

固态体积式真三维显示中的灰度级修正研究

方 勇^{1,2} 芦云龙³ 吴华夏^{1,2} 吕国强^{1,2*} 胡跃辉^{1,2}

¹合肥工业大学光电技术研究院现代显示技术省部共建国家重点实验室, 安徽 合肥 230009

²合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009

³合肥工业大学科学技术研究院, 安徽 合肥 230009

摘要 基于聚合物稳定胆甾相液晶(PSCT)光阀的固态体积式真三维(3D)显示体,在状态转换瞬间其雾度和透射率的非线性变化会引起成像亮度变化,并引起深度图像间的串扰。通过分析 PSCT 光阀的光电响应特性和显示体驱动方式,推导出显示体成像亮度的变化函数,并据此计算出子帧亮度和灰度级偏差。通过调整光阀的驱动时序和重新分配数字微镜器件子帧,结合伽马校正,实现了灰度级的修正。给出了在真 3D 样机上显示的灰度级修正前后的 3D 成像,实验结果表明,该方法在亮度损失较小(约 6%)的前提下,有效地修正了真三维成像的灰度级偏差,并基本消除了深度图像间的串扰,在一定程度上提高了 3D 显示的成像质量。

关键词 视觉光学; 固态体积式真三维显示; 灰度级修正; 聚合物稳定胆甾相液晶光阀; 子帧; 伽马校正

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1133001

Study on Gray Scale Correction in Solid-State Three Dimensional Volumetric Display

Fang Yong^{1,2} Lu Yunlong³ Wu Huaxia^{1,2} Lü Guoqiang^{1,2} Hu Yuehui^{1,2}

¹National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

²School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

³Academy of Science and Technology, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

Abstract The screen of solid-state volumetric three-dimensional (3D) display system is based on a polymer stabilized cholesteric texture normal-mode (PSCT) shutter array structure. The nonlinear variation of haze and transmittance of the shutter causes the image luminance deviation, as well as the image crosstalk between adjacent shutters. The photoelectric response characteristic and driving method of the PSCT shutter array are analyzed. Based on the analysis, the image luminance variation function of shutter array is derived, and thus the luminance of sub-frames and grayscale deviations are calculated. Grayscale correction is implemented through adjusting the driving timing of shutters and reallocating sub-frames, combined with Gamma correction. 3D images before and after grayscale correction are displayed on the solid-state 3D volumetric display system. Experimental results indicate that the proposed method can correct the grayscale deviations efficiently and eliminate the image crosstalk between adjacent shutters mainly at the cost of a minor luminance loss (about 6%). The proposed approach can improve the 3D image quality to some extent.

Key words visual optics; solid-state volumetric three-dimensional display; grayscale correction; polymer stabilized cholesteric texture shutter; sub-frame; Gamma correction

OCIS codes 330.1400; 330.4595; 330.5020; 290.4210

收稿日期: 2016-06-07; 收到修改稿日期: 2016-06-28

基金项目: 国家 863 计划(2012AA011901)

作者简介: 方 勇(1980—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事三维显示技术方面的研究。

E-mail: fy9903@hfut.edu.cn

导师简介: 吴华夏(1953—),男,研究员,博士生导师,主要从事特种显示技术方面的研究。E-mail: hdgdb@wvei.com.cn

* 通信联系人。E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn

1 引 言

近年来,随着材料科学和计算机技术的进步,双目视差、体三维、全息等立体显示技术得以迅猛发展^[1-7]。其中,体三维显示的成像具有真实的物理景深,一直是国内外研究的热点之一。根据显示体运动与否,体三维又可分为扫描体积式和固态体积式两种基本类型。固态体积式真三维显示利用多层可控液晶光阀构成显示体,通过空间光调制器将不同深度的图像序列依次投影到对应的光阀上,通过视觉暂留效应融合为一幅完整的立体影像。由于没有运动部件,相比扫描体积式显示具有一系列独有的优点^[8-9]。

