

文章编号: 1001-3806(2016)03-0367-05

## 自由立体显示器的光学性能测量与研究

王丛, 金杰\*, 沈丽丽

(天津大学 电子信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 为了评价自由立体显示器的光学性能,以八视点狭缝光栅自由立体显示器为例,针对不同的视点图像,测量了不同视角下的亮度值与色度值,研究自由立体显示器的光学性能,其光学性能包括自由立体显示器的最佳观看位置、串扰、可视范围、亮度均匀性、色度均匀性和莫尔条纹。结果表明,这种测量及分析方法实现了对多视点立体显示器光学性能的定量评估,增强了评估立体显示器性能的客观性,对自由立体显示器的设计具有指导意义。

**关键词:** 光学器件;自由立体显示;最佳观看位置;串扰;亮度均匀性;色度均匀性;莫尔条纹

**中图分类号:** TN27      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.014

### Measurement and research of optical characteristics of auto-stereoscopic display

WANG Cong, JIN Jie, SHEN Lili

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to evaluate optical characteristics of auto-stereoscopic display, taking 8 viewpoint parallax barrier auto-stereoscopic display as an example, optical characteristics of auto-stereoscopic display of different viewpoint images were studied and the values of brightness and chromaticity at different visual angles were measured. Optical characteristics included optimal viewing position, crosstalk, viewing range, brightness uniformity, chromaticity uniformity and Moiré fringes. The obtained data samples were analyzed. The results show that the method of measurement and analysis can evaluate the optical characteristics of multi-viewpoint stereoscopic display quantitatively and enhance the objectivity about the performance assessment of stereoscopic display. The study has an instructive effect on auto-stereoscopic display design.

**Key words:** optical devices; autostereoscopic display; optimal viewing position; crosstalk; brightness uniformity; chromaticity uniformity; Moiré fringe

### 引言

近年来,立体显示已成为国内外的一个研究热点,在影视艺术、可视化、虚拟现实等方面有着诱人的前景<sup>[1]</sup>。立体显示器凭借其全方位的展现力与呼之欲出的震撼感觉,以及不需要佩戴眼镜的优点,成为立体3-D显示研究的主要方向,是新一代显示器件的研究热点<sup>[2]</sup>。自由立体显示器主要包括狭缝光栅式自由立体显示器和柱镜光栅式自由立体显示器,其实现原理都是基于光栅的分光原理,通过对光栅形状的设计及光栅到显示器距离的精确控制,使通过显示平面的各像素的光线分别只进入人的左眼或右眼,双眼看到不同的画面,由立体融像原理产生空间感<sup>[3]</sup>。

由于自由立体显示技术本身的限制,自由立体显示器同时也存在着一些缺陷,例如与常规的平面显示器相比,其分辨率降低、可视区域较小,且存在串扰引起的观看视疲劳等问题,从而也限制了它的广泛应用<sup>[4]</sup>。因此,了解进而改善自由立体显示器质量对于自由立体显示技术的研究十分重要。作者将基于八视点狭缝光栅3-D显示器,针对串扰、可视范围、亮度均匀性、色度均匀性、莫尔条纹等特性,给出自由立体显示器光学性能的测量方法,并对测量结果进行分析。

### 1 测量原理与方法

对于自由立体显示器光学性能的研究,主要是通过测量其不同视角下的亮度和色度,并对测量数据进行分析。自由立体显示器的光学性能测量采用FS-5500TLS光学特性自动测量系统,如图1所示。搭载的亮度计为柯尼卡美能达CA-2000 2维色彩分析仪,所测显示器为八视点狭缝光栅式自由立体显示器。按照图1中的实验设备连接示意图搭建实验测试平台,将亮度计放置在显示器设计的最佳观看距离的位置

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61302123);国家八六三高技术研究发展计划资助项目(2012AA011505)

作者简介:王丛(1989-),女,硕士研究生,现主要从事3-D图像处理方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: jinjie@tju.edu.cn

