doi:10.3788/gzxb20144304.0422003

基于双层微透镜阵列的移动视差式立体显示屏

芮健^{1,2},尹韶云²,邓启凌¹,高洪涛¹,孙秀辉²,余金清^{1,2},杜春雷²

(1中国科学院光电技术研究所 微纳加工实验室,成都 610209)

(2 中国科学院重庆绿色智能技术研究院 微纳制造与系统集成中心,重庆 401122)

摘 要:受限于微透镜的数值孔径和像差问题,目前移动视差式立体显示屏存在多视场空间、视场区之间存在视场跳变、主视场空间角度小、显示效果模糊等问题.本文基于离散采样思想,分析了移动视差型三维显示系统的工作机理,结合加工工艺,设计了复合曲面反射层的双层微透镜阵列屏.仿真结果表明:所设计显示屏的视场观看空间角可提升到 60°,相对于传统的三维显示屏,双层微结构显示屏可有效提高视场角和显示性能.

关键词:立体显示;移动视差;离散采样;多层微透镜;曲面反射面;消像差

中图分类号:TN27

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)04-0422003-4

Design of Motion Parallax Stereoscopic Display System Based on Bilayer Microlens Array

GOU Jian^{1,2}, YIN Shao-yun², DENG Qi-ling¹, GAO Hong-tao¹, SUN Xiu-hui², YU Jin-qing^{1,2}, DU Chun-lei²

(1 The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)
(2 Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences,

Chongqing 401122, China)

Abstract: Motion parallax stereoscopic display exists the problems of multi-viewing field, sudden jumps between subzones, narrow main watching field, blurring etc, because of its low NA and aberration. In this paper, the idea of discrete sampling was applied to analysis the motion parallax stereoscopic display system. Based on the analysis and considering the manufacture procedure, a double micro-lens array screen combined with curve reflection surface was proposed. The simulation results show that this design makes improvement on the 3D display performance and viewing angle achieves almost 60 degrees. This proposal is of great significance to promote the practical application of the three-dimensional system.

Key words: Stereoscopic display; Motion parallax; discrete-sampling; Multilayer microlens array; Curve diffuser; Aberration correction

OCIS Codes: 120. 2040; 080. 3620; 200. 4740; 220. 3620

0 引言

随着现代科技的发展和当今丰富数据的显示需求,立体显示已成为显示技术发展的必然趋势.其在计算机设计、结构分析、广告、娱乐显示、现实虚拟及国防方面都具有巨大的应用潜力和优势.立体显示系统以双目视差型为代表,逐渐发展成熟并为广大电影院所

采用,但由于双目视差型系统只是在原有二维图像信息的基础上除双眼视差信息外并不能带来其它方面的 三维信息,因此给观看者带来严重视力疲劳和不适.

全息三维显示因其能很好地还原物光场而呈现出完整的三维信息,但即使在使用光致折变材料情况下^[1],与大面积真彩色动态显示还有较大差距^[2].体显示系统能正确地呈现像的深度信息,但由于体像素间

基金项目:重庆市科技计划项目(No. cstc2012ggc90003)和国家自然基金项目(Nos. 11174281, 61275061)资助

第一作者:荷健(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为三维显示技术. Email:janegouu@gmail.com

通讯作者:尹韶云(1981一),男,副研究员,博士,要研究方向为微纳光学与自由曲面光学. Email:ysy@cigit.ac.cn

导 师:杜春雷(1962-),女,研究员,博士,主要研究方向为微纳光学. Email:cldu@cigit. ac. cn

收稿日期:2013-08-13;录用日期:2013-12-02

没有光遮挡,存在大面积显示难,显示物体透明的问题^[3-4].集成成像系统能很好地实现大面积真彩色,但由于系统严重依赖成像光学,在观看角度和成像质量上一直达不到要求^[5-6].基于微透镜屏结合投影仪阵列的移动视差式自由立体显示系统能很好地呈现出大面积真彩色动态立体图像,满足实际三维显示的需求,更接近于实际应用^[7-9].但传统单层透镜显示屏受限记录,透镜的性能,存在多观看区域、主观看视场角小、显示图像模糊等问题^[10-12].采用多层透镜的仿传统消像差光学系统^[13],由于使用透镜层数较多而加大了实际系统的制作和对准难度.本文将离散采样思想用于分析系统工作的基本原理,给出了理想透镜屏的参量.结合实际加工工艺,提出双层光学曲面微透镜屏的设计方案,并进行了仿真验证.

