

固态体积式真三维显示中的闪烁评价及优化

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 为准确客观评价和优化固态体积式真三维显示中的闪烁现象, 提出一种隔层扫描的光阀矩阵刷新方法。采用傅里叶变换分析成像光信号在不同扫描模式下的频域能量分布, 在时间对比敏感度函数加权幅值谱强度(CSWA)评价模型的基础上, 提出时间对比敏感度函数加权幅值谱对比度(CSWC)方法。两组视觉感知实验的结果与 CSWC 评价模型的估算结果的 Pearson 相关系数达到 -0.99。结果表明, 所提出的隔层扫描方法可以减轻真三维显示的闪烁, 所提出的 CSWC 评价模型实现了对真三维显示闪烁程度的客观量化评价。该结果对基于深度融合原理的三维显示闪烁程度优化和观看舒适度提升起到积极的指导和推动作用。

关键词 视觉光学; 固态体积式真三维显示; 闪烁; 隔层扫描; 时间对比敏感度函数加权幅值谱对比度; 视觉感知

中图分类号 TN27 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0133003

Evaluation and Optimization of Flicker in Solid-State 3D Volumetric Display

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

¹Key Laboratory of Special Display Technology of the Ministry of Education, National Engineering Laboratory of Special Display Technology, National 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 To evaluate and optimize the flicker visibility in solid-state 3D volumetric display, a interlaced scanning refresh method of shutter array is proposed. Frequency domain energy distribution of the imaging light signal in different scanning modes is analyzed through Fourier transformation. Based on the temporal contrast sensitivity function weighted amplitude (CSWA) model, the method of temporal contrast sensitivity function weighted amplitude contrast(CSWC) is proposed. Meanwhile, Pearson correlation coefficient between two visual perception experiment results and the estimation result of CSWC model is -0.99, which shows that the proposed method could reduce flicker visibility, and the proposed CSWC evaluation model realizes objective evaluation of the flicker in solid-state 3D volumetric display. The result can guide and facilitate the flicker optimization in 3D display based on the depth-fused principle and the improvement of visual comfort.

Key words visual optics; solid-state 3D volumetric display; flicker; interlaced scanning; temporal contrast sensitivity function weighted amplitude contrast; visual perception

OCIS codes 330.1800; 330.5020; 330.6790; 330.7320

收稿日期: 2016-08-01; 收到修改稿日期: 2016-08-29

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

作为下一代最有潜力的显示技术,三维显示已成为显示领域的发展前沿和研究热点^[1-7]。国内外学者提出了诸多不同途径的三维显示技术,并不断致力于提升显示质量和观看舒适度^[8-11]。其中,体积式真三维显示是一种真实空间中成像的显示方法,因其具有真实物理景深、可多人多视角同时观看等突出优点,已引起学者的广泛关注。固态体积式真三维显示是体三维显示中的一种典型技术,其将多片液晶光阀组成光阀阵列作为显示体,通过高速投影电路将深度切片图像序列依次成像于对应深度的光阀平面上,利用视觉暂留效应融合为完整的立体影像^[12]。

固态体积式真三维的成像原理决定了系统的海量显示数据,如对于三维分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel} \times 608 \text{ pixel}$ 的真三维系统,一个完整的立体帧包含超过 4.7 亿个体素。受限于数据带宽,显示系统设计时必须要在显示刷新频率和颜色深度之间取得平衡。根据临界闪烁频率(CFF)理论,显示系统低于一定的刷新频率会产生闪烁现象,而闪烁问题会降低显示质量和观看舒适度,甚至带来一系列生理和心理上的负面影响^[13-14]。对于该问题的研究由来已久,代表性的学者有 Kelly^[15-17]、Farrell 等^[18] 和 Watson 等^[19]。目前,对于闪烁的评价主要关注传统的二维显示领域,对于三维显示的闪烁评价问题则鲜有研究。夏振平等^[20] 提出一种快门眼镜式立体显示的闪烁现象客观评价方法,但该方法基于快门眼镜对于显示光源的开关调制作用,与体三维的显示闪烁机理并不相同。