作为显示体的液晶光阀在电场的控制下有散射态和透明态两种基本工作状态,在某一工作时刻,只有一片光阀处于散射态,其他光阀处于透明态。通过驱动电路控制每层光阀的状态切换,顺序扫描。真三维系统使用数字微镜器件(DMD)作为空间光调制器,采用子帧法在光阀上产生灰度图像。光阀在状态切换过程中其雾度和透射率均会发生非线性变化,导致灰度级失真,且在深度方向产生显示串扰,严重影响真三维显示的成像质量。

在体三维显示领域,目前国内外对于扫描体积式研究较多,而对固态体积式的研究相对较少。自从2004年美国 Light Space Technologies 公司提出 Depth Cube 系统后,除了本研究小组成功搭建出基于3片DMD、20片液晶光阀的样机外,鲜见其他机构相关研究见诸报道。考察目前体积式真三维的相关文献,其内容主要集中于系统搭建和原理介绍,而甚少涉及显示结果和成像质量的研究分析^[10]。本文从液晶光阀的光电特性和DMD灰度级调制方式入手,结合人类视觉特性,量化分析了显示体成像亮度变化和灰度级偏差,提出了基于伽马校正的灰度级修正方法,显著提高了固态体积式真三维系统的成像质量。

2 真三维成像亮度分析

2.1 光阀光电特性

图1为固态体积式真三维成像系统结构示意图。成像系统主要包括光源、高速投影光学引擎、折叠光路及显示体等,其中显示体是由20层液晶光阀等间距平行排列组成的光阀矩阵,采用背投方式成像。液晶光阀采用聚合物稳定胆甾相液晶(PSCT)材料制成,克服了早期的聚合物分散液晶(PDLC)在透明态时对于倾斜入射光会产生斜向散射的缺点,对于不同角度的入射光线透射率基本不变,更加适合于固态体积式真三维显示^[11-13]。

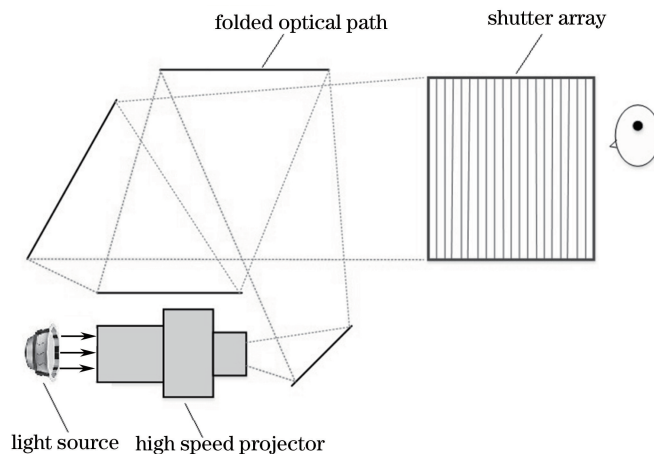


图1 固态体积式真三维成像系统结构图

Fig. 1 Structure of solid-state volumetric three-dimensional display imaging system

常黑模式下,施加一定电场光阀呈透明状态;关断电场光阀变为漫透射屏。不考虑光阀表面的反射和液晶层的吸收,入射光线进入光阀矩阵后,遇到透明态光阀,绝大部分光线直接透射;遇到散射态光阀,大部分光线发生散射。光阀散射包括前向与后向散射,真三维系统是背投显示,前向散射光线起成像作用。光阀在状态转换的瞬间,存在过渡态,其散射程度介于两种工作状态之间且逐渐变化,可采用雾度表征其散射效率。此外,由于存在后向散射,光阀的透射率从透明态到散射态的转换过程中逐渐降低。利用积分球系统,可测得PSCT光阀雾度和透射率的动态响应。图2为光阀在不同状态下的实物照片及雾度和透射率响应。

