

基于视觉感知的 Mini-LED 背光 LCD 中的光晕效应

张跃渊, 夏振平*, 宋玉, 张博文, 胡伏原

苏州科技大学电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009

摘要 作为前景广阔的高动态对比度显示系统, 基于 Mini-LED 背光的液晶显示受到越来越多的关注。由于背光分区和液晶漏光问题, Mini-LED 背光 LCD 中出现光晕效应, 降低了图像质量。为了准确再现不同参数下的光晕效应, 建立了精确的 Mini-LED 背光 LCD 显示系统光学模型。基于该模型设计了系统的视觉感知实验, 研究不同 Mini-LED 背光分块大小、不同 LCD 对比度以及不同背光调制算法下, 人眼对光晕效应的感知效果。实验结果表明, Mini-LED 背光分块大小和调制算法对光晕效应有显著性影响, 而 LCD 对比度对光晕效应感知无显著性影响。随着 Mini-LED 背光分块大小的增大, 光晕效应显著增强。背光分块视角在 0.5° 及以上时, 受测者能够较容易地感知到光晕效应。同时, 主观实验结果和客观评价结果具有较高线性相关性。研究结果可为 Mini-LED 背光 LCD 显示系统的设计提供理论参考。

关键词 成像系统; Mini-LED 背光; 局部调光; 光晕效应; 视觉感知

中图分类号 TN27

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221281

Halo Effect of Mini-Light-Emitting Diode Backlight Liquid-Crystal Display Based on Visual Perception

Zhang Yueyuan, Xia Zhenping*, Song Yu, Zhang Bowen, Hu Fuyuan

College of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology,
Suzhou 215009, Jiangsu, China

Abstract Liquid-crystal displays (LCD) based on the mini-light-emitting diode (Mini-LED) backlight have attracted significant attention as a promising highly dynamic contrast display system. A halo effect occurs in Mini-LED backlight LCDs because of backlight partition and LCD light leakage, reducing the image quality. In this study, an accurate optical model of the Mini-LED backlight LCD system was established to precisely replicate the halo effect under different parameters. Based on the proposed model, the visual perception experiment of the system was designed to investigate the perception of the human eye on the halo effect under different Mini-LED backlight block sizes, LCD contrasts, and backlight modulation algorithms. The experimental results show that the Mini-LED backlight block size and modulation algorithm significantly influence the halo effect, whereas the LCD contrast has no significant impact on halo effect perception. With an increase in the block size of the Mini-LED backlight, the halo effect is significantly enhanced. When the backlight block viewing angle is 0.5° or larger, the subject can easily perceive the halo effect. In addition, a high linear correlation exists between the subjective experimental results and the objective evaluation results. This study provides a theoretical reference for designing Mini-LED backlight LCD systems.

Key words imaging systems; Mini-LED backlight; local dimming; halo effect; visual perception

1 引言

随着显示技术的不断发展, 人们对日常生活中电子产品显示系统的显示性能有了更高要求, 如更高对比度、更大动态范围、更高的色彩对比度等。对比目前市面上应用最广泛的液晶显示器(LCD)和有机发光

二极管(OLED)显示系统可知, 两者在色域、分辨率等方面差距不大^[1]。LCD具有可达到更大峰值亮度这一优点, 而OLED不仅能呈现更细腻的暗态信息, 也能够极大降低所使用电子器件的厚度^[2]。目前在电视显示屏领域, LCD仍具有不可动摇的市场份额地位, 同时OLED凭借其优点正逐步得到更多用户的青睐。

收稿日期: 2022-04-12; 修回日期: 2022-06-14; 录用日期: 2022-06-21; 网络首发日期: 2022-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(62002254, 61876121)、江苏省自然科学基金(BK20200988)

通信作者: *xzp@usts.edu.cn

传统的液晶显示系统通常采用直下式背光源,当其应用于手机、笔记本电脑等便携电子产品时,由于厚度的局限性,LCD往往达不到高动态范围显示的要求^[3]。因此,在微小型显示器中,OLED被广泛使用,但在获得理想图像质量和轻薄面板等优点的同时,却引出屏幕寿命减短的问题^[4]。进一步,有研究者指出使用Mini-LED作为LCD背光时,可兼顾面板的轻薄和屏幕寿命的延长^[3]。

