

文章编号:1007-2780(2016)05-0518-06

固态体积式真三维立体显示效果优化

芦云龙^{1,2,3}, 盛杰超^{1,2,3}, 方 勇^{1,3}, 吕国强^{1,3*}

- (1. 合肥工业大学 特种显示技术教育部重点实验室 特种显示技术国家工程实验室
现代显示技术省部共建国家重点实验室, 安徽 合肥 230009;
2. 合肥工业大学 科学技术研究院, 安徽 合肥 230009;
3. 合肥工业大学 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为了优化固态体积式真三维的立体成像效果, 显示出更加逼真的立体图像, 对编码图像的灰度级和成像显示体的对比度进行了研究。论文从固态体积式真三维立体显示器成像原理出发, 介绍了固态体积式真三维的电路系统、光学投影系统和成像显示体, 在分析和研究影响立体显示效果的主要因素后提出了两种改进的方法。一种方法是通过降低图像刷新频率, 提高编码图像数据位数, 从而提高像素灰度等级, 另一种方法是改变液晶光阀的盒厚, 以此增强显示体的对比度。在真三维样机上, 成功实现了 32 级灰度, 将颜色种类从 4 096 种提升至 32 768 种, 对比度相比原样机提高了 1.2 倍, 主观感受到更加丰富的图像细节和色彩。优化效果明显, 可以显示出细节更加清晰、颜色更加丰富和效果更加真实的三维立体图像。

关 键 词: 固态体积式真三维; 灰度级; 液晶光阀; 对比度

中图分类号: TP391; TN27 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20163105.0518

Optimizing effect of solid volumetric true 3D display

LU Yun-long^{1,2,3}, SHENG Jie-chao^{1,2,3}, FANG Yong^{1,3}, LV Guo-qiang^{1,3*}

- (1. *Key Lab of Special Display Technology, Ministry of Education, National Engineering Lab of Special Display Technology, National Key Lab of Advanced Display Technology, Academy of Opto-Electronic Technology Hefei 230009, China;*
2. *Academy of Telecommunication Technology Hefei 230009, China;*
3. *Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*)

Abstract: In order to optimize the effect of solid-state volumetric true 3D display and show even more realistic 3D images, this paper researched the grayscale of coded images and the contrast of display volume. The paper introduces solid-state volumetric true 3D display's circuitry system, optical projection and the imaging display volume, according to the imaging principle of solid-state volumetric true 3D display. After analyzing and studying the main influences on the effect of 3D display, we come up with two methods to improve it. One way is reducing the image refresh rate and increasing the

收稿日期: 2016-01-06; **修订日期:** 2016-02-29.

基金项目: 国家 863 项目 (No: 2012AA011901)

Supported by National High Technology Research and Development Program 863 (No. 2012AA011901)

* 通信联系人, E-mail:

number of encoded image's bits to improve the pixel's gray level. Another method is changing the thickness of the liquid crystal light valve to enhance the contrast of the display volume. On the model machine of true 3D display, we not only succeed in achieving 32 levels of grayscale to increase the range of color from 4 096 to 32 768 and improve 1.2 times on contrast compared to the original model machine, but also can feel richer details and colors in image. The optimizing effect is obvious, and it make the machine show the details much clearly, the colors richer and the effect of 3D images more realistic.

Key words: solid-state volumetric true 3D display; grayscale; liquid crystal light valve; contrast

1 引 言

随着立体显示技术的发展,人们不再仅仅满足于平面图像的显示,进而追求更加真实的三维立体(3D)图像。立体显示技术具有不同的实现原理,大致可以分为裸眼视差、全息投影、真三维立体显示等。相比较于其他显示技术,真三维立体显示技术可以呈现真实的、不发生形变的三维立体图像,不仅具有物理和心理景深,同时不需要配带任何辅助观看设备,而且长时间观看不会出现视觉疲劳^[1-7]。因此,真三维立体显示技术具有很高的研究价值和应用前景。

