

文章编号:1004-4213(2011)09-1405-4

# 基于视场拼接的全视差三维显示系统

彭祎帆,李海峰,刘旭,李帅

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室,杭州 310027)

**摘 要:**提出了一种新的基于视场拼接的全视差三维显示方法及图像生成方案.系统核心部分由一个微投影机阵列、一个反射光路和一个散射屏组构成,图像生成方案采用基于 OpenGL 的算法实现.为了验证所提出的基于视场拼接理论的正确性,利用液晶显示器、菲涅耳镜组、定向散射屏和背投式反射光路搭建了实验样机.该装置可以在更紧凑的系统结构下显示包括横向视差和纵向视差在内的三维图像,并且通过图像生成算法的配合实现了动态三维显示效果.

**关键词:**信息光学;三维显示;全视差;拼接算法;集成化

中图分类号:TN27

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114009.1405

## 0 引言

三维显示技术一般可分为全息三维显示和非全息三维显示两种,实现非全息三维显示技术一般又有 3 种途径:体视法(Stereoscopic)、集成成像法(Integral photography)和体素法(3D pixels)<sup>[1-4]</sup>.南加州大学 2007 年开发出了一套 360°三维显示系统,采用一台高速投影机加上旋转屏幕技术实现三维全景立体显示<sup>[5]</sup>. Hiroshi N. 和 Yasuhiro T. 所在研究小组随后也提出了一种以很小角度间隔显示 256 个方向图像的非常自然逼真的三维显示设备<sup>[6-8]</sup>.但现有大部分全景三维显示系统需要高速旋转设备,只提供横向视差,孔径光阑小,图像效果不佳,系统所占空间大,存在较大可改进空间.而传统的集成三维显示系统最佳成像区域几乎在屏幕前很小的一个区域内,显示亮度问题也没有得到很好解决.从商业层面来说,目前各主流厂商的基于自由立体显示技术的立体显示电视也已经推向市场,但可视角度、舒适度、集成度等问题仍需进一步解决.

浙江大学在 2009 年国际信息显示学会年会上提出了一种横向视场拼接的体视三维显示方法<sup>[9-10]</sup>.本文在此基础上深入研究,提出了一种新型基于视场拼接的全视差三维显示方法及装置并对其进行了集成优化.该系统无转动装置、机构设计简单,实现了横向和纵向的全视差显示效果,并且具有较大的孔径光阑,可以显示较为明亮的三维图像.

## 1 显示系统原理

拼接视场的方法源于对集成成像法的改进,可

以显示超多视点并且视角间隔极小的三维图像.该全视差三维显示的硬件核心装置包括投影机阵列与定向散射屏.所述的投影机阵列可由显示屏阵列与透镜阵列构成,其中任一投影机都是由显示屏阵列中的一个显示屏与其正前方的一个透镜对应构成,定向散射屏由两组正交分布的柱面光栅构成.

为说明原理,假定  $m$  行  $n$  列的投影机  $P_{11}$ - $P_{mm}$  各自向定向散射屏上的同一位置投影图像,正交分布的柱面光栅栅线方向分别平行于  $x$  轴和  $y$  轴,由于定向散射屏的独特散射特性,在屏幕右侧对应形成  $V_{11}$ - $V_{mm}$  个视点,如图 1.

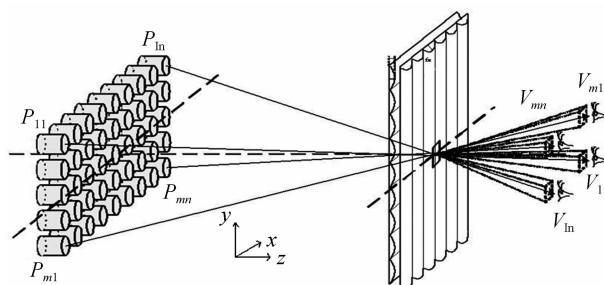


图 1 全视差三维显示方案实现说明

Fig. 1 Full-parallax three-dimensional display program

以散射屏上的一小块区域为例,在不同视点  $V_{11}$ - $V_{mm}$  可以观看到不同的图像.同理可推知,在右方观察区域内任意一个视点观察到的完整图像都是由每台投影机各自投影的一小块图像拼接形成,这样在不同视点就可以观察到三维物体对应视点的视图,各个视点的图像连续变化,从而可以给观看者提供横向视差和纵向视差,形成三维感知.

