

子像素排列方向对小间距LED裸眼3D显示系统串扰的影响

邓儒, 李文华, 党伟

引用本文:

邓儒, 李文华, 党伟. 子像素排列方向对小间距LED裸眼3D显示系统串扰的影响[J]. *液晶与显示*, 2020, 35(11): 1120–1126.
DENG Ru, LI Wen-hua, DANG Wei. Effect of sub-pixel arrangement direction on crosstalk of small interval LED naked eye 3D display system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(11): 1120–1126.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203511.1120>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

裸眼3D显示设备关键指标测试方案的研究

Key properties of autostereoscopic display

液晶与显示. 2015(5): 888–893 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153005.0888>

狭缝光栅开口率与裸眼3D显示串扰之间的关系

Relationship between parallax barrier opening ratio and auto-stereoscopic display crosstalk

液晶与显示. 2019, 34(5): 472–476 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193405.0472>

单摄像机无人机获取裸眼3D视频的方法

Naked-eye 3D videos acquired by single-camera unmanned aerial vehicle

液晶与显示. 2020, 35(4): 315–320 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203504.0315>

基于人眼检测优化的立体人机交互技术的研究

3D human-machine interaction based on human eye detection

液晶与显示. 2018, 33(11): 958–964 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183311.0958>

垂直/倾斜型交错狭缝光栅对立体显示效果的影响

Effect of the vertical /slanted staggered barrier on autostereoscopic displays

液晶与显示. 2019, 34(7): 659–666 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193407.0659>

文章编号:1007-2780(2020)11-1120-07

子像素排列方向对小间距 LED 裸眼 3D 显示系统串扰的影响

邓 儒¹, 李文华², 党 伟^{1*}

(1. 河北大学 物理科学与技术学院, 河北 保定 071002;

2. 保定学院 信息工程学院, 河北 保定 071002)

摘要:小间距 LED 裸眼 3D 显示系统可以实现超大幅面和相对较高分辨率的立体显示效果,是液晶裸眼 3D 显示系统的重要补充。LED 子像素具有类点状特性,且子像素可以水平或竖直排列。本文分析了子像素排列方向对小间距 LED 裸眼 3D 显示系统串扰的影响。利用 Tracepro 仿真软件,对像素间距 1.25 mm 和 1.667 mm 两种 LED 裸眼 3D 显示系统的串扰进行仿真。仿真结果表明子像素水平和竖直排列条件下系统串扰基本相同。对于 1.25 mm LED 裸眼 3D 显示系统,实验测量结果进一步证实子像素排列方向不影响系统串扰率。因此在实际应用中,可以根据需要选择 1.25 mm LED 裸眼 3D 显示系统的子像素排列方向。

关 键 词:裸眼 3D;LED;串扰;子像素排列方向

中图分类号:TN27 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/YJYXS20203511.1120

Effect of sub-pixel arrangement direction on crosstalk of small interval LED naked eye 3D display system

DENG Ru¹, LI Wen-hua², DANG Wei^{1*}

(1. College of Physical Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China;

2. School of Information Engineering, Baoding College, Baoding 071002, China)

Abstract: Small interval LED based naked eye 3D display system is complementary to LCD based naked eye 3D display system for its relative high resolution and large display size. The sub-pixel of LED is point-like and can be arranged in horizontal or vertical directions. In this paper the effect of sub-pixel direction on cross talk of display system is investigated. The Tracepro software is used to analyze crosstalks of two 3D display systems with sub-pixel interval as 1.25 mm and 1.667 mm, respectively. The simulation results shows 3D display systems of different sub-pixel arrangement directions have nearly the same crosstalk. This result is further confirmed by experimentally testing crosstalk of 1.25 mm LED naked eye 3D display system. With 1.25 mm LED naked eye 3D display system, its sub-pixel

收稿日期:2020-04-22;修订日期:2020-05-31.

基金项目:河北省高等学科科学技术研究项目(No.ZD2017102)

Supported by Key Project of Hebei Education Committee(No.ZD2017102)

* 通信联系人, E-mail: dangwei@hbu.edu.cn

arrangement direction can be changed freely according to actual requirements.