自2013年以来,关于高动态范围(HDR)的研究就逐步展开^[5],高动态范围显示由于可呈现出十分贴近自然场景的图像效果而受到人们越来越多的追捧。现实世界中人眼可感知光线动态范围远超当前常规显示器的可显示范围,多数HDR显示器更倾向于使用OLED显示屏,但由于OLED显示屏寿命较短等缺陷,相关研究人员提出了局部调光的LCD屏幕以更好匹配HDR显示^[6]。因此,Mini-LED背光技术应运而生,具体为将原始LCD中整块的背光区域用局部调光的Mini-LED背光代替。Mini-LED背光技术使得显示面板的薄厚程度和动态范围均得到显著改善,同时由于更精细的区域调光,显示能耗上也会有显著降低。

2019年,Mini-LED背光技术开始市场化应用,由苹果和华硕公司在32 inch(1 inch=2.54 cm)专业显示器以及TCL电视上实现。在商业化研究中,他们使用更小的发光二极管(50~300 μm)以增加直接照明背光中局部调光区域数量^[7]。随着第五代技术(5G)的持续发展,以Mini-LED为局部背光调光单元的LCD必将成为下一代LCD显示背光技术发展的重点研究方向。因此,解决Mini-LED背光造成的显示缺陷尤为重要。

在自然图像中,从图像边缘传播出的光圈称为光晕^[8]。在使用局部调光单元时,由于图像边缘不可避免地存在从亮处到暗处的过渡,因此在明暗对比的边缘更容易出现光晕效应。

除去背光分区的影响,在Mini-LED背光的LCD中,由于LCD的电子元件特性,Mini-LED背光块间会存在光的扩散^[9]。尤其在明暗对比明显的HDR图像显示过程中,一个Mini-LED背光块发出的光会漫射到相邻背光块,导致LCD显示亮度不均匀,从而造成光晕效应。对于人来说:当光晕效应在某阈值内时,人眼无法清晰分辨出图像边界的光晕效应,此时光晕效应不会显著影响图像整体质量;若超出阈值,人眼便可清晰地感知到光晕效应,此时光晕效应则会极大破坏整体图像的完整性和图像细节信息。

目前针对Mini-LED背光LCD存在光晕效应的解决方案主要有以下几种:在背光单元之间增加隔板、提高面板对比度、减少面板漏光、增加背光分块数等。本文构建了一个完整的Mini-LED背光LCD成像模拟模型,针对Mini-LED背光的分块大小、LCD面板对比度进行排列组合设计,同时选择不同的Mini-LED背光调制,展开不同背光调制算法的对比,确定最优背光调

制算法。基于该模拟模型,对可能影响光晕效应人眼感知效果的3个因素进行研究,为降低Mini-LED背光的LCD显示系统中光晕效应提出合理建议,为Mini-LED背光LCD的显示系统设计提供理论参考。

2 Mini-LED背光的LCD

2.1 Mini-LED背光液晶显示器系统

在以Mini-LED为背光的LCD显示系统中(如图1所示),最内层为由Mini-LED背光单元组成的背光板,图1中假设其背光单元为正方形块,在背光板中根据不同的算法计算相应局部调光区域的亮度值,最终通过所得亮度值确定背光单元(板)光强度。因此,Mini-LED背光板中的背光分块大小和背光调制算法是显示系统的重要组成部分^[10]。