收稿日期:2015-03-10;收到修改稿日期:2015-04-10

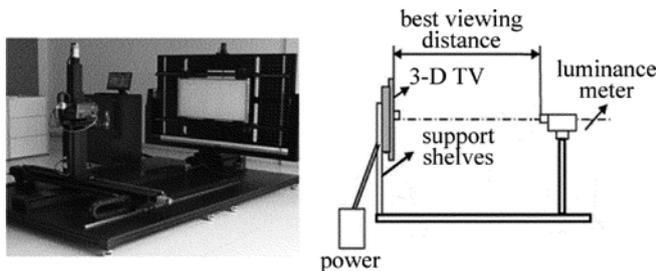


Fig. 1 Measurement system

上,显示器搭载于可以转动的测量系统面板上,显示器垂直中线与测量系统面板的垂直中线重合,通过转动测量系统面板实现不同角度下亮度、色度的测量。

为了测量自由立体显示器不同视点的光学性能,选取以下几种测量图像:全白图像、全黑图像、各视点白场图像。其中各视点白场图像只有相应视点图像的子像素显示最高亮度值,而其它的子像素均不显示。即第  $i(i=1\sim 8)$  张测试图中第  $i$  幅视点图的子像素的显示亮度值为 255,其余子像素的显示亮度值为 0。测量时,所有的设备均需预热 0.5h 以上,且在暗室中进行。测量前需进行零度校准,零度时,亮度计不完全垂直于显示器,会使得亮度与角度的关系产生偏差。

测量方法如下:在水平方向,将显示器由  $-30^\circ$  旋转至  $30^\circ$ ,每隔  $0.2^\circ$  记录一次亮度计的亮度值与色度值,分别测量全黑图像,各视点白场图像的亮度和色度。再将显示器由  $-15^\circ$  旋转至  $15^\circ$ ,每隔  $0.1^\circ$  记录一次亮度计的亮度值与色度值,测量全白图像的亮度和色度<sup>[5]</sup>。测量过程中要注意显示屏的亮度会随着时间产生漂移,从而对测量结果产生影响,因此可以分成两部分进行测量,如  $0^\circ\sim 30^\circ$  和  $-30^\circ\sim 0^\circ$ ,再以  $0^\circ$  数据为基准,对数据进行修正,以减小时间对亮度的影响<sup>[6]</sup>。

## 2 测量结果与分析

### 2.1 最佳观看位置

最佳观看位置即在一定的视角范围内每个视点的最大亮度位置,在该位置上,可以近似视为只观测到该视点的亮度。自由立体显示器的最佳观看位置在开发设计之时就已固定,只有在最佳观看位置处才能观看到舒适的立体效果。但是,产品设计的最佳观看位置没有考虑不同视角对立体观看效果的影响,即使在最佳观看距离处,不同的观看角度也会带来相差悬殊的立体观看效果<sup>[7]</sup>。为了指导观看者找到最佳观看位置,观看到良好而舒适的立体效果,有必要找到合适的观看角度。

最佳观看位置的测量图像为各视点白场图像,在最佳观看距离处,测量各视点的白场亮度分布曲线,如

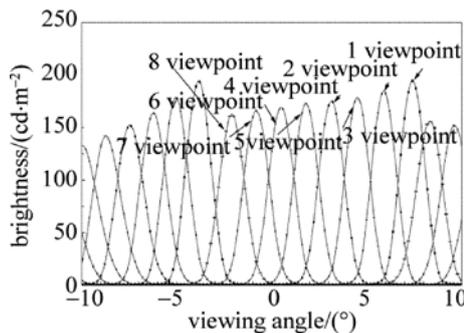


Fig. 2 Brightness curve of 8 viewpoint auto-stereoscopic display

图 2 所示,曲线上峰值点对应的角度位置即为最佳观看位置,每个视点有多个峰值点,即每个视点在屏前空间会水平交替出现多个最佳观看位置<sup>[8]</sup>,相邻最佳观看位置角度间隔固定,约为  $10.4^\circ$ 。

表 1 中列出了  $-7^\circ\sim +7^\circ$  范围内各视点的最佳观看位置,由表 1 可知,最佳观看位置呈规律分布,相邻视点最佳观看位置角度间隔约为  $1.4^\circ$ 。

Table 1 The optimal viewing angle of each viewpoint

viewpoint	optimal viewing angle	viewpoint	optimal viewing angle
1	$7.4^\circ$	5	$1.8^\circ$
2	$6^\circ$	6	$0.6^\circ$
3	$4.6^\circ$	7	$-0.8^\circ$
4	$3.2^\circ$	8	$-2.2^\circ$

### 2.2 自由立体串扰及可视范围

自由立体显示为了平衡视差图像分辨率在水平和垂直方向的损失以及减少彩色莫尔条纹的影响,光栅需按一定角度倾斜放置,然而显示器的子像素是不会按相应角度倾斜的,光栅在对合成图像进行分光时,某个视点除了接收到来自于对应视差图像子像素所发出的光线外,还会接收到来自于相邻视差图像子像素所发出的光线,这就产生了视点之间图像的串扰。串扰影响了立体显示器的图像质量,降低了观看舒适度<sup>[9]</sup>。

