

文章编号:1007-2780(2012)06-0759-05

应用微柱透镜的自由立体前投影屏幕设计

马建设,张波常,苏 萍,程雪岷*

(清华大学 深圳研究生院,广东 深圳 518055,E-mail:mjs888@126.com)

摘 要:介绍了应用微柱透镜阵列的自由立体前投影显示的原理。推导出确定自由立体前投影屏幕中微柱透镜参数的公式,详细给出了一种设计方法。根据此方法设计了一块采用微柱透镜阵列的自由立体前投影屏幕,在 Lighttools 中对采用此屏幕的投影系统进行仿真模拟,仿真结果显示有 5 个比较明显的视区,视区间隔比较连续。搭建屏幕和投影系统进行实验验证,实验结果与仿真结果一致,串扰度为 7.9%,图像重合度为 1.008,在观察面处立体效果显著。实验结果验证了应用微柱透镜阵列的自由立体前投影显示的可行性。与背投影的自由立体显示技术相比,自由立体前投影显示具有装调快、占用空间小、投影距离灵活可调的优点,将是未来大屏幕自由立体显示的一个重要发展方向。

关 键 词:微柱透镜;自由立体显示;前投影

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/YJYXS20122706.0759

Autostereoscopic Front Projection System Based on Micro-Lenticular Lens Array

MA Jian-she, ZHANG Bo-chang, SU Ping, CHENG Xue-min*

(Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China, E-mail:mjs888@126.com)

Abstract: The principle of autostereoscopic front projection display based on micro-lenticular lens array is introduced. Formulas to determine the parameters of the micro-lenticular lens are deduced and a method to design the micro-lenticular lens array is proposed. A piece of stereoscopic projection screen is designed based on the method and the whole projection system with the screen is emulated in Lighttools. The simulation result shows that there are five definite viewing zones. The distance of the adjacent viewing zone is very close to each other. The projection system is built up and the observe plane is at the vertical plane with the projectors. The crosstalk is 7.9% and overlap ratio is 1.008. The final result is consistent with the simulation result and the autostereoscopic display effect is good. The experimental results show that the autostereoscopic front projection display based on micro-lenticular lens is feasible. Compared to autostereoscopic rear projection, the autostereoscopic front projection display has the advantages of simple implementing, compact structure and adjustable projection distance, therefore it will be an important developing direction of large screen 3D display in the future.

Key words: micro-lenticular lens; autostereoscopic display; front projection

收稿日期:2012-07-15; 修订日期:2012-09-03
基金项目:中国博士后科学基金(No. 041800015); 粤港关键领域重点突破项目(No. 2009205128)
作者简介:马建设(1969—),男,河南永城人,博士后,副研究员,主要从事交互投影及成像技术方面的研究。
* 通讯联系人, E-mail:chengxm@sz.tsinghua.edu.cn

1 引 言

人的双眼在观看某个空间对象时,由于双眼观看角度的差异,空间物体对每只眼睛的成像略有不同,即所谓双目视差^[1]。双目视差经过神经网络的融合处理后便在人脑中形成立体感。立体显示技术就是利用一定的物理装置使这种具有不同视差信息的图像分别对应地进入人的左右眼,使人们产生像观察真实物体那样的立体感^[2-6]。

根据立体显示形式不同,主要有平板立体显示和投影立体显示。投影显示相比平板显示,具有图像尺寸大,临场感强,占用空间小,移动灵活方便等优点。目前,投影立体显示基本上还需要佩戴立体眼镜。近年来,也有研究者致力于自由立体投影显示的研究^[7-11]。文献[10]中,作者提出了一种基于双狭缝光栅的自由立体投影机系统,整机分辨率不降低,立体观看范围大。文献[11]中,作者提出了一种基于双柱面透镜阵列结构的自由立体投影系统,亮度损失小。两种投影方法都取得较好的立体显示效果。