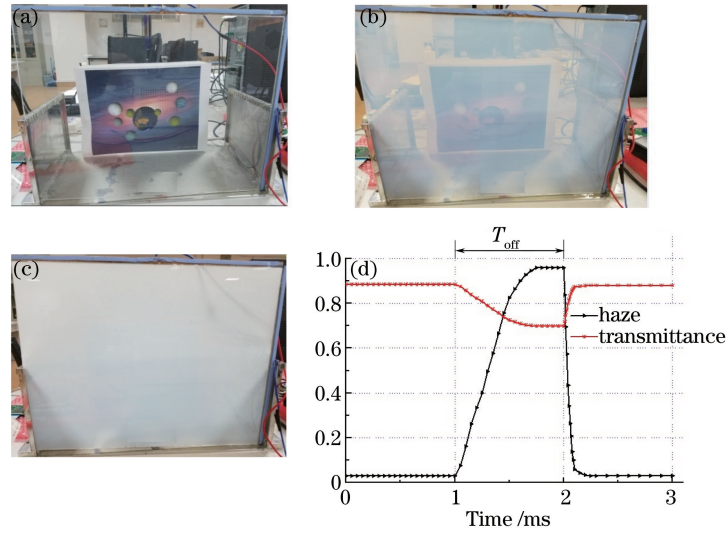


图 2 PSCT 光阀的不同状态及雾度和透射率响应。(a)透明态;(b)过渡态;(c)散射态;(d)雾度和透射率响应

Fig. 2 Different states and responses of haze and transmittance of PSCT shutter. (a) Transparent state; (b) transient state; (c) scattering state; (d) response of haze and transmittance

图中 T_{off} 表示光阀关断电场的时段,光阀的雾度和透射率变化函数可表示为

$$H(t) = \begin{cases} f_1(t), & t \in T_{off} \\ f_2(t), & t \in T_{off} + 1 \\ 0.03, & \text{others} \end{cases}, \quad (1)$$

$$T(t) = \begin{cases} g_1(t), & t \in T_{off} \\ g_2(t), & t \in T_{off} + 1 \\ 0.89, & \text{others} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $f_1(t)$ 、 $g_1(t)$ 分别为 T_{off} 时段雾度和透射率变化的拟合函数, $f_2(t)$ 、 $g_2(t)$ 分别为 $(T_{off} + 1)$ 时段雾度和透射率变化的拟合函数。

2.2 显示体成像亮度

与一般背投系统只有一层显示屏不同,真三维显示体由光阀矩阵构成,某一时刻的成像亮度取决于所有光阀的状态。真三维系统显示体刷新率为 50 Hz,光阀矩阵扫描周期为 20 ms,单层光阀成像时间 $T_{off}=1$ ms。图 3 为光阀矩阵的驱动时序图。

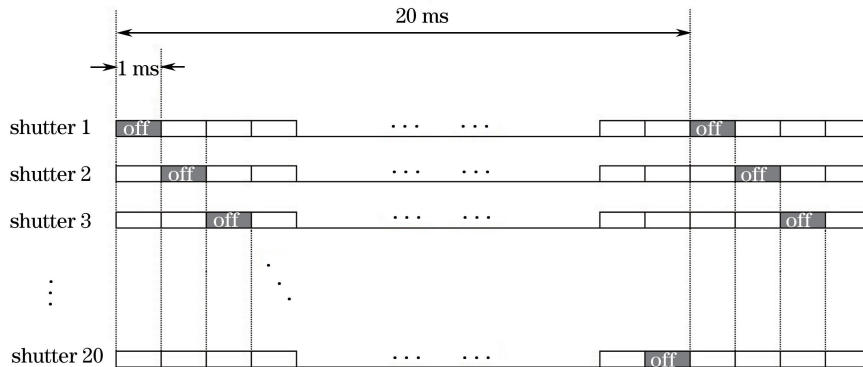


图 3 光阀矩阵驱动时序图

Fig. 3 Drive timing sequence of shutter array

记第 n 层光阀雾度变化函数为 $H_n(t)$,透射率变化函数为 $T_n(t)$,由驱动时序可得

$$\begin{cases} H_{n+20}(t) = H_n(t) \\ H_{n+m}(t) = H_n(t - m) \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} T_{n+20}(t) = T_n(t) \\ T_{n+m}(t) = T_n(t - m) \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $1 \leq n \leq 20, 1 \leq n + m \leq 20$ 。