Key words: naked eye 3D; LED; crosstalk; sub-pixel arrange direction

1 引言

相对于传统眼镜式、头盔式等助视立体显示技术,裸眼 3D 显示使观看者摆脱了辅助设备的束缚,极大地减轻了观看者的负担。与全息技术、集成成像相比,裸眼 3D 显示技术实现原理更简单,对硬件要求更低。目前基于液晶屏幕的裸眼 3D 显示系统已经进入商业应用阶段。LED 显示屏幕具有大尺寸、高亮度、室内外均可应用的特点。发展基于 LED 屏幕的超大尺寸裸眼 3D 显示系统可以给观众带来更好的视觉沉浸感,在应急指挥、展览展示、商业宣传领域有广阔的市场前景^[1-5]。LED 屏幕幅面大,像素排列机械精度略低,因此狭缝光栅更适合作为裸眼 3D 显示系统的分光元件。视点图像间串扰是评价裸眼 3D 显示系统的重要指标。对于裸眼 3D 显示系统而言,串扰加重了观看者的视觉疲劳和晕眩等不适症状。虽然已有大量文献针对液晶屏幕裸眼 3D 显示系统的串扰分析^[6-8],但 LED 屏幕裸眼 3D 显示系统的串扰仍值得特别关注。LED 屏幕的像素排列方式不同于液晶屏幕。一般认为液晶屏幕的像素按照子像素水平排列,且纵向横向宽度比为 3:1。LED 屏幕由多个模组构成,子像素可以水平排列,也可以竖直排列。LED 像素发光面积呈点状,使得像素水平和竖直方向上黑矩阵占比高。LED 子像素在空间上非等间隔排列。裸眼 3D 显示技术通过给观察者呈现水平视差而使其获得立体感。像素排列方式必然会对视点间串扰产生影响。对于黑矩阵占空比高,可以预测有利于减小串扰^[9]。但是子像素的非等间隔排列、子像素的排列方向对裸眼 3D 显示系统串扰的影响还不清晰。

本文选择 1.25 mm 和 1.667 mm 两种小间距 LED 屏幕,通过仿真和实验测量分析了子像素的排列方向对裸眼 3D 显示系统串扰的影响。为了突出子像素排列方向的作用,本文仿真时令子像素等间隔排列。仿真和实验测量初步表明,两种小间距的 LED 裸眼 3D 显示系统在子像素水平和竖直排列条件下的串扰率基本一致。

2 狭缝光栅式 LED 裸眼 3D 显示系统仿真模型建立

本文利用 Tracepro 软件的光线追迹功能,对狭缝光栅式 LED 裸眼 3D 显示系统的串扰进行分析,具体包括子像素水平排列条件和子像素竖直排列条件。仿真模型建立需要确定:LED 像素的排列方式、裸眼 3D 显示系统的视点数、狭缝光栅结构与栅屏距、观察距离。

2.1 狭缝光栅式裸眼 3D 显示系统原理

狭缝光栅又称为“黑光栅”,是指在透明胶片上规律性地印刷黑色不透明的倾斜条纹,每两个黑色条纹之间是固定间隔的透明狭缝。利用小孔成像的原理,狭缝控制不同视点图像的光线传播,使观察者左眼和右眼分别观看一对视差图像。图 1 为 2 视点裸眼 3D 显示系统原理示意图。 W_p 为相邻两个子像间距离, W_b 为水平方向光栅挡光条宽度, W_s 为水平方向狭缝光栅节距。 D 是狭缝光栅与显示屏的间距, L 为最佳观测距离, Q 为观察者双瞳距。本文参考亚太地区成人双瞳距平均值约为 63 mm^[10],并根据实验效果,将双瞳距 Q 设为 62.5 mm。根据相似三角形,可以得到栅屏距离 D 为

$$D = \frac{W_p L}{Q + W_p}, \quad (1)$$

狭缝光栅节距为

$$W_s = \frac{K Q W_p}{Q + W_p}, \quad (2)$$

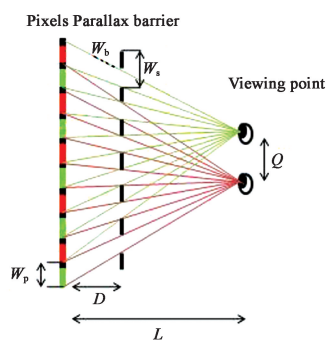


图 1 2 视点裸眼 3D 显示系统原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of 2 view-point naked eye 3D display system

