

基于二维旋转屏的体三维显示系统像素属性分析

林远芳 刘向东 刘旭 张晓洁

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要 介绍了利用视觉暂留效应、高速扫描处于快速旋转中的二维显示屏,从而在三维实空间内再现图像的体三维显示系统. 体像素是与三维图像空间内的点对应的图像信息的表述单元,其形状、位置、数目及密度分布等属性,直接影响图像的再现质量和系统的整体性能. 对决定体像素属性的屏幕像素尺寸、排列规律及刷新率间的匹配关系进行了建模和量化分析,并从实验上说明了体像素的空间密度分布不均匀时,会导致在显示空间不同位置的同一原始模型有不同的再现效果.

关键词 信息光学;体三维显示;体像素;视觉暂留;发光二极管阵列

中图分类号 TN27 **文献标识码** A

0 引言

体三维显示系统^[1] (Volumetric 3-D display system)提供的显示空间是易于采用三维坐标描述的真实空间,再现信息是固有三维和客观存在的,可自由选择视点直接进行观察,有利于可视化分享和群体协作,其研究得到了广泛关注. 目前人们主要是利用被动表面散射投影光而实现体三维显示^[2-4],需要一套用于光束产生、偏转、扫描及聚焦的装置,因此系统整体尺寸大、控制算法复杂. 如果将光源与目标屏做成一体、由二维显示屏的屏幕像素在旋转中多次瞬时发光,形成分散于三维实空间内的体像素(voxel),也可实现体三维显示,且数据处理简单、系统结构紧凑^[5]. 作为再现图像信息表述单元的体像素,其形状、位置、数目及密度分布等属性与屏幕像素的尺寸、排列规律及刷新率间的匹配关系密切相关. 本文针对基于二维显示屏的体三维显示系统进行建模,量化分析了不同匹配关系下的体像素属性及其对图像再现质量和系统整体性能的影响,最后利用建立的以发光二极管为屏幕像素的体三维显示系统,进行了实验与分析.

1 再现原理及特点

利用旋转的二维显示屏对三维图像进行再现的原理可以简述为,二维显示屏周期性地旋转,形成具有一定直径和高度的圆柱体空间,同时提供了按时序依次出现的、位于不同方位的显示平面,每一平面均可写入不同的二维信息,如图1所示. 当屏幕转速高于人眼可分辨的频率,且写入信息与原始三维数据相对应、信息总量足以表现原始图像的细节时,屏本身材料变为不可见,而瞬时显示的二维图像序

列由于视觉暂留效应,将被复合感知为位于显示空间内的三维图像.

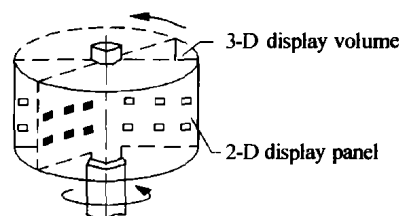


图1 二维显示屏旋转形成三维实空间

Fig. 1 3-D display volume swept by a 2-D display panel

考虑到体三维显示与其它三维显示的本质区别在于,再现的三维图像是360°各向可视的,因此屏幕应是单面180°可视的余弦发光体,且双面发光以便显示360°可视信息;当转轴与显示屏的竖直对称轴共线时,可以只是单面发光,但利用前半周期内的屏幕位置与后半周期内的屏幕位置重合、且显示面朝向互补而做到全角可视.

2 模型建立及量化分析

构成三维再现图像的每个体像素都代表着一个独立的信息单元,其属性理想与否将直接影响图像的再现质量和系统的整体性能. 一方面,体像素都是屏幕像素在旋转过程中瞬时形成的,并非静止分布在显示空间中;另一方面,由同一屏幕像素提供的每个体像素在物理上都是独立的单元,携带的信息不尽相同,必须保证它们互不重叠. 因此,分析体像素在空间中的可能位置、个数、形状和体积等属性时,必须综合考虑屏幕像素尺寸、排列规律及刷新率之间的匹配关系.