固态体积式是真三维立体显示中的一种类型,它是由多层液晶光阀堆叠体构成显示体,每层依次成像,从而显示立体图像。合肥工业大学开发的固态体积式真三维系统样机^[1-6]是由 20 层液晶光阀和高速投影光学系统构成,基于美国德州仪器(TI)的 DMD(Digital Micro-mirror Device)投影技术。该工程样机能够显示立体图像,但显示效果不够清晰,部分细节处会出现模糊,针对以上这两种立体显示效果缺陷,本文在固态体积式真三维成像原理的基础上,对影响立体显示效果的因素进行了分析和研究,提出了两种改进的方法和措施,并在真三维样机上进行了测试,观察了改进后的显示效果。人眼可以观察到更加清晰、细节和色彩更加丰富的三维立体图像。

2 固态体积式真三维成像原理

固态体积式真三维系统可大致简单地分成以下 3 部分:第一部分为电路系统,主要用于图像编解码和系统控制;第二部分为光学投影系统,主要用于图像高速投影;第三部分为成像显示体,主要

用于图像显示与切换。图 1 简单地描述了真三维系统实现的原理。首先,待显示的三维图像由电脑的 DVI(Digital Visual Interface)接口输出,传送至图像发生器中;再由图像发生器同时输出 RGB(红绿蓝)三通道的数据到 DMD 上;然后,投影的图像经过折叠光路后投射到成像显示体的平面上;最后,显示体通过成像层切换的位置与图像发生器所提供的投影顺序信号相同步,使投影的图像依次成像在不同显示体平面上。系统最终成功呈现出了一幅具有深度信息的三维立体图像。

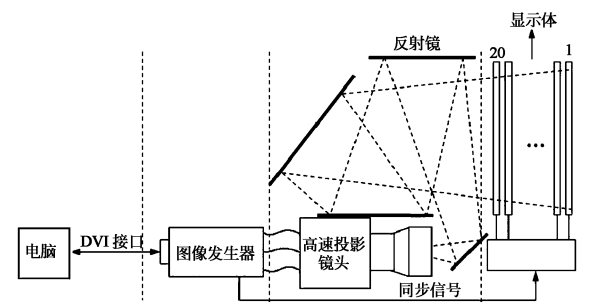


图 1 固态体积式真三维系统原理图
Fig. 1 Schematic of solid-state volumetric 3D display

电路系统中有多个模块,各个模块负责不同的功能。视频解码模块是将输入的 TMDS (Transition-minimized Differential Signaling) 信号解码成标准的 RGB 信号,方便数据后续的接收和处理;主控板模块则是对解码模块输出的 RGB 信号进行立体图像重构,在一帧的时间内生成 20 幅切片图像的数据,通过 LVDS (Low-voltage Differential Signaling) 差分信号接口传输到 DMD 控制板,控制 DMD 显示。

光学投影系统包括了光源、分色棱镜、中继系统、数字微镜、投影镜头和折叠光路。光源采用超高压直流汞灯(UHP),构成了照明系统;分色棱镜则是将光源出射的白光分成红绿蓝三色光后传

导进中继系统;中继系统不仅提供照明光路,同时衔接了照明光路和投影光路^[4-5];DMD 是投影光路中最重要的部分,主要是成像后对入射光进行调制,三者同时反射出红绿蓝三色光;合色后生成图像,并由投影镜头出射;投射出来的光线经折叠光路中具有高反射率的反射镜进行了四次反射。

成像显示体由多层液晶光阀构成,每层液晶光阀有透明态和散射态两种状态。在一幅切片图像投影的时间内只有一层处于散射态,其它全部处于透明态。随着光学投影系统投影出不同的图像,同时液晶光阀切换透明态和散射态不同状态,依次循环,利用人眼视觉暂留的特性,呈现出具有不同深度观感的立体图像。