自由立体显示器的串扰比可以表示各视点信息互相泄漏的影响,串扰比定义为串扰亮度与非串扰亮度的比值<sup>[10-11]</sup>。串扰比是自由立体显示器的特征之一,也是最能体现自由立体显示性能的特征参量,串扰比越小,表示立体显示器的性能越好<sup>[12-13]</sup>。多视点自由立体显示设备视点  $k$  的串扰比计算公式为:

$$\chi_k = \frac{\sum_{i=1-N, k=1-N}^N L_{i,k} - L_b}{L_{k,k} - L_b} \quad (1)$$

式中,  $\chi_k$  是视点  $k$  的系统串扰比,  $L_{i,k}$  为第  $i$  幅图像为白图像而其它图像为黑图像时在视点  $k$  处测量到的亮度值,  $L_{k,k}$  为第  $k$  幅图像为白图像而其它图像为黑图像时在视点  $k$  处测量到的亮度值,  $L_b$  为各视点图像都是

黑图像时在视点  $k$  处测量到的亮度值,  $N$  为视点数。

串扰测量图像为各视点白场图像及全黑图像, 图3为串扰随角度变化曲线, 每个视点串扰曲线有多个谷值点, 即各视点在屏前空间存在多个低串扰观测点, 这些低串扰观测点在屏前空间的分布规律与最佳观看位置分布是一致的。

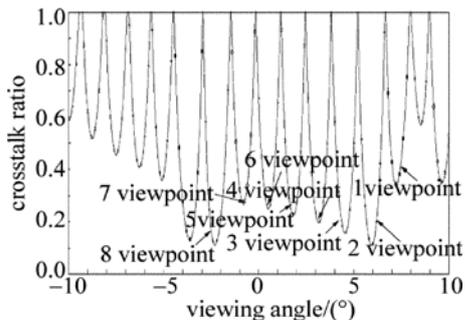


Fig. 3 Crosstalk ratio changing with the viewing angle

表2中列出了各视点最低串扰比, 各视点最低串扰比均小于40%。

Table 2 Lowest crosstalk ratio of 8 viewpoint auto-stereoscopic display

viewpoint	the minimum crosstalk ratio	viewpoint	the minimum crosstalk ratio
1	0.38	5	0.23
2	0.12	6	0.26
3	0.16	7	0.28
4	0.2	8	0.13

可视范围是指在可接受的视疲劳范围内观看图像的空间范围。可视范围取决于显示器的串扰、亮度、对比度、色彩、莫尔条纹等诸多性能。对立体显示器而言, 可视范围主要是由串扰决定的<sup>[14]</sup>。可视范围测量图与串扰测量图相同, 为各视点白场图像。可视范围与低串扰区及最佳观看角度范围对应, 由表1可知, 该显示器水平可视范围为  $-2.2^\circ \sim 7.4^\circ$ 。

### 2.3 亮度均匀性

即使是在平面显示器上, 屏幕不同位置的亮度值也不相同, 一般屏幕中心亮度会高于周边位置的亮度, 立体显示器同样存在这个问题。当屏幕中心亮度值与周边特定位置的亮度值相差较大时, 容易使人产生视疲劳<sup>[15]</sup>。因此, 有必要对立体显示器的整体亮度进行均匀性测试。

亮度均匀性的测量图像为全白图像, 图4为测得的全白图像亮度曲线, 该显示器右半屏幕亮度略高于左半屏幕亮度, 偏离屏幕中心点角度越大, 亮度值越小。亮度均匀性衡量指标为白场亮度的调制性, 其计算公式如下:

$$Y = \frac{\max[L_i] - \min[L_j]}{\max[L_i]} \quad (2)$$

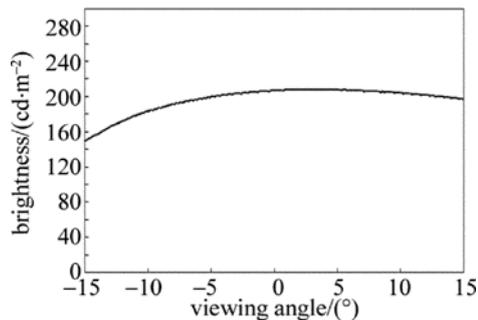


Fig. 4 Brightness curve for all white images

式中,  $L_i, L_j$  为相邻视点的全白图像亮度。

表3中列出了各视点全白图像亮度, 计算亮度调制性, 用最大值来表示亮度均匀性。由表3计算出该显示器亮度调制性最大值为0.7%。

Table 3 Brightness of 8 viewpoint for all white images

viewpoint	brightness for all white	viewpoint	brightness for all white
1	206.112	5	207.516
2	207.059	6	206.934
3	207.436	7	205.817
4	207.659	8	204.332

