

文章编号:1000-5641(2009)04-0115-09

低成本真三维显示器的构建

田丰^{1,2}, 徐劭敏¹, 刘锦高¹

(1. 华东师范大学 电子科学技术系, 上海 200062;
2. 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要: 通过分析已有的几种基于旋转的真三维显示方案, 解释了基于可视体素的显示技术. 针对现有旋转显示方案的局限性和缺点, 提出基于 Cortex-M3 处理器的新型高速同步显示接口, 利用其高速带宽实现体像素空间分布均匀化与体像素亮度均匀化, 获得水平 360° 与垂直 180° 的视角范围和高亮度显示效果.

关键词: 真三维; cortex-M3 处理器; 扫描输出; 同步输出

中图分类号: TN6 **文献标识码:** A

Realization of low-cost true 3D volumetric display system

TIAN Feng^{1,2}, XU Jie-ming¹, LIU Jin-gao¹

(1. Department of Electronics Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Institute of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai University of Engineering and Technology, Shanghai 201620, China)

Abstract: By analysis of existed proposals for true 3D volumetric displays based on rotation, the visual voxel display technology was explained. In order to overcome limitations and shortcomings of current rotation proposals, a new high-speed display interface based on ARM Cortex-M3 was raised. Using its high speed bandwidth, equality of voxel volume and voxel brightness was realized. Finally horizontal 360°, vertical visual 180° visual angle range and high brightness display effect is obtained.

Key words: true 3D; cortex-M3 processor; swept-export; synchronization-export

0 引 言

视觉是人获知信息的一种方式,也是接受信息量最大的感知途径.人眼观看物体时,能清晰看清视场区域对应的分辨率为 $2\ 169 \times 1\ 213$,再算上上下左右比较模糊的区域,最后的分辨率在 $6\ 000 \times 4\ 000$ ^[1].尽管人的视神经厚度只有区区几毫米,但其每秒钟却能够向大脑传输大约 20 MB 的信息^[2].人们不断追求更完美的显示技术,一旦有新的基础理论发现,就

收稿日期:2008-10

基金项目:上海市科技攻关重点项目(075115002)

第一作者:田丰,男,博士研究生,研究方向为立体显示. E-mail: 52071202013@student.ecnu.edu.cn.

通信作者:刘锦高,男,教授,研究方向为通信工程. E-mail: jgl0000@126.com.

会被尝试用来设计创新的显示器,真三维显示是显示领域的终极目标之一.随着电子技术的快速发展,研制大带宽显示接口与真三维立体显示器成为可能.

真三维立体显示技术包括静态体显示技术和体扫描显示技术^[3].体扫描显示技术是依靠显示设备周期性运动构成成像空间.体扫描技术中根据屏幕的运动方式分为:平移体扫描技术和旋转体扫描技术^[3].旋转扫描技术机械部件结构简单、易于集成和加工,故本文低成本像素显示器也采用旋转扫描方案.本文论述了已制作的数代旋转显示方案,提出了基于 Cortex 处理器的新型高速同步显示接口,介绍了系统的结构、性能、转速自测和体像素均匀分布.最后对比扫描输出与同步输出显示方案的具体性能指标,并讨论了需改进之处.

1 真三维旋转显示器架构

把 LED (Light Emitting Diode) 点光源组成线光源,围绕固定轴旋转,可构成平面显示器.图 1(a)是在电风扇叶片上绑定三组红绿蓝 LED 可控线光源,依托电扇高速旋转构成平面显示屏.(b)是 LED 幻映彩球,同样在球内有三组 LED 可控线光源,围绕球体旋转一周构成一帧画面.利用人眼视觉残留现象,能够显示稳定的画面.旋转线光源能构成面显示,旋转面光源能形成三维显示.近几年,我们对真三维显示做了不少基础研究工作,如图 1(c).我们首先采用基于 TFT-LCD(Liquid Crystal Display)屏的方案.栅驱动器与源驱动器是 TFT-LCD 驱动矩阵的两个部分,栅驱动器实现 TFT 行的导通和关断,源驱动器的作用是当栅驱动器通过栅极线使某行 TFT 处于导通状态时,通过屏的源极施加到像素电极上显示相应亮度.它是一个选通扫描过程.常规的 LCD 屏完成一次扫描需十几到几十毫秒.本文尝试使用 LCD 作为显示部件,试验后发现人眼正面观看液晶光源作为体像素感觉不够亮,侧面几乎看不见,由于扫描时间过慢和高速旋转,立体画面已发生严重扭曲变形. LCD 不适用于体空间显示,故改用 LED 阵列,如图 1(d).普通 LED 屏也为行列扫描方式,扫描速率较 LCD 高一个数量级,屏幕旋转后,立体画面基本能被显示出来,但像素亮度太暗,只能在黑暗环境下观看.