如图 2,横向间距为  $D$  的两台投影机  $P_a$ 、 $P_b$  分别向投影距离设置为  $L_p$  的柱面光栅屏投影,由此

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(No. 2009CB320803)资助

第一作者:彭祎帆(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为三维显示技术. Email: zjuhuayu@gmail.com

导师(通讯作者):李海峰(1965-),男,教授,博导,主要研究方向为显示技术、光学薄膜和光学设计. Email: lihaifeng@zju.edu.cn

收稿日期:2011-04-02;修回日期:2011-05-10

可推知系统所需的柱面光栅屏的散射特性. 相对于投影距离  $L_p$  及观察距离  $L_v$ , 不妨将投影机的出瞳和人眼瞳孔可近似看作一点, 若柱面光栅屏的散射角度为  $0$ , 则由于光线的直线传播在视点  $V$  处只能看到  $a, b$  两个点, 此时只要控制柱面光栅的散射角在合适的范围内, 理论上当柱面光栅屏定向散射角度  $\theta$  增加到与投影机角度间隔  $\delta$  相等,  $a, b$  两点会被

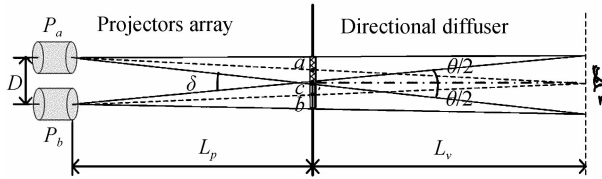


图2 投影关系与定向散射屏散射角度关系

扩展成两块, 那么观察者就可在光栅屏上观察到来自投影机  $P_a, P_b$  的两块图像恰好在  $c$  点处拼接到一起, 这样便可构成更宽幅的图像. 当系统参量设置  $L_p \gg D$  时, 边缘视场斜投影的关系式同样可近似用式(1)表示, 根据数学上三角关系可得

$$\frac{\delta}{2} \approx \arctan\left(\frac{D/2}{L_p}\right) \quad (1)$$

纵向视角显示原理与此一致, 这里不再赘述.

## 2 图像生成方法

根据上述原理, 在一个视点观看该三维显示装置, 看到的完整视图是由许多相同大小的方形小图像拼接起来的, 为方便说明图像关系称之为图像区块, 每个图像区块的成像光路与投影机阵列中的投影机一一对应. 如图3, 液晶显示屏阵列、透镜阵列及定向散射屏构成基本的成像系统, 在视点  $V$  观察到的视图包含了分别来自于三个不同显示屏的不同位置的图像区块  $A, B, C$ .

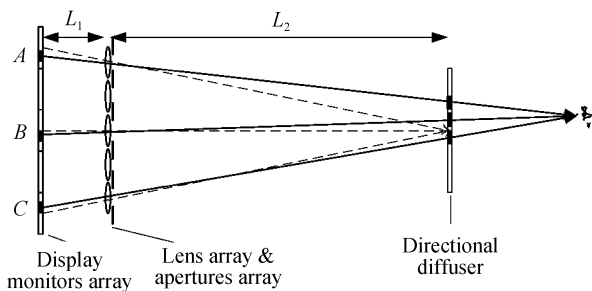


图3 基于视场拼接的体视三维显示图像分割原理

Fig. 3 Novel imaging approach of three-dimensional display based on spliced-field

同理可知, 送入任意一台投影机的图像也是不同图像区块拼接起来的, 分别来自于从不同视点拍摄三维物体获得的视图. 图像源生成部分需要对各个视角的图像进行剪裁和重新拼接组合. 设重组后的投影图像为  $P_{ab}(x, y)$ , 表示横向第  $a$ 、纵向第  $b$  台

投影机所对应第  $x$  行、第  $y$  列的投影图像区块, 各视角分割后的图像区块为  $S_{ij}(p, q)$ , 表示第  $i$  纵向视角、第  $j$  横向视角的第  $p$  行、第  $q$  列的视角图像, 于是根据成像关系遍历可得

$$\sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n P_{ab}(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{ij}(p, q) \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} x = (n-i)n + (p-1)(n-1) - n(a-1) & (3) \\ y = (n-j)n + (q-1)(n-1) - n(b-1) & (4) \end{cases}$$

$n$  表示横向/纵向视角数,  $p, q$  取值为  $1 \sim n$ .

