

基于 LED 扫描的全景三维显示系统研究

姚振宁 李海峰 柳 迪 刘 旭

(浙江大学光电信息工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 利用高速一维 LED 阵列和圆柱形视差光栅构建了一套 360° 可视的空间三维显示系统。为了提高它的显示效果, 分析了这种系统的成像原理, 推导了系统的分辨率、刷新率、显示空间等主要显示参数与系统结构参数之间的关系, 并提出了一种提高分辨率的方法。根据分析结果制作了原理样机, 同时设计了基于 FPGA 与并行处理技术的图像传输与分发系统。图像分辨率达到了周视 1380 pixel, 垂直 480 pixel, 并在 $\phi 383 \text{ mm} \times 480 \text{ mm}$ 的柱形显示空间内达到了 233 pixel \times 480 pixel 的单视角分辨率。

关键词 成像系统; 全景三维显示; 视差光栅; 时序扫描

中图分类号 TP368 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1233003

An Analysis of Omnidirectional 3D Display System Based on Scanning LED

Yao Zhenning Li Haifeng Liu Di Liu Xu

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract An omnidirectional 3D display system is built with the use of scanning LED and cylindrical parallax barrier. To improve image quality, the imaging principle of this system is analysed. The relation between system structure and display parameters, such as resolution, refresh rate and display space, is discussed. A method to increase the resolution is also proposed. Based on the analysis result, an experimental display system is produced. The images have a resolution of 1380 circumferential pixels and 480 vertical pixels, achieving a single-view-angle resolution of 233 pixel \times 480 pixel within a cylindrical space of $\phi 383 \text{ mm} \times 480 \text{ mm}$.

Key words imaging systems; omnidirectional display; parallax barrier; sequential scan

OCIS codes 330.1400; 230.3670

1 引 言

全景三维显示是利用特殊显示装置的空间扫描, 重新构建三维物体 360° 的发光光场, 从而实现 360° 可绕视的真实空间三维显示, 具有遮挡关系明显, 观察者数量不受限制等优点^[1~5]。与只扫描发光点空间位置的体三维显示^[6]和只扫描部分视角的自体视显示^[7]相比, 全景三维显示的信息量更大。全景三维显示设备显示的一帧图像, 数据量可达到传统二维显示设备的数百倍甚至更高。为了把如此巨大的信息量在规定时间内显示出来, 一些系统采用了空间复用的方式: 采用传统显示装置, 将多台装

置或多个像素组合起来, 利用分光元件将其投射到不同角度上。如 Tanaka^[1]提出的多投影系统, 采用了 12 台投影机, 利用一种具有方向选择性的旋转屏幕实现多视角显示。基于这种原理的设备, 显示效果往往取决于复用的显示器件数量, 成本增加的同时设备体积也比较庞大。还有人提出了时间复用的方式, 使用新型高速显示器件, 利用人眼的视觉暂留效应, 在短时间内将视角图像依次显示出来^[2~5]。如 Jones 等^[4]提出的系统, 采用高速数字微镜元件 (DMD) 投影机和具有方向选择性的旋转屏幕, 实现了全景的单色显示。显示效果细腻, 体视感觉逼真,

收稿日期: 2011-06-29; **收到修改稿日期**: 2011-08-02

基金项目: 国家 973 计划(2009CB320803)资助课题。

作者简介: 姚振宁(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事三维显示与三维测量等方面的研究。E-mail: yaoyaozn@sina.com

导师简介: 李海峰(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电显示、光学与光电子薄膜以及光学测量等方面的研究。

E-mail: lihaifeng@zju.edu.cn(通信联系人)

但是显示空间受限于旋转屏幕的大小,不能实现大面积显示,且受限于 DMD 的速度而不能实现彩色显示。Yendo 等^[5]提出了一种基于旋转 LED 屏的三维显示装置,采用高速彩色 LED 作为显示器件,利用视差光栅限制光线,实现了彩色三维显示,并在 $\phi 200\text{ mm} \times 256\text{ mm}$ 的显示空间内达到了 $200\text{ pixel} \times 256\text{ pixel}$ 的分辨率。