针对上述问题,本文通过分析固态体积式真三维成像光信号的时频域特性,提出一种隔层扫描的显示体刷新方法。在对时间对比敏感度函数(TCSF)加权幅值谱强度(CSWA)评价模型进行改进的基础上,提出 TCSF 加权幅值谱对比度(CSWC)的闪烁程度评价方法,结合不同扫描模式下的视觉感知实验,建立适合固态体积式真三维显示的闪烁程度客观评价模型,并据此优化系统设计。

2 固态体积式真三维显示

2.1 真三维成像光信号分析

固态体积式真三维系统结构如图 1 所示,主要包括计算机、三维图像引擎、高速投影电路、显示体驱动电路和光阀矩阵,其中,光阀矩阵由多层液晶光阀平行排列组成,液晶光阀采用聚合物稳定胆甾相液晶(PSCT)材料制成,具有特殊的光电性能:零电场下光阀雾度很高,入射光发生散射成像;施加一定电场,光阀呈透明状态,光线直接透射。

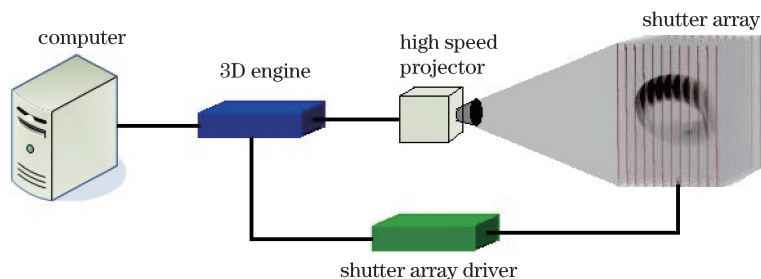


图 1 固态体积式真三维显示系统结构图

Fig. 1 Structure of solid-state 3D volumetric display system

从图 1 可见,真三维成像是由液晶光阀上的一系列二维切片图像构成,只有深度位于这些特定平面上的体素才能被激活。因此,深度位于相邻二层光阀之间的体素点,需要通过深度融合来模拟激活。根据人类视觉系统(HVS)特性,人眼对于亮度较高的发光点感觉距离较近,对于亮度较低的发光点感觉距离较远。因此,位于两层光阀之间的某一体素点 P ,可以由通过 P 点的屏幕法线与两层光阀的交点 P_1 和 P_2 的成像来等效代替,如图 2 所示。

设体素点 P 亮度为 L_P ,则 P_1 和 P_2 点的亮度 L_{P_1} 、 L_{P_2} 可表示为

$$\begin{cases} L_{P_1} = \frac{d_2}{d} \cdot L_P \\ L_{P_2} = \frac{d_1}{d} \cdot L_P \end{cases}, \quad (1)$$

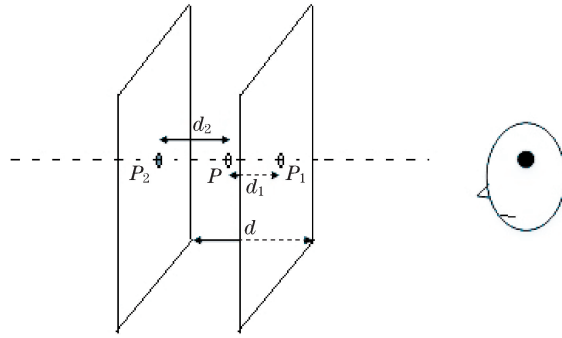


图 2 体素的深度融合示意图
Fig. 2 Diagram of depth fusion of voxel

式中 d 为两层光阀之间的距离, d_1, d_2 分别为 P 与 P_1, P_2 之间的距离, 且有 $d_1 + d_2 = d$ 。

三维图像的融合通过切片图像的快速扫描完成, 最简单直观的扫描方式为逐层顺序扫描, 如图 3(a) 所示。与二维显示刷新周期概念有所不同的是, 真三维显示的刷新周期 T_{frame} 包括多层光阀的显示时间之和。图 3(a) 中真三维显示系统具有 20 层液晶光阀, 刷新频率为 40 Hz, 每层光阀的显示占空比为 5%。从图 3(a) 可见, 成像光信号是周期性变化的信号, 而符合狄利克雷条件的周期信号可展开为

$$L(t) = L_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2}{T} \int_0^T L(t) \cos\left(n \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) dt \cdot \cos\left(n \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) + \frac{2}{T} \int_0^T L(t) \sin\left(n \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) dt \cdot \sin\left(n \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \right], \quad (2)$$