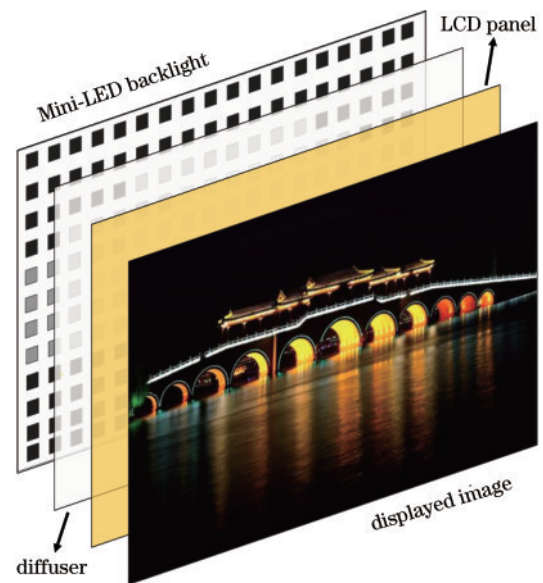


图1 Mini-LED背光液晶显示系统
Fig. 1 Mini-LED backlight LCD system

背光板前需设置一层扩散板,经背光调制算法处理后的光线传播至扩散板时,借助扩散板的特性可获得更加理想的空间均匀性,能够更加均匀地散发到下一层,可避免由于背光块间隔导致的光线不均匀。经过扩散板的光线到达LCD层之前,可在扩散板与LCD层之间增加一至两层亮度增强膜^[11],以提高LCD层接收到的光强度,便于LCD面板对接收到的光进行调制处理。最后LCD面板对所接收光进行对应的调制,最终显示器件呈现出高动态范围的图像信息^[12]。

2.2 Mini-LED背光局部调制算法

选取4种不同背光调制算法进行对比分析。现有背光调制算法中,较早提出的有最大值法和平均值法等,选取的第1种算法为最大值法^[13]。最大值法通过选取每个子像素中亮度的最大值确定整个背光局部调光区域的亮度。通常最大值法能够较好地调制亮度,并且在背光分块较小时拥有更低的能耗。均方根法^[14]

为第 2 种背光调制算法,首先计算所有像素中灰度值的平均值(L_{avg}),接着将其平方根作为每个子像素的调光亮度值(V_{BL}):

$$V_{\text{BL}} = 255 \times \sqrt{\frac{L_{\text{avg}}}{255}}。 \quad (1)$$

第 3 种背光调制算法选用标准差法^[15],首先计算所有像素的标准差值(D_{SD}),然后根据所得标准差值与平均值之和得到 V_{BL} :

$$D_{\text{SD}} = \sqrt{\frac{1}{r \times c} \sum_{i=0}^{r-1} \sum_{j=0}^{c-1} [L(i, j) - L_{\text{avg}}]^2}, \quad (2)$$

$$V_{\text{BL}} = L_{\text{avg}} + D_{\text{SD}}。 \quad (3)$$

第 4 种背光调制算法选用误差修正法^[16],将所有像素中灰度值的最大值(L_{max})和 L_{avg} 的差作为修正的值 L_{diff} ,经由式(5)可得 V_{BL} :

$$L_{\text{diff}} = L_{\text{max}} - L_{\text{avg}}, \quad (4)$$

$$V_{\text{BL}} = L_{\text{avg}} + 0.5 \times (L_{\text{avg}} + \frac{L_{\text{diff}}^2}{255})。 \quad (5)$$

3 Mini-LED 背光 LCD 成像模拟

3.1 Mini-LED 背光 LCD 成像模型

使用 MATLAB 建立以 Mini-LED 为背光的 LCD 成像仿真模型,采用 4 种背光调制算法,使用高斯分布模拟每个 Mini-LED 块的光线分布,本小节选用最大值法作为背光调制算法对所提模型进行介绍。

在所提模型中:首先创建以每个像素 RGB 三通道最大值所得的亮度图像,如图 2(a) 所示;然后根据 Mini-LED 局部调光区域分配方法,获取该区域内的亮度最大值,以此作为该 Mini-LED 分块中的亮度,如

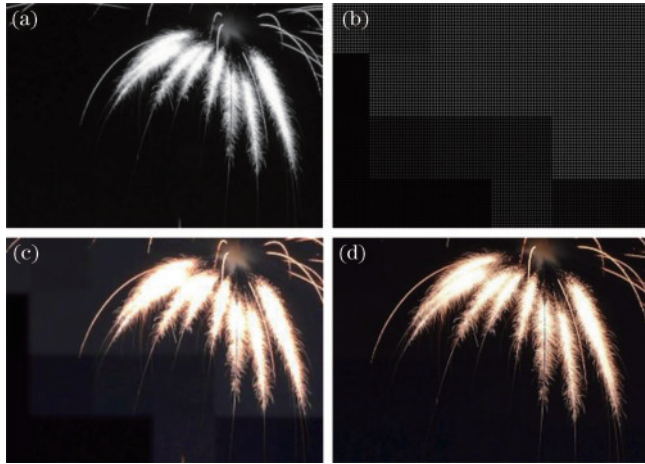


图 2 图像渲染过程。(a)通过 RGB 三通道最大值得出的亮度图像;(b)Mini-LED 背光图像;(c)Mini-LED 背光调制后的 LCD 面板图像;(d)LCD 面板像素补偿后图像

