

对快门式立体显示中环境光闪烁的影响研究

夏振平¹ 李晓华² 陈磊² 王坚²

(¹ 苏州科技学院电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009)
(² 东南大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要 为了优化主动快门式立体显示中的闪烁现象,对环境光的影响进行了深入的研究。研究中使用高采样率瞬态亮度响应测量系统对透过快门眼镜的环境光信号进行实时测量和记录,测量的时域信号经过傅里叶变换后得到对应的频域信号,用来分析环境光影响闪烁的可能原因。同时,基于多参数可调的发光二极管(LED)照明系统完成了两组视觉感知实验,结果表明,环境光的频率、最大光强、占空比以及显示器的显示内容等参数对人眼透过快门眼镜感受到的环境光闪烁程度有显著性的影响,120 Hz 或以上的倍频光作为匹配环境光可以消除环境光闪烁并且达到比较好的舒适度。研究结果对主动快门式立体显示中闪烁感的优化以及视觉舒适度的提高具有指导和推动作用。

关键词 视觉光学;信号处理;立体显示;闪烁;视觉感知

中图分类号 TN27 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0733002

Study on the Effect of Ambient Light Flicker in Stereoscopic Display with Active Shutter Glasses

Xia Zhenping¹ Li Xiaohua² Chen Lei² Wang Jian²

(¹ College of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China)
(² School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract To optimize the flicker phenomenon in active shutter type stereoscopic display, the influence of ambient light is deeply investigated. The transient luminance response measurement system with high sampling rate is used to measure and record ambient light through shutter glasses in real time. The measured time domain signal is transformed into frequency domain through Fourier transformation for the analysis of possible flicker source. Meanwhile, two perception experiments are implemented based on the multi-parameter adjustable light emitting diode (LED) lighting system. The experiment result shows that the involved factors such as frequency, maximum intensity, duty cycle and displayed image on the display, all have significant effect on the ambient light flicker felt by human eye through shutter glass, and 120 Hz or higher times frequency as matching ambient light can eliminate the flicker caused by ambient light and accomplish better visual comfort. The investigation result guides and facilitates the optimization of flicker in stereoscopic display with active shutter glasses and the improvement of visual comfort.

Key words visual optics; signal processing; stereoscopic display; flicker; visual perception

OCIS codes 330.5020; 330.6790; 330.7320; 120.1880

1 引 言

立体显示技术的研究几经起落之后,近年来成为电子显示技术领域的热门。2009年,在全球以多种语言版本播放的立体电影《阿凡达》掀起了一股巨

大的立体显示浪潮。随后,各大国际一线电视厂商纷纷投入巨额研究经费,相继推出立体电视。立体显示相关的研究也紧锣密鼓地展开,研究层面不仅仅局限在如何实现^[1-2],立体显示质量的提升也成

收稿日期: 2013-12-23; **收到修改稿日期**: 2014-02-17

基金项目: 国家 973 计划(2013CB328803)、国家 863 计划(2013AA011004)

作者简介: 夏振平(1985—),男,博士,讲师,主要从事立体显示图像质量测量、评价和优化方面的研究。

E-mail: xzp@mail.usts.edu.cn

为研究的重点^[3-5]。

目前,主动快门式立体显示技术凭借其容易实现、成本低、效果突出等优势成为消费市场中的主流立体显示技术之一^[6]。从现状来看,主动快门式立体显示技术仍然存在很多问题。其中,由于其产生左右视图的方式是通过时间上交替呈现,在显示大面积、高亮度图像时存在闪烁感是主要问题之一,这也是其他竞争技术(如偏振式立体显示技术)攻击的要害之一。研究表明,闪烁现象对于显示质量、观看舒适度有显著影响^[7],甚至存在健康隐患^[8-9]。因此,研究者提出了一些评价并降低主动快门式立体显示自身存在闪烁的方法^[10-12]。除了显示系统的闪烁以外,日常使用的照明环境光也可能存在闪烁现象^[13-17]。主动快门式立体显示技术和照明环境光各自的闪烁现象都有相关研究,而两者之间共存时的相互作用容易被科研人员忽略,这种被忽略的相互作用往往可能产生比各自本身更为严重的闪烁现象。

本文结合客观测量和主观实验的方法,从环境光对快门式立体显示中闪烁的影响角度进行了深入研究。客观测量主要通过瞬态亮度响应测量系统^[11]测量经过快门眼镜调制后的环境光,即人眼透过快门眼镜看到的环境光的时序特性,并进行频域特性分析;主观感知结合人因设计全面的视觉感知实验并对结果进行科学统计分析,研究了多个因素在环境光影响快门式立体显示闪烁中所起的作用,并据此提出降低和消除闪烁的方法。

2 快门眼镜与环境光

2.1 快门眼镜

主动快门式立体显示是通过显示器与液晶快门眼镜的同步工作来实现的,即显示器时序显示立体图像的左右视图的同时,快门眼镜的左右镜片交替开关。使人的左右眼分别交替看到具有一定视差的左右图像,从而形成立体效果。快门眼镜是该立体显示技术的关键,也是形成闪烁的根源所在。尽管现在的液晶扫描速度能达到 240 Hz 甚至更高^[18],而快门眼镜仍以 60 Hz 的频率工作,人眼接受到的图像信号的调制频率为 60 Hz,因此在显示大面积高亮度图像时会有明显的闪烁感^[11]。

快门眼镜除了调制频率以外,它的结构特性也非常重要,图 1 所示是快门眼镜的结构示意图。主动快门式立体显示发展初期,快门眼镜的结构如图 1(a)所示,从光线的传播方向(显示屏到眼睛)看,依

次是透明基板、液晶层、透明基板和偏振膜,因为从显示屏传过来的光是偏振光,快门眼镜的液晶层对于该偏振光有改变偏振方向的作用,最后一层偏振膜起到了检偏器的作用,所以该结构对显示器发出的光具有开关作用。然而,这样的结构存在很大问题,由于没有前偏振膜充当起偏器的角色,观看者必须保持正视的姿势,一旦头部左右倾斜(比如,侧躺在沙发上观看主动快门立体显示),左右视图将产生交叉影响,形成串扰^[5]。因此目前使用的快门眼镜基本上都采用了如图 1(b)的结构,也就是在原来结构的基础上增加了一层前偏振膜充当起偏器,前后偏振膜的偏振方向互相垂直,这样就避免了在观看角度偏移的过程中引入的串扰,从而增强了立体感知效果,提高了观看的自由度和舒适度。

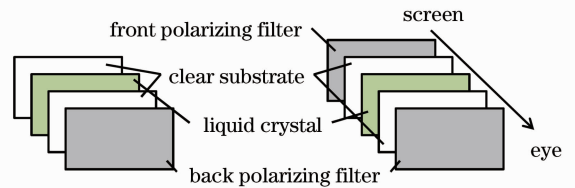


图 1 快门眼镜的结构。(a)仅具有后偏振膜;
(b)具有前后偏振膜

Fig. 1 Structure of shutter glasses. (a) Only with back polarizing filter; (b) with both front and back polarizing filters

2.2 环境光

居家照明所用的灯具种类有白炽灯、日光灯、发光二极管(LED)等,白炽灯已经逐渐被淘汰,日光灯目前的使用最为普遍,LED 的使用正逐步普及。欧洲和亚洲的大部分地区所使用的交流电的频率为 50 Hz,因此在该交流电条件下工作的照明灯具的光输出调制主频率为 100 Hz,直流驱动的 LED 根据驱动电路的不同,其输出光也有可能存在 100 Hz 的调制现象。本文利用自主研发的瞬态亮度响应测量系统^[11]在交流电主频为 50 Hz(中国大陆)的条件下,测量了包括白炽灯、日光灯和 LED 灯三种不同技术的输出光响应。从时域亮度响应看,这些输出光都不同程度地出现周期性的波动现象,经过频谱分析后,从频域发现它们的调制主频率都为 100 Hz。

2.3 快门眼镜对环境光的调制

目前使用的快门眼镜基本上都使用了前后偏振膜的结构,这样一来,快门眼镜不仅对来自显示器的光具有开关调制作用,其将对任何经过它进入人眼的光线都具有调制作用,因此在观看主动快门式立体显示时的照明环境光也将被快门眼镜调制后进入

人眼。图 2 测量了常用的日光灯产生的环境光经过快门眼镜调制后的情况。光强的时序变化归一化后如图 2(a)所示,从时序变化可以看出该光信号仍然

是周期变化信号,而任何满足狄里赫利条件的周期信号都可以表示为直流分量和多个简谐分量的和,如(1)式所示,式中 L_0 为亮度平均值, T 为信号的周期。

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

时域周期信号经过傅里叶变换后,得到该信号在频域上对应频率的幅度值,其中频率为 0 时对应直流分量,也就是亮度的平均值,图 2(b)为归一化的信号频域图,直流分量强度为 1,不难发现,除了与显示器发出的光透过快门眼镜后同样出现的 60 Hz 主频^[1]外,在 60 Hz 以下还有 40 Hz 和 20 Hz 左右的频率分量。这些低频信号是这样产生的,环境光本身以 100 Hz 的主频周期性变化,经过快门眼镜调制,而快门眼镜以 60 Hz 为基频(同时包含其倍频,如 120 Hz 等)对 100 Hz 为主频的信号进行调制,相当于两种波形相乘,最终得到的光信号中包含原有频率以及两种波形中各频率的和频和差频,40 Hz 由

100 Hz 和 60 Hz 的差得到,20 Hz 由 120 Hz 和 100 Hz 的差得到。

Kelly^[19]基于视觉感知实验对闪烁感的基本原理做了深入研究,总结出各种实验条件下人眼对光闪烁频率的敏感程度,即时间对比敏感度函数(TCSF)。其中,闪烁频率对闪烁感知具有决定性的影响,时间对比敏感度函数在 60 Hz 左右几乎为 0,随着频率的降低,敏感度数值迅速增加,在 10 Hz 左右达到峰值。因此,100 Hz 调制的环境光透过快门眼镜后产生了低于 60 Hz 的低频分量,这些低频分量将产生比主动快门立体显示系统自身更为强烈的闪烁感。

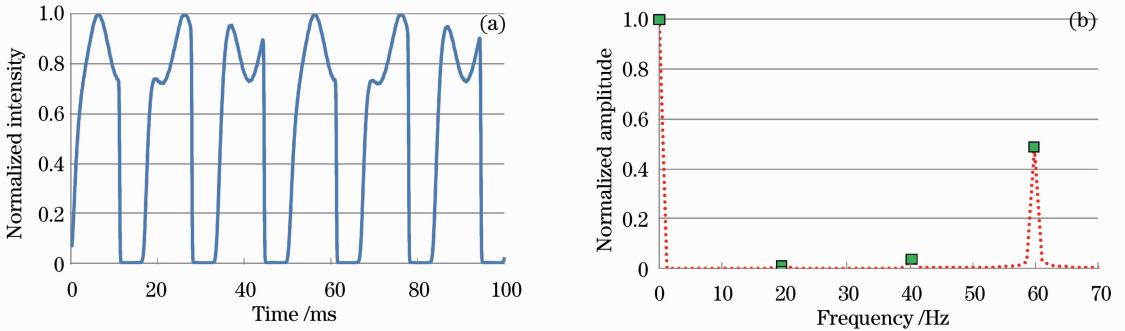


图 2 经过快门眼镜调制的环境光。(a)时域图;(b)频域图

Fig. 2 Ambient light modulated by active shutter glasses. (a) Time domain; (b) frequency domain

3 环境光对闪烁的影响

为了深入研究照明环境光的特性对主动快门式立体显示中闪烁的影响,文中基于 LED 设计了多种参数可调节的照明系统,并设计完成了两组针对环境光透过快门眼镜闪烁的视觉感知实验。

3.1 视觉感知实验设计

设计的 LED 照明系统由两个 20 W 的白光 LED(色温 6000 K,与常用日光灯色温相近)组成,直流驱动,脉宽调制(PWM)信号控制,三个基本的参数可调:最大光强、调制频率、调制占空比。其中,最大光强通过输入电流的大小控制。实验中,LED

照明系统放置在立体显示器的背面,测试者在正对显示屏中心位置的三倍屏高距离处端坐,感受到的环境光是经过墙面漫反射后的效果(如图 3 所示)。

由于研究涉及的影响因素比较多,因此视觉感知实验分为两个部分:1)实验一涉及的影响因素有三个,包括环境光的调制频率、最大光强和感知环境光闪烁时显示器的显示内容;2)实验二涉及的影响因素有两个,包括频率和占空比。其中,频率因素中包含六个参数:50、60、75、90、100、120 Hz;最大光强包括三个参数:1-弱、2-中、3-强,其中 2-中的强度大概是 1-弱的两倍,3-强的强度大概是 2-中的两倍;

显示内容包括两个参数:全黑图像和彩色立体图像;占空比包含三个参数:25%、50%、75%。实验中不涉及的因素采用默认值,最大光强的默认值为 2-

中,显示内容的默认值为全黑图像,占空比的默认值为 50%。

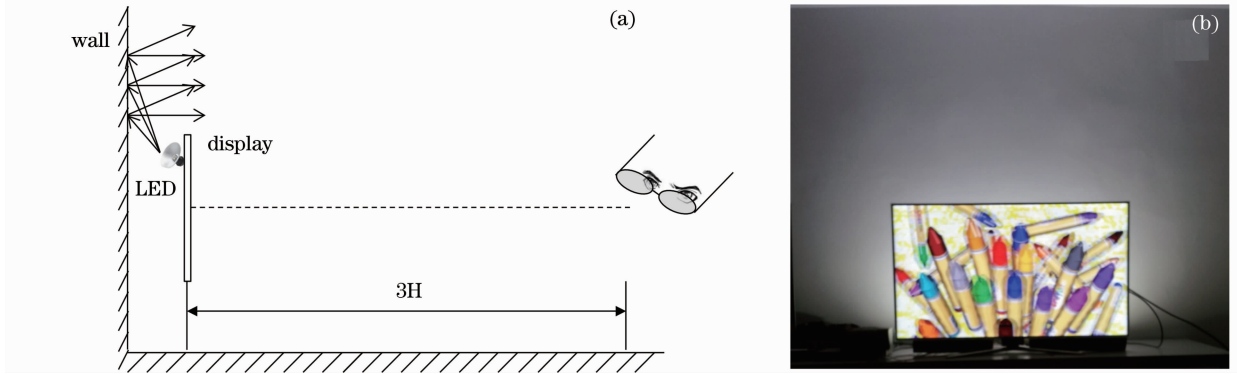


图 3 视觉感知实验设置。(a)示意图;(b)实际测试场景

Fig. 3 Perception experiment setup. (a) Schematic diagram; (b) actual test scene

实验中采用 55 inch(1 inch=2.54 cm)主动快门式立体显示器,除为实验设计的照明环境光外,无其他环境光源,实验环境温度为 26 °C,相对湿度为 77%,都在 VESA 标准^[20]所规定的范围之内。共有 16 人参加了实验,男女人数比例为 1:1,年龄范围在 22~37 周岁,平均年龄为 24 周岁,所有受测者的双眼视力(或矫正后视力)均达到 1.0 以上,立体视觉经过双眼立体视觉测试表测试,立体视觉精度均小于等于 60"。

受测者被要求端坐在三倍屏高距离位置,正视显示屏,通过眼睛的余光感受环境光的闪烁,以 ITU-RBT. 500 标准^[21]中 5 分制的形式对闪烁程度进行评分(如表 1 所示)。

3.2 实验结果分析

表 2 各因素对闪烁评分的 ANOVA 分析结果

Table 2 Results of the ANOVA analysis, investigating the effect of all factors on flicker

	Factor	<i>df</i>	<i>F</i>	δ
Exp. 1	Frequency	5	490.949	<0.001
	Maximum intensity	2	13.690	<0.001
	Displayed image	1	5.135	0.024
Exp. 2	Frequency	5	478.058	<0.001
	Duty cycle	2	40.013	<0.001
	Frequency×Duty cycle	10	5.526	<0.001

根据边际均值估计(EMM)的统计分析结果,各影响因素对应的评分(评分越低闪烁感越强烈)平均值及其误差范围如图 4 所示。其中,频率、最大光强、占空比是照明环境光自身的客观特性,而显示内容与显示器以及人因相关。频率的六个参数[图 4(a)]中,60 Hz 和 120 Hz 对应评分接近 5 分(无闪烁);90 Hz 和 100 Hz 对应评分在 4 分左右

实验结束后,所有实验数据经过仔细地处理,并利用 SPSS 软件(Version 13.0)进行统计分析。方差分析(ANOVA)的结果(如表 2 所示)表明,实验 1 中的三个因素频率、最大光强、显示内容以及实验 2 中的频率、占空比和它们的组合都对环境光闪烁程度的主观感知有显著性影响($\delta < 0.05$)。

表 1 视觉感知评分标准

Table 1 Perception experiment grading standard

Grade	Flicker visibility
5	Invisible
4	Slightly visible
3	Moderate visible
2	Obviously visible
1	Very obviously visible

(轻微闪烁);50 Hz 和 75 Hz 对应评分最低在 2 分左右(明显闪烁)。环境光经快门眼镜调制后产生的 60 Hz 以下的低频分量是闪烁的主要原因。最大光强的三个参数对应的评分依次下降[图 4(b)],表现为光强越强闪烁越明显。占空比的三个参数对应的评分依次上升[图 4(c)],表现为占空比越小闪烁越明显,从平均光强的角度来看,占空比越大平均光强

越大,结论与光强对闪烁的影响规律恰恰相反,因此占空比对闪烁的影响应该和人眼的视觉暂留效果相关。显示内容的两个参数[图 4(d)]中,彩色立体图

像对应的评分要高于显示全黑图像的评分,这是由于更具吸引力的内容分散了人眼和大脑的注意力,从而缓解了对环境光闪烁程度的感知。

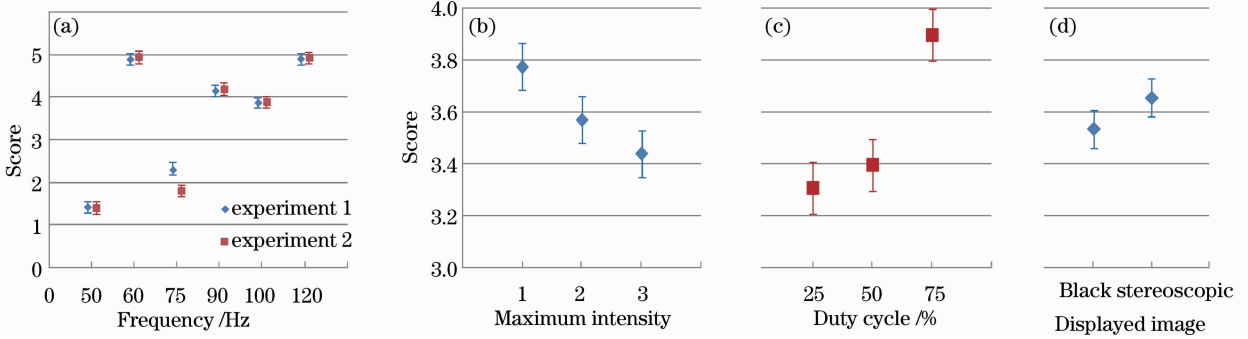


图 4 视觉感知评分结果。(a)各频率评分;(b)各最大强度评分;(c)各占空比评分;(d)各显示内容下的评分
Fig. 4 Perception experiment results. (a) Score with different frequencies; (b) score with different maximum intensities; (c) score with different duty cycles; (d) score with different displayed images

环境光的频率在涉及的几个闪烁影响因素中最为重要,图 4(a)从主观评价的角度对各个环境光频率下的闪烁程度进行了比较,这种比较只是直观上的,因此图 5 从客观评价的角度对闪烁感进行了具体的量化。量化方法利用人眼的时间对比敏感度函数(TCSF)^[19]对归一化的功率谱[图 2(b)]进行加权,即两者对应频率相乘,得到对比敏感度加权的强

度(CSWA),各主频对应的强度和可以作为闪烁程度的指标。图 5 中的数据选择了实验二中占空比为 50%的情况作为示例,客观评价的结果与主观实验结果高度一致,线性拟合的相关度极高($R^2 = 0.999$),比较小的差异(比如环境光 50 Hz 和 75 Hz 以及 90 Hz 和 100 Hz 之间的差异)也能准确体现。

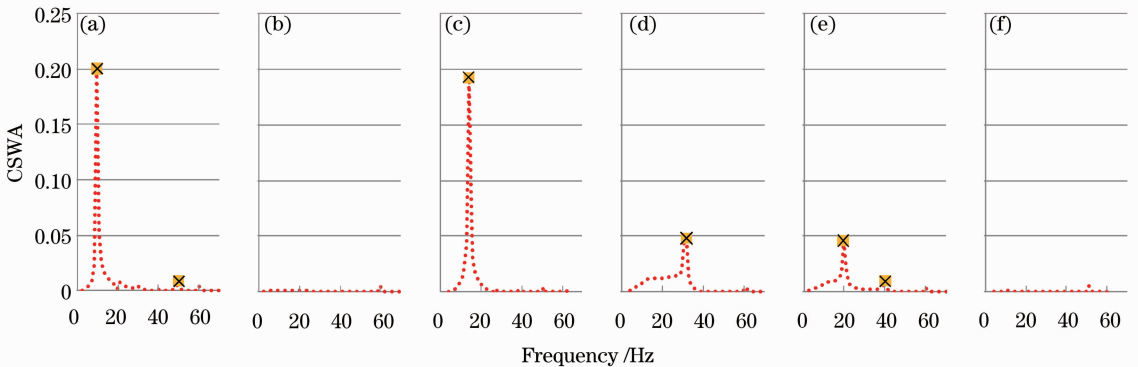


图 5 经过时间对比敏感度函数加权的功率谱。(a) 50 Hz 环境光;(b) 60 Hz 环境光;(c) 75 Hz 环境光;
(d) 90 Hz 环境光;(e) 100 Hz 环境光;(f) 120 Hz 环境光

Fig. 5 Temporal contrast sensitivity function weighted power spectrum. (a) 50 Hz ambient light; (b) 60 Hz ambient light; (c) 75 Hz ambient light; (d) 90 Hz ambient light; (e) 100 Hz ambient light; (f) 120 Hz ambient light

3.3 讨论

从视觉感知实验设计及其结果分析中,除了对环境光影响主动快门式立体显示中闪烁的主要因素及其机理有更深入全面的理解外,其对主动快门式立体显示或其它时序式显示器匹配环境光源的设计也具有现实的指导意义。频率匹配是该配套环境光源要考虑的首要因素,从评分结果来看,60 Hz 和 120 Hz 的评分不分伯仲,但是从左右眼亮度的角度考虑两者还是有很大差异。经过具体测算,当环境

光为 60 Hz 时,透过眼镜的环境光强有 50% 以上的波动,且左右眼接受的光波动相位完全相反,亮度不一致;当环境光为 120 Hz 时,透过眼镜的环境光强有 20% 左右的波动,左右眼接受的光波动相位一致,亮度一致。因此,匹配频率建议使用 120 Hz 或更高的倍频。另外,环境光与快门眼镜之间的调制相位差对闪烁以及人眼接受的光强没有影响。

4 结 论

就环境光对快门式立体显示中闪烁的影响进行了深入的研究。研究中使用高采样率瞬态亮度响应测量系统对透过快门眼镜的环境光信号进行实时测量和记录,测量的时域信号经过傅里叶变换后得到对应的频域信号,用于分析环境光影响闪烁的可能原因。同时,基于多参数可调的LED照明系统完成了两组视觉感知实验,结果表明,环境光的频率、最大光强、占空比以及显示器的显示内容等参数对人眼透过快门眼镜感受到的环境光闪烁程度有显著性的影响,环境光的频率匹配是消除环境光闪烁的主要途径,120 Hz 或以上的倍频去作为匹配环境光可以达到消除环境光闪烁的目的并且达到比较好的舒适度。研究结果对主动快门式立体显示中闪烁感的优化以及视觉舒适度的提高具有指导和推动作用。

参 考 文 献

- 1 Long Tao, Qian Keyuan. Research on digital synthetic holography based on multi-parallax stereo display [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 070901.
龙 涛, 钱可元. 基于多视差立体显示的数字合成全息技术研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(7): 070901.
- 2 Dai Zhihua, Xu Yuping, Bu Jing, *et al.*. Light field microscope to achieve three-dimensional real-time naked-eye display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1022005.
戴志华, 徐于萍, 步 敬, 等. 光场显微镜实现裸眼三维实时显示 [J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1022005.
- 3 Cao Zisheng, Li Haifeng, Yao Zhenning, *et al.*. Simulation and crosstalk analysis of 360° three-dimensional display system based on rotating LED line array [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0508001.
曹子盛, 李海峰, 姚振宁, 等. 基于旋转LED线阵列全景三维显示系统的模拟及串扰分析 [J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0508001.
- 4 Wang Fang, Li Da, Zhao Xing, *et al.*. Study on the stereo depth of integral imaging three-dimensional display system [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(s1): s109002.
王 芳, 黎 达, 赵 星, 等. 集成成像三维显示系统立体深度的研究 [J]. *中国激光*, 2011, 38(s1): s109002.
- 5 Xia Zhenping, Li Xiaohua, Cui Yuan, *et al.*. Crosstalk analysis and cancellation method study in stereoscopic displays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1012002.
夏振平, 李晓华, 崔 渊, 等. 眼镜式立体显示中的串扰分析及

- 消除方法研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1012002.
- 6 D Suzuki, T Fukami, E Higano, *et al.*. Crosstalk-free 3D display with time-sequential OCB LCD [C]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2009, 40(1): 428-431.
- 7 Li Chen, Yan Tu, Lili Wang, *et al.*. Investigation of flicker visibility in impulse type displays [C]. *Proceedings of Asia Display*, 2007, 1: 264-267.
- 8 J Lamparter, A Schulze, A Schuff, *et al.*. Learning curve and fatigue effect of flicker defined form perimetry [J]. *American J Ophthalmology*, 2011, 151(6): 1057-1064.
- 9 H Li, J Seo, K Kham, *et al.*. Measurement of 3D visual fatigue using event-related potential (ERP): 3D oddball paradigm [C]. *3D-TV Conference: the True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video*, 2008: 213-216.
- 10 A B Watson, A J Ahumada. Flicker visibility: a perceptual metric for display flicker [J]. *SID symposium digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 957-959.
- 11 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.
- 12 C Curtin, D Hall, T Woody, *et al.*. Flicker reduction in field sequential stereo displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2009, 40(1): 1423-1426.
- 13 S Kitsinelis, G Zissis, L Arexis. A study on the flicker of commercial lamps [J]. *Light & Engineering*, 2012, 20(3): 25-33.
- 14 A Wilkins, J Veitch, B Lehman. LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update [C]. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2010: 171-178.
- 15 A Hooshyar, E F El-Saadany. Development of a flickermeter to measure non-incandescent lamps flicker [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, 28(4): 2103-2115.
- 16 J Drapela, M Kratyky, L Weidinger, *et al.*. Light flicker of fluorescent lamps with different types of ballasts caused by interharmonics [C]. *IEEE Russia Power Tech*, 2005: 1-7.
- 17 J Drapela, J Slezinger. Flickering of lamps due to ripple control signal [C]. *IEEE Trondheim Power Tech*, 2011: 1-7.
- 18 D S Kim, S M Park, J H Jung, *et al.*. New 240 Hz driving method for full HD & high quality 3D LCD TV [J]. *SID Symposium digest of Technical Papers*, 2010, 41(1): 762-765.
- 19 D H Kelly. Theory of flicker and transient response, I. uniform fields [J]. *J Opt Soc Am*, 1971, 61(4): 537-546.
- 20 Video Electronics Standards Association. Flat Panel Display Measurements Standard, Version 2.0 [S]. Milpitas, CA, 2001.
- 21 International Telecommunications Union. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures [S]. Geneva, Switzerland, 2002.

栏目编辑: 张浩佳