3 提升立体显示效果研究

3.1 提高灰度等级

在立体图像显示的过程中,原样机在一些细节精致或者色彩非常丰富的图像处较容易出现模糊。原因是原样机的图像灰度等级偏小,能够实现的颜色种类不足以显示图像比较精致的细节和丰富的色彩,因此容易丢失图像原本的特征,出现模糊不清的结果。这种情况可以等效于低分辨率显示器显示高分辨率图片时,图片会出现颗粒感,放大后像素模糊。原样机的灰度等级为 16 级,即颜色种类为 4 096 种(16×16×16)。

该真三维立体显示系统的显示图像通过 DVI 接口高速传输数据,海量的数据从 PC 机传送到解码模块。传输的格式为 XGA,则每帧图像的分辨率为 1 024×768,图像刷新率为 60 Hz。与普通平面图像不同的是,它是由立体(3D)图像重构得到,RGB 像素数据中同时融入了灰度和深度信息,对图像编码的工具主要基于 OpenGL 平台^[6]。图 2 为 3D 原图像和编码后的人脸图像。

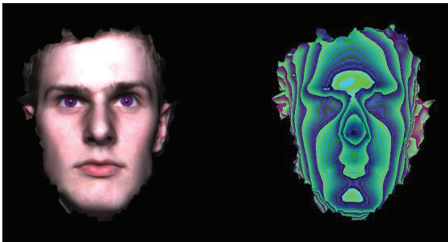


图 2 原图像和编码后图像

Fig. 2 Original image and coding image

立体空间的成像比平面图像多了一个空间维度,在深度方向也存在像素分辨率。其三维空间模型可以类似地映射到右手笛卡尔坐标系(x, y, z)^[7]。因此显示体的体像素不仅仅需要包括 RGB 颜色信息(X, Y 轴方向),还需要携带深度信息(Z 轴方向)。具体编码的方法是将深度信息融合进 RGB 颜色信息,可称之为 RGBZ 编码^[8]。DVI 接口传输原理基于最小化传输差分信号(TMDS)。如图 3 所示,RGBZ 编码图像中每个体像素共包含了 24 bits 数据,R、G、B 子像素各占 8 bits,其中单像素灰度值为 4 位,深度值共 10 位。比特位从高到低按照 4-3-3 顺序排列方式。深度值用十位二进制表示,深度方向的分辨率大小为 608,所以深度值大小范围从 0~1 023,有效深度分辨率的范围从 0~607。

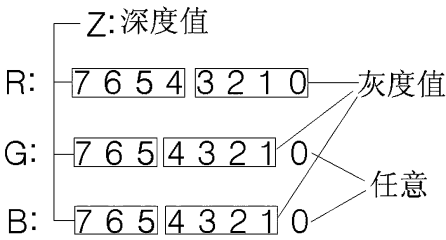


图 3 4 位色体像素编码
Fig. 3 4 bits volume pixel coding

然而原样机采用的这种编码方式只能实现 4 位色,即 16 级灰度,在图像的色彩丰富性上会有所欠缺,带来了所提及的图像模糊问题。而解决这个问题的根本方法是提高图像的灰度等级。

核心成像器件 DMD 可以高速投影图像,最高投影频率为 32 550 帧/s。其灰度等级实现方式是以二进制脉宽调制(PWM)的方式工作,0 和 1 分别对应 DMD 的“关闭”和“开启”^[9]。4 位的颜色信息值代表了关闭或开启的显示时间,利用时间调制法,将显示时间的权值从 LSB 到 MSB 依次设定为 $2^0, 2^1, 2^2, 2^3$,这样整个显示时间划分为了 15 份,间隔为 $1/(2^4 - 1)$,依次为 1/15, 2/15, 4/15 和 8/15。