当第 n 层光阀处于 T_{off} 时, 显示体漫透射光通量为

$$\Phi_n(t) = \Phi \prod_{i=1}^{n-1} \{T_i(t) [1 - H_i(t)]\} T_n(t) H_n(t) \prod_{j=n+1}^{20} \{T_j(t) [1 - H_j(t)]\}, \quad (5)$$

式中 Φ 为显示体入射光通量。联立(1)~(5)式, 可计算得到

$$\Phi_n(t) = 0.07\Phi [1 - f_2(t)] g_2(t) f_1(t) g_1(t). \quad (6)$$

显示体的漫透射光照度为

$$E(t) = \frac{\Phi_n(t)}{S}, \quad (7)$$

式中 S 为光阀显示面积。显示体成像亮度为^[14]

$$L(t) = \frac{P_g E(t)}{\pi} = \frac{0.07P_g \Phi [1 - f_2(t)] g_2(t) f_1(t) g_1(t)}{\pi S} = k f_1(t) g_1(t) [1 - f_2(t)] g_2(t), \quad (8)$$

式中 P_g 为屏幕增益, 常量 $k = \frac{0.07P_g \Phi}{\pi S}$ 。图 4 为根据(8)式求出的显示体成像亮度归一化曲线。

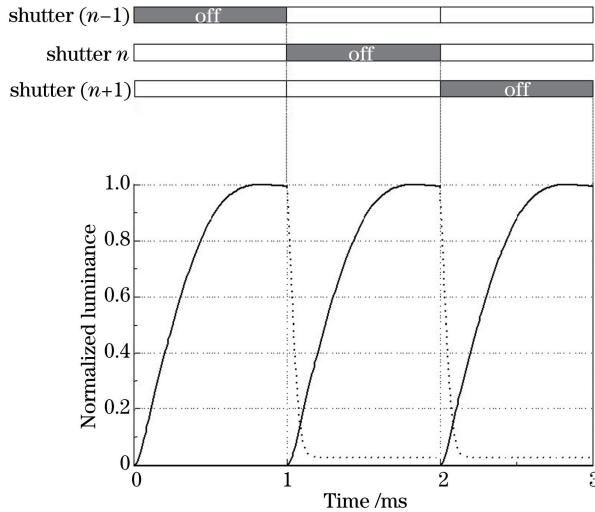


图 4 显示体成像亮度曲线

Fig. 4 Imaging luminance curves of display object

可见, 工作中显示体的成像亮度呈非线性变化, 且相邻光阀在状态转换期间存在亮度变化的交叠区域。

3 灰度级偏差及修正

3.1 灰度级偏差

真三维系统采用数字光处理器(DLP)套件 D4100 作为投影引擎, 显示 5 位灰度图像。D4100 最大二进制图像显示速率为 32552 frame/s, 最小二进制图像刷新时间 $T_{\text{min}} = 30.72 \mu\text{s}$ 。DMD 将光阀成像时间 T_{off} 由低位到高位划分为 5 个子帧进行显示, 子帧时长与数据比特权重相对应。子帧 M 的时长为

$$T_M = \frac{2^M}{\sum_{i=0}^4 2^i} T_{\text{off}}, \quad (9)$$

式中 $M=0, 1, 2, 3, 4$ 。

根据人类视觉系统特性, 图像亮度高低是由人眼接收到的光辐射亮度与作用时间的积分效果决定的, 人眼感知的亮度是实际亮度的平均值^[15]。子帧 M 的亮度可表示为

$$\bar{L}_M = \frac{1}{T_{off} - T_M} \int_{T_M} L(t) dt. \quad (10)$$

对于常规 DLP 显示,显示体成像亮度恒定,子帧亮度与显示时长对应,灰度级线性变化。而对于真三维显示,光阀的响应特性导致显示体成像亮度动态变化,如图 5 所示,子帧亮度不再与显示时长对应,灰度级在整个亮度区间分布不均匀:低位子帧亮度占比过小,高位子帧亮度占比过大。灰度级失真造成三维成像灰阶过渡不平滑,图像细节部分损失较大。此外,相邻光阀在状态转换瞬间的亮度交叠会引起深度图像间的串扰,导致三维成像清晰度下降。