### 2.4 色度均匀性

与亮度均匀性类似, 色度的均匀性也是影响立体观看舒适度的一个因素。色度均匀性的测量图像为全白图像, 得到的色度值是用色度坐标  $(x, y)$  表示的, 需将其转化为 CIELUV 空间中的坐标  $(u, v)$ , 其转化公式如下:

$$\begin{cases} u = \frac{4x}{3 - 2x + 12y} \\ v = \frac{9y}{3 - 2x + 12y} \end{cases} \quad (3)$$

色度偏差计算公式如下:

$$\Delta_w = \sqrt{(u_i - u_0)^2 + (v_i - v_0)^2} \quad (4)$$

式中,  $(u_i, v_i)$  为八视点色度坐标,  $(u_0, v_0)$  为屏幕中心点色度坐标。图5为色度偏差随角度变化曲线, 该显示器右半屏幕色度偏差较左半屏幕变化明显, 偏离屏幕中心点角度越大, 色度偏差越大。

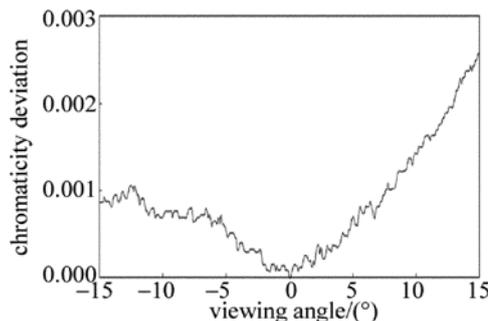


Fig. 5 Chromaticity deviation changing with the viewing angle

表4中列出了8个最佳观看位置的色度偏差, 用

Table 4 Chromaticity deviation of 8 viewpoint for all white images

viewpoint	chromaticity deviation	viewpoint	chromaticity deviation
1	0.09%	5	0.01%
2	0.08%	6	0.01%
3	0.05%	7	0.01%
4	0.03%	8	0.03%

色度偏差最大值表示色度均匀性。由表 4 可知,色度偏差最大值为 0.09%。

### 2.5 莫尔条纹

莫尔条纹是两条线或两个物体之间以恒定的角度和频率发生干涉的视觉现象,它使人眼无法分辨这两条线或两个物体,只能看到干涉的条纹。在光栅式自由立体显示器中,由于 2-D 显示器的像素是有序排列的周期性矩阵结构,其发出的光场也具有周期性矩阵结构,这样的光场与 2-D 显示屏前面的周期性结构的光栅相互干涉,形成莫尔条纹。其中,2-D 显示屏子像素间周期排列的黑矩阵与光栅结构干涉生成黑白莫尔条纹,周期排列的 RGB 子像素滤色膜与光栅结构干涉生成彩色莫尔条纹,使裸眼 3-D 显示效果变差,甚至造成图像无法正常显示,进而产生视疲劳<sup>[16]</sup>。

在实际测量中,莫尔条纹表现为自由立体显示器的亮度或色彩在空间或角度上的不均匀性,这种不均匀性由光学器件上光的吸收、反射、折射等现象引起。亮度莫尔条纹由亮度调制性和对应角度差异决定。如图 6 所示,亮度调制性计算公式如下:

$$C = \frac{|L_A - L_B|}{L_A + L_B} \quad (5)$$

对应角度差异为:

$$\theta = |\theta_A - \theta_B| \quad (6)$$

式中, $L_A$  和  $L_B$  为相邻亮度拐点亮度, $\theta_A$  和  $\theta_B$  为对应角度。要求亮度调制性与对应角度差异足够小,由此得到的亮度莫尔条纹不明显,从而减小观看视疲劳。