假设屏幕像素是长、宽、厚分别为 l, w, t 的长方体,构成以转轴 O 为对称的 $2M$ 列 $\times N$ 行阵列. 显然,前半周期内位于转轴左、右侧的屏幕像素提供的体像素,分别与后半周期内转轴右、左侧屏幕像素提供的体像素的形状及体积一致. 系统

通常采用逐行扫描、所有列同步输出的并行驱动方法,以便在有限的时间内获得较大范围的显示. 在旋转过程中,同一行不同列的屏幕像素具有不同的旋转半径,可能导致各自构造出的体像素个数、形状及体积有所不同;而同一列不同行屏幕像素提供的体像素个数、形状及体积相同,只是方位有所不同. 所以只需研究某行屏幕像素在所处水平面内的旋转特性和提供的体像素属性,即可推知所有行屏幕像素、也就是整个显示屏提供的体像素属性. 因此,下面以位于转轴右侧的第一行共 M 个屏幕像素为研究对象,分析它们旋转一周后提供的体像素属性. 设屏幕像素的间距为 d ,第一个屏幕像素与 O 相距 r ,如图 2(a)所示,其中只示意了两个屏幕像素. 图 2(b)表示屏幕转过不同角度时对应的位置俯视图,标有十字符号的两个屏幕像素转过 α_2 后各自到达未标记任何符号的长方形和标有三角符号的长方形位置,转过 α_1 后只画出与第一个屏幕像素对应的标有三角符号的长方形.

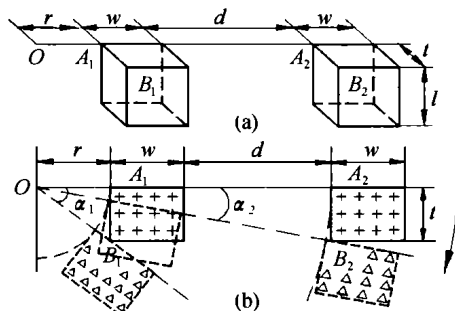


图 2 (a) 屏幕像素的几何形状及排布规律
(b) 屏幕像素绕轴旋转俯视图

Fig. 2 (a) The geometry and arrangement of panel pixels
(b) Top view of panel pixels rotating about the axis

由图 2(b)可知,从 O 向右的第 $1, 2, \dots, M$ 个屏幕像素相对于转轴所成弧度角为

$$\alpha_i = \arctan \frac{t}{r + (i-1)(w+d)} \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

此行屏幕像素旋转后,可在一周内提供的位置互不重叠的体像素个数分别为

$$2\pi/\alpha_1, 2\pi/\alpha_2, \dots, 2\pi/\alpha_M \quad (2)$$

由于体像素是由屏幕像素在一周内瞬态发光形成的,为了不出现闪烁且亮度可观察,应从人类视觉特性和元器件的电学特性出发,选定屏幕像素的状态刷新率,即一周内允许每行屏幕像素瞬时显示不同信息的最高次数 L ,从这个意义上讲,旋转中屏幕像素每更新一次状态,就相当于提供了一个独立的体像素. 因此,从屏幕像素尺寸及排列规律角度,每个屏幕像素一周内可能提供的最高体像素数为 $2\pi/\alpha_i$;而从刷新率角度,每个屏幕像素依据其最快的发光速度或显示响应速度,可能提供的最高体像素数为 L . 所以计算实际有效的体像素个数时,应比较

$2\pi/\alpha_i$ 与 L 的关系并取其中的较小值. 边旋转边显示的特点决定了可以从转角入手,分析二维显示屏提供的体像素有效总量、形状、体积及分布规律,以及屏幕像素参量取值对再现图像的影响.

$$1) L \leq 2\pi/\alpha_i \quad (i=1, 2, \dots, M)$$

这种情况下,每个屏幕像素在一周内提供的有效体像素数均为 L ,显示屏提供的体像素总量 S 为

$$S = N \times (L \times M) = LMN \quad (3)$$

由于一行中每个屏幕像素的旋转半径不同,它们在一周内扫过的轨迹长度也不相同,而这里要求不同周长上包含的体像素数目相同,故可推知不同屏幕像素提供的体像素的各自间隔不同,说明显示空间中体像素的位置分布是各向非均匀的,体像素密度不一致. 情况 1) 也可写为

$$2\pi/L \geq \alpha_i \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (4)$$

式(3)说明 L 取得越大,构成再现图像的体像素越多,图像细节越丰富. 但根据式(1)、(4)可得

$$\alpha_1 = \arctan(t/r) \leq 2\pi/L \quad (5)$$

要满足式(5), t/r 应取较小的值,然而 t 的减小会降低竖直观察方向上的图像亮度及视角范围, t 太小将导致俯视时看不到图像轮廓;而 t 保持一定时,要求 r 较大,这意味着转轴附近没有排布屏幕像素,存在着无法点亮的区域,将影响图像的空间连贯性.