其中: K 为视点数, 透光条宽度一般取光栅节距的 $1/K$ 。

2.2 仿真模型的建立

裸眼 3D 显示系统仿真模型由 3 个部分组成: LED 光源阵列、狭缝光栅以及接收板。LED 光源阵列用于显示立体合成视图, 狭缝光栅起到分光作用, 接收板在最佳观看距离处接收系统光强分布。LED 光源阵列是由多个 LED 灯组成, 每个 LED 灯包含红、绿、蓝 3 颗灯芯。显示图像时, 一个 LED 灯作为一颗全像素, 而其中的每个灯芯作为子像素。本文将 LED 光源阵列设置为小间距规格, 像素间距分别为 1.25 mm 和 1.667 mm。图 2(a)、图 2(b) 为像素间距 1.25 mm LED 子像素横向和纵向排列分布图。图 2(c) 和图 2(d) 为像素间距为 1.667 mm LED 子像素水平和纵向排列分布图。两种规格 LED 子像素发光面均为边长 0.1 mm 正方形。定义子像素的占空比为 $\frac{\text{子像素发光面积}}{\text{子像素节距}^2}$ 。1.25 mm LED 子像素占空比为 5.8%, 1.667 mm LED 子像素占空比为

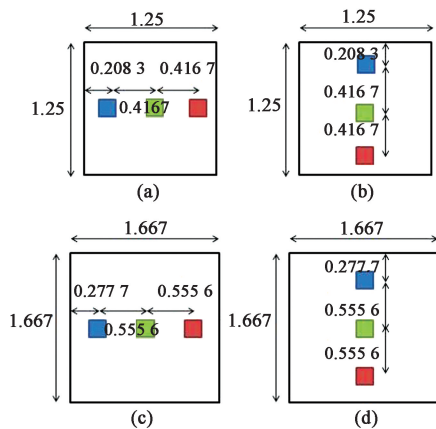


图 2 横向、纵向子像素分布图。(a) 像素间距 1.25 mm LED 的横向子像素排列; (b) 像素间距 1.25 mm LED 的纵向子像素排列; (c) 像素间距 1.667 mm LED 的横向子像素排列; (d) 像素间距 1.667 mm LED 的纵向子像素排列。

Fig.2 Sub-pixel distributions in horizontal and vertical direction. (a) Horizontal arrangement of sub-pixel in LED (1.25 mm pixel spacing); (b) Vertical arrangement of sub-pixel in LED (1.25 mm pixel spacing); (c) Horizontal arrangement of sub-pixel in LED (1.667 mm pixel spacing); (d) Vertical arrangement of sub-pixel in LED (1.667 mm pixel spacing).

3.24%。实际商用的 LED 灯体, 其灯芯呈簇状非等间隔排列。本文为了突出子像素排列方向对裸眼 3D 显示系统串扰的作用, 将两种规格 LED 灯芯设为等间隔排列。10 行 6 列 LED 灯构成仿真用 LED 光源阵列。图 3 为子像素竖直排列时, 光源阵列示意图。不同于液晶显示器, LED 灯芯发光面积很小, 类似于发光点。当子像素竖直排列时, 横向上相邻两个子像素距离是纵向上相邻两个子像素距离的 3 倍。以像素间距 1.25 mm, 子像素竖直排列为例, 水平方向上相邻两个子像素距离为 1.25 mm, 而纵向相邻两个子像素距离约为 0.416 66 mm。与之相对应, 当子像素水平排列时, 横向相邻两个子像素距离是纵向相邻两个子像素距离的 1/3。

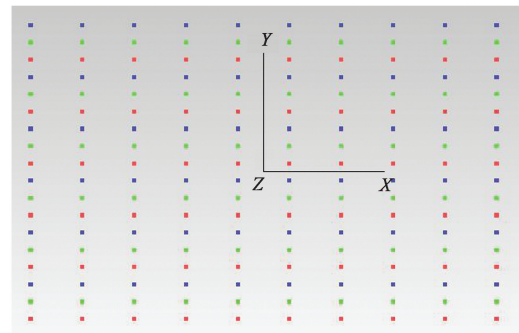


图 3 竖直排列光源阵列示意图

Fig.3 Schematic diagram of light source array with sub-pixel vertical distribution