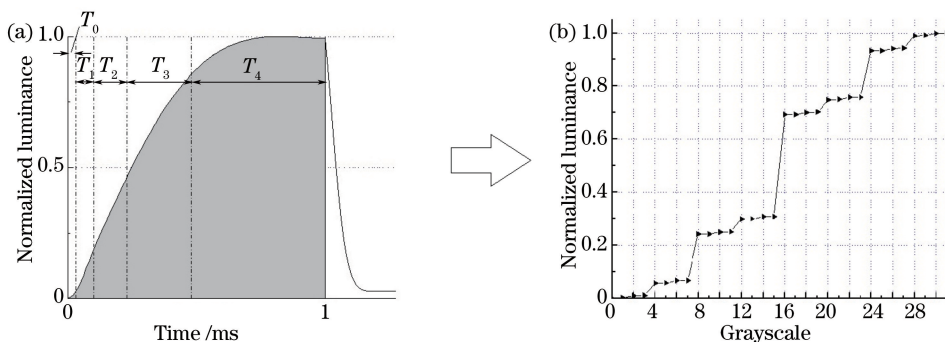


图 5 子帧亮度和灰度级偏差

Fig. 5 Luminance of sub-frames and deviations of grayscale

3.2 伽马校正

人类视觉系统对亮度的响应具有对数性质,主观亮度符合 Weber-Fechner 定律^[16-17]。因此,灰度级修正不仅需要考虑到子帧亮度失真的问题,还需要进行合适的伽马校正。

伽马校正会导致灰度级压缩,校正后的灰阶输出在低灰度区域损失严重,比如 5 位灰度图像采用 $\gamma = 2.2$ 曲线校正后,仅能显示 20 级灰度值。为了补偿灰阶损失,通常采用的办法是提高校正数据输出位数,即

$$C_{out} = (2^N - 1) \left(\frac{C_{in}}{2^5 - 1} \right)^\gamma, \quad (11)$$

式中 C_{in} 、 C_{out} 分别为输入、输出灰度值, N 为输出图像的位数, $N > 5$ 。显然,增大 N 可以减少灰阶损失,使输出灰度值更接近理想伽马曲线。

由以上分析,可以考虑采用重新分配子帧的方法实现 N 位灰度,再采用(11)式调整真三维显示的伽马值。

3.3 偏差修正

通过调整光阀的驱动时序消除图像深度串扰。如图 6 所示,将光阀的关断电场时间调整为 $(T_{off} - \Delta t)$ 。

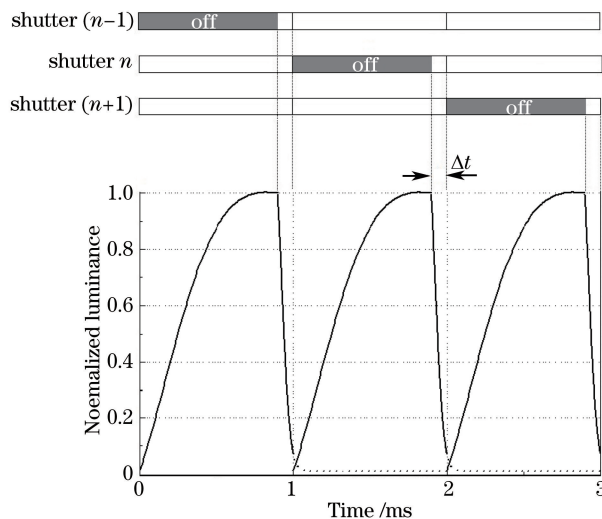


图 6 驱动时序的调整和成像亮度曲线的变化

Fig. 6 Adjustment of drive timing sequence and changing of imaging luminance curve