以  $3 \times 3$  (即  $n=3$ ) 的图像分割和拼接方式进行说明, 首先将每一个视角获得的图像进行  $3 \times 3$  的切割, 然后将每一幅图像的指定区域  $A_1 \sim A_9$  取出, 以每一幅图像相对于中心的位置关系重新组合, 如图4(a)为需要呈现的视角图像, 每一种颜色灰级表示一个视角的图像区块, 图4(b)为与式(2)相对应的分割和重组规则, 图4(c)为实际三维物体图像拼接重组示意. 通过这样的拼接重组方式可获得中心投影机的图像源. 同理, 其他视角的图像源也是按照相似的位置关系进行切割和拼接重组. 通过式(3)和(4)所表达的关系进行切割和重组, 所得到的图像源经过投影系统的成像将满足对应视角的观看要求并真实地还原三维物体.

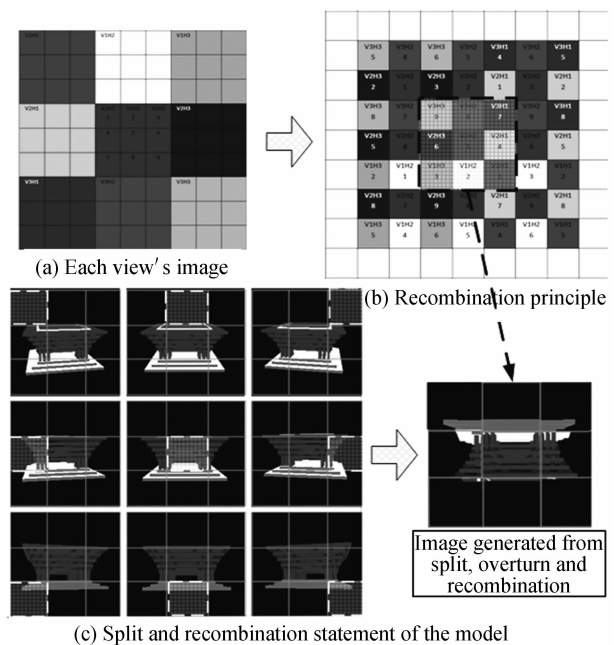


图4 图像源拼接方法示例

Fig. 4 Statement of image source approach based on split and recombination

为实现投影所需的三维模型场景模拟与获取, 该算法将三维物体的中心放置在视场的中央, 从视场中心前方一定位置平面上不同角度模拟摄像机进行拍摄获取了  $m \times n$  个视角的图像, 摄像机阵列的排布与系统微投影机阵列排布对应, 相当于人眼从

不同角度的视点观察位于视场中央的三维物体,然后将这些图像送入图像处理程序模块进行重新切割和组合并生成拼接后的  $m \times n$  幅图像作为投影图像源,考虑到算法的实用性,图像转换是基于 OpenGL 的算法实现,通过调用 Matlab 工程软件实现原始图像源的拼接和生成.通过算法的改进预先对多帧图像进行循环获取与拼接,进而通过多帧图像合成与连续播放的模式获得动态显示效果.

### 3 样机系统参量和结果分析

把 23 inch 液晶显示器图像区域分割成分辨率为  $225 \times 225$  的 45 个小图像(由于商用 23 inch 液晶显示器分辨率受限,横向两侧边缘视场像素利用率为  $173 \times 225$ ,纵向两侧边缘视场像素利用率为  $225 \times 203$ ),和 45 个焦距 100 mm 的菲涅耳透镜相配合作为微投影阵列,正交的透射式柱面光栅作为定向散射屏,并配以背投式反射光路优化系统结构开发出了一台实验样机,如图 5,二维图像经透镜阵列及倾斜  $45^\circ$  设置的反射镜投影到横向和纵向散射角度均为  $4.77^\circ$  的散射屏上.系统主要器件及参量如表 1.