本文建立的仿真模型为基于子像素的 4 视点裸眼 3D 显示系统, 即公式(1)和(2)中 W_p 为相邻子像素间距离, 视点数 $K = 4$ 。对于像素间距 1.25 mm LED 屏幕, 其对应的光栅水平方向节距为 1.655 6 mm, 其中透光条宽度为 0.413 9 mm。对于像素间距 1.667 mm LED 屏幕, 其对应的光栅水平方向的节距 2.204 3 mm, 透光条宽度为 0.551 1 mm。为了消除莫尔条纹的干扰, 仿真模型中光栅相对于竖直方向逆时针旋转 13° 。光栅挡光条部分吸光属性设为 100%。

光栅与 LED 屏幕间距离设为 50 mm, 对于像素间距为 1.25 mm 的 LED 裸眼 3D 显示系统, 最佳观察距离 $L = 7\ 550$ mm。对于像素间距为 1.667 mm 的 LED 裸眼 3D 显示系统, 最佳观察距离 $L = 5\ 675$ mm。在最佳观察距离处设置光强接收屏, 水平方向为 1 000 mm, 竖直方向为

10 mm,在观察方向厚度为 0.1 mm,且对光吸收属性为 100%。

模型中 4 视点图像分别为三黑一白(黑、白、黑、黑)或者三白一黑(白、黑、白、白)。根据像素视点分配通用算法^[11-13],生成立体合成视图。根据立体合成视图中每个像素的灰度值,对 LED 光源阵列中每个灯芯的亮度进行设置(Cree Xlamp MC-E White)。红色灯芯波长为 625 nm,绿色灯芯波长为 525 nm,蓝色灯芯波长为 470 nm。每颗单色 LED 灯芯的出射光线为 10 000 条。

光线的非序列追迹方式设定为重点采样。

3 仿真实验结果与分析

3.1 裸眼 3D 显示系统的仿真结果

为了抑制接收屏上光强分布非均匀性,对接收板竖直方向光强进行累加,可以得到在水平方向光强分布曲线。对论文中不同条件的光强分布曲线命名规则如下:子像素水平排列三黑一白(H-3B1W)、三白一黑(H-3W1B)。子像素竖直排列三黑一白(V-3B1W)、三白一黑(V-3W1B)。

图 4 为 1.25 mm LED 裸眼 3D 显示系统在最佳观看距离处的光强分布曲线。由图 4 可以看出,子像素水平排列与子像素竖直排列均可以实现良好的分光。且子像素水平和竖直排列时,得到的光强分布曲线的幅值与宽度基本吻合。

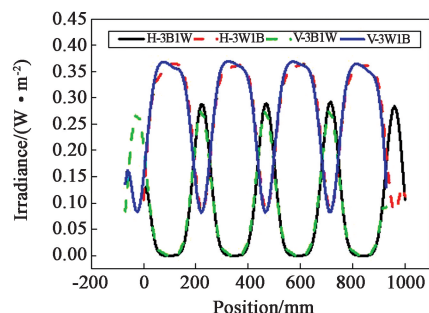


图 4 1.25 mm LED 裸眼 3D 显示系统光强分布曲线
Fig.4 Light intensity distribution curves for 1.25 mm LED naked eye 3D display system

根据串扰公式^[13]

$$C = \frac{I_{\text{leak}}}{I_{\text{signal}}} \times 100\%, \quad (3)$$

对子像素水平和竖直排列条件的串扰进行计算。其中 I_{leak} 取三白一黑(3W1B)最小幅度值,而 I_{signal} 取三黑一白(3B1W)的最大幅度(图中多个幅度求平均),则所得串扰表示 4 视点显示系统中 3 个视点向另外一个视点的串扰。对于 1.25 mm LED 屏幕,子像素水平排列 I_{leak} 为 0.0847 W/m^2 , I_{signal} 为 0.2884 W/m^2 ,串扰 C 为 29.37%。子像素竖直排列时, I_{leak} 为 0.0825 W/m^2 , I_{signal} 为 0.2754 W/m^2 ,对应串扰度 C 为 29.96%。

图 5 为像素间距 1.667 mm LED 裸眼 3D 显示系统光强分布曲线。根据相同的串扰计算方法,得到子像素水平排列时 3 个视点向一个视点的串扰度 C 为 25.27%,子像素竖直排列时串扰度 C 为 27.01%。

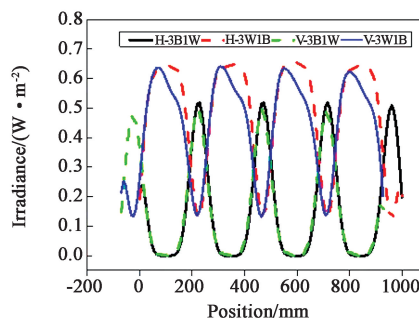


图 5 1.667 mm LED 裸眼 3D 显示系统光强分布曲线
Fig.5 Light intensity distribution curve for 1.667 mm LED naked eye 3D display system

3.2 1.25 mm LED 裸眼 3D 显示系统串扰测量

本文利用北京神州科鹰技术有限公司生产的 1.25 mm LED 模组(子像素占空比约为 20%),分别搭建了子像素水平排列和子像素竖直排列 LED 裸眼 3D 显示系统。两个系统的栅屏距离设为 31 mm,对应最佳观看距离为 5 000 mm。令两个系统均显示三白一黑(3W1B)构成的立体视图,在最佳观看距离处利用光电二极管(ThorlabsPDA-36A)将光强信号转换为电信号,并通过数字源表(Keithley 2400)读取。两个系统的光强分布曲线如图 6 所示。对于 1.25 mm LED 4 视点裸眼 3D 显示系统,子像素横向排列和纵向排列时,光强分布曲线基本吻合。这表明两种子像素排列方式条件下,狭缝光栅对不同视点的图像分离能力大体相同。利用色亮度计(PHOTO RESEARCH_{INC},PR-525 ColorMate)测量光强分布曲线 H-3W1B, V-3W1B 的最小值,以及 H-

3B1W,V-3B1W 的最大值(表 1),对显示系统串扰进行准确标定。计算得到 1.25 mm LED 子像素水平排列时系统的串扰度为 33.17%,子像素纵向排列时串系统的扰度为 32.94%。两种子像素排列条件下裸眼 3D 显示系统的串扰相当,与仿真结论相同。

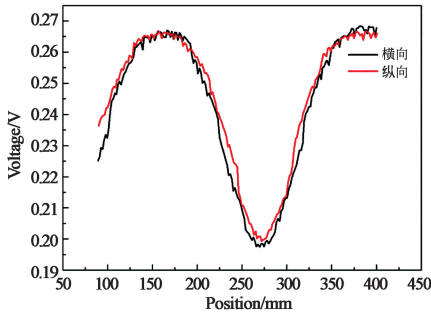


图 6 1.25 mm LED 裸眼 3D 显示系统实验光强分布
Fig.6 Measured light intensity distribution curves for 1.25 mm LED naked eye 3D display system

表 1 实验测量串扰值

Tab.1 Crosstalk values in the experimental group

子像素排列方向	$I_{\text{background}} / (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$	$I_{\text{leak}} 3\text{W1B} / (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$	$I_{\text{signal}} 3\text{B1W} / (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$	Crosstalk/%
水平	0.287 2	41.16	123.5	33.17
竖直	0.156 6	41.61	126	32.94

3.3 子像素排列方向对裸眼 3D 显示系统串扰作用分析

表 2 总结了 4 视点 LED 裸眼 3D 显示系统串扰的仿真和实验结果。对于 1.25 mm LED 裸眼 3D 显示系统,仿真和实验测量均表明子像素水平和竖直排列条件下的立体显示系统串扰相当。实验测量所得系统串扰略大于仿真结果。这主要是因为实验所用 LED 子像素为非均匀排列,而仿真光源阵列的子像素采用等间隔排列。相对于 1.25 mm LED 裸眼 3D 显示系统,1.667 mm LED 裸眼 3D 显示系统的串扰略小。这是由于间距 1.667 mm LED 子像素占空比更小所致^[14]。对于 1.667 mm LED 裸眼 3D 显示系统,子像素水平排列系统串扰比子像素竖直排列系统串扰低约 2 个百分点。