相应地,显示体成像亮度曲线也随之发生变化。

Δt 需要选取合适的值, Δt 过小,深度串扰消除不彻底; Δt 过大会带来较大的成像亮度损失。选取 $\Delta t = 0.1$ ms,基本消除了深度串扰,并较好地控制了亮度损失(约 6%)。调整以后,显示体亮度变化函数修正为

$$L'(t) = \begin{cases} kf_1(t)g_1(t)[1 - f_2(t + 0.1)]g_2(t + 0.1), & t \in T_{\text{off}} - \Delta t \\ 0.86kf_2(t - 0.9)g_2(t - 0.9), & t \in \Delta t \end{cases} \quad (12)$$

再考查将光阀成像时间 T_{off} 重新划分为 N 个子帧的可能性。由上文分析可知,子帧需满足下列方程组:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{N-1} T_i = T_{\text{off}} \\ \frac{1}{T_{\text{off}}} \int_{T_{j+1}} L'(t) dt = \frac{2}{T_{\text{off}}} \int_{T_j} L'(t) dt, 0 \leq j \leq N - 2 \end{cases} \quad (13)$$

由(13)式得到的各子帧时长需不小于 T_{min} 。分别计算 $N=6,7,8,9,10$ 情况下的各子帧时长,结果如图 7 所示。

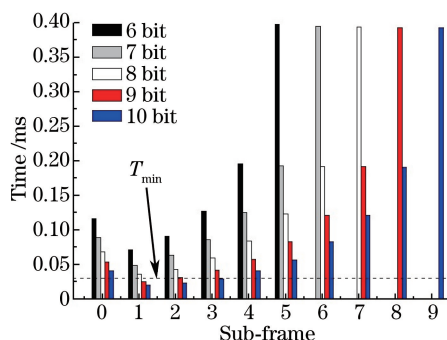


图 7 子帧时长计算结果

Fig. 7 Calculation results of sub-frame length

可见,在 $N > 8$ 的情况下会出现时长小于 T_{min} 的子帧,因此最多可以实现 8 位灰度。采用 $N = 8$ 的方案重新分配子帧,再采用 $\gamma = 2.2$ 曲线由(11)式计算得到校正后的灰度输出。图 8 为子帧分配方式和伽马校正后的测试曲线,可见灰度级响应得到了较好的修正。

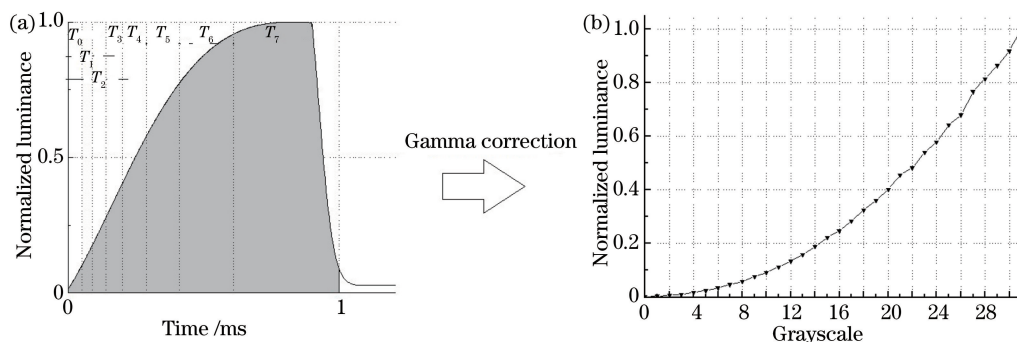


图 8 子帧分配和伽马校正结果

Fig. 8 Allocation of sub-frames and results of Gamma correction

为验证灰度级修正方法的效果,在本研究小组搭建的固态体积式真三维样机上进行三维成像显示。图 9(a)为灰度级失真修正前的成像,图 9(b)为修正后的成像。通过对比可以看出,修正前成像的灰阶过渡不平滑,细节损失较严重,而且存在深度串扰使整体成像清晰度较差;修正后成像的灰阶过渡更加自然,图像细节明显提升,经伽马校正后图像对比度有所提高,且消除了深度串扰使整体成像更加清晰。