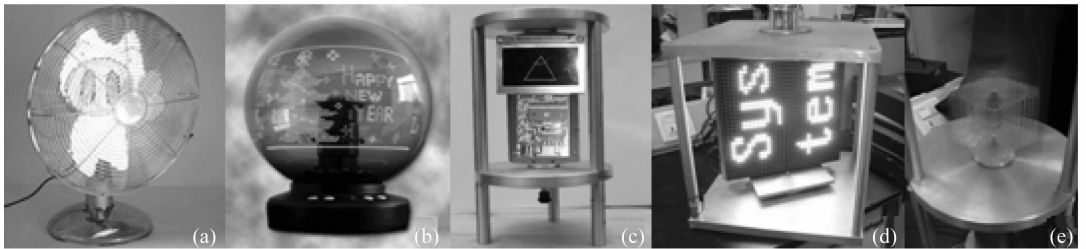


图 1 (a)电扇平面显示器;(b)幻彩球;(c)自主开发的 LCD 旋转显示器;
(d)第一代 LED 旋转显示器;(e)第二代 LED 旋转显示器

Fig. 1 (a) Flat panel display based on fan; (b) Symphony ball; (c) Prototype based on LCD;
(d) The first generation of LED rotating display; (e) The second generation of LED rotating display

本文为解决行列扫描引来的亮度问题,提出了基于新型 ARM Cortex-M3 处理器与 SOC(System On Chip)的高速同步显示接口.如图 2,LED 显示屏由高速马达驱动旋转.体显示器由搭载 SOC 的底板与搭载 LED 的 A 显示板构成.旋转面位于显示板上的 LED 中心.由 PC 处理好的点云数据通过 USB 传入 NIOSII 能寻址的 SDRAM 上,再由 NIOSII 调

度发送给 SPI 群,新型 ARM-Cortex 作为显示单元的核心,通过 SPI 方式手牵手连接.在 Cortex 内部的 SRAM 中打开 Ping Pang 结构,利用处理器提供的 DMA 获得了高通信带宽.一帧画面由行列扫描形成,定义为行列扫描真三维显示;而同步显示是最原始的显示方式,一帧画面几乎在同一时刻完全输出并保持.处理器的一个引脚对应一个 LED.一块面板有 1 024 个 LED,共有 16 个 STM32-Cortex 处理器.如此高密度的布局对硬件设计提出了挑战.LED 面板与第二代 LED 旋转显示器如图 3.

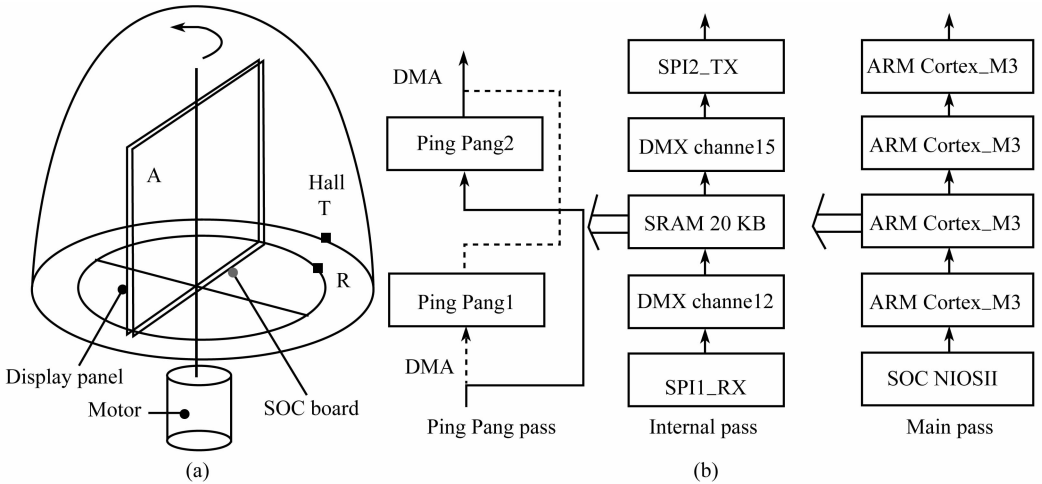


图 2 (a) 旋转屏幕架构; (b) 数据传输流程

Fig. 2 (a) Structure of rotary screen; (b) Data transmission flow

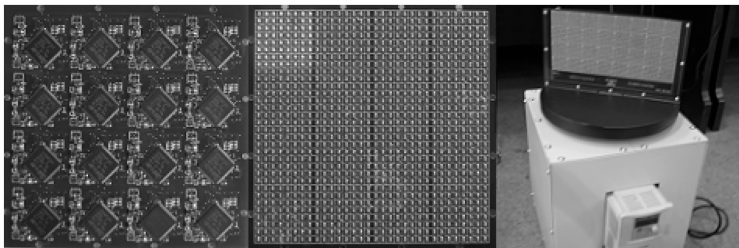


图 3 1 024 点阵模块(反面和正面)和第三代 LED 旋转显示器(搭载 2 个模块的 A 板)

Fig. 3 Board of 1 024 LED and the third generation LED display

2 体像素研究与像素均匀化

2.1 关键部件选择

旋转屏采用 LED 发光二极管作为核心显示部件. LED 是由 III-IV 族化合物半导体制成,其核心为 PN 结.在多种 LED 产品中,我们需选用各项性能指标都能满足立体显示需求的产品.小功率 LED 有多种封装,由于立体显示所需像素小,故本文选择 0603 型表面贴装器件(1.6 mm×0.8 mm×0.6 mm).体像素要求能从各个角度被观察,视角接近 180°,故在用于封装的环氧树脂中加大量无色散射剂.不同材料制得的 LED 响应时间各不相同,如 GaAs(砷化镓)和 GaAsP(磷砷化镓)其响应时间小于 10⁻⁹ s, GaP(磷化镓)为 10⁻⁷ s,因此它们可用在 10~100 MHz 高频系统.我们选用具有高速响应时间的红色 LED,它基于 Epistar

公司提供的晶元芯片,采用 GaAs 材料制成,具有 100 MHz 开关响应时间。

在众多 ARM 产品中,本文选择 ST 公司的基于 Cortex-M3 的 STM32F103 处理器.采用基于架构先进的 Cortex-M3 内核,使得模块控制核心具有低功耗(0.15 mW/MHz)、高性能(CPU = 72 M × 1.25 MIPS/M = 90 MIPS)、多种通信接口和低成本(20 元人民币)等优势.它的功耗是常规 ARM7 的一半,而性能提高了 30%.常规的 ARM7 的 GPIO 只能进行 1 MHz 左右的操作(ARM9200 为 4 MHz),而 STM32F103 的所有 GPIO 可基于高速 APB2 总线,它能进行 18 MHz 操作.系统必须获取电机转速,本文选用 Allegro Micro-Systems 公司的 A1102 霍尔器件来测定转速、计算输出图像的时间间隔和确定初始相位。

2.2 扫描型与同步型体显示器性能分析

由于在行列扫描一幅图像的时候旋转屏已转过一个小角度,虽然所有点阵像素总处于同一平面内,但像素扫描的不同步和点阵的旋转运动将导致前、后两个扫描瞬间产生的体像素不在同一转角方位上.因此当二维平面内的点阵像素均被扫描一次后,在空间内各自产生的瞬态体像素将不再处于同一平面内.所显示的画面也会类似液晶屏一样发生扭曲变形,但由于 LED 进行的高速扫描,使得扭曲变形较小,如图 4(b)(c).设屏幕旋转周期 T_{vision} 约为 $1/15$ s;显示 1 幅图像所需时间为 tp ;三维体分割的图像数目为 L . STM32Cortex 处理器有 64 个通用 IO,可扫描 32×32 个点阵 LED.也可分块使用多个处理器扫描,例如 16×16 或 8×8 .处理器运行在 72 MHz,操作一组 16 个 LED 需读 SRAM 数据然后输出.读 SRAM 指令需 3 个指令周期,程序运行在主频为 24 MHz 的 FLASH 中;操作 IO 需 9 个指令周期. Cortex 完成一次 16 bit 输出时间为 T_{16} ,一个 32×32 模块扫描的时间为 tp ,最大切片数为 L_{max} :

$$T_{16} = T_{\text{readSRAM}} + T_{\text{io}} = \frac{1}{72} \times 3 \times \frac{72}{24} + \frac{1}{72} \times 9 = 0.25 \mu\text{s}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} tp_{\text{scan}32 \times 32} &= (T_{16} \times 2 + T_{\text{io}} + T_{\text{cyclecode}}) \times 32 \\ &= \left(0.25 \times 2 + \frac{9}{72} + \frac{1}{72} \times \frac{72}{24}\right) \times 32 = 21.3 \mu\text{s}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$L_{\text{scan-max}} = T_{\text{vision}} / tp_{\text{scan}32 \times 32} = 66666 / 21.3 = 3130. \quad (3)$$

图 4(a)为理想的 LED 体像素分配图,图 4(b)和 4(c)为行、列扫描体像素分布。

由于 Cortex 处理器的优异性能,21.3 μs 就能完成 32×32 构成的 1 024 点阵扫描, L 理论最大值为 3 130.同理,由 4 组 16×16 构成的 1 024 点阵,其 L 为 9 992,由 16 组 8×8 构成的 1 024 点阵, L 为 19 984.图 4(d)为每像素对应单个 IO 的同步输出分布图.本文模块由 16 组 8×8 构成 1 024 点阵.完成一次同步输出的最大切片数计算如下:

$$tp_{\text{syn}8 \times 8} = T_{16} \times 4 + T_{\text{cycleCode}} = 0.25 \times 4 + \frac{1}{72} \times \frac{72}{24} = 1.04 \mu\text{s}, \quad (4)$$

$$L_{\text{syn-max}} = T_{\text{vision}} / tp_{\text{syn}8 \times 8} = 66666 / 1.04 = 64102. \quad (5)$$

高性能的处理器带来大显示带宽,大大提高分割图像数 L ,扭曲变形已控制在最小范围,同步输出的像素偏移可忽略.软件设置每列或每行偏移角度为 α ,完成 32 次扫描已偏移 $32 \times \alpha$.每幅图像的间隔角度必须和 1 幅图像总偏移角相等才能满足画面在空间上不重叠,如式 6(a).同步输出体显示器的像素接近理想值.满足每幅图像互不重叠的条件如式 6(b).

$$(a): \alpha_{\text{scan}} = 2\text{PI}/M \times L_{p32} = 0.0146^\circ; (b): \beta_{\text{syn}} = 2\text{PI}/L_{p32} = 0.47^\circ \quad (6)$$

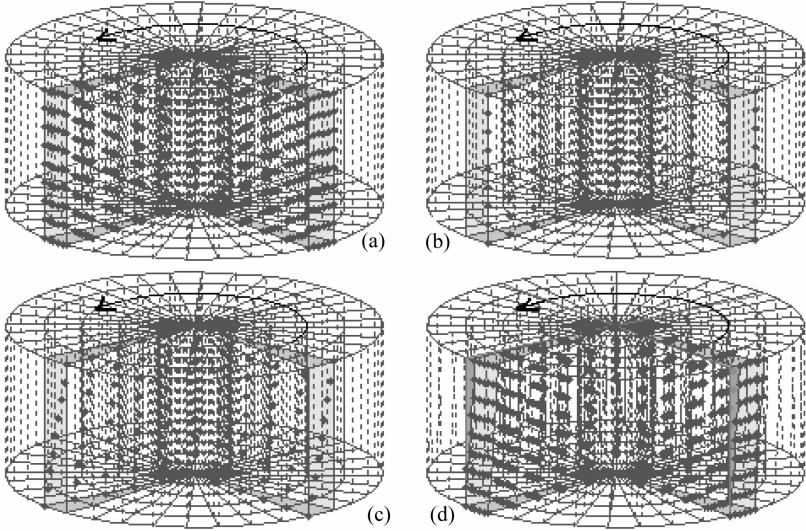


图 4 (a) 理想真三维显示器; (b) 基于列扫描的扭曲变形; (c) 基于行扫描的扭曲变形; (d) 同步输出体显示器

Fig. 4 (a) Ideal display effect; (b) Twisted diagram based on column scan; (c) Twisted diagram based on line scan; (d) Synchronization-export effect

扫描显示的最大问题在于总输出光强,扫描 32×32 点阵的亮度仅为理想亮度的 $1/32$,扫描 8×8 点阵的亮度为理想亮度的 $1/8$. 我们只能在暗室里观看扫描型体显示器. 为了在普通室内环境中观看,需采用图 4(d)的全同步显示(非扫描)方式.

2.3 体像素均匀化与图像引擎制作

可视体素是图像在真三维显示系统中的可视范围内,观察者肉眼可观察到它们的体素集^[4]. 并非 L 越大体像素越多,体像素数量有极限值. 俯视旋转体显示器,体像素为多个等间隔同心圆,同心圆平面在 Z 轴上是相同的. 外围体像素密度低、体积大和相同弧度亮度暗,内侧体像素密度高、体积小和相同弧度亮度高,如图 5(a). 这就表现出内侧体像素重叠与亮度过高的缺点. 要满足所有体像素不重叠必须进行均匀化,如图 5(b).

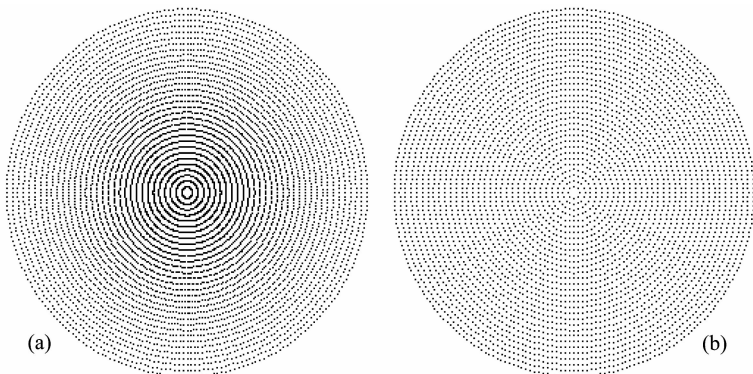


图 5 (a) 像素体积均匀化前亮 1 灭 2 状态下像素分布; (b) 像素体积均匀化后亮 1 灭 2 状态下像素分布

Fig. 5 (a) Distribution before volume equality (1 bright, 2 extinguish); (b) Distribution after volume equality (1 bright, 2 extinguish)

0603LED 尺寸 $L \times W \times H$ 为 $1.6 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$. LED 要形成一个真正的体像素必须有持续发光时间. 调试后发现, LED 滑行 $2H/3$ 所形成的体像素可以达到像素体积小和足够亮度之间的平衡, 如图 6(a), 对应体像素弧长为 1 mm , 故对于最外圈的 LED 发光时转过的角度为 0.188° , 弧长 0.4 mm , 点亮时间为 $34.7 \mu\text{s}$, 关闭角度为 0.752° , 弧长 0.6 mm , 时间为 $52.05 \mu\text{s}$. 实际系统中 LED 中心间距 r 为 3.82 mm , 共 32 圈, 最外 LED 旋转半径为 122.24 mm . 不同旋转半径 LED 扫描像素相对于转轴的夹角如图 6(b). 每圈提供的互补重叠的有效体像素个数 NUM 与每圈画面 L 为

$$\theta_i = \arctan \frac{H + \frac{2}{3}H}{i \times r} = \arctan \frac{1}{i \times 3.82}, \quad (i = 1, 2, \dots, 32);$$

$$L_{pi} = \text{NUM}_i = \text{INT}\left(\frac{2(\pi)}{\theta_i}\right). \quad (7)$$

当 $\frac{2\pi}{L} \geq \theta_1$ 时, 如图 6(c). L 越大可提供的体像素越多. 计算一组面板提供的有效体像素

$$Z_{\text{total}} = L_{pl} \times M \times N = 24 \times 32 \times 32 = 24\ 576. \quad (8)$$

当 $\frac{2\pi}{L} \leq \theta_{32}$ 时, 如图 6(b). 无论 L 多大, 体像素都有个极限值. 体显示器装备 2 个 32×32 模块以构成 A 面板, 如图 2(a). 面板提供的有效体像素为

$$Z_{\text{total}} = N \times \sum_{i=1}^M \text{NUM}_i = 32 \times \sum_{i=1}^{32} \text{INT}\left(\frac{2\pi}{\theta_i}\right) = 405\ 504. \quad (9)$$

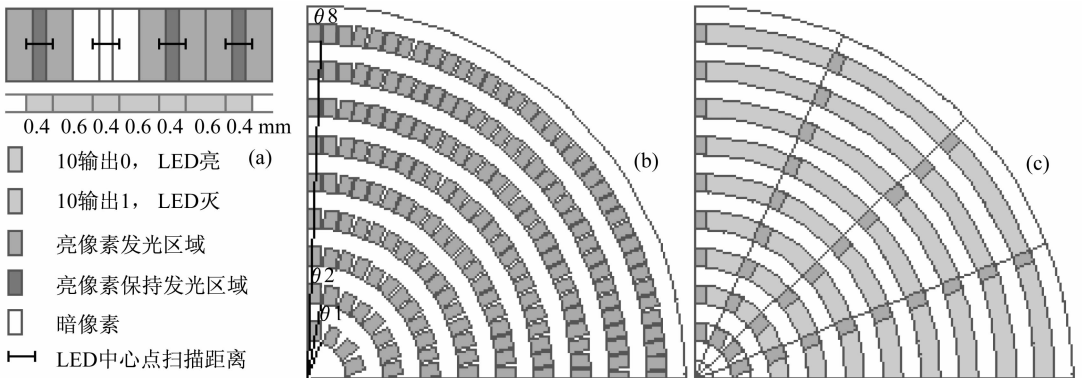


图 6 (a) 像素亮灭属性; (b) $L > L_{p32}$ 时互不重叠体像素分布;

(c) $L < L_{p1}$ 时互不重叠体像素分布

Fig. 6 (a) Voxel character of bright extinguish; (b) No overlap when $L > L_{p32}$;

(c) No overlap when $L < L_{p32}$

不同旋转半径 LED 构成的有效体像素所转过的角度不同, 如图 7(a), 最外圈扫过弧长 0.4 mm 的角度为 0.188° , 最内圈扫过 0.4 mm 的角度为 6° , 由于系统提供的 L_{max} 为 $64\ 102$, 提供的分辨率为 $0.005\ 616^\circ$, 完全可以细分出子像素. 屏幕以 15 r/s 的频率旋转, 系统时钟由霍尔器件和处理器内部定时器来确定, 像素体积均匀化使内圈和外圈的像素密度一致, 体积均匀化后内圈表示一个像素的时间较外圈长, 故 LED 发光时间也长, 内圈像素亮度高于外圈.

体积均匀化后还必须做亮度均匀化. 点亮外圈和内圈 LED 的时间保持一致. 单像素

(1 mm)发光的总时间 T_i 与子像素 TR_i 为

$$T_i = \frac{T_{\text{vision}} \times P_i}{\text{NUM}_{32} \times Z_{32}} = \frac{666\ 66 \times 10}{768 \times 25} = 34.7\ \mu\text{s}, \quad (i = 1, 2, \dots, 32), \quad (10)$$

$$TR_i = \frac{T_i}{P_i} = \frac{34.7}{10} = 3.47\ \mu\text{s}, \quad (i = 1, 2, \dots, 32). \quad (11)$$

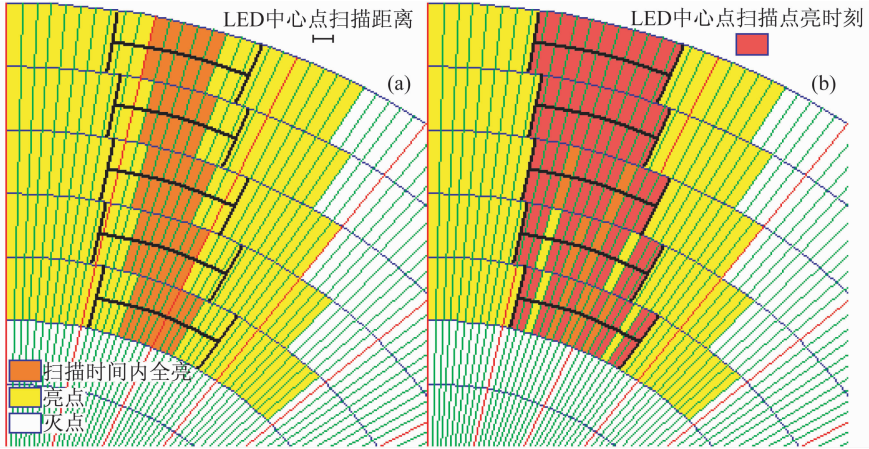


图 7 (a) 体像素大小均匀化; (b) 体像素亮度均匀化

Fig. 7 (a) Equality of voxel volume; (b) Equality of voxel brightness

系统拥有 $1.04\ \mu\text{s}$ 的输出能力, 本文使用定时器把输出延迟设定在 $3.47\ \mu\text{s}$. 如图 7(b), 最外圈需点亮 10 次可扫过 $0.4\ \text{mm}$ 的弧长. L_i 为第 i 圈 $1\ \text{mm}$ 像素对应的子像素数, 外圈单像素包含少, 内圈包含多. P_i 为 $1\ \text{mm}$ 像素对应点亮次数, 为保持亮度均匀, 每圈的 $1\ \text{mm}$ 像素都只能被点亮 10 次, Q_i 为熄灭次数. P_i 与 Q_i 必须对称间隔, 各圈的间隔参数在各模块处理器内保存, 红色对应 P_i , 土黄色加明黄色对应 Q_i , 此方法类似 PWM 调光法. L_i 计算如下:

$$L_i = \frac{768 \times 25}{24 \times i}; P_i = P_{32} = 10; Q_i = L_i - P_i = \frac{800}{i} - 10, \quad (i = 1, 2, \dots, 32). \quad (12)$$

系统采用 3DMAX 生成可视体素, 使用 ASE 文件格式便于基于 VB 制作的图像引擎读取并处理数据. 3DMAX 数据源与第 3 代真三维显示器如图 8. 图像引擎的功能就是将原始空间的图像数据转换成符合显示单元的几何特性, 然后输入显示单元^[5]. 主要步骤如下:

首先把三维笛卡儿坐标转换为三维极坐标, 对于所有亮像素 (x, y, z) ,

$$(\theta, r, z) = (\arctan(y/x), \sqrt{x^2 + y^2}, z). \quad (13)$$

对均匀化前的体像素归一化,

$$(\theta, r_{\rightarrow 1}, z_{\rightarrow 1}) = (\arctan(y/x), 32 \times \sqrt{x^2 + y^2} / (\sqrt{x^2 + y^2})_{\max}, 32 \times z / z_{\max}). \quad (14)$$

重复式(13)和(14)以记录均匀化前所有位置需显示的信息. 然后根据式(7)均匀化切割方法所提供的每圈切割角度, 对每一圈进行分别切割, 最后再叠加每圈的显示信息. 根据式(12)可计算出子像素亮与灭的个数, 根据处理器内部设置确定子像素亮与灭的分布.

2.4 体显示器参数比较与优势

表 1 为行列扫描真三维显示器与同步真三维显示器的具体数据比较.

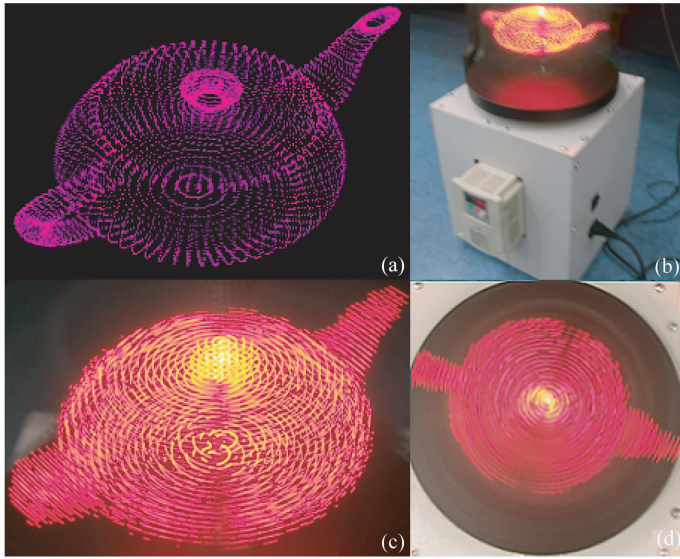


图 8 (a) 3DMAX 数据源;(b) 室内光照度下的显示效果;(c) 均匀化后的效果;(d) 顶视图
Fig. 8 (a) 3DMAX data;(b) Display effect under indoor light;(c) Effect after equality;
(d) Picture from vertex

表 1 行列扫描与同步体显示器比较

Tab. 1 Compare swept-export with synchronization-export

	扫描显示	同步显示
体像素	1 306 624×2(重叠,非有效)	405 504×2(不重叠,有效)
最大切割画面 L/个	3 130	64 102
最外像素弧度/mm	0.612 5	1
像素大小/(mm×mm×mm)	1.6×0.8×0.612 5(最外圈)	1.6×0.8×1
显示体积/mm ³	$\text{PI} \times (121.92)^3$	$\text{PI} \times (121.92)^3$
色彩灰度/级	1	10
画面亮度比	1/32(32×32LED); 1/8(8×8LED)	1
画面扭曲变形	小	极小
均匀化算法	算法过于复杂,未均匀化	已制作

在高性能处理器阵列的支撑下,行列扫描与同步显示最大区别在于显示图像的亮度,而不在于画面扭曲变形. 本文的 LED 屏并不能像普通 LED 大屏幕那样有大量 595 芯片寄存数据,而且我们的面板空间无论如何也不允许用大量寄存器芯片,故扫描阵列显示第 1 行数据,其它任何一行的 LED 都是关闭状态(对每个 LED 操作都只能看作为 PWM 方式). 而本文采用的图 4(d)同步输出的方案并不存在这个问题,每个显示数据都可被 GPIO 寄存. 假设本文提供的显示器亮度为 1 的话,32×32 扫描型显示器的亮度就是 1/32. 为了实现近 180°垂直视角,我们要求 LED 制造商对使用的 LED 加入大量散射剂,亮度比普通 0603 表贴 LED 大为降低,再加上需要旋转显示,亮度是关键问题. 如采用扫描方案,显示器亮度将有 1 个数量级的降低,显示器就不能在普通室内环境下观看(必须关闭室内照明灯才能看),而且在顶视方位亮度更低,不可能实现近 180°垂直视角的范围.