在双狭缝光栅的自由立体背投影系统中,投影图像与狭缝光栅需要达到像素级误差范围的精确匹配。由于光栅的遮挡,每只眼睛观察亮度会比投影机亮度降低一半以上,单眼分辨率也会随投影机数目增加而成比例下降,背投影比前投影多占用一倍的空间。双柱面投影系统中两柱面也要精确对准,占用空间大,亮度有待进一步提高,而且文献[11]中并没有给出柱透镜板的设计过程。其中多台投影机放置于不同行上,相邻投影机间在垂直方向上有一定的位置偏移,导致垂直分辨率有所损失。本文作者研究了一种基于微柱透镜阵列的自由立体前投影显示系统,在文中详细给出微柱透镜的设计方法,并进行了仿真模拟和实验验证。该系统可用两台或多台投影机在屏幕前方投射图像,占用空间小。只用一块柱透镜板折射光线,装配简单、亮度损失少、没有分辨率的损失。

2 自由立体前投影显示原理

双柱面结构的自由立体背投影屏幕结构示意图 1 所示,包括正面光栅、漫射层和背面光栅,两光栅关于中间漫射层的结构和位置都对称。投影机在屏幕后投射的画面在正面光栅上被分成若

干图像条,图像条经光栅折射成像到对应的散射面上,再经过背面光栅的分光成像,在屏幕前面即可观察到具有立体效果的图像。观察区域和投影机关于漫射层对称。

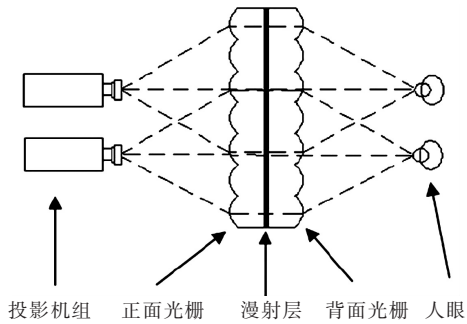


图 1 大屏幕自由立体背投影系统结构简图
Fig. 1 Schematic of a large-screen autostereoscopic rear projection system

上述屏幕系统中投影机位于屏幕后面,占用空间较大;双光栅在漫射层表面上需要达到水平方向的像素级对准;屏幕由两块光栅板组成,重量和成本都较高。

本文对基于微柱透镜阵列的自由立体前投影显示系统进行了系统的理论和实验研究。其中投影屏幕包括一块微柱透镜板和一块高斯型金属漫反射幕,漫反射幕紧贴柱透镜板的后焦平面。微柱透镜自由立体前投影显示的原理示意如图 2 所示,投影仪投出带有水平视差的图像,微柱透镜光栅板用于将投影图像分成若干图像条,图像条在垂直方向上发散,以便有一个较大的垂直观看视区,而在水平方向聚焦成像到金属漫反射幕上。投影图像经过金属漫反射幕的高斯型漫射作用,相当于一个物,一部分光线在水平方向原路返回出射为平行光束,在屏幕前方中央与投影仪同一

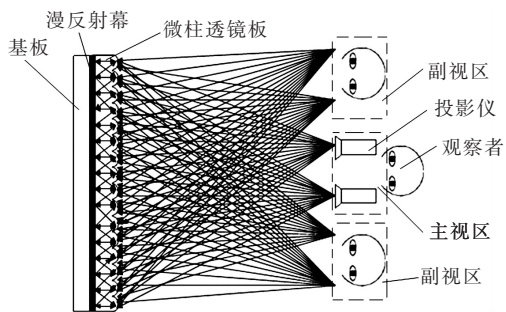


图 2 微柱透镜自由立体前投影显示的原理示意图
Fig. 2 Schematic of an autostereoscopic front projection display based on micro-lenticular lens

垂直平面处形成主视区,另一部分光经过相邻的透镜出射为平行光束(由于投影距离远大于柱透镜节距,这里近似为平行光线),在主视区两侧形成副视区。漫射后的光路分布是漫射前的逆过程。左右投影仪投射的光线分别进入观察者的左右眼,观察者在屏幕前方投影仪处及两侧相应区域观察可看到具有立体效果的图像。