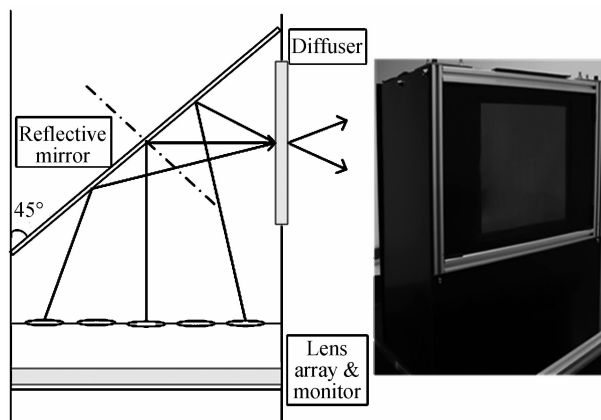


图 5 集成化结构示意图及原理样机

Fig. 5 Prototype-equipment of the compact system

表 1 实验样机核心器件及详细参量

Table 1 Detailed parameters of the prototype

	Devices and parameters
Prototype size	60 cm $\times$ 38 cm $\times$ 85 cm
Number of projectors	45
Image size	30 cm $\times$ 30 cm
Image resolution	225pixels $\times$ 225pixels (Central views)
Directional diffuser	Lenticular sheet (Orthogonal); Both horizontal & vertical diffuse angle approximately $4.77^\circ$
Projection Lens	45 Fresnel lens; Focal length of 100 mm, Size of $50 \times 50 \text{ mm}^2$
Aperture	Circle; $D = 25 \text{ mm}$
Reflective mirror	56 cm $\times$ 48 cm Front surface mirror (Tilted $45^\circ$ placed)
LCD Display	23 inch, resolution 1 920 pixels $\times$ 1 080 pixels

在 1.2 m 观察距离以 CCD 拍摄的方式获取了样机系统上、下、左、右及中心等 5 个不同视角静态显示效果,如图 6.

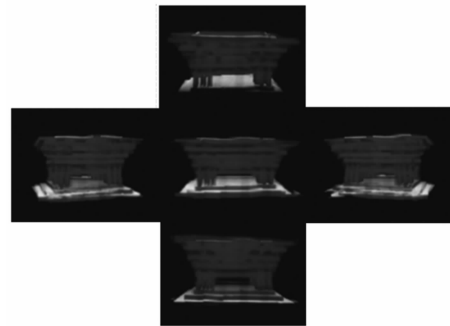


图 6 上海世博会中国馆上、下、左、右、中心 5 个视角显示效果图

Fig. 6 Photos captured at 5 different viewpoints of China Pavilion (2010 Expo)

采用 CCD 拍摄的方式对样机系统显示效果进行测试的结果表明样机系统最佳视角范围为水平方向  $35^\circ$ 、垂直方向  $20^\circ$  内.该系统相较于先前的横向视差拼接三维显示方法采用了更大的孔径光阑,因此可以显示更为明亮且均匀性较好的三维图像,在一定程度上改善了传统集成成像三维显示的一些不足.但现有显示效果存在一定程度的拼接痕迹,并且在视场边缘图像出现了一定程度的模糊.视场边缘的菲涅耳透镜斜投影到散射屏上成像质量较差,反映到散射角度偏大造成视角信息可能的重叠等都可能引致系统成像效果不佳.测试结果还发现,现有柱面光栅屏材质存在一定程度的正色散,柱面光栅屏对不同色光的散射角度的不同既造成了拼接图像信息重合或者不连续,也降低了屏幕的显示对比度.另外,上文所述拼接方法采用的工程近似对成像效果的影响程度也需要进一步考虑.

拼接不连续及散射屏散射角度控制不准确的问题可以通过增加更多数量的微投影机以及使用更精细的制作工艺得到大大改善.用于投影的透镜可以采用优化过的树脂镜片组,在可控范围内减少投影成像的像差影响.视点数目理论上可无限增加且视角间隔可以做到很小,相关研究称视角间隔小有助于这种多视点型自体视三维显示装置减轻观察者视觉疲劳.这些将作为下一步研究的重点.