DMD 投影频率 F 可以采用公式(1)计算:

$$F = f_h \times z \times (2^n - 1), \tag{1}$$

其中: f_h 为图像刷新率, z 为液晶光阀层数, n 为颜色位数,本文中 $z=20$,该取值是为了保证立体图像有足够的深度,从而保证立体效果。

由此可以计算得到原样机的 DMD 投影频率为 18 000 帧/s。假设此时提升颜色位数至 5 位,则 DMD 投影频率 37 200 帧/s,明显超出了 DMD 最高投影频率。为了提升灰度等级,解决色彩欠缺的问题,同时在 DMD 投影频率的上限范围内,于是将图像刷新率由原来的 60 Hz 降低为 50 Hz。硬件上的实现方式是通过 SDRAM 对图像进行缓存,存 6 幅取 5 幅的操作,则 z 值由 60 减小为 50。同时,经过观察也可以验证,将图像的刷新频率降低为 50 Hz 并不会出现任何图像显示的问题。而此时 DMD 投影频率为 31 000 帧/s,小于最高投影频率 32 550 帧/s,故达到了使用的要求。

然后重新设计了图像编码方式。如图 4 所示,深度值不变,仍为 10 位(4、3、3 排列),RGB 单像素的灰度值增加为 5 位。由于深度值位数和像素位数共有 25 bits,与 24 bits 的数据宽度相比总位数多了 1 个 bit,所以采用在子像素 R 的 LSB 填补一位色的方法。具体实现方法为:该一位色决定 Z 方向的深度值选择哪个大小范围,从 0~607,或者从 608~1 023。若该一位色值为“1”,则 $0 \leq \text{深度值大小} \leq 607$,有效的深度分辨率即 0~607;若该一位色值为“0”,则 $608 \leq \text{深度值大小} \leq 1\,023$,由深度值大小减去 608 可得到有效的深度分辨率即 0~415(空缺部分 192)。当然,由于深度值位数限制,当子像素 R 的 LSB 为“0”时,不能完全用深度值的不同范围来表示,但是因为空缺部分所占比例不大,而且只是子像素的最低有效位,对结果影响甚微,因此可以忽略不计。



图 4 5 位色体像素编码
Fig. 4 5bits volume pixel coding

这样改进后的编码方式既未突破 DMD 投影帧率的上限,又保持了原有的数据流量,并且不会带来图像显示的问题,但是可以提高一倍

的灰度级,颜色种类从 4 096 种提升至 32 768 种,进而可以显示更加丰富的色彩,还原更多的图像细节。

3.2 增强对比度

成像显示体是由 20 层液晶光阀依次堆叠而成,每层液晶光阀则是由两层电子玻璃基板和聚合物液晶材料构成。两层玻璃基板间的距离称为盒厚,48 cm(19 in)系统中使用的液晶光阀盒厚为 8 μm 。液晶光阀的成像原理是当液晶光阀两端引出的电极加上阈值电压后,会在液晶盒内部形成电场^[10-11]。液晶分子在电场作用下垂直于玻璃基板排列,这时入射光不会发生散射,液晶光阀呈现透明态,即非成像状态,如图 5(a)所示。当撤去电压后,在聚合物的作用下,液晶分子呈焦锥织构态(FC 态)分布,这时入射光会发生散射,液晶光阀变成散射态,即成像状态,如图 4(b)所示。

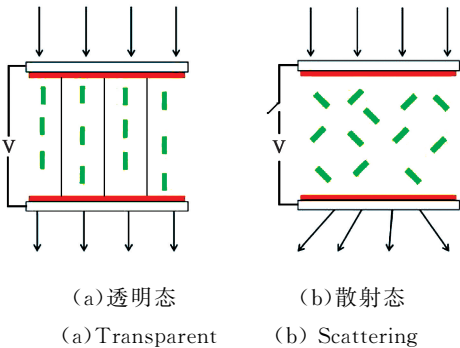


图 5 液晶光阀工作原理
Fig. 5 Operating principle of liquid crystal light valve

随着投影图像的变化,同时电路驱动模块控制液晶光阀分别加电和去电,成像层的位置也随之发生相应变化。当输入图像的帧率为 50 Hz 时,每一次切片图像投影时间为 1/1 000 s,此时要求液晶光阀在该时间内迅速完成开启,成像,关