3 投影屏幕的设计

3.1 柱透镜板参数的确定

微柱透镜板的基本参数有柱透镜光栅板的线数(lpi)、观察距离 D 、观察视角范围 φ 、栅距 P 、厚度 d 和折射率 n 等。

其中线数是指每英寸宽度内的微柱透镜个数,栅距 P 为线数的倒数。栅距 P 越大,加工越简单。但为了使观看过程中不至看到微柱透镜的微观结构而影响感受立体效果,栅距又要尽可能小。栅距 P 要尽量小于式(1)中确定的距离。其中 ϵ 是人眼视角鉴别率,在眼睛放松状态下, $\epsilon \approx 1'$ 。

$$P = D \tan \epsilon \tag{1}$$

观察距离 D 依投影距离而定,而投影距离灵活可调,故观察距离 D 也灵活可变。能感受到立体效果的视角范围 φ 由栅距 P 、厚度 d 、折射率 n 和投影机台数确定。如图 3 所示,根据折射定律可得到视角范围 φ 和视区间距 ΔS 与上述参数的关系。

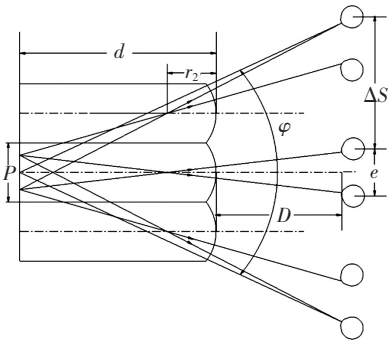


图 3 观察视角范围和视区间距的确定

Fig. 3 Viewing range and the distance between two adjacent viewing zones

对两台投影机组成的立体投影系统,能感受到立体效果的视角范围 φ 和视区间距 ΔS 分别由下面两式确定。

$$\varphi = 2 \arctan \left[\frac{\frac{(N-1)P}{2} + \frac{(d-r_2)e}{2(D+r_2)}}{d-r_2} \right] \tag{2}$$

$$- \frac{(d-r_2)e}{2(D+r_2)(D+d)}$$

其中,由于柱透镜全反射的限制,

$$N \leq 2 \text{floor} \left(\frac{\tan(\arcsin(1/n)d)}{P} \right) + 1,$$

floor(x)表示对 x 向下取整。

$$\Delta S = \frac{P(d+D)}{d-r_2} \tag{3}$$

式(2)中 N 为一束光线经漫反射返回后对此漫射光起折射作用的柱透镜的个数,随着光束离轴量变大,光束两侧的透镜对此光束的折射作用减弱,故一般取 N 为 3 或 5。从式(2)可以看出,视角范围 φ 与栅距 P 及厚度 d 相关,栅距 P 越大,厚度 d 越小,则视角范围越大。当栅距 P 及厚度 d 一定时,折射率 n 越高,视角范围 φ 越大。图 3 中是双台投影仪的视角范围,增加投影仪的台数也可以有效增加视角范围。式(3)中 ΔS 是相邻视区之间的间距,当视区数 N 一定时,栅距 P 越小、厚度 d 越大,则视区之间的间距越小,视区越连续。根据实际观察时对视角范围、观察距离和视区间距的要求确定合理的柱透镜板材料和厚度。

3.2 微柱透镜元的设计

微柱透镜结构图如图 4 所示,C 点为微柱透镜元的节点,它到后焦平面的距离为 q ,微柱透镜元的左侧曲率半径为 r_1 ,右侧曲率半径为 r_2 ,栅距为 P ,厚度为 d ,物方焦距为 f ,折射率为 n 。取坐标系 Oy ,原点 O 在光轴 OO' 上。

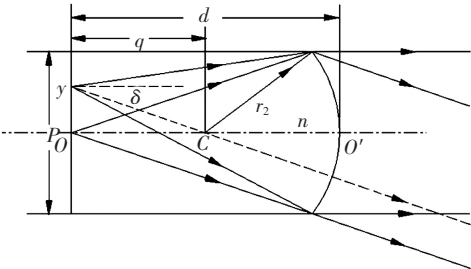


图 4 微柱透镜结构图

Fig. 4 Schematic of one of the micro-lenticular lens

微柱透镜板的后平面为整个柱透镜板的焦平面,微柱透镜左侧的曲率半径 $r_1 \rightarrow \infty$,根据几何光学折射关系可以求解出柱透镜板的厚度、曲率

半径和折射率之间的关系：

$$r_2 = \frac{1-n}{n}d$$

(4)

在设计微柱透镜板时,首先根据观察距离和范围等确定合适的板材材料和厚度,再由式(4)确定柱透镜的曲率半径。

文中符号参量的正负是根据几何光学符号规则规定的,下同^[12]。

对于 $y \neq 0$ 的任一点,经微柱透镜元可形成一束极细的平行光束并传输相应信息,传输方向角：

$$\delta = \arctan \frac{ny}{d}$$

(5)

式(5)表明,光束的传输方向角 δ 与 d 、 n 及 y 点位置相关。在前投影系统中,柱透镜板折射入射图像条并将其顺序聚焦到后焦平面上,经过漫反射后,微柱透镜元分别折射两视差图像使其成像于人的双眼而产生立体视觉感。

选定光栅板的材料和厚度后,便可根据式(4)确定柱透镜的曲率半径。根据式(5)确定光栅板后相应各点平行光束的传输方向,求得最佳立体感受效果的视区分布。

3.3 漫射屏幕的确定

立体观察范围集中在正对屏幕中央及两侧附近的区域,在屏幕两侧靠近边缘的区域立体效果十分微弱,途径此处的光线也不能被观察者所利用。为了使观察者在屏幕前方看到高亮度的立体图像,同时增加光能利用率,需要选择具有一定增益功能的金属屏幕。在此实验中,最好选用增益较高的高斯型漫反射金属屏幕。

在高斯型漫反射金属屏幕中,入射光线依据高斯公式散射,如式(6)所示：

$$P(\theta) = -\frac{1}{2}P_0\left(\frac{\theta}{\sigma}\right)$$

(6)

其中, $P(\theta)$ 为在与轴向夹角为 θ 的方向上的强度或辐射, P_0 为轴向的强度或辐射, σ 为高斯分布的标准偏差,单位为度。

3.4 立体性能评价指标

立体显示除具有普通二维显示所要求的亮度、对比度、色彩均匀性指标外,还有其特有的评价指标,在验证过程中主要利用立体串扰度和重合度进行设计屏幕效果的评价^[13]。

以左眼视差图为例,立体串扰度 χ_L 为右眼观

察此图像亮度和左眼图像亮度之比例。串扰度越小,立体效果越好。

$$\chi_L = \frac{E_R - E_E}{E_L - E_E}$$

(7)

E_R 是左视差图像在右眼观察区域的亮度, E_L 是左视差图像在左眼观察区域的亮度, E_E 是环境光亮度。

文献[14]提到一种重影度的定义,而投影系统中像素排列与文献[14]中不同,在此将定义图像重合度为左眼看到的左右眼图像总宽(高)度与左眼图像宽(高)度的比值。重合度越接近于 1,表明投影仪投射的视差图像重合得越好。

$$\gamma = \frac{W(H)_{LR}}{W(H)_L}$$

(8)

$W(H)_{LR}$ 是左右眼图像总宽(高)度, $W(H)_L$ 是左眼图像宽(高)度。

4 建模仿真与实验验证

4.1 建模仿真

根据上述设计公式,计算出确定微柱透镜结构的各个参数。设计结果如表 1 所示,采用 PMMA

表 1 屏幕设计参数及结果

Table 1 Screen parameters and results

参数	数值
材料	PMMA
n	1.491 8
r_2/mm	1.648
d/mm	5
P/mm	1

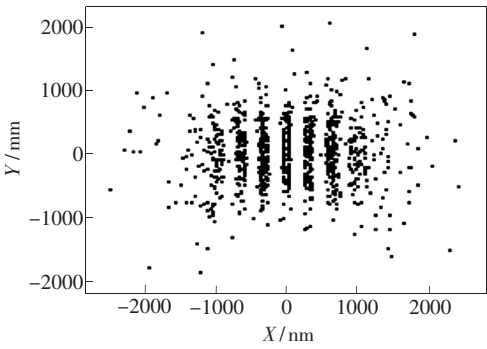


图 5 采用设计微柱透镜板的自由立体前投影系统的视区仿真结果

Fig. 5 Simulated viewing zones of the autostereoscopic front projection system based on the designed micro-lenticular lens

材料,厚度为 5 mm 的柱透镜板,第二面曲率半径为 1.648 mm。设定投影机间距为 65 mm,投影机与屏幕距离为 1 000 mm,将上述确定的柱透镜参数在 Lighttools 中仿真,柱透镜板后焦平面设置为高斯型漫反射,模拟结果如图 5 所示,图中 x 和 y 轴代表接收面上水平和垂直方向的坐标,每组黑色条纹为一个观察视区,每组里面包括两条黑纹,分别对应左右眼的图像。图中有 5 个比较明显的观察视区,视区间的距离大约为 310 mm,比较连续。

4.2 实验验证

从软件仿真情况来看,本设计的视区分布比较理想。作者搭建了实验系统,进行自由立体前投影系统的原理验证。

实验中将增益为 3.0 的金属漫反射屏幕紧贴柱透镜板的后焦平面上,两台投影机尺寸为 130 mm×115 mm×45 mm,分辨率为 800×600,放在屏幕前 1 000 mm 处,两者相距 65 mm,即人眼的瞳距,分别同步播放左右眼视差图像。实验平台如图 6 所示,实验中最佳观察距离在屏幕前方 1 000 mm 处,经过投影机镜头与立体屏幕平行的垂直平面上。在此平面处放置一块接收屏,如图 7 所示,实验中接收屏幕较小,只接收到 3 组垂直亮线,实际有 5 组明显的亮线,每组亮线由两条平行的亮线组成,左右亮线分别对应左右眼,称为一个观察视区。在主视区和两副视区处观看屏幕画面,能感受到较强的立体效果。经测量,其中每组亮线的两条亮线距离为 65 mm,满足人眼瞳距要求,两组亮线间的距离为 310 mm 左右,即相邻观察视区为 310 mm,由上文的分析可知,通过增加透镜板厚度和减小柱镜的节距可以缩小视区

表 2 实验验证结果

Table 2 Experimental results

参数	数值
图像大小/cm	61
视点数	5
观看距离/mm	1 000
视角/(°)	64
视区间距/mm	310
串扰度	7.9%
重合度	1.008

间距,使视区更连续。为了更具一般性,投射一副白色图片,测量左右眼观察区域的亮度,图 8 为用相机拍摄的左眼投影仪投射的白色图像在左右眼观看位置的图片,左图亮度明显比右图高,说明每台投影机投射的图像经过屏幕作用后只能成像到对应的区域,被人眼所接收。投影图像的最小串扰度不到 8%,图像重合度为 1.008,基本上重合。

前投影系统中只需要一块微柱透镜板,而背投影系统中需要双狭缝光栅或双柱面透镜板,狭缝光栅或双柱面透镜板之间要达到像素级精确匹配;另一方面,前投影系统中的微柱透镜板只起到折光和聚焦的作用,只要保证投影机间距为 65 mm,在任何投影距离下的投影图像都可以显示三维效果,观察距离随之灵活可变。而双狭缝光



图 6 自由立体前投影系统实物图

Fig. 6 Implementation of the autostereoscopic front projection system

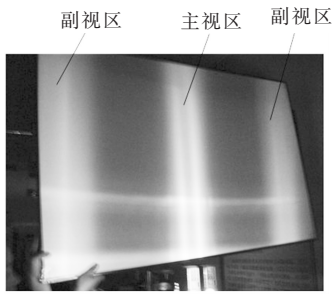


图 7 自由立体前投影系统的视区分布图

Fig. 7 Viewing zones distribution of the autostereoscopic front projection system

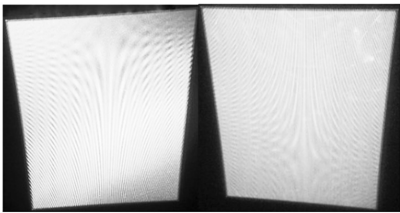


图 8 左右眼位置拍摄的左投影仪白色图片

Fig. 8 White picture from left projector shot at left eye and right eye viewing zone

栅的背投影系统中要更改观察距离,需要调整第二光栅与屏幕的距离,并且狭缝需要与投影图像在宽度方向上达到像素级匹配,因而每个特定的屏幕需要一个固定的投影距离。综上所述,相比自由立体背投影系统,前投影系统的装配难度大大降低,增强了系统的实用性。

5 结 论

系统研究了采用微柱透镜屏幕的自由立体前投影系统及屏幕设计。完善了自由立体前投影系统中微柱透镜板的设计方法,并据此设计了一块用于自由立体前投影系统的微柱透镜板。模拟结果表明,基于该柱镜板做成的自由立体前投影屏

幕有 5 个比较明显的视区,视区间的距离为 310 mm 左右,通过增加透镜板厚度和减小柱镜的节距可以缩小视区间距,以使视区连续。对基于微柱透镜板的自由立体前投影系统进行了实验验证,实验结果与仿真分析吻合,立体效果显著。本文的研究结果表明,应用微柱透镜阵列实现自由立体前投影显示是可行的,其立体串扰度和重合度等立体性能均能达到较高的要求。相比背投影自由立体显示技术,前投影的自由立体显示技术占用空间小,结构简化,亮度损失少,装配过程简单,因而是未来大屏幕自由立体显示的一个重要发展方向。

参 考 文 献:

- [1] 王冬翠,王慧南. 关于立体视觉与真三维立体显示技术 [J]. 现代显示, 2009, (104): 16-29.
- [2] Sexton I, Surman P. Stereoscopic and autostereoscopic display systems [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1999, 16:85-99.
- [3] Okoshi T. Optimum design and depth resolution of lens-sheet and projection-type three-dimensional displays [J]. *Appl. Opt.*, 1971, 10(10):2284-2291.
- [4] Sang X Z, Fan F C, Jiang C C, *et al.* Demonstration of a large-size real-time full-color three-dimensional display [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(24):3803-3805.
- [5] 王元庆. 基于 LCD 的自由立体显示技术 [J]. 液晶与显示, 2003, 18(2):116-120.
- [6] 郑华东,于瀛洁,程维明. 三维立体显示技术研究新进展 [J]. 光学技术, 2008, 34(3):426-434.
- [7] Fei J Y, Zhang Z J, Bi J Y. The multiview projector 3D display system [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2008, 31(1):280-284.
- [8] Liao H, Iwahara M, Kolke T, *et al.* Scalable high-resolution integralvideography autostereoscopic display with a seamless multi-projection system [J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(3):305-315.
- [9] Borner R, Duckstein B, Machui O, *et al.* A family of single-user autostereoscopic displays [J]. *IEEE Transactions On Circuits And Systems For Video Techology*, 2000, 10(2):234-243.
- [10] Tao Y H, Wang Q H, Gu J, *et al.* Autostereoscopic three-dimensional projector based on two parallax barriers [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(20):3220-3222.
- [11] Matusik W, Pfister H. 3DTV: A scalable system for real-time acquisition, transmission, and autostereoscopic display of dynamic scenes [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG) SIGGRAPH*, 2004, 23(3): 814-824.
- [12] 郁道银,谈恒英. 工程光学 [M]. 北京:机械工业出版社, 2008: 7-8.
- [13] 邹阳,邓善熙,梁发云. 一种自动立体显示器立体对比度和视区检测方法 [J]. 中国图象图形学报, 2006 (11): 570-574.
- [14] 文江涛,胡跃辉,吕国强,等. 光栅式立体显示器重影问题的研究 [J]. 液晶与显示, 2007, 22(3): 310-314.