本文在基于旋转 LED 屏的全景三维显示装置基本原理基础上,对显示装置中的最大扫描角、可视视图、显示分辨率和图像刷新率等参数进行了详细分析,提出了一种新的 LED 排布方式,并设计制作了全景三维显示装置,显示体积达到 $\phi 383\text{ mm} \times 480\text{ mm}$,周视分辨率达到 $1380\text{ pixel} \times 480\text{ pixel}$,单视角分辨率达到了 $233\text{ pixel} \times 480\text{ pixel}$,实现了彩色 360° 可周视三维显示。并实现了 2 Gbit/s 的高速数据处理与传输,显示尺寸和精度都达到了可以用于实用展示的水平。

2 显示原理

基于旋转 LED 柱面屏的全景三维显示系统主要由两部分组成:一维 LED 阵列和视差光栅。由于光栅狭缝和 LED 宽度很小,LED 的发光角度被限制在一个很小的区域内,如图 1 所示。系统运行时,狭缝和 LED 相向运动,就会形成对 LED 发光角度的扫描,当狭缝扫描到不同的角度时,让 LED 显示对应该角度的物体信息,就可以实现对视角信息的显示。受 LED 刷新率的限制,在一个光栅周期的扫描范围内,LED 所能显示的内容是有限的,所显示的内容是不连续的。假设 LED 在一个周期内显示了帧图像,每一帧图像对应一个视角信息,那么称这一帧图像称为一个视角图像。

为了便于理解,假设 LED 静止,只有光栅运动,

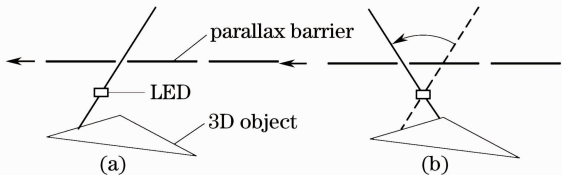


图 1 一维 LED 阵列与视差光栅的相对运动。(a) 某时刻光栅对 LED 发光方向的限制;(b) 光栅运动使得 LED 发光方向改变

Fig. 1 Relative motion between 1D LED array and parallax barrier. (a) Limitation of the light direction of LED by parallax barrier; (b) change of light direction caused by the motion of barrier

那么显示的内容将会是一个具有多个角度信息的一维图像,其中的每一个点称为一个像素。如果让 LED 同样运动起来,那么当一条光栅狭缝扫描出一维图像后,下一个光栅狭缝再对 LED 扫描时,LED 所在的位置已经改变,显示出来的一维图像位置也会随之改变。让 LED 阵列在一个圆柱面内移动,将狭缝光栅做成圆柱状,让 LED 与光栅同轴转动。当 LED 旋转一周后,就可以在空间扫描出一个呈柱面分布的二维阵列,如图 2 所示。阵列中的每一个点都具有角度信息,在水平方向上再现了真实物体发光的状态。当人眼从不同位置观察时,看到的像素是相同的,但是看到的视角是不同的,这样就可以保证从不同位置观察时看到的内容不同,从而实现三维显示。同时像素呈柱面分布,可以实现围绕其一周观看。