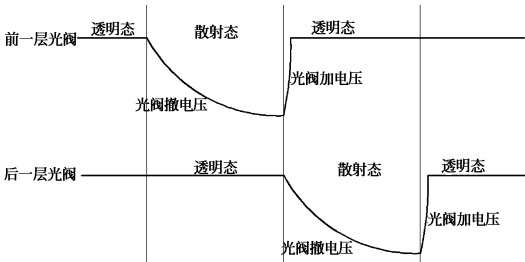


图 6 液晶光阀光电特性曲线
Fig. 6 Optical characteristic curve of liquid crystal light valve

断 3 段过程,工作状态的转变为透明态-散射态-透明态。图 6 为光电探测器和示波器测得的液晶光阀光电特性曲线,其对应了 3 段过程,可以清楚地表示出每层液晶光阀的工作时序。

衡量液晶光阀的重要指标之一是开关比,散射态透过率越低,透过态透过率越高,则开关比越高,投影的图像成像越清晰;相反,散射态透过率越高,透过态透过率越低,则开关比越低,成像越模糊。由此可以得到,液晶光阀的开关比影响了成像的清晰度,对立体成像效果起着至关重要的作用。从整个显示体成像特性上来分析,在其它条件不变的情况下,可以用开关比来衡量显示体的对比度。经过多次试验,发现不同盒厚的聚合物稳定胆甾相液晶(PSCT)液晶光阀^[11]在透明态透过率和散射态透过率上存在差异。

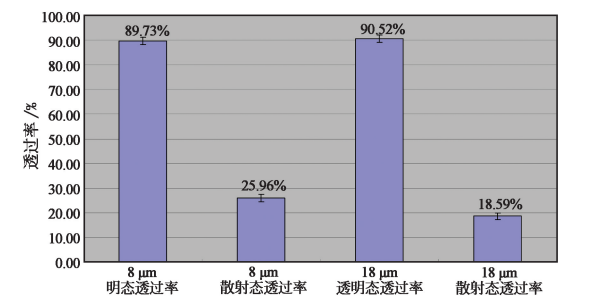


图 7 透明态和散射态透过率

Fig. 7 Transparent state and scattering state transmittance

图 7 所示为 8 μm 液晶光阀与 18 μm 液晶光阀的透明态透过率和散射态透过率。为了确保测试的准确性,各组透过率值经过 10 组测试后取平均值得到。测试平台使用了 LED 白色光源,光电探测器和示波器。从以上直方图中可以得到,18 μm 液晶光阀透明态透过率与 8 μm 液晶光阀透明态透过率比较接近,透过率都在 90% 左右,而 18 μm 液晶光阀的散射态透过率比 8 μm 液晶光阀低 7% 左右。开关比提高的倍数 i 具体可由公式(2)求得:

$$i = \frac{25.96\% \times 90.52\%}{18.59\% \times 89.73\%} = 1.65 \quad (2)$$

综上所述,采用盒厚 18 μm 的液晶光阀比盒

厚 8 μm 的液晶光阀的平均开关比理论上提高了 1.65 倍,而开关比的提高使成像更加清晰。

4 样机测试

为了评估改进后的立体显示器显示效果,我们采用对比度作为客观评价指标,同时采用多人对相同图像观察后做主观评价的综合评价方法。其中对比度测试方法采用标准黑白格图像和 TOPCON 公司的亮度计。测得多组对比度的平均值约为 57,相比原样机提高了 1.2 倍,从主观评价上立体图像相比原样机能显示成像物体更多的细节特征,色彩更加鲜艳。



图 8 优化前和优化后的真三维立体图像

Fig. 8 True 3D image of before and after optimization

图 8 为真三维系统样机上优化前和优化后显示的立体图像,相比较可以看出,优化后颜色更加真实,能够较清楚地显示出老虎牙齿、胡须等细节特征,一些花草也能生动地呈现出来。