显然,所有 N 行屏幕像素的状态均更新 L 次后,二维显示屏刚好转过一周,对应 2π 弧度角. 由此推知,所有 N 行屏幕像素的状态均更新 1 次后,屏幕转过 $2\pi/L$ 弧度角,如图 3(a)所示;而每行屏幕像素状态更新 1 次对应的弧度角为 $2\pi/(NL)$,相当

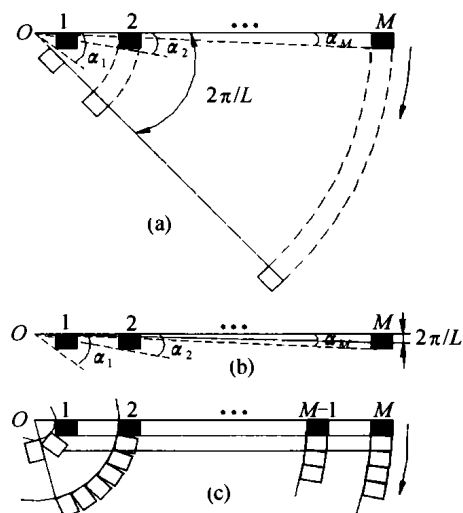


图 3 (a) $2\pi/L \geq \alpha_i$ 时的显示屏俯视图; (b) $2\pi/L \leq \alpha_i$ 时的显示屏俯视图; (c) $2\pi/L \leq \alpha_i$ 时各屏幕像素形成的体像素

Fig. 3 Top view of a display panel with M pixels on each row corresponding to the situation of (a) $2\pi/L \geq \alpha_i$; (b) $2\pi/L \leq \alpha_i$; (c) Voxels created by the pixels of display panel under the situation of $2\pi/L \leq \alpha_i$

于将显示空间等分为 NL 个扇区. 因此, 每行屏幕像素提供的体像素形状及体积取决于 $2\pi/(NL)$ 与 α_i 的大小关系, 前者小于后者时体像素为长方体, 体积为 lwt ; 反之, 体像素为扇形体, 体积是对应离 O 距离处、内外径之差为屏幕像素宽度 w 的环带面积被 NL 等分后, 所得面积与屏幕像素长 l 的乘积

$$V_q = \frac{1}{NL} \pi \{ [r + (q-1)(w+d) + w]^2 - [r + (q-1)(w+d)]^2 \} \times l = \frac{\pi l}{NL} \{ (2q-1)w^2 + 2w[r + (q-1)d] \} \quad (6)$$

$$2) 2\pi/\alpha_i \leq L \quad (i=1, 2, \dots, M)$$

这种情况下, 一行中每个屏幕像素在一周内提供的有效体像素数分别为 $2\pi/\alpha_i$, 体像素总量 S 为

$$S = N \sum_{i=1}^M \frac{2\pi}{\alpha_i} \quad (7)$$

情况 2) 也可转换成如图 3(b) 示意的转角关系

$$2\pi/L \leq \alpha_i \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (8)$$

这时状态更新很快, 对不同旋转半径的屏幕像素可以采用不同的刷新率, 因此, 每个屏幕像素都提供体积为 lwt 的长方体像素, 且离开转轴越远数目越多. 从图 3(c) 所画的三条水平线可看出, 除了转轴附近的屏幕像素外, 其它屏幕像素提供的体像素位置分布是均匀的, 可近似为各向同性的方格状结构, 能很好地描述三维图像细节. 然而, 由于反正切函数 α_i 随着 i 的增加而单调递减, 依式(1)、(8)有

$$\alpha_M = \arctan \frac{t}{r + (M-1)(w+d)} > \frac{2\pi}{L} \quad (9)$$

说明 M 不能取得太大, 否则很难满足式(9), 这使得显示空间横向尺寸受到限制.

$$3) 2\pi/\alpha_j < L \leq 2\pi/\alpha_k \quad (j=1, 2, \dots, m; k=m+1, \dots, M)$$

这是介于 1) 与 2) 间的情况, 也是实际中最为常见的. 这时前 m 个及后 $(M-m)$ 个屏幕像素提供的体像素属性, 分别与 2)、1) 情况相类似, 不再详述. 二维显示屏提供的有效体像素总量 S 为

$$S = N \left[\sum_{j=1}^m \frac{2\pi}{\alpha_j} + (M-m)L \right] \quad (10)$$

3 实验与分析

为了验证上述分析的实验效果, 我们建立了以发光二极管(LED)为屏幕像素的体三维显示系统, 选定几何参量 l, w, t, r, d 分别为 1.6、0.8、0.6、0.8、1.6 mm, 由 128 列 \times 32 行 LED 构成的显示屏在旋转后形成 $\psi 305.6 \text{ mm} \times 76 \text{ mm}$ 的圆柱体显示空间. 实际测得 LED 的配光曲线如图 4 所示, 能基本满足单面 180° 可视的要求.