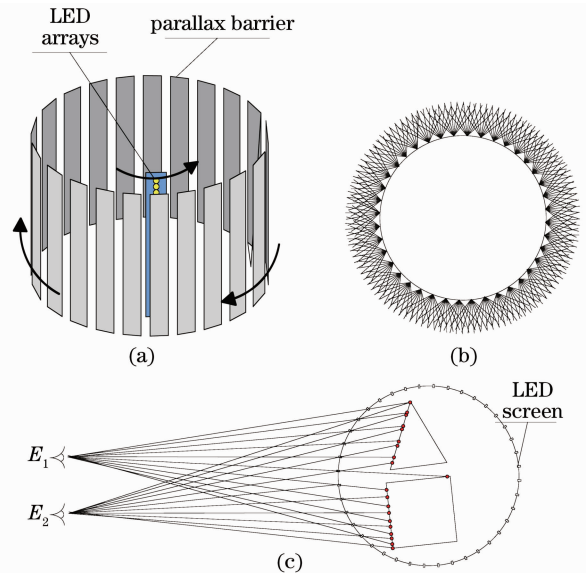


图 2 系统的结构及原理示意图。(a) 系统示意图;(b) 每个像素都包含有多个视角;(c) 双目视差的形成原理
Fig. 2 Structure and principle of the system. (a) Schematic of the system; (b) each pixel has a number of view angles; (c) the formation of binocular parallax

3 显示参数分析

3.1 最大扫描角

最大扫描角是指光栅对 LED 发光方向进行扫描的过程中,LED 发光方向改变的范围。它对系统的分辨率及显示空间有着重要影响。

令内圆 LED 的半径为 R_1 、转速为 ω_1 ,外圆狭缝光栅的半径为 R_s 、转速为 ω_s ,一周的像素数为 M 。每个像素的圆心角(单像素角)为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{M}, \quad (1)$$

令狭缝光栅一周共有 N_s 个狭缝, 一个狭缝周期的圆心角

$$\theta_s = \frac{2\pi}{N_s}, \quad (2)$$

如图 3 所示, LED 从 A_1 转到 A_2 为像素 p_A , 此时狭缝从 S_{A1} 转到 S_{A2} , 依次显示第 1 到第 N_a 视角方向的图像。LED 从 B_1 转到 B_2 为像素 p_B , 与像素相对应的狭缝换成下一个狭缝, 并从 S_{B1} 转到 S_{B2} , 并扫描像素 p_B 的 N_a 个视角。由图 3 可见, 狭缝相对像素的扫描是一个周期性的扫描过程, $\angle S_{A1}A_1A_2$ 与 $\angle S_{B1}B_1B_2$ 相等, 且 A_1 和 B_1 的间隔等于二个像素之间的间隔, 因此 S_{A1} 和 S_{B1} 对应的圆心角应等同于单像素角 $\Delta\varphi$ 。所以光栅对每个像素的最大扫描范围对应的圆心角

$$\angle S_{A1}OS_{A2} = \theta_s - \Delta\varphi, \quad (3)$$

在 $\triangle OB_2S_{B2}$ 中, $\angle OS_{B2}B_2$ 标为 β_{s0} , $\angle B_2OS_{B2} = \frac{\theta_s - \Delta\varphi}{2} + \frac{\Delta\varphi}{2} = \frac{\theta_s}{2}$ 。根据正弦定理得

$$\frac{\sin \beta_{s0}}{R_1} = \frac{\sin\left(\pi - \frac{\theta_s}{2} - \beta_{s0}\right)}{R_s}, \quad (4)$$

$$\beta_{s0} = \arctan\left[\frac{R_1 \sin\left(\frac{\theta_s}{2}\right)}{R_s - R_1 \cos\left(\frac{\theta_s}{2}\right)}\right]. \quad (5)$$

所以, 每个像素的最大扫描角为

$$\varphi = 2\left[\beta_{s0} + \frac{(\theta_s - \Delta\varphi)}{2}\right] = 2\arctan\left[\frac{R_1 \sin\left(\frac{\theta_s}{2}\right)}{R_s - R_1 \cos\left(\frac{\theta_s}{2}\right)}\right] + \theta_s - \Delta\varphi. \quad (6)$$