Fig. 2 Image rendering process. (a) Brightness image obtained through the maximum value of RGB three channels; (b) Mini-LED backlit image; (c) LCD panel image after Mini-LED backlight modulation; (d) image of LCD panel after pixel compensation

图 2(b) 所示;模型中采用的模拟背光方形 Mini-LED 的尺寸 $p=1 \text{ mm}$ 。在背光的局部调光区域中,为了研究背光块分块大小对于光晕效应的影响,共设置 5 种尺寸,分别为 2×2 、 5×5 、 10×10 、 20×20 、 40×40 。由于相同观看视角下的内容不会受屏幕尺寸的影响^[17],因此将背光块分块大小改为背光块观看视角进行研究。视觉感知实验中 3.2 倍图像高度的标准观看距离对应的背光分块观看视角分别为 0.10° 、 0.25° 、 0.50° 、 1.0° 、 2.0° 。当 Mini-LED 光直接经过液晶面板调制会出现明显的光晕效应,如图 2(c) 所示。为补偿光晕现象,对已完成 LCD 调制的图像进行补偿,使 LCD 显示图像更接近原场景,如图 2(d) 所示。然而,即使进行相应的补偿,由于 LCD 存在漏光的特性,对比度(CR)也会对光晕效应的轻重程度有影响。因此,模型中对对比度共设置 5 个等级,分别为 $1000:1$ 、 $2000:1$ 、 $3000:1$ 、 $4000:1$ 、 $5000:1$ 。

3.2 基于模型的客观数据分析

在所建 Mini-LED 背光 LCD 成像模型基础上,采用基于 CIE 1976 色彩空间的峰值信噪比(R_{LabPSNR})^[18] 分析评价调制后的图像。 R_{LabPSNR} 是峰值信噪比(R_{PSNR}) 在 CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色彩空间上的应用,将 CIE 1931 中的 XYZ 转换为 $L^*a^*b^*$ 。

$$\begin{cases} L^* = 116f(\frac{Y}{Y_n}) - 16 \\ a^* = 500 [f(\frac{X}{X_n}) - f(\frac{Y}{Y_n})], \\ b^* = 200 [f(\frac{X}{X_n}) - f(\frac{Z}{Z_n})] \end{cases} \quad (6)$$

$$f(t) = \begin{cases} \sqrt[3]{t}, & t > (6/29)^3 \\ \frac{t}{3 \times (6/29)^2} + \frac{4}{29}, & t \leq (6/29)^3 \end{cases} \quad (7)$$

式中: L^* 表示最大光强; a^* 为正数时表示红色在色彩空间的位置,若为负数则表示绿色在色彩空间中的位置; b^* 为正数时表示黄色在色彩空间的位置,若为负数则表示蓝色在色彩空间中的位置; X_n 、 Y_n 、 Z_n 分别为 CIE 标准参考白色的 X、Y、Z 值。

在 R_{PSNR} 中定义两图像之间的亮度差值使用最大值(255),而在 R_{LabPSNR} 中定义 ΔE :

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^* + \Delta a^* + \Delta b^*}。 \quad (8)$$

R_{LabPSNR} 的表达式为

$$R_{\text{LabPSNR}} = 10 \times \ln \left[\frac{(\Delta E_{\text{max}})^2}{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta E(i, j)^2} \right]。 \quad (9)$$

使用 R_{LabPSNR} 评价所提模型时, R_{LabPSNR} 所得评分越高,则表明两张图像信息差异越小。图 3 是 R_{LabPSNR} 在不同背光分块大小和屏幕对比度下的平均值及标准误差。由图 3 可知,两张图像之间的差异随背光分块大小的增大和屏幕对比度的增加显著增加,表明这种情

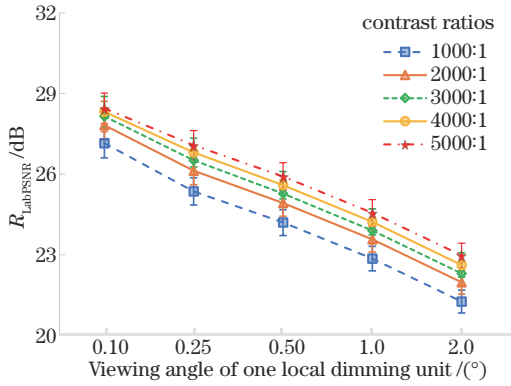


图 3 不同背光块观看视角和屏幕对比度时的 $R_{LabPSNR}$

Fig. 3 $R_{LabPSNR}$ at different viewing angles of backlight block and screen contrast