同步显示中的嵌入式图像引擎软件,原型简单和易于实现. 对于同步显示,本文已完成体像素体积与亮度的均匀化,并使得体像素在空间内互不重叠.

3 结 论

在真三维显示领域,被显示的信息量是平面显示信息量的几个数量级.得益于近年电子技术的飞速发展,使得设计具有一定实用价值的真三维显示器成为可能.本文对先期的旋转屏做了数项改进,提出基于新型 ARM 和 FPGA 的同步显示方案,并完成体像素体积和亮度均匀化,获得水平 360° 与垂直 180° 视角范围,并提高系统整体性能和图像再现的亮度,其软硬件结构简单,且成本低廉.由于 LED 有封装体积的极限,利用 LED 组成显示屏分辨率较低,发光体像素较大.为了增大分辨率,形成市场化的产品,我们正继续探索基于 DLP 投影的方案,并已着手研制超高速投影机.本文论述的高速数据传输的显示方案及已开发的图像引擎一定能够在今后的研究开发中得到继承.

[参 考 文 献]

- [1] 胡峻源.人眼的分辨率是多少,能识多少种色[EB/OL]. [2006-7-28]. <http://sina4.com.cn/>.
HU J Y. How much of human eyes' resolution[EB/OL]. [2006-7-28]. <http://sina4.com.cn/>.
- [2] 伊凡.美科学家成功测算出人眼视觉信号传输速度[EB/OL]. [2006-7-31] <http://tech.tom.com/>.
YI F. U S scientists measured transmission speed of human's visual signal successfully[EB/OL]. [2006-7-31] <http://tech.tom.com/>.
- [3] 姜盈,王惠南.真三维立体显示系统中平移体扫描技术研究[J]. 计算机应用, 2006, 26(1): 135-137.
JIANG Y, WANG H N. Study of translational motion swept-volume techniques in the true 3D volumetric display systems[J]. Computer Applications, 2006, 26(1): 135-137.
- [4] 姜太平,沈春林.真三维立体显示系统中的体视观察算法分析与实现[J]. 航空电子技术, 2007, 38(3): 20-24.
JIANG T P, SHEN C L. Analysis and realization of the volume viewing in the true 3D volumetric display system [J]. Avionics Technology, 2007, 38(3): 20-24.
- [5] 丁琴,王惠南.真三维立体显示技术中体扫描技术的图像引擎研究[J]. 光电子技术, 2006, 26(2): 101-105.
DING Q, WANG H N. Study of the graphics engine in swept-volume technique of true 3 D volumetric display[J]. Optoelectronic Technology, 2006, 26(2): 101-105.

(上接第 81 页)

- [3] HARAUX A, ZUAZUA E. Decay estimates for some semilinear damped hyperbolic problems[J]. Arch Rational Mech Anal, 1998, 150: 191-206.
- [4] LEVINE H A. Instability and nonexistence of global solutions of nonlinear wave equation of the form $Pu_t = Au + F(u)$ [J]. Trans Amer Math Soc, 1974, 192: 1-21.
- [5] LEVINE H A. Some additional remarks on the nonexistence of global solutions to nonlinear wave equation[J]. SIAM J Math Anal, 1974(5): 138-146.
- [6] ZHOU Y. A blow-up result for a nonlinear wave equation with damping and vanishing initial energy in \mathbf{R}^n [J]. Appl Math Lett, 2005, 18: 281-286.
- [7] ZHOU Y. Global existence and nonexistence for a nonlinear wave equation with damping and source terms[J]. Math Nachr, 2005, 278: 1341-1358.
- [8] KOMORNIK A, ZUAZUA E. A direct method for the boundary stabilization of the wave equation[J]. J Math Pure and Appl, 1990, 69: 33-54.
- [9] ZUAZUA E. Uniform stabilization of the wave equation by nonlinear boundary feedback[J]. SIAM J Control and Opt, 1990, 28: 466-477.
- [10] DAFERMOS C M, HRUSA W J. Energy methods for quasilinear hyperbolic initial value problems. Applications to elastodynamics[J]. Arch Rational Mech Anal, 1985, 87: 267-292.
- [11] HUGHES T J R, T KATO, MARSDEN J E. Well-posed quasilinear second order hyperbolic systems with applications to nonlinear elastodynamics and general relativity[J]. Arch Rational Mech Anal, 1997, 63: 273-294.