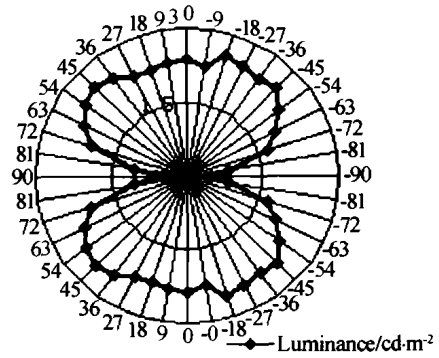


图 4 LED 的配光曲线

Fig. 4 Luminance distribution of LED

根据式(1)(2)可算出从转轴向外第 1~64 个 LED 提供的位置互不重叠的体像素数 $2\pi/\alpha_i$ 分别是 9、33、58、83、109、134、...、1536、1561 和 1586. 如果 LED 刷新率 L 取小于等于 9, 则符合上文情况 1), 此时依式(3)算得屏幕提供的体像素总量只有 18432 个, 不足以在 $\psi 305.6 \text{ mm} \times 76 \text{ mm}$ 显示空间内描绘图像细节. 如果要符合上文情况 2), L 应取大于等于 1586, 这意味着一周内要向显示屏写入 1586 幅二维信息, 且所有信息要在视觉暂留时间、即至少 100 ms 以内显示完毕, 则一幅 128×32 分辨率的二维信息显示时间只有 $63 \mu\text{s}$, 这要求采用高速的存取装置. 在综合考虑了硬件组成、电路结构和系统稳定性等因素后, 所选定器件存取并显示同样分辨率信息的时间约为 $500 \mu\text{s}$, L 最大可取为 200, 实验中采用 120.

由于 $2\pi/(NL) = 2\pi/3840$, $\alpha_{64} = 2\pi/1586$, 根据上文 1) 的分析可知, 建立的体三维显示实验系统提供的体像素均是体积为 0.768 mm^3 的长方体, 有效体像素总量为 235904. 此外, 可算出同一行中各 LED 在水平面内扫过的环带面积, 分别求得从几何角度和从刷新率角度算得的体像素密度, 也就是单位环带面积内的体像素个数, 从而画出体像素密度与离轴距离的关系曲线, 如图 5 所示, 其中只示意了转轴右侧第 1~13 个 LED 提供的体像素密度. 图中连接三角图例的折线表明, 当对旋转半径不同的所有 LED 都采用统一的刷新率 L 时, 体像素密度将随着离开转轴距离的增加而逐渐降低, 在显示空间中表现为转轴附近的体像素密集, 而越往外越稀疏. 体像素的空间密度分布不均匀这一特性, 会导致在显示空间不同位置的同一模型有不同的再现效果, 这是因为原始模型的方位发生变化时, 可供构成再现图像的体像素个数和空间分布也发生了变化. 而图 5 中连接正方形图例的折线表明, 如果对不同旋转半径的 LED, 分别根据由几何角度算出的体像素个数采用不同刷新率 L , 则离转轴不同距离的 LED 提供的体像素密度差别不大, 可望获得空间分布均

匀的体像素,使再现效果与原始模型的定位无关.

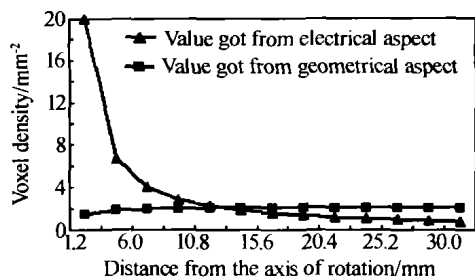


图5 前13个LED提供的体像素密度与其旋转半径关系
Fig.5 Voxel densities provided by the LEDs numbered 1 to 13 versus their corresponding radii of rotation

我们建立的实验系统目前还无法对不同旋转半径的LED采用不同的刷新率,而是统一将 L 取为120,因此出现了与上一段落中分析相吻合的实验现象,如图6所示,其中图6(a)是三维软件创建的飞机模型透视图,图6(b)和图6(c)分别是系统再现的转轴位于左侧机翼边缘和转轴位于飞机头部的飞机图像.显然,图6(b)中左侧机翼和尾翼的细节分别比右侧丰富,图6(c)中飞机中后部的细节不明显,都证实了体像素密度的各向异性会造成图像细节丢失,影响再现质量.此外,图6(c)中飞机头部表现出过于明晰状态,这是因为 L 高于转轴附近前5列LED可提供的位置互不重叠的体像素个数,造成了对应的体像素密度明显高于其它位置,如图5中连接三角图例的折线所示.可用图2(b)说明由此带来的对再现质量的影响,假设 L 与 $2\pi/\alpha_2$ 相等,则 α_1 大于 α_2 将导致未标任何符号的长方形与