1 系统原理分析

用 $P(x,y,z,\theta,\varphi)$ 表示物光场, P 表示物体上位置 (x,y,z) 处沿 (θ,φ) 方 向 传播 的 光波, 也 可 表示 为 $P(x,y,z,x_1,y_1)$, 见图 1(a). 设摄像头数量为 $c\times d$, 分

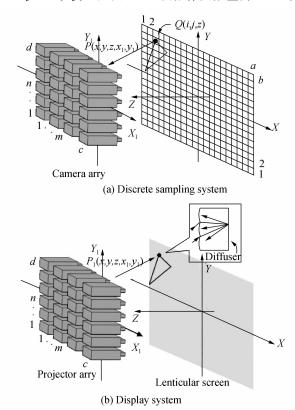


图 1 离散采集系统及对应的再现系统原理

Fig. 1 Discrete sampling system and corresponding reproduction system diagram

辨率为 $a \times b$,所有采样间隔为单位一,则对于某一波长 光离散采样后的物光场可表示为[14]

$$U_{\lambda}(x,y,z,x_{1},y_{1}) = \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} \sum_{m}^{c} \sum_{n}^{d} P_{\lambda}(i,j,z,m,n) \times \delta(x-i,y-j,x_{1}-m,y_{1}-n)$$
(1)

式中 $P_{\lambda}(i,j,z,m,n) = [A(i,j,z)/r]e^{ik}$,采集到的离散光场强度分布为

$$D_{\lambda}(x, y, z, x_{1}, y_{1}) = \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} \sum_{m}^{c} \sum_{n}^{d} \frac{A^{2}(i, j, z)}{r^{2}} \times \delta(x - i, y - j, x_{1} - m, y_{1} - n)$$
(2)

再现系统结构与采集系统相似,见图 1(b).图中 $c \times d$ 个摄像头阵列由 $c \times d$ 个投影仪代替,在物平面放以微透镜阵列屏幕[10].设每个投影仪具有和摄像头相同的图像分辨率,把对应位置摄像头采集到的完整图片投射到与采集物空间面积相同的屏上,则第 mn 个投影仪的第 ij 个像素发出的传播到 XY 面屏幕上的光可表示为

$$P_{1\lambda}(i,j,z,m,n) = A_1 e^{-ikr_1}$$
(3)
式中: $A_1 = t_1 \lceil A(i,j,z)/r \rceil, r_1 = sr/(s-z)$

s 为 XY 面和 X_1Y_1 面间的距离, t_1 是投影仪像素投射光振幅与对应摄像头像素单元采集到的光振幅之比. P_{1x} 经过微透镜屏上透镜的相位叠加作用后汇聚点光斑到漫反射层上,经过漫反射层的随机反射,一部分有效光线被反射回透镜,再经过透镜的相位叠加,出射透镜光线波矢与入射时方向相反,并存在一定的相移,振幅衰减系数为 t_2 ,在考虑透镜汇聚光斑无限小的条件下可表示为

$$P_{21} = t_2 A_1 e^{ik(r_1 + t)} (4)$$

传播到 X_1Y_1 面时为

$$P_{3\lambda} = P_{2\lambda} e^{ikr_1} \tag{5}$$

由式(3)~(5)可得在 X₁Y₁ 面获得的光场为

$$U_{3\lambda}(x,y,z,x_1,y_1) = \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} \sum_{m=1}^{c} \sum_{j=1}^{d} t_1 t_2 \frac{A(i,j,z)}{r} \cdot e^{ik(2r_1+l)} \times \delta(x-i,y-j,x_1-m,y_1-n)$$
(6)

光强分布为

$$D_{3\lambda}(x,y,z,x_1,y_1) = \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} \sum_{m=1}^{c} \sum_{j=1}^{d} t_1^2 t_2^2 \frac{A^2(i,j,z)}{r^2} \times \delta(x-i,y-j,x_1-m,y_1-n)$$
(7)

由式(2)、(7)可得: $D_{3\lambda} = t_1^2 t_2^2 D_{\lambda}$,即完成了对离散化后物光场的再现,还原了物体真实的三维光学信息.实际上当反射型屏应用于此系统时,由于观看空间和投影空间的重叠,系统的应用受到阻碍,实际考虑到系统成本和观看只需要水平移动视差的特点,可以采用单排投影仪阵列投影显示的方式.理论分析可知,三维显示的微透镜屏应满足 3 个条件:

- 1)对入射的近平行光线进行无相差的汇聚到后层的漫反射层上.
- 2)汇聚光斑尽可能的小,且不能存在光斑间的叠加.
- 3)漫反射的所有光线中只有进入原汇聚透镜通道的部分对再现起到贡献作用(其它通道的会形成旁瓣).

2 多层曲面微透镜屏设计

图 2 是所设计的水平视差型显示系统,系统只做 在水平方向上的光场离散采样,只产生水平方向的移 动自由三维视差.

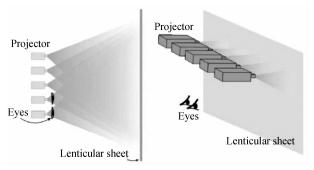


图 2 本文设计的三维系统俯视及侧视图 Fig. 2 The target system frame used for this proposed design

图 3 是传统微透镜屏结构,透镜的焦平面处于透镜板的后平面上,在后平面上涂以漫反射物质实现漫反射. 图 3(a)展示了漫反射层对透镜汇聚光斑反射的性质,其中只有反射回原汇聚透镜部分的光线 2 对光场的再现做出贡献,而光线 1 和 3 最终形成了观察旁级区域,这是需要避免的. 然而除非是加上阻挡光阑,否则这部分光线是不可消除的. 同时,每个通道的汇聚光斑必须限制在每个透镜通道对应的漫反射层中,通道间的光斑叠加会导致不可分离的串扰(如图 3(b)). 为抑制反射光线进入相邻通道,扩大主级的空间角度,透镜的 F 数要求尽量减小,但小 F 数的透镜会引入较大的微透镜矢高和透镜球差. 针对此问题,本文采用双层透镜分离曲率的思想,消去部分像差,使汇聚光斑变小,同时也降低了大矢高导致的加工难度.

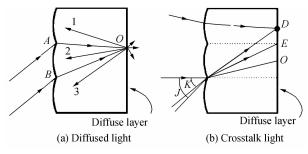


图 3 单层微透镜屏的工作性质

Fig. 3 The working principle of single layer microlens array screen

双凸透镜虽在一定程度上对球差进行了校正,但 其汇聚光斑还是偏大.实验中,在双凸透镜中间加入光 阑遮挡住透镜的边缘光线,可进一步降低球差,得到更 小的汇聚光斑.但双凸透镜结构引入了严重的场曲,使 得光线在匹兹伐尔像面上汇聚(图 4).为了更大化地 缩小汇聚光斑,在系统中采用球形漫反射层,如图 5. 球形曲面相较传统平面反射层具有更大的有效接收面 积,在汇聚光斑大小一定的情况下能承载更多的光斑数,即增大了信息容量,能容纳更高的采样率(投影仪个数).

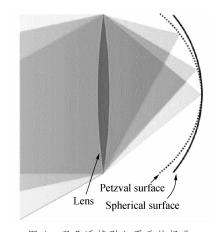


图 4 双凸透镜引入严重的场曲 Fig. 4 Biconvex lens lead to field curvature

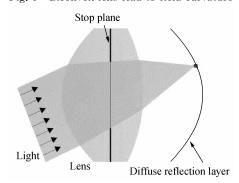
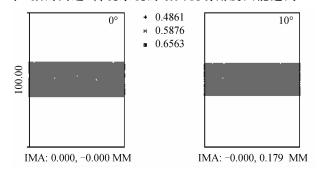


图 5 设计的复合曲面反射层的双层微透镜结构 Fig. 5 Proposed structure combined with curve diffuser

3 仿真结果及讨论

采用 ZEMAX 软件对图 5 所示结构进行了仿真. 单通道口径宽 1.0 mm,厚度 1.55 mm,光束采用三波段平行光束,入射角度分别为 0°、10°、20°、30°,漫反射面上的汇聚光斑情况如图 6(a) 所示,最大几何光斑宽度小于 30 μ m. 作为对照,在相同口径条件下对传统结构(如图 3)的性能进行了仿真,仿真入射光线分别为0°、5°、10°、15°,汇聚光斑的情况如图 6(b) 所示,最大光斑宽度超过 $60~\mu$ m. 从图 $6~\mu$ 可以明显地发现传统系统的汇聚光斑最大是双层透镜系统的两倍多,同时限于F数的问题,传统系统的最大视场角度只能达到 30°