图 7(a)和图 7(b)分别表示子像素水平排列和竖直排列条件下子像素视点归属与狭缝光栅相对位置示意图。LED 屏幕子像素的占空比很小,其发光区域可近似看作数字所在点,其余空间为黑矩阵。裸眼 3D 显示系统的串扰来源于观察者透过狭缝光栅看到的属于不同视点的像素^[13,15]。如图 7(a)所示,当子像素水平排列时,竖直方向相邻两个子像素距离为 $3W_p$,水平方向相邻两个子像素距离为 W_p 。透过狭缝(阴影区域),观察者获得视点 4 的视差图像,但水平方向与视点 4 图像像素相邻的视点 1 和视点 3 图像像素也会进入观察者的眼中。

表 2 仿真和实验串扰值

Tab.2 Crosstalk values of the simulation group and the experimental group

	像素间距/mm	子像素排列方向	串扰度/%
仿真	1.25	横向	29.37
	1.25	纵向	29.96
	1.666 7	横向	25.27
	1.666 7	纵向	27.01
实验	1.25	横向	33.17
	1.25	纵向	32.94

当子像素竖直排列时(图 7(b)),横向相邻两个子像素距离是 $3W_p$,竖直方向相邻两个子像素距

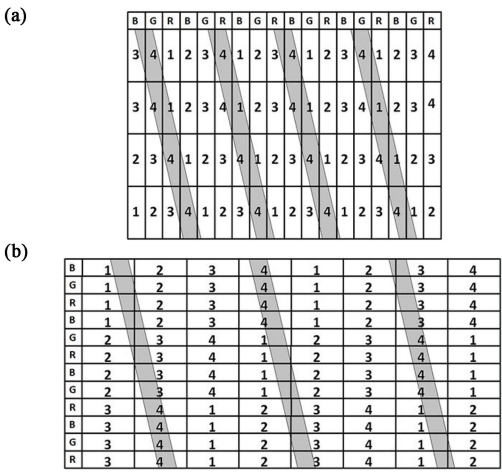


图 7 (a)子像素水平排列;(b)子像素竖直排列。
Fig.7 (a)Horizontal arrangement of sub-pixels; (b) Vertical arrangement of sub-pixels.

离为 W_p 。观察者透过狭缝观看视点 4 图像时,在竖直方向与视点 4 图像像素相邻的视点 1 和视点 3 像素形成串扰。对于 1.25 mm LED 裸眼 3D 显示系统,虽然子像素水平和竖直排列的串扰来源不同,但串扰程度相当。对于 1.667 mm LED 裸眼 3D 显示系统,子像素水平排列时系统串扰略小于子像素竖直排列方式。1.25 mm LED 子像素的占空比大于 1.667 mm LED,这可能是引起两种规格 LED 裸眼 3D 显示系统仿真结果差异的原因。

4 结 论

本文针对像素间距 1.25 mm 和 1.667 mm

LED 裸眼 3D 显示系统,分析子像素的排列方向对系统串扰的影响。在子像素水平排列时,LED 裸眼 3D 显示系统串扰主要源于水平方向相邻视点图像。在子像素竖直排列时,LED 裸眼 3D 显示系统的串扰主要源于竖直方向相邻视点图像。Tracepro 软件仿真和实验表明,1.25 mm LED 裸眼 3D 显示系统在两种子像素排列方向条件下具有几乎相同的串扰率。对于 1.667 mm LED 裸眼 3D 显示系统,子像素水平排列系统串扰比子像素竖直排列系统串扰低约 2 个百分点。因此在子像素等间隔排列条件下,子像素排列方向对 1.25 mm 和 1.667 mm LED 裸眼 3D 显示系统的串扰率无明显影响。

参 考 文 献:

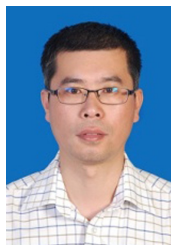
- [1] 胡素珍,姜立军,李哲林,等.自由立体显示技术的研究综述[J]. 计算机系统应用,2014,23(12):1-8.
HU S Z, JIANG L J, LI Z L, *et al.* Overview of autostereoscopic display technology [J]. *Computer Systems & Applications*, 2014, 23(12): 1-8. (in Chinese)
- [2] 王析理,石君.自由立体显示技术的原理和研究进展[J]. 光学与光电技术,2017,15(1):90-97.
WANG X L, SHI J. Principles and progress of autostereoscopic display technologies [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2017, 15(1): 90-97. (in Chinese)
- [3] 谢宏斌,杨勇,赵星,等.狭缝光栅、柱面透镜光栅及其新构型在三维显示中的应用[J]. 中国光学,2011,4(6):562-570.
XIE H B, YANG Y, ZHAO X, *et al.* Applications of parallax barrier, lenticular lens array and their modified structures to three-dimensional display [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 562-570. (in Chinese)
- [4] 赵星,王芳,杨勇,等.集成成像三维显示系统显示性能的研究进展[J]. 中国光学,2012,5(3):209-221
ZHAO X, WANG F, YANG Y, *et al.* Research progress of display performance of integral imaging three-dimensional display system[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 209-221. (in Chinese)
- [5] 孔令胜,南敬实,苟显超.平面三维显示技术的研究现状[J]. 中国光学,2009,2(2):112-118.
KONG L S, NAN J S, XUN X C. Research status quo of flat 3D display technology[J]. *Chinese Optics*, 2009, 2(2): 112-118. (in Chinese)
- [6] 王琼华,潘冬冬,李大海,等.狭缝光栅自由立体显示器的立体图像串扰度[J]. 光电子·激光,2010,21(7):1058-1061.
WANG Q H, PAN D D, LI D H, *et al.* Stereoscopic image crosstalk factor for auto-stereoscopic display based on parallax barrier [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(7): 1058-1061. (in Chinese)
- [7] 侯春萍,王晓燕.基于倾斜狭缝光栅的自由立体显示串扰比[J]. 天津大学学报,2012,45(8):663-668.
HOU C P, WANG X Y. Crosstalk ratio evaluation of autostereoscopic display based on the slanted parallax barrier [J]. *Journal of Tianjin University*, 2012, 45(8): 663-668. (in Chinese)
- [8] 许国.多视点自由立体显示串扰分析与理论建模[D].天津:天津大学,2015.
XU G. Crosstalk analysis and theoretical modeling for multi-view autostereoscopic display [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese)
- [9] ZENG X Y, ZHOU X T, GUO T L, *et al.* Crosstalk reduction in large-scale autostereoscopic 3D-LED display based on black-stripe occupation ratio [J]. *Optics Communications*, 2017, 389: 159-164.
- [10] DODGSON N A. Variation and extrema of human interpupillary distance [C]//Proceedings Volume 5291, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI. San Jose: SPIE, 2004.

- [11] 臧东宁.柱镜光栅式自由立体显示技术研究 [D].杭州:浙江大学,2015.
ZANG D N. Research on lenticular-autostereoscopic 3D display techonology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [12] VAN BERKE V. Image preparation for 3D LCD [C]//*Proceedings Volume 3639, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VI*. San Jose: SPIE, 1999: 84-91.
- [13] 李晶,李建军.光栅式自由立体显示器空间视区建模与串扰计算[J].液晶与显示,2017,32(5):394-401.
LI J, LI J J. Modeling and crosstalk calculation methods of spatial viewing zones for the autostereoscopic display device based on parallax barrier or lenticular lens [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32 (5): 394-401. (in Chinese)
- [14] YAMAMOTO H, KOUNO M, MUGURUMA S, *et al*. Enlargement of viewing area of stereoscopic full-color LED display by use of a parallax barrier [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(32): 6907-6919.
- [15] 王志远.立体图像克隆和立体显示串扰的研究 [D].天津:天津大学,2015.
WANG Z Y. Research on stereo image cloning and crosstalk on the stereoscopic display [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese)

作者简介:



邓 儒(1995—),女,四川成都人,硕士研究生,2018 年于齐鲁工业大学获得学士学位,主要从事 LED 屏幕立体显示技术的研究。E-mail: 18180927850@163.com



党 伟(1981—),男,河北唐山人,博士,副教授,2014 年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事 LED 屏幕立体显示技术的研究。E-mail: dangwei@hbu.edu.cn