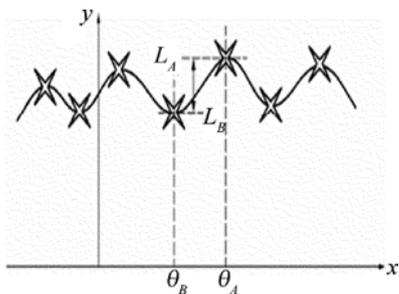


Fig. 6 Brightness of Moiré fringes

亮度莫尔条纹测量图像为全白图像,图 7 为实验中测量得到的亮度莫尔条纹曲线,该显示器右半屏幕

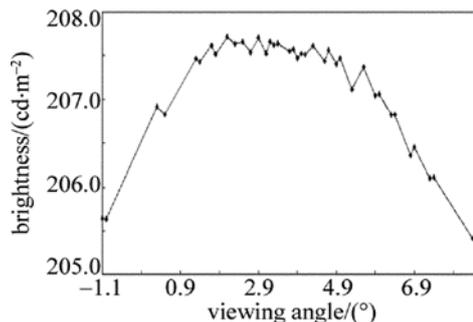


Fig. 7 Curve for brightness of Moiré fringes

亮度莫尔条纹较左半屏幕明显,计算相邻亮度拐点的亮度调制性及对应角度差异,用其最大值来表示莫尔条纹的光学性能。经计算得出亮度调制性最大值为 0.31%,对应角度差异为 1.3°。

### 3 结 论

从自由立体显示器光学性能如最佳观看位置、串扰、可视范围、亮度均匀性、色度均匀性、莫尔条纹出发,给出了自由立体显示器光学性能的测量与分析方法,并对获得的数据样本进行了分析,对自由立体显示器质量客观评价有一定的指导作用。基于不同显示器和不同的测量分析方法,要得出自由立体显示器一般性的结论还要进行大规模数据验证。

#### 参 考 文 献

- [1] WANG P, ZHANG Y P, ZHANG J Q, *et al.* 3-D computer generated hologram display based on digital micro-mirror device[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4):483-486 (in Chinese).
- [2] WANG Q H, TAO Y H, LI D H, *et al.* 3-D auto-stereoscopic liquid crystal display based on lenticular lens[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2008, 31(1): 296-298 (in Chinese).
- [3] WANG Q H. 3-D display technology and devices[M]. Beijing: Science Press, 2011:68-70 (in Chinese).
- [4] LI X F, WANG Q H, LI D H, *et al.* Visual fatigue caused by auto-stereoscopic displays[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(4):464-467 (in Chinese).
- [5] WU D Y, FAN K F, BU S P, *et al.* Methods of measurement for eyes crosstalk of 3DTV[J]. *Video Engineering*, 2012, 36(6):87-89 (in Chinese).
- [6] HUANG Y, LI X H, XIA Z P, *et al.* Measurement method research on the optical characteristics of auto-stereoscopic display[C]//China FPD Conference. Shenzhen: Chinese Physical Society, 2012:542-546 (in Chinese).
- [7] LEE J H, SONG J K. Individual variation in 3-D visual fatigue caused by stereoscopic images[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2012, 58(2):500-504.
- [8] HOU C P, XU G, SHEN L L. Analysis of viewing zone and simulation of the crosstalk based on multi-view auto-stereoscopic display[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(1):219-223 (in Chinese).
- [9] HOU C P, WANG X Y. Crosstalk ratio evaluation of auto-stereoscopic display based on the slanted parallax barrier[J]. *Journal of Tianjin University*, 2012, 45(8):663-668 (in Chinese).
- [10] LI X F, WANG Q H, LI D H, *et al.* Image processing to eliminate

- crosstalk between neighboring view images in three-dimensional lenticular display[J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(8): 443-447.
- [11] WU D Y, CAO J D, FAN K F. Research on range of crosstalk influencing comfort of 3-D TV[J]. *Video Engineering*, 2013, 37(22): 94-96(in Chinese).
- [12] LIU W. Performance test and evaluation methods of stereoscopic display[D]. Nanjing: Southeast University, 2008;17-29(in Chinese).
- [13] BOEV A, GTCHEV A, EGIAZARIAN K. Crosstalk measurement methodology for auto-stereoscopic screens [C]// 3DTV Conference. New York, USA:IEEE, 2007;1-4.
- [14] HOU C P, XU G, SHEN L L. Calculation and simulation of viewing zone based on parallax barrier auto-stereoscopic display[J]. *Journal of Tianjin University*, 2012, 45(8):677-681(in Chinese).
- [15] WANG Q H, PAN D D, LI X F, *et al.* Relation between viewer's pupil diameter and visual fatigue in auto-stereoscopic display[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(3):350-353(in Chinese).
- [16] ZHU Y L, CHEN R G, XIE J, *et al.* Principle of Moiré fringe in auto-stereoscopic display based on parallax barrier and lenticular lens [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(6):911-915(in Chinese).

《激光技术》编辑部

版权所有 ©