式中 $L(t)$ 为亮度变化函数, L_0 为直流分量即亮度平均值, T 为信号周期。采用傅里叶变换将体素点亮度的时域信号转换至频域进行分析, 图 3(b) 为 40 Hz 刷新频率、5 位颜色深度情况下的体素点 P 的成像光信号归一化后的时域变化情况, 设置体素点 P 的亮度值为 31, $d_1 = 21d/31, d_2 = 10d/31$; 图 3(c) 为傅里叶变换后的归一化频域幅值谱。其中, 频率为 0 的直流分量对应的是平均亮度, 40 Hz 基频的幅值最大。

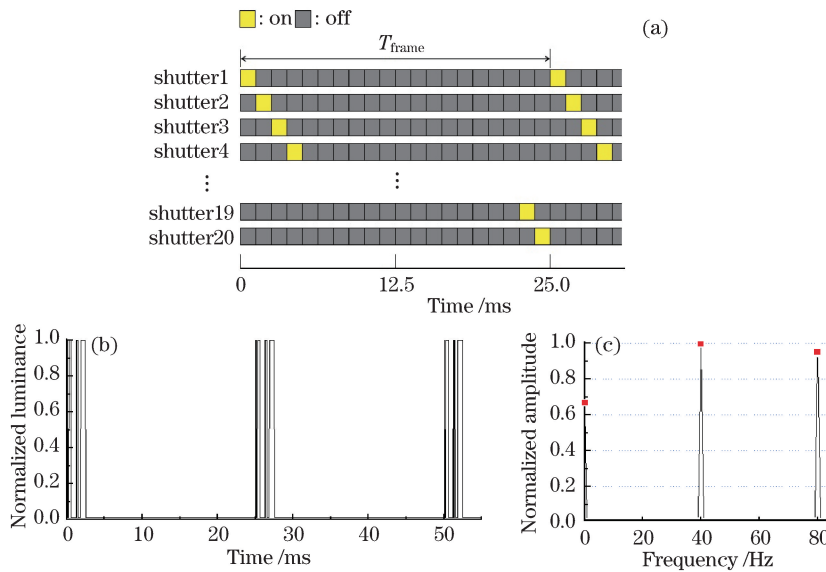


图 3 顺序扫描模式下的成像光信号。(a) 扫描时序图; (b) 时域图; (c) 频域图

Fig. 3 Imaging light signal under sequential scanning mode. (a) Scan sequence diagram; (b) time domain; (c) frequency domain

2.2 隔层扫描刷新法

根据 Watson^[21] 提出的时间对比敏感度函数(TCSF)理论, 人眼对不同时间频率的光刺激响应灵敏度具有低通特性, 即有

$$F(\omega) = \xi \left| (1 + i2\pi\omega\tau)^{-n_1} - \zeta (1 + i2\pi\omega\kappa\tau)^{-n_2} \right|, \quad (3)$$

式中 $F(\omega)$ 为时间对比敏感度函数, ω 为频率, ξ, ζ, τ, κ 和 n_1, n_2 均为常数。标准参数下 TCSF 响应曲线如图 4 所示, 函数值在 10 Hz 左右达到峰值, 此后随频率增加函数值快速下降, 在 60 Hz 时函数值小于 1, 闪烁已经极轻微。