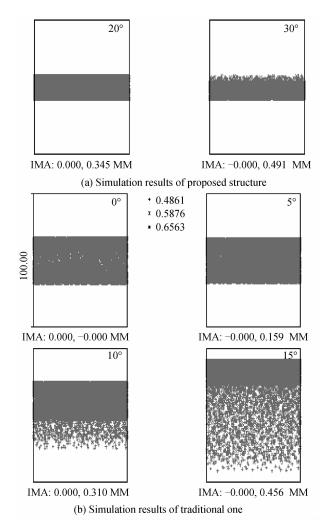


图 6 设计结构和传统结构的仿真结果(方框的长和 宽均为 100 μm)

Fig. 6 The simulation results of proposed and traditional structure (both width and length of the black box are 100 $\mu \rm m)$

左右,而双层透镜屏能提高到 60°,相较于传统透镜屏幕在成像质量和观看空间角度上都得到了两倍多的提升.

4 结论

通过理论分析提出了三维显示屏幕的设计要求,根据要求进而设计出复合凹形反射面的双层微透镜屏.对塑料热压成型加工工艺中的透镜系统进行了设计,系统透镜采用两块平凸透镜对准压合而成,光阑置于压合平面上,方便采用大面积的热压加工工艺生产.平面层的光阑可采用镀膜后利用透镜汇聚光线曝光的方法刻蚀加工,解决了刻蚀曝光困难的问题.漫反射层曲面设计成与双凸透镜的第一面相同,省去了此层热压模板的加工,减少了加工工序,降低了加工成本.仿真结果证实了所设计的双层屏结构对观看空间角和显

示画质提升的可行性. 此结构屏为大面积真彩色移动 视差式自由立体显示器的实用化提供了一种切实可行的方案.

参考文献

- [1] BLANCHE P A, BALUMIAN A, COORAKARANAM R, et al. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer[J]. Nature, 2010, 468: 80-83.
- [2] SMALLEY D E, SMITHWICK Q Y J, JR V M B, et al. Anisotropic leaky-mode modulator for holographic video displays[J]. Nature, 2013, 498: 313-317.
- [3] FAVALORA G E, NAPOLI J, HALL D M, et al. 100 Million-votex volumetric display [C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2002, 4712: 300-312.
- [4] LIN Yuan-fang, LIU Xiang-dong, LIU Xu, et al. The analysis of voxel attributes in three-dimensional volumetric display system based on the rotation of a two-dimensional display panel[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(2): 476-479.
 - 林远芳,刘向东,刘旭,等.基于二维旋转屏的体三维显示系统像素属性分析[J].光子学报,2004,**33**(2):476-479.
- [5] KIM Y, PARK J H, CHOI H, et al. Viewing angle enhanced integral imaging system using a curved lens array[J]. Optics Express, 2004, 12(3): 421-429.
- [6] 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.
- [7] LIU Xu, LI Hai-feng. Spatial three-dimensional display based on the light-field reconstruction [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900121. 刘旭,李海峰. 基于光场重构的空间三维显示技术[J]. 光学学

报,2011,31(9):0900121.

- [8] PENG Yi-fan, LI Hai-feng, LIU Xu, et al. A full-parallax compact three dimensional display system based on spliced view-field[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(9): 1406-1408.

 彭廷昭、李海峰、刘阳、等、基于知场推择的全观美二维显示
 - 彭祎帆,李海峰,刘旭,等. 基于视场拼接的全视差三维显示系统[J]. 光子学报,2011,40(9):1406-1408.
- [9] LI Shuai, LI Hai-feng, ZHENG Zhen-rong, et al. Full-parallax three-dimensional display using new directional diffuser[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(8): 081202.
- [10] MATUSIK W, PFISTER H. 3D TV: a scalable system for real-time acquisition, transmission, and autostereoscopic display of dynamic scenes[J]. Acm Siggraph, 2004, 23(3): 814-824
- [11] QI Lin, WANG Qiong-hua, LUO Jiang-yong, et al. Autostereoscopic 3D projection display based on two lenticular sheets[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(1): 011101.
- [12] SON J Y, SAVELJEV V V, KIM J S, et al. Viewing zones in three-dimensional imaging systems based on lenticular, parallax-barrier, and microlens-array plates [J]. Applied Optics, 2004, 43(26): 4985-4992.
- [13] KIM H, HAHN J, CHOI H J, et al. Numerical investigation on the viewing angle of a lenticular three-dimensional display with a triplet lens array[J]. Applied Optics, 2011, 50(11): 1534-1540.
- [14] 王仕璠. 信息光学理论与应用[M]. 2 版. 北京:北京邮电大学 出版社,2004:11.