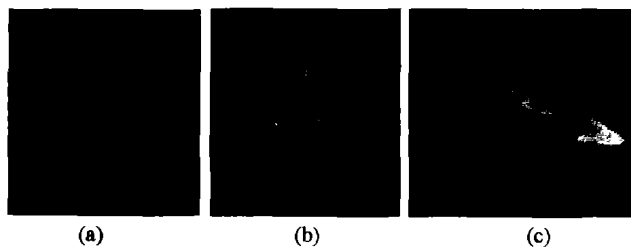


图6 (a)飞机模型的三维透视图;(b)转轴位于左侧机翼边缘的再现图像;(c)转轴位于飞机头部的再现图像
Fig.6 (a)3-D model of a plane;(b)The reconstructed plane imagery with the axis of rotation passing through the edge of its left wing;(c)The reconstructed plane imagery with the axis of rotation passing through its head

标有十字符号的长方形的大部分发生重叠,说明屏幕像素本身尺寸的影响使得状态信息混合,在对应的图像部分表现为亮度过高.

4 结论

对体像素属性的清楚了解,有助于预先评价图像再现质量和系统整体性能,能避免形成样机后难以进行后续修改的情况,对已建样机的进一步优化也有积极的理论指导意义.本文对影响体像素属性的系统参量建模和量化分析,说明了在设计基于旋转二维显示屏的体三维显示系统时,必须综合考虑屏幕像素的几何尺寸、排列规律及刷新率间的匹配;当系统所允许的最大刷新率很高时,可对旋转半径不同的屏幕像素采用不同的刷新率,从而获得各向均匀的体像素分布.建立了LED体三维显示系统,提供了开展三维显示及体像素属性研究的有效实验平台,验证了体像素的空间密度分布不均匀时,会导致在显示空间不同位置的同一模型有不同的再现效果.为了实现空间均匀的三维再现,还有必要进一步优化该实验平台.

参考文献

- Blundell B G, Schwarz A. The classification of volumetric display systems: characteristics and predictability of the image space. *IEEE*, 2002, **8**(1): 66 ~ 75
- Soltan P, Lasher M, Dahlke W. *et al.* Laser projected 3-D volumetric displays. *Proc SPIE*, 1997, **3091**: 96 ~ 109
- Favalora G E, Dorval R K, Hall D M, *et al.* Volumetric three-dimensional display system with rasterization hardware. *Proc SPIE*, 2001, **4297**: 227 ~ 235
- Langhans K, Bahr D, Bezecky D, *et al.* FELIX 3D display: an interactive tool for volumetric imaging. *Proc SPIE*, 2002, **4660**: 176 ~ 190
- 林远芳,刘旭,刘向东,等.基于旋转二维LED阵列的体三维显示系统. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1158 ~ 1162
Lin Y F, Liu X, Liu X D, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1158 ~ 1162

The Analysis of Voxel Attributes in Three-Dimensional Volumetric Display System Based on the Rotation of a Two-Dimensional Display Panel

Lin Yuanfang, Liu Xiangdong, Liu Xu, Zhang Xiaojie

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received date:2003-09-16

Abstract A 3-D volumetric display system, which exploits persistence of vision by quickly scanning a 2-D display panel in rapid rotation so as to reconstruct 3-D images in a volume space, is presented in this paper. Voxel is defined as a graphic unit of information corresponding to one point in a 3-D image space, attributes of which such as the shape, position, total available number and density distribution always influence the perceived image quality and the overall system performance directly. Simulated modeling and quantitative analysis regarding the relationship of voxel attributes to the coupling between the size, the arrangement and refresh frequency of panel pixels are given in detail. In addition, experimental results show that original 3-D model usually has different perceived quality when positioned and oriented in different regions of the image space.

Keywords Information optics; Volumetric three-dimensional display; Voxel; Persistence of vision; Two-dimensional array of LEDs



Lin Yuanfang was born in 1975 in Fujian province. She received M. S. degree from Mechanical and Electrical Engineering Department of Xiamen University in 2000. She is currently studying for Ph. D. in Department of Optical Engineering. Her research is mainly focused on three-dimensional display technology.