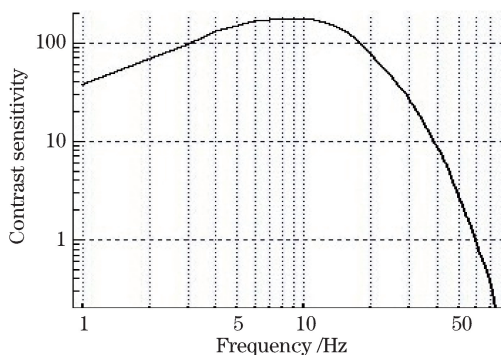


图 4 TCSF 响应曲线

Fig. 4 Response curve of TCSF

从 TCSF 响应曲线可知, 40 Hz 处的函数值仍然较大, 因此常规的顺序扫描方式在此刷新频率下闪烁感会比较明显。提高刷新频率会减轻或消除闪烁感, 但会带来颜色深度的下降, 进而对显示画质产生严重影响。因此, 本文提出一种固态体积式真三维显示的隔层扫描刷新方法。如图 5(a) 所示, 将真三维显示体的光阀矩阵按奇数层和偶数层分为两组, 在显示体刷新周期内, 先对奇数层光阀扫描成像, 再对偶数层光阀扫描成像。图 5(b) 和图 5(c) 分别为成像光信号归一化后的时域亮度和频域幅值谱。可以看出, 该扫描方法改善了信号的频域能量分布, 40 Hz 基频幅值大幅降低。

需要注意的是, 频域能量的改善程度与体素点 P 在两层光阀间的深度距离相关。定义体素的深度因子 δ_d , 则有

$$\delta_d = \frac{|d_1 - d_2|}{d}, \quad (4)$$

显然有 $0 \leq \delta_d \leq 1$ 。

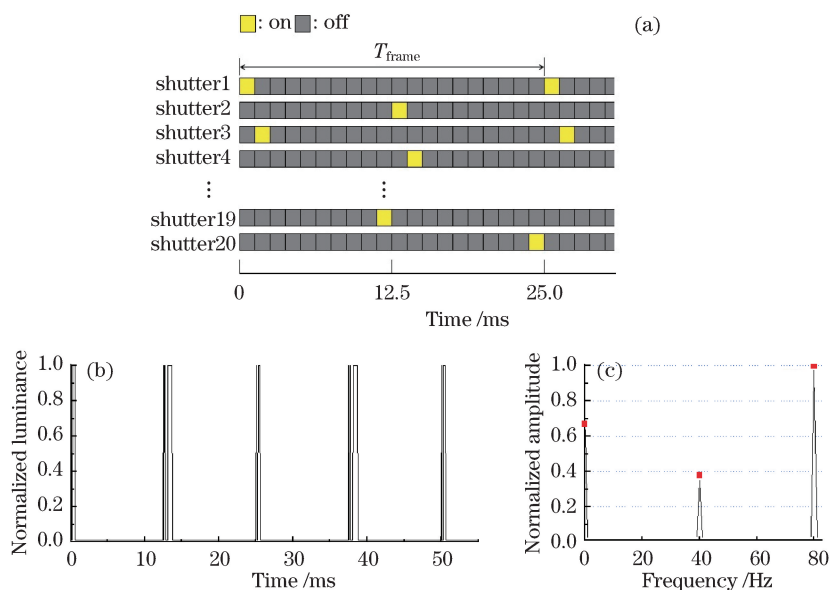


图 5 隔层扫描模式下的成像光信号。(a) 扫描时序图; (b) 时域图; (c) 频域图

Fig. 5 Imaging light signal under interlaced scanning mode. (a) Scan sequence diagram; (b) time domain; (c) frequency domain

3 闪烁程度量化评价方法

3.1 CSWC 评价模型

视频电子标准协会(VESA)利用 TCSF 对归一化功率谱加权的方法得到对比敏感度加权强度,将各主频对应的强度和作为衡量指标对闪烁程度进行量化。该方法有效利用了人眼的 TCSF 特性,但只考虑了主频的幅值强度,而非亮度对比度。考虑到人眼对于对比度变化的敏感度高于单纯亮度变化的敏感度,在参考 Watson 等^[19]提出的 JND 方法的基础上,提出一种 TCSF 对归一化幅值谱对比度加权的方法,将各主频对应的加权之和作为评判闪烁严重程度的因子 F_{CSWC} ,得到

$$F_{\text{CSWC}} = \sum_{i=1}^n F_{\text{TCSF}}(\omega_i) \cdot \frac{A_i}{A_0}, \quad (5)$$

式中 $F_{\text{TCSF}}(\omega_i)$ 为 i 次谐波所在频率的时间对比敏感度函数值, A_i 和 A_0 分别为 i 次谐波幅值和直流分量幅值。因为 80 Hz 以上频率所对应的 TCSF 函数值已接近 0,所以只考虑 80 Hz 及以下的谐波分量,即 $\omega_n \leq 80$ Hz。

图 6 为真三维显示在 40 Hz 刷新频率、5 位颜色深度情况下, F_{CSWC} 值随图像灰度和深度因子的变化情况。可见, F_{CSWC} 值在隔层扫描模式下比顺序扫描模式下有不同程度的改善,尤其在深度因子较小的区域, F_{CSWC} 值下降十分明显,深度因子越小,频域能量的改善程度越高。甚至在 $\delta_d = 0$ 时,隔层扫描模式下 40 Hz 基频能量幅值已减小至 0 附近,基本消除了闪烁感。

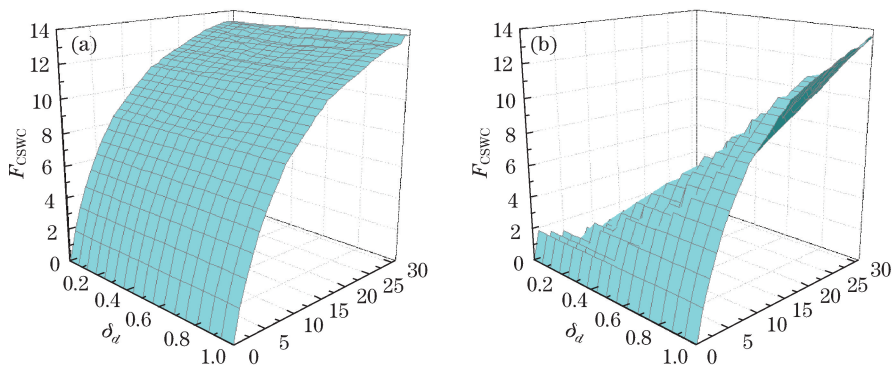


图 6 F_{CSWC} 值随灰度和深度因子的变化。(a) 顺序扫描模式; (b) 隔层扫描模式

Fig. 6 Variation of F_{CSWC} with gray scale and δ_d . (a) Sequential scanning model; (b) interlaced scanning model

3.2 视觉感知实验

为研究符合固态体积式真三维显示的闪烁程度评价模型,基于固态体积式真三维样机设计并完成了两组视觉感知实验。固态体积式真三维样机系统采用 19 英寸(48.26 cm)、20 层 PSCT 液晶光阀结构设计, PSCT 光阀具有极高的响应速度,如图 7 所示,其响应时间 $t_{\text{on}} + t_{\text{off}}$ 小于 0.6 ms,可以实现 60 Hz 及以下的显示刷新频率。

两组实验分别在顺序扫描模式和隔层扫描模式下进行,显示内容为亮度分布均匀的灰度图像。实验涉及的影响因素有三个:显示刷新频率、显示亮度和体素深度。其中,真三维样机显示刷新频率设置为 20、30、40、50、60 Hz;显示亮度通过调整图像的灰度值实现,可设置为低(灰度值 4)、中(灰度值 16)、高(灰度值 31);体素深度根据深度因子的值设置为低(0.03)、中(0.48)、高(0.87)。实验环境的温度和湿度符合 VESA 标准,共有 16 人参加实验,其中男 9 人,女 7 人,年龄范围在 21~32 周岁,平均年龄 24.7 周岁。所有受试者双眼视力(或校正后视力)达到 1.0 以上。实验采用 ITU-RBT.500 标准^[22]中规定的 5 分制方法对所感知的闪烁程度进行评分,分值越高代表闪烁感越轻。

实验过程中,保持其中两个影响因素为默认值,改变另一个参数完成测试。显示刷新频率默认值为 40 Hz,显示亮度和体素深度的默认值均为中。实验完成后,利用 SPSS 软件(Version 19.0)对所有实验数据进行分析,结果如表 1 所示。方差分析(ANOVA)结果表明,实验 1 中的频率、显示亮度以及实验 2 中的频率、深度因子对闪烁程度的主观感受有显著性影响($p < 0.05$)。