5 结 论

本文在固态体积式真三维工作原理的基础上,对真三维立体显示的效果进行了优化。为了更好地满足人眼的视觉特性,解决立体显示的缺陷,首先通过在不影响成像的情况下降低图像刷新频率,同时改进编码方式,从而提高像素灰度等级,然后利用液晶光阀盒厚对开关比的影响来增强成像显示体对比度。最终成功地在真三维系统样机上实现了 32 级灰度显示,把能够显示的颜色种类从 4 096 种提升至 32 768 种,同时对比度提高了 1.2 倍左右,提升了真三维立体显示的效果,弥补了显示的缺陷。

参 考 文 献:

[1] 吕国强,胡跃辉,张涛,等. 立体显示的现状、机遇与建言[J]. 真空电子技术,2011(5):22-27.
LÜ G Q, HU Y H, ZHANG T, et al. Current situation and development opportunities of 3D display [J]. Vacuum

- Electronics*, 2012(5): 22-27. (in Chinese)
- [2] SULLIVAN A. Depthcube solid-state 3D volumetric display [C]. *Proceedings of the SPIE 5291, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI*, San Jose, CA: SPIE, 2004, 5291: 279.
- [3] LV G J, WANG Q H, WANG J, *et al.* Multi-view 3D display with high brightness based on a parallax barrier [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(12): 121101.
- [4] 杨光磊,井长龙,裴治棋,等. 固态体积式真三维立体显示器[J]. 液晶与显示, 2015, 30(1): 137-142.
YANG G L, JING C L, PEI Z Q, *et al.* Solid-state volumetric true 3D display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 137-142. (in Chinese)
- [5] FENG Q B. 3D display: from autostereoscopic to true 3D [C]. IMID 2008, Seoul, Korea: IMID, 2008, 8(2): 139-142.
- [6] 冯奇斌,杨光磊,井长龙,等. 固态体积式真三维立体显示发光二极管投影光源[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1113-1119.
FENG Q B, YANG G L, JING C L, *et al.* LED-based projection light source for solid-state volumetric true-3D display [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(5): 1113-1119. (in Chinese)
- [7] 朱尧. 固态体积式真三维显示系统若干关键技术研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
ZHU Y. Certain key technology research of the solid volumetric true three-dimensional display system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [8] 方勇,张应松,吴华夏,等. 基于分类映射的真三维显示深度抗锯齿算法[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0233001.
FANG Y, ZHANG Y S, WU H X, *et al.* Depth anti-aliasing algorithm based on classified mapping for volumetric true-3D display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0233001. (in Chinese)
- [9] 冯奇斌,牛红林,华懿魁,等. 用于固态体积式真三维立体显示的 LED 投影照明系统研究[J]. 光电工程, 2011, 38(9): 93-98.
FENG Q B NIU H L, HUA Y K, *et al.* LED-based illumination system for solid-state volumetric true 3D display [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(9): 93-98. (in Chinese)
- [10] FAVALORA G E. Volumetric 3D displays and application infrastructure [J]. *Computer*, 2005, 38(8): 37-44.
- [11] 牛红林,陆红波,鲁文武,等. 快速响应光阀的制备及在真三维立体显示中的应用[J]. 光电工程, 2012, 39(8): 141-145.
NIU H L, LU H B, LU W W, *et al.* Preparation of fast response light shutter for the true 3D display [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(8): 141-145. (in Chinese)

作者简介: 芦云龙(1991—),男,浙江湖州人,硕士研究生,主要从事成像与显示等方面的研究。E-mail: luyunlongyouxiang@163.com

吕国强(1962—),男,浙江新昌人,教授,博士生导师,1983年和1986年于浙江大学分别获得学士、硕士学位,主要从事立体显示、液晶显示等方向的研究。E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn