

文章编号: 0253-2239(2003)10-1158-5

基于旋转二维发光二极管阵列的体三维显示系统

林远芳 刘 旭 刘向东 张晓洁 徐 ■

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 利用发光二极管(LED)的高速发光特性,以旋转的二维发光二极管阵列为显示载体,通过时分寻址电路快速显示三维形体的二维截面序列。受调制的离散二维图像信息,因视觉暂留而形成深度效应,将被整合感知为一幅连续的三维图像。成功实现了具有 49152 个体像素,尺寸为 $\phi 144.6 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ 的柱体空间内的三维显示,图像具有双目视差、调节、会聚等常规视差信息,能提供真实的深度暗示,可同时从任意角度直接观察。论述了系统的显示原理及图像编码分解方法,分析和讨论了显示质量与体像素优化选取、起始位置显示信息的关联程度。

关键词: 信息光学; 体三维显示; 二维发光二极管阵列; 视觉暂留; 图像编码及优化

中图分类号: TP368; TN141 文献标识码: A

1 引 言

三维显示是对客体固有三维信息进行记录、处理和再现的可视化过程,可分成四大类。第一类是基于阴影等心理深度暗示^[1,2]的二维屏幕透视显示,缺点是不能直观表达深度信息,三维空间感完全取决于观察者的想象重构能力,容易产生混淆^[3]。第二类是基于双目视差暗示的体视对显示^[4~7],缺点是视角有限,固有的非自然深度感容易引起错觉、视疲劳及头痛等不适。严格地说,这两类显示不能提供完整的深度暗示,都不是真正意义上的三维显示。在空中交通控制、军事战术和战略显示、医学成像等应用场合,三维信息可被看作是结构性的(视觉上属于三维结构)或是数值性的(超多维数据),使用前两类伪三维显示技术,容易丢失第三维信息。第三类的全息显示^[8,9,11]能再现图像的幅值和相位信息,因此能利用二维介质得到虚拟三维效果的显示,使观察者有三维视感。但全息显示制备复杂,要求很宽的信号传输带宽和巨大的信息存储容量。第四类的三维显示^[10~13]利用人眼视觉系统固有的三维数据处理结构,显示出占据着真实体积空间的三维图像信息,因此被称为体三维显示。这类显示可供多人多角度直接观察,并能涉及客体的内部结构,具有广阔的潜在应用前景。

目前国外的体三维显示研究主要有激光扫描双红

外光子上变频技术^[12]、基于高速声光扫描器和旋转螺旋屏的激光扫描系统^[13]、采用快速空间光调制器的螺旋屏投影系统等。我们利用发光二极管阵列实现了具有 49152 个体像素,空间尺寸为 $\phi 144.6 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ 柱体内的三维显示,文中论述了系统结构、显示原理及空间编码分解方法,并以显示方形体为例,对显示质量与体像素选取、起始位置显示信息的关联程度进行分析和讨论。

2 体三维显示系统设计

2.1 系统结构及显示原理

研究表明,人眼视觉暂留时间约为 50~100 ms,即人类视觉对亮度改变的跟踪会由于意识处理延时而滞后。当实际光源闪烁频率超过 10 Hz 时,给人的感觉是连续发光体而非闪烁体。基于人眼视觉暂留特性,可设计图 1 所示的三维显示系统。对称置于转轴两侧的发光二极管阵列在电

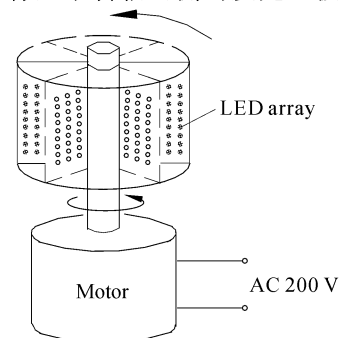


Fig. 1 Schematic of three-dimensional volumetric display system

机驱动下高速旋转,周期性地扫出一个柱体空间,阵列上的发光二极管旋转后提供分散于三维空间中的体显示介质,从而形成虚拟的体像素。

时分寻址电路与旋转同步,逐行扫描发光二极管阵列,根据需要调制不同时刻发光二极管的发光状态,快速显示二维图像截面序列。这种对发光二极管面像素的时分调制直接寻址,等价实现了对分

散于柱体空间内的所有体像素的寻址扫描,从而形成三维图像。图 2(a)~图 2(d)分别表示连续 4 个单位时间间隔内,左侧发光二极管阵列显示的二维信息,图中黑点表示发光二极管处于发光状态。由于视觉暂留,观察者感知的不是上述图 2(a)~图 2(d)的离散二维图像序列,而是一幅复合后的空间整体图像,如图 2(e)示。

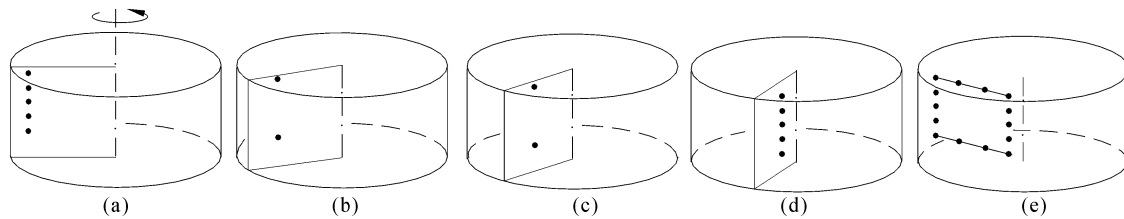


Fig. 2 Principle of volumetric three-dimensional display system. (a)~(d) Four adjacent two-dimensional images displayed actually at intervals; (e) final image perceived by viewers

2.2 空间编码分解

上述体三维显示系统将一幅完整空间图像分解成多个二维截面,按时序快速显示从而创造深度幻觉,其过程涉及从连续到离散的编码分解和从离散到连续的合并复原。为了保证显示效果尽可能真实反映源图像的三维特性,必须基于人眼视觉特性,充分考虑人体生理学和认知学方面与三维空间感形成有关的因素^[1],并结合光机电算的同步处理,合理完成从三维源图像到二维截面序列的分解映射。

首先,对三维源图像进行缩放处理,使之适应系统提供的显示空间。假定单侧发光二极管阵列的像素分辨率为 $M \times N$,旋转后可提供的显示空间是半径为 N 个像素尺度、高为 M 个像素尺度的柱体空间。

其次进行坐标变换,把通常用 (x, y, z) 直角坐标系描述的三维源图像特征点集,变换到 (r, θ, z) 柱坐标系中,并对每个点的 r, z 坐标进行归整处理,使之映射到发光二极管阵列中。 r 表征阵列中发光二极管相对于转轴的径向距离, z 表征阵列中发光二极管相对于原点的高度值,而 θ 值则反映了发光二极管阵列相对于起始位置的旋转运动,每一个 θ 对应柱体空间内的一个阵列位置。

再次,根据显示图像所需的灰度等级、发光二极管的响应特性和控制电路的存取速度,计算显示一幅 $M \times N$ 分辨率的二维图像所需的最小时间 t_{\min} ,然后依据

$$L = \frac{1/n}{t_{\min}} = \frac{1}{nt_{\min}}, \quad (1)$$

确定系统可被寻址显示的最大体像素数 $(M \times N \times L)$,其中 n 为转速, L 为二维图像序列的最大数目。

当 $n \geq 10$ r/s 时,可保证体像素实际闪烁频率超过 10 Hz,不会引起闪烁感觉。

最后,根据不同的显示要求确定三维源图像需要在一转内被分割成多少个截面,截面个数 K 必须小于或等于 L 。对空间源图像是否是等间隔分割,只影响到控制电路的延时不同,因此等分与否取决于实际的显示需要,但必须保证每个分割部分对应的圆心角 θ 满足下式:

$$\theta \geq 2\pi \cdot n \cdot t_{\min}, \quad (2)$$

此时能确保每个截面的二维信息均能被正确显示,不会发生重叠或错位现象。

下面以等间隔分割为例说明空间图像的编码分解过程。假定将柱体空间内的一幅三维图像等分为 K 个含轴截面,形成 K 个扇形体,扇形角 θ 是一幅二维图像截面贯穿的角度,其显示维持时间为 t ,则有

$$\theta = \frac{2\pi}{K}, \quad t = \frac{1}{nK}, \quad (3)$$

通过控制电路延时,使一幅二维图像的显示时间刚好等于 t ,则能够确保显示与旋转严格同步,即每显示完当前扇形体对应图像的最后一行,发光二极管阵列刚好转到相邻下一个扇形体的预定起始处,开始显示该扇形体对应图像的第一行。因此当 K 幅离散的二维图像截面被依次显示后,发光二极管阵列转过的总圆周角

$$\Theta = K\theta = 2\pi, \quad (4)$$

这说明发光二极管阵列已转过一周回到起始点。虽然视觉暂留使 K 幅离散二维图像被合并复原成连续三维图像,但由于转速太高,人们感知的只是一闪而过的信息,无法形成明确的知觉,因此必须周而复

始再依次扫描,才能获得稳定的视觉效果,同时通过延长积分时间来提高图像亮度。

3 分析及讨论

我们选择与转轴不共面的斜向直线、绕轴匀速上升的螺旋线、以转轴为几何对称中心的立方体线框图为实验显示对象。实验采用直径 $\phi 3$ mm 的柱状发光二极管器件,单阵列分辨力 24×16 ,相邻像素的横向和纵向中心距均为 4.6 mm,转速 600 r/min,形成等效半径为 72.3 mm、高为 110 mm 的柱状体。实验结果表明,待显对象出现在预定体积空间内,观察者无论从水平 360° 范围内的哪一角度平视,还是从系统上方俯视或侧视,均可看到不同角度及高度的三维信息。但也出现了一些值得关注的现象。

下面以立方体线框图的显示为例,对实验现象进行分析讨论。图 3 是显示立方体边长的几何关系图,连接所有黑点的直线代表着与转轴垂直的上底面中一条待显边长。从图中看出有 12 个可供寻址的体像素位于待显线上,但如果只是按照图中所示圆心角对应的瞬间点亮这些发光二极管,将得到具有直线倾向的离散体像素集,因此还必须点亮更多接近待显线的可供寻址的体像素。这说明由于发光二极管阵列中每个发光二极管均是作圆周运动,其运行轨迹始终是圆而非直线,因此并不能保证待显边长上的点总是能与可供显示的体像素相符,就会导致直线表现为锯齿状。

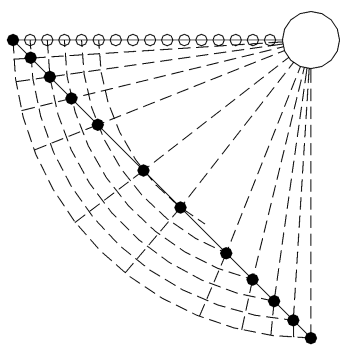


Fig. 3 Schematic of displaying an edge of a cube

图 4 是观察距离为 200 mm 时拍摄的一个边长约为 88.5 mm 的立方体线框图,上下底面每条边长实际是由线段构成的,呈现出从端点向中点逐渐拉长的趋势,这与图 3 的理论分析相符。改进设计时应尽可能采用面像素尺寸较小、排列较密的发光二极管阵列,从而提供更多可供显示的体像素;显示时应优化体像素的选择,尽可能选取有助于减轻直线锯齿状外观的体像素,利用待显直线方程和可寻址

体像素的坐标,将经过该线所有点的最小二乘方减到最小。

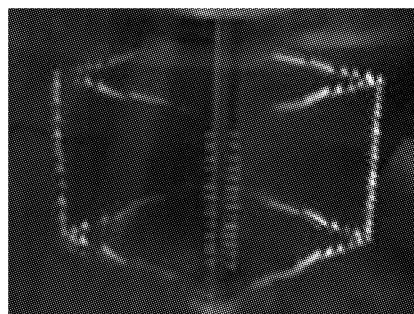


Fig. 4 Photo of a cube displayed before optimization

图 5 拍摄的长方体线框图,是在对体像素整体优化选取、并改变发光二极管阵列起始位置显示信息的情况下获得的。

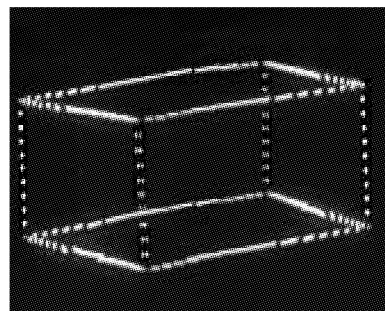


Fig. 5 Photo of a cuboid displayed after optimization

与图 4 对照,可以看出图 5 中直线锯齿状现象大为改观、且四条棱线清晰可见,这说明显示质量除了和体像素选取有关外,还与起始显示信息具有密切关系。这一现象可以参照图 6 进行解释。由于发光二极管的发光亮度分布曲线不是各向同性的,因此人眼接收的发光二极管光强和观察者与阵列相对位置有关。方形体的几何关系决定了显示两相邻棱线时,对应的发光二极管阵列正好成 90° 的位置关系。图 4 起始位置显示的是照片中位于转轴左侧的棱线,此时发光二极管阵列平面与视线垂直,人眼正面接收发光二极管发光;显示相邻棱线即照片中位

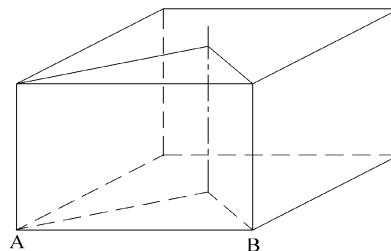


Fig. 6 Positions of LED arrays corresponding to arries A and B

于转轴前方的棱线时,发光二极管阵列刚好转过 90° ,处于与视线平行的位置,人眼接收的是发光二极管侧向光,同时由于实验采用的发光二极管器件有一定的侧向尺寸,因此得到由短的横向线段在纵向排列的显示效果。图5起始位置显示的不是棱线,而是左视场后部的上下底边中点,因此显示两相邻棱线时,发光二极管阵列所处的平面都是既不垂直于、也不平行于视线,使得表征长方体竖向特性的四条棱线均能被正常观察。

从图4、图5均可看出,显示的线条亮度并不均匀,且直线各部分的平滑程度也不同。这是因为当形成一幅占据实际空间的图像时,旋转系统根据时间有选择地改变发光二极管面像素的发光状态,形成二维截面序列。由于系统提供的体像素均是由阵列上的个体发光二极管旋转产生,而非实际静止分布在空间中,因此每个体像素在柱坐标系统中呈现出小扇形体形状,从转轴中心向外辐射排列。显而易见,阵列中径向各发光二极管线速度的大小随着离轴距离增加而增大,体像素的大小是不均匀的。当发光二极管阵列尺寸加大时,近轴体像素和远轴体像素的大小明显不同,从而影响到显示质量。比如,对于一幅径向尺寸较大的图像,近轴部分将表现得平滑细腻些,远轴部分则稀疏粗糙些。为了克服体像素大小的不一致,可以通过软件处理,在两个相邻截面间对不同离轴距离的发光二极管面像素的发光状态进行调整,同时可通过引入灰度改善亮度的均匀性,这些涉及到图像数据的优化算法以及电路补偿和存储值变化问题,这里不再详细论述。

结论 基于人眼视觉暂留特性,利用发光二极管的高速发光特性实现分时操作,提出基于旋转二维发光二极管阵列实现真实空间中的三维显示方法,建立的实验系统成功显示了斜向直线、螺旋线及立方体线框图,得到了传统二维显示无法取得的显示效果。这一三维显示系统的优点在于,构成三维轮廓的体像素真实存在于显示空间,所以存在着常规视差信息,眼睛的调节和会聚处于自然的匹配状态,符合人类的视觉观察习惯;视场大,观察者可环绕系统进行观看;能更好地传达客体相互位置关系,有助于观察者理解三维信息,可靠确定客体的距离、形状和

方位。当然,目前的系统体像素大小不一致、显示亮度不均匀、分辨率不够高。如何解决这些问题并实现复杂三维图像的显示,是我们当前正在开展的主要工作。

参 考 文 献

- 1 Wickens C D. Three-dimensional stereoscopic display implementation, guidelines derived from human visual capabilities. *Proc. SPIE*, 1990, **1256**:2~11
- 2 Han Shaofa, Sun Guoliang. The problem of alias and the technology of anti-alias in realistic 3-D computer generatin graphics. *Opto-Electronic Engineering* (光电工程), 1994, **21**(2):15~19 (in Chinese)
- 3 Cai Lüzhong, Liu Huaguang. Optical technologies of 3-D display. *Advanced Display* (现代显示), 1996, **7**(1):39~54 (in Chinese)
- 4 Endo T, Kajiki Y. A cylindrical 3-D video display observable from all directions. *Proc. SPIE*, 2000, **3957**:225~233
- 5 Tang Jiyue, Guo Lurong. A real-time method for making stereo-hologram. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1994, **14**(12):1258~1262 (in Chinese)
- 6 Cheng Duo, Hao Zhiqi, Wang Shuyan *et al.*. Reconstruction of 3D field by electronic holography. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(5):577~580 (in Chinese)
- 7 Wang Zhaoqi, Zhang Huijuan, Mu Guoguang *et al.*. Head-mounted display with reflective relay system using micro-liquid crystal on silicon. *Acta Optica Sincia* (光学学报), 2002, **22**(10):1251~1254 (in Chinese)
- 8 Downing. Method and system for three-dimensional display of information based on two-photon up-conversion, 1997, *U. S. Patent*, No. 5,684,621
- 9 Soltan P, Lasher M, Dahlke W *et al.*. Laser projected 3-D volumetric displays. *Proc. SPIE*, 1997, **3091**:96~109
- 10 Zheng Jason Geng, Method and apparatus for high resolution three-dimensional display, 2000, *U. S. Patent*, No. 6,064,423
- 11 Wang Hui, Li Yong, Jin Hongzhen *et al.*. Visualization using computer-generated hologram (CGH) based on three-dimensional shape measurement data of object. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(3):284~288 (in Chinese)
- 12 Berlin, Jr. Three-dimensional display, 1979, *U. S. Patent*, No. 4, 160, 973
- 13 Knut Langhans, Detlef Bahr, Daniel Bezecny *et al.*. FELIX 3-D display: an interactive tool for volumetric imaging. *Proc. SPIE*, 2002, **4660**:230~245

Three-Dimensional Volumetric Display System Utilizing a Rotating Two-Dimensional LED Array

Lin Yuanfang Liu Xu Liu Xiangdong Zhang Xiaojie Xu Wei

(*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027*)

(Received 2 December 2002; revised 4 March 2003)

Abstract: A three-dimensional volumetric display system utilizing a rotating panel is described. The LEDs are arranged in a matrix configuration on the panel. They can be addressed by control circuit to create a sequence of two-dimensional image information at a predefined interval. These discrete images will be perceived and interpreted as an integrated three-dimensional image due to eye persistence. The system can provide 49152 voxels in a cylinder display space with a diameter of 144 mm and a height of 110 mm. The three-dimensional image displayed provides viewers with true depth cues, binocular parallax, accommodation and convergence, etc. , and can be observed from any directions horizontally without the need for any special viewing aids. The structure, principle of displaying method and the volumetric information encoding are discussed. Moreover, the relationship between quality of display, optimization of selection of voxels and initial image information displayed are analyzed in detail.

Key words: information optics; volumetric three-dimensional display; two-dimensional LED array; eye persistence; image encoding and optimization