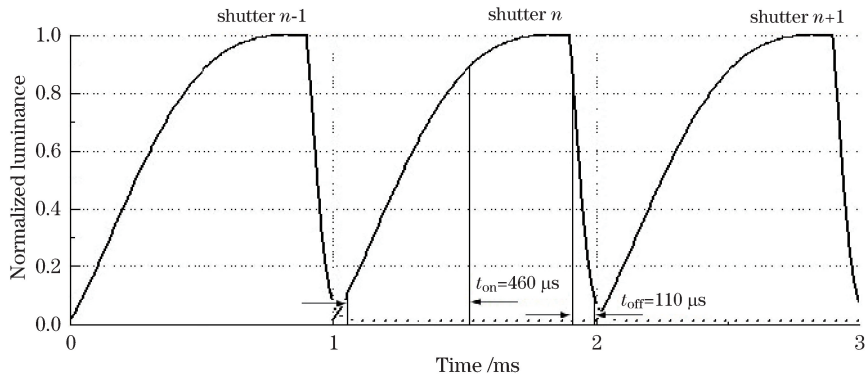


图 7 PSCT 光阀的动态响应曲线

Fig. 7 Dynamic response curve of PSCT shutters

表 1 各因素对闪烁评分的方差分析结果

Table 1 ANOVA results of flicker scoring of various factors

	Factor	df	F	p
Exp1	Frequency	4	170.146	<0.001
	δ_d	2	0.241	0.787
	Gray scale	2	3.343	0.0442
Exp2	Frequency	4	97.795	<0.001
	δ_d	2	4.141	0.022
	Gray scale	2	0.276	0.761

图 8 所示为视觉感知实验中各影响因素评分结果的平均值和误差范围。结果表明,显示刷新频率是影响闪烁程度的重要因素,在两种扫描模式下均对评分有显著性影响。顺序扫描模式下,20 Hz 和 30 Hz 刷新频率评分小于 4 分,存在较明显地闪烁感,50 Hz 和 60 Hz 刷新频率评分大于 4.5 分,闪烁感极轻微;隔层扫描模式下,各频率对应评分均有所上升,50 Hz 和 60 Hz 下基本消除了闪烁。深度因子的变化在顺序扫描模式下对评分无显著性影响,在隔层扫描模式下对评分有显著性影响,随深度因子的减小评分明显上升;而显示亮度的变化在顺序扫描模式下对评分有显著性影响,表现为亮度越高闪烁感越明显,在隔层扫描模式下整体评分上升,显示亮度对评分无显著性影响。

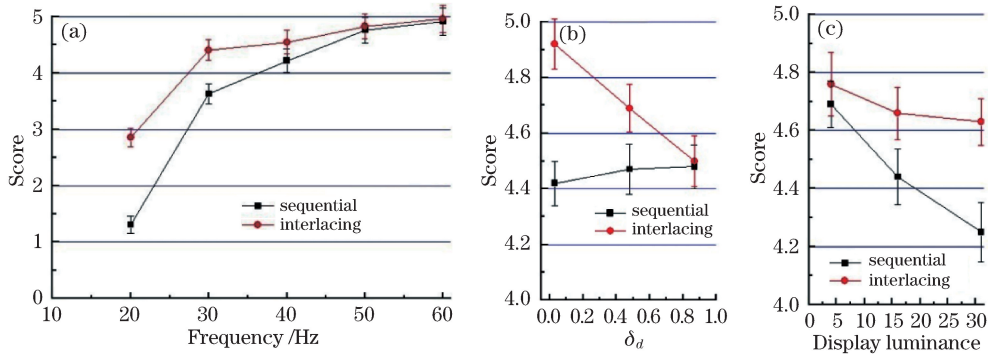


图 8 不同参数变化下的视觉感知评分结果。(a) 频率; (b) 深度因子; (c) 显示亮度

Fig. 8 Scores of visual perception experiments of different parameters. (a) Frequency; (b) δ_d ; (c) display luminance

为检验 CSWC 评价模型的客观评价效果,选取两组实验中不同显示亮度的情况作为示例,图 9 给出了 CSWC 评价模型的客观量化结果。

对图 9 中所涉及实验内容的评分结果和相对应的 CSWC 和 CSWA 评价模型估算值进行相关性分析,结果如表 2 所示。可见,CSWC 评价模型的客观评价结果与主观实验评分结果高度一致,并且比 CSWA 评价模型具有更高的线性相关度(实验 1 中 CSWC 评价模型的 $R^2 > 0.99$)。结果表明,采用 CSWC 评价方法可以更加准确、客观地评估固态体积式真三维显示的闪烁程度。

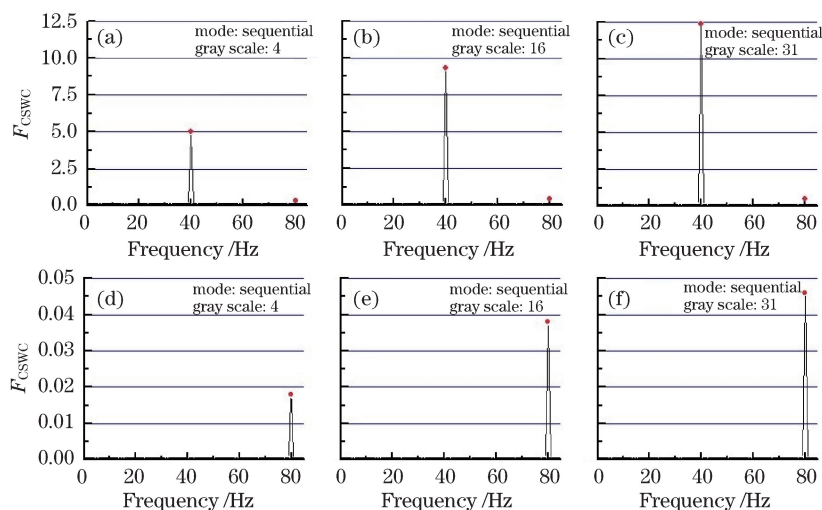


图 9 不同扫描模式和显示亮度下经时间对比敏感度函数加权的幅值谱对比度

Fig. 9 Temporal contrast sensitivity function weighted amplitude spectrum contrast under different scanning modes and display luminance

表 2 评分结果与 CSWC 及 CSWA 评价模型的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of flicker scoring and CSWC/CSWA model

	Gray scale	CSWA	CSWC	R^2	
				CSWA	CSWC
Exp1	4	0.102	5.016	0.980	0.999
	16	0.408	9.346		
	31	0.788	12.456		
Exp2	4	3.816E-04	0.018	0.981	0.998
	16	1.325E-03	0.031		
	31	2.852E-03	0.046		

3.3 讨论

隔层扫描模式不仅对固态体积式真三维显示的闪烁有一定程度的优化,还对于其他基于深度融合原理的三维显示设计有指导意义。显示刷新频率是影响闪烁感的首要因素,尤其在体素深度因子较大的情况下,隔层扫描的改善程度较小。从实验和模型估算结果来看,隔层扫描模式下 50 Hz 显示刷新频率对不同深度因子和显示亮度的体素均基本消除了闪烁感,在此刷新频率下真三维显示可以实现 5 位颜色深度,获得较好的彩色三维图像显示效果。实验中采用亮度分布均匀的灰度图作为显示内容,与实际显示中的自然图像闪烁程度存在一定差异,但从实际三维成像情况来看区别并不明显。所提出的隔层扫描方法是基于相邻两层光阀的体素深度融合,对于多层相邻光阀的体素深度融合情况可能会不同,这些将会在后续研究中涉及和讨论。

4 结 论

针对固态体积式真三维显示采用深度融合方式进行体素显示的特点,提出采用隔层扫描的刷新方法来降低闪烁程度。对已有的 TCSF 加权归一化幅值谱强度的闪烁程度评价模型进行改进,提出了一种 TCSF 加权归一化幅值谱对比度的方法对闪烁程度进行客观评价。该方法实现了对固态体积式真三维显示闪烁程度准确、客观的评价,量化结果与实验结果相吻合,对基于深度融合方式的三维显示闪烁程度评价以及观看舒适度提升起到了积极的指导和推动作用。

参 考 文 献

- [1] Yu X B, Sang X, Chen D, *et al.* Autostereoscopic three-dimensional display with high dense views and the narrow structure pitch[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(6): 060008.