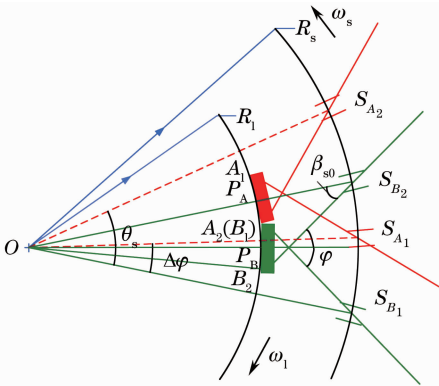


图 3 像素与视角的扫描过程

Fig. 3 Scanning process of pixels and view angles

3.2 可视视图分析

如图 4 所示, 假设人眼位于视点 ν_b 处观察, 距离中心轴的距离为 D_b , 与 x 轴的夹角为 θ_b , 人眼的视场角为 θ_b 。每个像素的最大扫描角为 φ , 当位于视点 ν_b 处人眼的视线与该像素的径向夹角超过 $\varphi/2$ 时, 该像素的图像无法在视点 ν_b 处观察到, 即人眼只能观察到柱面显示屏 AB 段范围内的图像, 因此位于 ν_b 的人眼只能观察到直线 $\nu_b A$ 和直线 $\nu_b B$ 所围成的三维图像可视区。对于半径为 D_b 不同 θ_b 的视点, 都有各自对应的相同大小的三维图像可视区。而对于所有一周视点, 在平面 xOy 内有一个共同的圆形图像显示区, 在三维空间内就是一个柱体图像显示区。位于该区域内的三维图像可以在所有一周视点内都可见。称这个共同显示区为柱体图像空间, 其柱面与边缘视线相切(边缘视线就是边缘像素以最大发散半角发光光线方向)。柱体图像空间的半径为

$$r = R_1 \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right). \quad (7)$$

可见 r 由显示系统的圆柱面显示屏半径 R_1 和最大扫描角 φ 决定。半径 R_1 和最大扫描角 φ 越大, 三维图像显示的柱体图像空间就越大。视场角与观察距离 D_d 的关系为

$$\theta_v = 2\arcsin\left[\frac{R_1 \sin(\varphi/2)}{D_b}\right]. \quad (8)$$

对于显示系统, 圆柱面显示屏半径 R_1 和最大扫描角 φ 是常数, 所以视场角为 θ_v 随观察距离 D_b 增加而变小。令弧长 AB 对应的圆心角为

$$\alpha = \varphi - \theta_v. \quad (9)$$

假设柱面显示屏 AB 段范围共有 m 个像素, 分别为 $p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{km}$, 则

$$m = E\left(\frac{\alpha}{\Delta\varphi}\right). \quad (10)$$

其中 E 为向下取整函数。

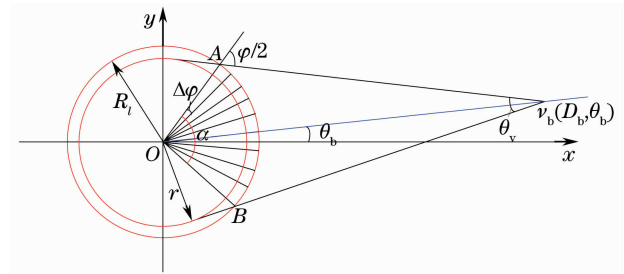


图 4 柱体显示空间

Fig. 4 Cylindrical display space

3.3 光栅狭缝数与分辨率

每次 LED 与光栅的某一条缝相交时,该 LED 就可以从光栅外观察到,即为前文所述的一个像素。假设光栅一周上有 N_s 条细缝,LED 的转速为 ω_1 ,光栅的转速为 ω_2 ,LED 与光栅反向转动。则 LED 每转一圈与光栅缝相交次数为

$$M = N_s \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} + 1 \right). \quad (11)$$

这就是系统的像素数。观察者在某一位置观察,所看到的图像是所有可见像素的组合,称之为可视视图。

3.4 图像刷新率

LED 每扫描一周,画面刷新一次,系统的刷新率 R_f 完全由 LED 的转速来决定:

$$R_f = \frac{\omega_1}{2\pi}, \quad (12)$$

当系统刷新率较高时,LED 的高速转动会对机械和同步系统提出较高要求。为此,我们采用多块 LED 复用的方案^[5],在较低转速下获得了较高的刷新率。图 5 为该方案的示意图,在柱面内安装了 m 列一维 LED 阵列,系统运行时, m 列 LED 同时旋转。当一列 LED 扫描一像素后,只要等到下一列 LED 经过时,画面就可以再次显示,系统的刷新率变为 $R_f = \omega_1 m / 2\pi$,这样就可以在较低转速下得到较高的刷新率。