该方法的另一个创新之处在于对自体视三维显示系统集成化和商业化的尝试,平板显示器和透镜阵列的组合替代投影机阵列、以及背投式反射光路的运用,在很大程度上优化了系统结构、减少了系统硬件占用空间的同时降低了开发成本.

### 4 结论

本文演示了一种利用视场拼接获得全视差三维

显示图像的新途径、新方法. 根据成像原理和投影关系,分析了定向散射屏的散射特性,也推导出了图像拼接的映射关系并完成了图像生成算法设计. 样机搭建结果表明,通过该方法能够实现包括横向视差、纵向视差在内的全视差三维效果,具备更大的孔径光阑,可以产生相较于传统集成成像法更明亮的三维图像. 系统无转动装置,可扩展性强,视点数目理论上可大幅增加,并且视角间隔可以做到很小. 平板显示器和背投反射式光路的运用也为自体视三维显示系统的集成化和商业化提供了新思路.

**致谢** 感谢浙江大学现代光学仪器国家重点实验室的支持.

#### 参考文献

- [1] ABILEAH A. Introduction: special section on 3-D display technologies [J]. *Journal of Society for Information Display*, 2009, **17**(5): 397-398.
- [2] SON J Y, JAVIDI B, KWACK K D. Methods for displaying three-dimensional images [C]. Proceedings of Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006, **94**: 502-523.
- [3] ZHENG Hua-dong, YU Ying-jie, CHENG Wei-ming. A review on three-dimensional display techniques[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(3): 426-434.  
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.
- [4] ZHAO Ren-liang, ZHAO Wu-xiang, WANG Qiong-hua, *et al.* Research on stereo viewing zone in auto-stereoscopic display based on parallax barrier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 960-963.  
赵仁亮,赵悟翔,王琼华,等. 狭缝光栅自由立体显示器立体可视区域的研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5):960-963.
- [5] JONES A, McDOWALL I, YAMADA H, *et al.* Rendering for an interactive 360° light field display[C]. Proceedings of ACM SIGGRAPH Emerging Technologies, San Diego, California, USA, 2007.
- [6] NAKANUMA H, KAMEI H, TAKAKI Y. Natural 3D display with 128 directional images used for human-engineering evaluation[C]. Proceedings of International Society for Optical Engineering, 2005, **5664**: 28-35.
- [7] TAKAKI Y, DAIRIKI T. 72-directional display having VGA resolution for high-appearance image generation [C]. Proceedings of International Society for Optical Engineering, 2006, **6055**: 60550X-1-8.
- [8] TAKAKI Y, NAGO N. Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display [J]. *Opt Express*, 2010, **18**(9): 8824-8835.
- [9] LI Shuai, LI Hai-feng, XIE Jing, *et al.* A novel 3D display based on spliced images[C]. Society for Information Display Digest, Seattle, USA, 2010.
- [10] LI Shuai, LI Hai-feng, PENG Yi-fan, *et al.* Novel 3D display based on spliced view-field[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, **25**(4): 601-604.  
李帅,李海峰,彭祎帆,等. 基于视场拼接的体视三维显示[J]. *液晶与显示*, 2010,**25**(4):601-604.

## A Full-parallax Compact Three Dimensional Display System Based on Spliced View-field

PENG Yi-fan, LI Hai-feng, LIU Xu, LI Shuai

(State Key Lab of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** A novel full-parallax 3D display approach and image generating algorithm are demonstrated. The display system employs a panel display monitor, an array of mini-projectors, a rear projecting light beam and a special orthogonal diffuser. Image generation program is operated based on OpenGL programming. In order to validate the proposed theory based on spliced view-field, a compact prototype-equipment with LCD, Fresnel lens, directional diffuser and rear projecting structure is proposed. The 3D images and dynamic videos displayed by the system can be observed at different horizontal and vertical viewpoints, with more compact size and better use experience.

**Key words:** Information optics; Three dimensional display; Full-parallax; Splice algorithm; Compact