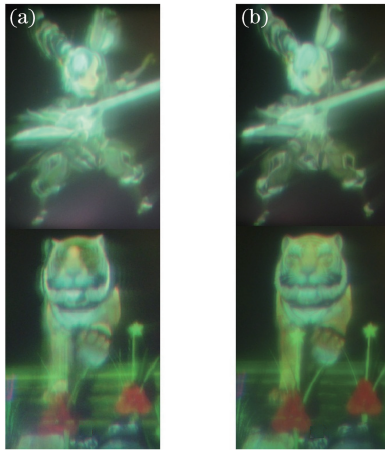


图 9 灰度级修正前后的三维成像效果。(a)修正前;(b)修正后

Fig. 9 Effect of 3D imaging before and after grayscale correction. (a) Before correction; (b) after correction

4 结 论

PSCT 液晶光阀在透明态和散射态转换瞬间存在过渡态,其透射率和雾度发生非线性变化。通过分析光阀的光电特性和驱动时序,建立显示体成像亮度变化函数,推导得出灰度级偏差的量化结果。通过合理调整光阀关断电场的时长并重新分配子帧,结合伽马校正,实现灰度级偏差的修正。利用搭建的真三维样机,分别显示修正前后的三维成像。结果表明,修正后的图像灰度级失真得到有效修正,图像细节、对比度和清晰明显提高,从而验证了理论分析得出的结论。下一步研究工作将考虑不同光阀光电响应的差异性以及光阀间杂散光线的影响,进一步提高修正方法的效果。

参 考 文 献

- Holliman N S, Dodgson N A, Favalora G E, *et al.* Three-dimensional displays: A review and applications analysis[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2011, 57(2): 362-371.
- Wang Zheng, Cao Liangcai, Zhang Hao, *et al.* Three-dimensional display based on volume holography[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0909003.
王 靖, 曹良才, 张 浩, 等. 基于体全息的三维显示方法[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0909003.
- Son J Y, Javidi B, Kwack, K D. Methods for displaying three-dimensional images[J]. Proceedings of the IEEE, 2006, 94(3): 502-523.
- Liu Yongchun, Gong Huajun, Geng Zheng, *et al.* Research of light-field 3D imaging systems based on holographic directional scattering-screen[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101103.
刘永春, 龚华军, 耿 征, 等. 基于全息定向散射屏的光场三维成像系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101103.
- Zhao T, Sang X, Yu X, *et al.* High dense views auto-stereoscopic three-dimensional display based on frontal projection with LLA and diffused screen[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(1): 011001.
- Dong Jianwen, Chen Dingchen, Pang Xiaoning, *et al.* Spatial-domain computer generated holographic three-dimensional display[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0701001.
董建文, 陈定尘, 庞晓宁, 等. 空域计算全息三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0701001.
- Lu G, Wang Q, Wang J, *et al.* Multi-view 3D display with high brightness based on a parallax barrier[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(12): 121101.
- Ling 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.
- Sullivan A. Depth cube solid-state 3D volumetric display[C]. SPIE, 2004, 5291: 279-283.
- 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.
- 11 Yin Y, Li W, Cao H, *et al.* Effects of monomer structure on the morphology of polymer network and the electro-optical property of reverse-mode polymer-stabilized cholesteric texture[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 111(3): 1353-1357.
- 12 Natarajan L V, Beckel E R, Tondiglia V P, *et al.* The effect of weak polymer stabilization on the switching properties of cholesteric liquid crystals[J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2009, 502(1): 143-153.
- 13 Sun J, Chen Y, Wu S. Submillisecond-response and scattering-free infrared liquid crystal phase modulators[J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20124.
- 14 Brennesholtz M S, Stupp E H. *Projection displays*[M]. Hoboken: Wiley Publishing, 2008: 327-328.
- 15 Deutsch S. Visual displays using pseudorandom dot scan[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1973, 21(1): 65-75.
- 16 Hecht S. The visual discrimination of intensity and the Weber-Fechner law[J]. *Journal of General Physiology*, 1924, 7(2): 235-267.
- 17 Wandell B, Gamal A EI, Girod B. Common principles of image acquisition systems and biological vision[J]. *Proceedings of IEEE*, 2002, 90(1): 5-17.