- [2] Yang Lei, Xia Jun, Zhang Xiaobing, *et al.* Three-dimensional display by holographic imaging on multiple focal planes [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209017.
杨 磊, 夏 军, 张 晓 兵, 等. 基于多平面全息成像的三维显示[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209017.
- [3] Lee C, DiVerdi S, Hollerer T. Depth-fused 3D imagery on an immaterial display[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(1): 20-33.
- [4] Liu Yao, Deng Huan, Luo Chenggao, *et al.* An integral imaging three dimensional display method based on aperture stop array[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0910004.
刘 尧, 邓 欢, 罗 成 高, 等. 基于光孔阵列的集成成像三维显示方法[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0910004.
- [5] Ji Dong, Song Jiawen, Zhou Hao, *et al.* Three-dimensional color holographic projection system using single digital micromirror device[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080901.
季 冬, 宋佳文, 周 皓, 等. 基于单片数字微镜器件的三维彩色全息投影技术[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080901.
- [6] 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.
- [7] Zhang H, Zhao Y, Cao L C, *et al.* Three-dimensional display technologies in wave and ray optics: A review [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(6): 060002.
- [8] Xia Zhenping, Li Xiaohua, Chen Lei, *et al.* Study on evaluation of motion blur in binocular parallax based stereoscopic displays[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0111001.
夏振平, 李晓华, 陈 磊, 等. 基于双目视差的立体显示运动模糊评价方法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0111001.
- [9] 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.
- [10] Chen Yanyan, Wang Lili, Yang Lanlan. Investigation of visual fatigue caused by 2D/3D display under different illuminations[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2016, 39(2): 242-247.
陈燕燕, 王莉莉, 杨兰兰. 不同照明环境下 2D/3D 显示视疲劳研究[J]. 电子器件, 2016, 39(2): 242-247.
- [11] Li Jing, Wang Ani, Wang Junle, *et al.* Visual discomfort induced by three-dimensional display technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030009.
李 静, 王阿妮, 王君乐, 等. 三维显示技术引起的视觉疲劳研究综述[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 030009.
- [12] Sullivan A. Depth cube solid-state 3D volumetric display[C]. Proceedings of Electronic Imaging, 2004, 5291: 279-283.
- [13] Sheedy J. VDTs and visual complaints: A survey[J]. Information Display, 1992, 8(4): 20-23.
- [14] Masahide N. A comfortable brain-interface to video displays[J]. Neural Networks, 1999, 12(2): 347-354.
- [15] Kelly D H. Theory of flicker and transient response, I. Uniform fields[J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(4): 537-546.
- [16] Kelly D H. Theory of flicker and transient response, II. Counterphase gratings[J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(5): 632-640.
- [17] Kelly D H, Savoie R E. Theory of flicker and transient response, III. An essential nonlinearity[J]. Journal of the Optical Society of America, 1977, 68(11): 1481-1490.
- [18] Farrell J E, Benson B L, Haynie C R. Predicting flicker thresholds for video display terminals[C]. Proceeding of SID, 1987, 28(4): 449-453.
- [19] Watson A B, Ahumada A J. Flicker visibility: a perceptual metric for display flicker[C]. SID Digest of Technical Papers, 2011, 42(1): 957-959.
- [20] Xia Zhenping, Li Xiaohua, Chen Lei, *et al.* Objective evaluation of flicker in stereoscopic display with active shutter glasses[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1233001.
夏振平, 李晓华, 陈 磊, 等. 快门眼镜式立体显示中闪烁的客观评价[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1233001.
- [21] Watson A B. Temporal sensitivity[M]. New York: Wiley, 1986.
- [22] Assembly I T U R. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures[M]. Geneva: International Telecommunication Union, 2003.