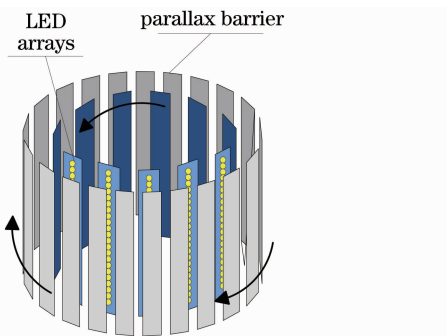


图 5 多列 LED 复用方案示意图

Fig. 5 Schematic of the system using multiple LED arrays

4 实验装置

4.1 结构设计

显示装置采用 30 块 RGB 三色 LED 制作的显示电路板,并均匀分布于半径为 325 mm 的柱面上。每块 LED 电路板有 480 颗 LED,每颗 LED 有红绿蓝三个发光区。由于 LED 颗粒及其驱动尺寸较大,为了实现纵向上的高分辨率,采用了错位排布的方

式,如图 6 所示。图中的四列 LED 在纵向上错位排列,使得 4 mm 的高度内分布了 4 颗 LED。对每列 LED 分别定位,再通过旋转柱面分布的 LED 电路板,便可实现柱面显示。外圈是圆柱状狭缝光栅,高度为 500 mm,半径为 333 mm,一周共有 180 条狭缝。通过旋转狭缝光栅,控制每一个时刻的 LED 的发光方向,并限制每个 LED 的发光角度。整个系统半径为 400 mm,高度为 1500 mm。

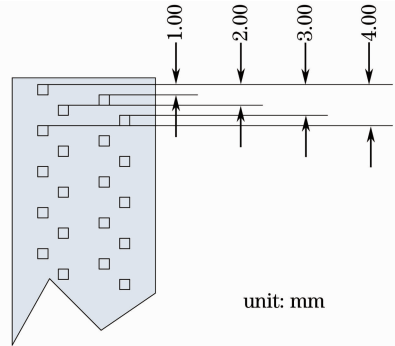


图 6 LED 的错位分布

Fig. 6 Staggered distribution of LED

系统运行时,纵向分辨率为 480 pixel,横向分辨率随内外相对转速不同而变化。采用的内圈转速为 30 r/m,外圈转速 200 r/m,根据(11)式可知系统周视像素数为 1380,设定观察距离为 2 m,由(6)式和(10)式可知最大扫描角为 72.1° ,此时单视角视图的分辨率为 $233 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 。同时系统中每个像素含有 64 个视角,每个视角的颜色位数为 256 色(8 bit)。根据(12)式可知系统的像素刷新率为 15 Hz。在实际使用中,刷新率和像素数可以根据需要另行提高。

4.2 电路系统

在上述条件下,系统的单帧图像大小为 $1380 \times 480 \times 64 \times 8 \text{ bit} = 339 \text{ Mbit}$,为了满足数据的高速传输从而达到较快的动态刷新率,采用了 FPGA 作为处理单元并采用了并行处理的电路结构。

在传输部分,由于系统运行时是旋转的,采用了单模光纤驳接光纤滑环实现计算机到显示器的数据传输,同时采用双 RAM 的方式实现数据的实时“乒乓缓存”,系统电路原理图如图 7 所示。三维数据由计算机发出后,需要先处理成可以由显示屏直接显示的二维信号^[8,9]。采用 GPU 处理可以加速这一过程,三维信息经 GPU 处理后产生可以让 LED 直接显示的二维信息,经 VirtexTM-5 PCI-E 开发板通过电光转换模块发出,由光纤驳接光纤滑环后传输到带光接收模块的总控 FPGA 板上,并通过 FPGA