况下由 Mini-LED 背光调制的图像质量显著降低, 光晕效应更容易被人眼察觉。

图 4 是在 4 种背光调制算法下的 $R_{LabPSNR}$ 平均值及标准误差。由图 4 可知, 最大值法和标准差法对应的 $R_{LabPSNR}$ 更高, 即图像信息更理想, 其中, 最大值法表现更加优异, 而均方根法和误差修正法表现略逊色。

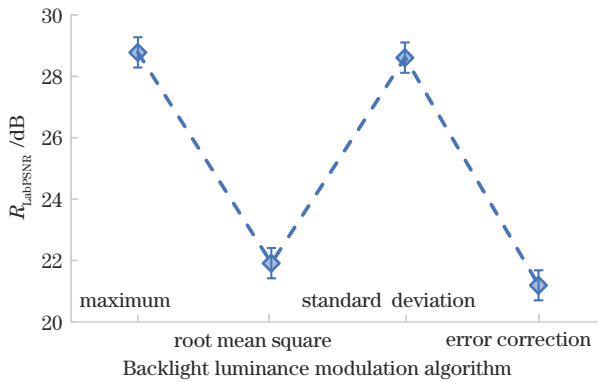


图 4 4 种背光算法的 $R_{LabPSNR}$

Fig. 4 $R_{LabPSNR}$ of four backlight algorithms

4 视觉感知实验

4.1 实验设计

基于建立的 Mini-LED 背光 LCD 成像模型设计视觉感知实验。输入为 1 张 HDR 图像, 通过模型中 3 种参数的组合输出调制后的模拟图像。在 Mini-LED 背光 LCD 成像模型使用过程中, 当人眼无法分辨由于 Mini-LED 特性导致的光晕效应时, 则表明调制的模拟图像质量较理想。对比 120 组原始图像与调制后图像, 其中, 调整参数包括背光调制算法 (4 种)、分块大小 (5 种)、对比度 (5 种)。

实验使用 55 寸 Sony 品牌的 OLED 4K 显示器进行图像显示, OLED 可以避免 LCD 导致的伪光晕效应, 防止 LCD 屏幕本身特性对实验造成的影响。实验过程中, 受测者坐在距离图像中心点 1.6 倍显示屏高度处, 如图 5 所示, 图 5 左侧上方为原始图像, 左侧

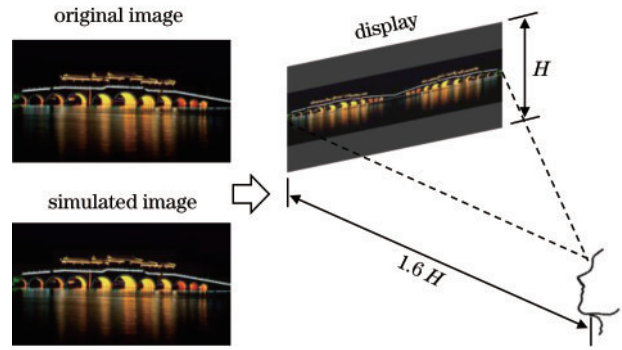


图 5 实验设置

Fig. 5 Experimental setting

下方为通过调整模型参数得出的模拟图像, 两张图像左右随机对称显示在屏幕中心位置, 每幅图像大小为 1920 pixel × 1080 pixel。由于人眼在观察屏幕中心与屏幕边缘时, 角度差异会影响受测者对光晕效应的感知, 实验中设置左右对称的两张图像, 原始图像和模拟图像随机出现在屏幕两侧。在图像未涉及区域采用灰色像素进行填充, 利于受测者集中注意力于有效的图像信息部分, 同时可缓解由于实验时间过长造成的人眼不适。

实验中每位受测者需要观看 120 组图像, 在每组图像中选出左右两侧图像中难以分辨出光晕的一侧, 并将其记录为该受测者所认为的图像质量较好的一侧。实验通过 0 和 1 分别记录选择两侧图像的人数, 根据定量分析和定性分析两种不同的方式分析人眼是否能分辨不同参数组合的 Mini-LED 背光调制图像所产生的光晕效应, 以探究人眼对光晕效应的感知阈值。

