  $DOF=2g=2f=30$  mm。

集成成像再现场景的再现深度取决于透镜的焦距,在透镜前表面半径一定的情况下,凹凸透镜的焦距大于普通单球面透镜,可以进一步提高场景的再现深度。

仿真结果表明:凹凸透镜的使用可以明显的降

低单球面透镜的球差,虽然不能完全的消除球差,但是球差的大小在可控范围内,不影响整体的成像效果,克服了 LED 集成成像大发散角引起的重构图像光线发散现象,有效的减少 LED 大屏幕像素点发散角大导致的相邻透镜间像素串扰现象。

使用 TracePro 对三种不同形状的透镜仿真并比较,分析对成像效果的影响。可以得出以下结论,凹凸透镜更适用于基于 LED 的集成成像系统,有效的提高集成成像的再现效果。

## 4 结 论

文中分析了不同形状透镜及其球差对集成成像的成像过程的影响,根据透镜特性设计获得一种凹凸透镜结构,分别对 LED 大屏幕的单个像素点相邻透镜和字母模型“E”进行仿真,对所有的仿真结果分析总结:球差的减小有助于透镜单元焦平面的确定,该凹凸透镜可以减小透镜的球差。同时,凹凸透镜相比于普通透镜的透光率更高,在屏幕参数一定的情况下,可以有效的降低像素发散角大引起的相邻透镜串扰的现象,使再现场景更加符合观看需求。单个透镜相比于其它复合透镜,对制造工艺相对较低,更加方便安装,对 LED 集成成像的大范围推广有着重要的意义。

## 参 考 文 献:

- [1] Piao Yan, Wang Yu. Integrated Stereo Imaging Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.(in Chinese)  
朴燕,王宇.集成立体成像技术[M].北京:电子工业出版社,2015.
- [2] Zhang Lei. Research on non-screen projection integrated imaging 3D display system [D]. Tianjin: Nankai University, 2013. (in Chinese)  
张雷.无屏投影集成成像三维显示系统的研究[D].天津:南开大学,2013.
- [3] Zhao Min, Xiong Zhaolong, Xing Yan, et al. Real-time integrated imaging pickup system based on binocular stereo camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1103007. (in Chinese)  
赵敏,熊召龙,邢妍,等.采用双目立体相机的实时集成成像拍摄系统[J].红外与激光工程,2017,46(11):1103007.

- [4] Wang Qionghua, Tang Song, Luo Chenggao, et al. Integrated imaging 3D display based on high refractive index filling layer and orthogonal polarizer array [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, 47(4): 132–135. (in Chinese)  
王琼华, 唐松, 罗成高, 等. 基于高折射率填充层和正交偏振片阵列的集成成像 3D 显示器 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(4): 132–135.
- [5] Kim H, Hahn J, Lee B. The use of a negative index planoconcave lens array for wide-viewing angle integral imaging[J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 21865–21880.
- [6] Peng Yuyan, Zhou Xiongtu, Zhang Yong'ai, et al. Design and simulation of surface microlens arrays for integrated imaging 3D display[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(3): 149–154. (in Chinese)  
彭玉颜, 周雄图, 张永爱, 等. 用于集成成像 3D 显示的曲面微透镜阵列设计与仿真 [J]. 光子学报, 2016, 45(3): 149–154.
- [7] Pang K, Song L, Fang F, et al. An imaging system with a large depth of field based on an overlapped micro-lens array [J]. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2016, 65(1):471–474.
- [8] Zhou Xiongtu, Chen En'guo, Yao Jianmin, et al. Design and simulation of pinhole/lens combination array for integrated imaging[J]. *Liquid Crystals & Display*, 2013, 28(6): 855–859. (in Chinese)  
周雄图, 陈恩果, 姚剑敏, 等. 用于集成成像的针孔/微透镜组合阵列设计与仿真 [J]. 液晶与显示, 2013, 28(6): 855–859.
- [9] Zhao Xuewei, Wang Yaoyao, Song Lipei, et al. Imaging of underwater targets based on computational integrated imaging [J]. *Journal of Chinese Lasers*, 2018, 45(1): 0109001. (in Chinese)  
赵雪微, 王尧尧, 宋丽培, 等. 基于计算集成成像的水下目标成像[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0109001.
- [10] Dong Jichang. *Optical Basics* [M]. Nanning: Guangxi People's Publishing House, 1982. (in Chinese)  
董继昌. 光学基础[M]. 南宁: 广西人民出版社, 1982.