存储于两片 DDR2。其中光纤的发送与接收模块的带宽为 2 Gbit/s, 光纤上的数据经过 8 b/10 b 转换后传输带宽为 2.5 Gbit/s。

对于 LED 的并行驱动, 采用 sata 数据线以 LVDS 格式传输到 20 块分发板, 每块小分发板再向 3 片 LED 驱动板传输数据。分板与 LED 驱动板由排线连接, 每 2 条排线(50 pin)控制 LED 驱动板上的 45 只 LED 驱动芯片(TLC5924), 完成 LED 屏的显示。图 8 为实际系统及其显示效果。

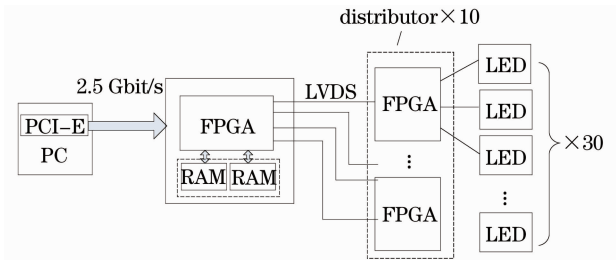


图 7 系统的电路原理图

Fig. 7 Circuit schematic of the system



图 8 实际系统及其现实效果。(a)实际系统;(b)显示不同视角的照片

Fig. 8 Photos of the system and its display images. (a) Photo of the system; (b) photos with different view angles

5 结 论

基于旋转 LED 柱面屏的全景视场三维显示系统, 采用了高速 LED 作为显示器件, 并采用光栅限制其发光方向。利用人眼的视觉暂留效应, 通过时分复用实现了三维显示。观众可以从各个角度观看, 同时对于观众人数没有限制。研究了这种系统的分辨率、刷新率和显示空间等主要显示参数, 设计了电路系统并提出了一种新的 LED 分布方式。根据分析的结果, 制作了原型样机, 显示参数达到了实用水平。该系统尺寸的灵活性, 在设计上有很大的调整空间, 同时具备可调节的显示参数。其显示效果细腻清晰, 在室内或室外的大型三维显示中有较大的应用潜力。

参 考 文 献

- 1 Kenji Tanaka, Soko Aoki. A method for the real-time construction of a full parallax light field [C]. *SPIE*, 2006, **6055**: 605516
- 2 Oliver S. Cossairt, Joshua Napoli, Samuel L. Hill *et al.*. Occlusion-capable multiview volumetric three-dimensional display [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(8): 1244~1250
- 3 Rieko Otsuka, Takeshi Hoshino, Youichi Horry. All-around

three-dimensional display system [C]. *SPIE*, 2004, **5599**: 56~65

- 4 Andrew Jones, Ian McDowall, H. Yamada *et al.*. Rendering for an Interactive 360° light field display [C]. *Proc. ACM SIGGRAPH*, 2007
- 5 Tomohiro Yendo, Toshiaki Fujii, Masayuki Tanimoto *et al.*. The Seelinder: Cylindrical 3D display viewable from 360 degrees [J]. *J. Vis. Commun. Image R.*, 2010, **21**(2): 586~594
- 6 Lin Yuanfang, Liu Xu, Liu Xiangdong *et al.*. Three dimensional volumetric display system utilizing a rotating two dimensional LED array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1158~1162
- 林远芳, 刘旭, 刘向东等. 基于旋转二维发光二极管阵列的体三维显示系统 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1158~1162
- 7 A. Neil. Autostereoscopic 3D displays [J]. *Computer*, 2005, **8**: 32~36
- 8 Xie Xiaoyan, Liu Xu, Lin Yuanfang. Study on gray scale deviations in three-dimensional volumetric display system based on geometric approximation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1508~1513
- 谢小燕, 刘旭, 林远芳. 体三维显示系统中基于几何近似法的灰度偏差研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1508~1513
- 9 Zhang Chao, Wang Qionghua, Li Dahai *et al.*. Acquisition of parallax images for multi-view auto-stereoscopic display based on SIFT matching algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1989~1993
- 张超, 王琼华, 李大海等. 基于 SIFT 匹配算法的多视点自由立体显示视差图像的生成 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 1989~1993