4.2 受测者

在适龄实验人群中选择 21 名受测者开展视觉感知实验。为保证实验准确性, 在选取受测者的过程中考虑了受测者年龄、性别等条件, 本实验受测者年龄范围为 18~36 岁, 平均年龄为 23 岁, 在所有受测者中女性受测者共有 6 名, 所有受测者都具有正常 (包括被矫正后) 的视力, 正常的视力指朗多环形视力表测试为 1.0 及以上。

5 结果分析

5.1 主观实验结果分析

在记录了 21 名受测者的实验数据后, 使用 IBM SPSS Statistics 26 (SPSS) 软件对所得实验数据进行分析。从两方面展开视觉感知实验数据对比。第 1 种方法是计算能够从模拟图像和原始图像中正确选择出原始图像的人数占总人数的比值, 并将比值作为定量分析的依据 (如图 6 所示)。图 6(a) 代表观看背光块视角不同时, 通过定量数据得出的平均值图。可以看出, 随着背光块观看角度的增加, 能够选择原始图像的受测者人数逐渐增加, 表明光晕效应的可见性提升即模

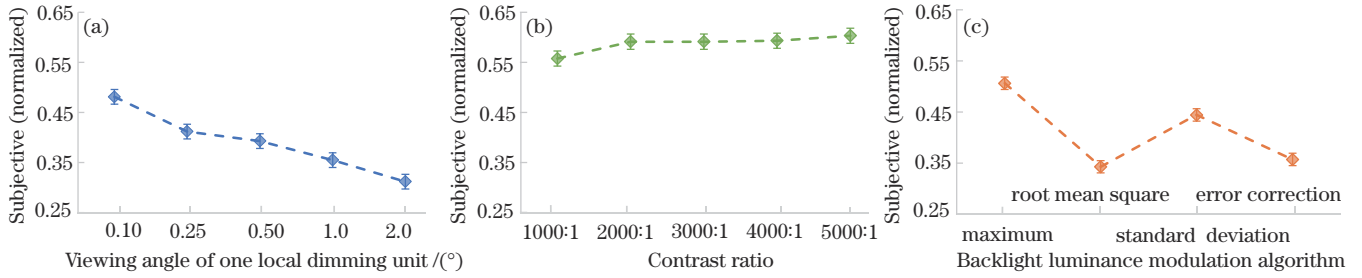


图 6 视觉感知实验数据定量分析折线图。(a)背光块观看视角定量分析趋势图;(b)对比度定量分析趋势图;(c)背光调制算法定量分析趋势图

Fig. 6 Line charts for quantitative analysis of visual perception experimental data. (a) Quantitative analysis trend chart of viewing angle; (b) contrast quantitative analysis trend chart; (c) quantitative analysis trend chart by backlight dimming algorithm

拟图像质量下降。图 6(b)代表图像在不同对比度情况下的比值。可以看出,对比度越大,则能够正确选择原始图像的人越多,即调制的模拟图像光晕效应越明显。图 6(c)代表不同背光调制算法下的比值,可以看出,最大值法的调制效果最好,能分辨出光晕效应的受测者最少。

通过定量数据分析可知,随着背光分块数的大小和屏幕对比度不断增大,人眼越容易分辨由背光块特性导致的光晕效应,越能够选择出无光晕效应的原图。4 种不同的局部背光调光算法中,最大值法的表现最优。使用最大值算法确定局部调光域亮度时,能够在更大的影响因素参数范围内获得更理想的图像质量。

表 1 描述了 3 种影响因素对光晕效应可见性的影响,其中, d_f 为统计量的自由度, F 为组间与组内变化的比值, Sig. 为样本显著性。通过方差分析可知,背光分块大小(背光块观看视角)和背光调制算法的 Sig. 系数均小于 0.01,表明这两种影响因素在人视觉感知光晕效应的过程中具有显著性影响。

表 1 3 种影响因素对光晕效应可见性的影响

Table 1 Influence of three factors on the visibility of halo effect

Factor	Visibility of the halo effect		
	d_f	F	Sig.
VA	5	5.605	0.000
CR	4	0.391	0.815
Backlight type	3	10.323	0.000

第 2 种方法是基于二项分布进行定性分析:

$$P = C(n, k) \times p^k \times (1 - p)^{n-k}, \quad (10)$$

式中: C 是组合的个数。式 10 可解释为:如果正确选择的概率是 P , 那么在所有 n 次选择中, k 次选择正确的概率是 p 。在本实验中, $p=0.5$ 、 $n=21$ 。通过计算,当正确选择的人数大于等于 14 时,正确选择概率小于 5%,说明人能够轻易分辨光晕效应。由二项分布分析可知,当人眼观看背光块的视角大于等于 0.5° 时,能够明显分辨出光晕效应。

5.2 主观实验与客观结果分析比较

在视觉感知实验数据的基础上,使用 R_{LabPSNR} 得到

的客观数据与主观数据进行对比分析。主观数据的方差分析结果表明,只有背光分块大小和背光调制算法对光晕效应有显著性影响,所以在剔除了对比度的情况下形成了 20 对主观数据和客观数据。拟合分析的结果如图 7 所示,使用皮尔逊相关性系数^[19]表示主观数据和客观数据两者之间的关系强弱情况。拟合结果表明,皮尔逊相关性系数为 0.791,当皮尔逊系数大于 0.7 时,代表两者线性关系非常紧密,并且呈现出 0.01 水平的高度显著性。本实验主观数据与客观数据有显著的正相关性,验证了人眼对光晕效应的视觉感知与预估的客观影响因素具有一致性。

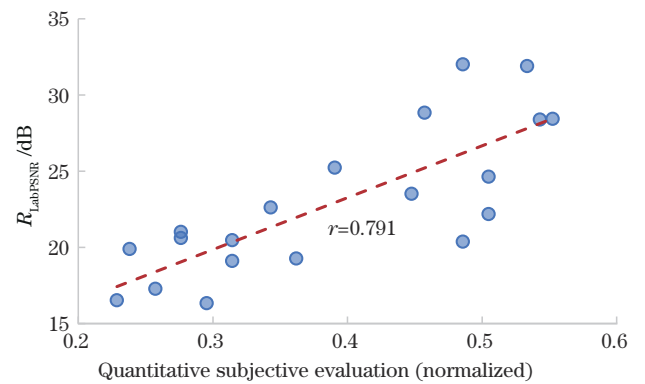


图 7 客观评价与主观评价的散点拟合图

Fig. 7 Scatter fitting diagram of objective evaluation and subjective evaluation

由图 4 可知,最大值法和标准差法的优劣差距并不明显,最大值法的平均值只比标准差法高 0.2 左右。而对人眼视觉感知的主观数据进行分析时(图 6)可以明显得出,使用最大值法作为背光调光算法的图像更加不容易被人感知到光晕效应。在相同的背光分块大小(背光块观看视角)下,选取最大值法进行局部调光区域的亮度调制算法,能够获得更好的图像质量。综上所述,在 Mini-LED 背光 LCD 选择局部背光调制算法时,更加推荐最大值法。

6 结 论

为了研究 Mini-LED 背光 LCD 中的光晕效应,建

立了一个完整的 Mini-LED 背光模拟成像模型,系统可以对 Mini-LED 背光分块大小(背光块观看视角)、LCD 对比度以及背光调制算法等 3 个因素进行调整,对输入的 HDR 图像进行 Mini-LED 背光调制,最终输出调制后的模拟图像。通过设计的视觉感知实验可知,在对比 Mini-LED 背光分块大小和对比度两个因素时,Mini-LED 背光分块大小对光晕效应影响更大,而 LCD 对比度对光晕效应无显著性影响。随着 Mini-LED 背光分块大小的增大,光晕效应更加明显,当分块视角达到 0.5° 及以上时,受测者普遍能够观察到光晕效应。结合主观数据和客观数据可知,主观数据和客观数据有显著的线性相关性。在 4 种背光调制算法中,使用最大值法调制的图像更接近原始图像,因此在选取背光调制算法时,建议使用最大值法。所建立的模型为 Mini-LED 相关实验提供了模型基础,为 Mini-LED 背光的 LCD 显示系统提供理论支持。

参 考 文 献

- [1] Harding J. OLCD: delivering an exciting future for flexible displays[J]. *Information Display*, 2019, 35(6): 9-13.
- [2] Hsiang E L, Yang Z Y, Yang Q, et al. Prospects and challenges of mini-LED, OLED, and micro-LED displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2021, 29(6): 446-465.
- [3] Masuda T, Watanabe H, Kyoukane Y, et al. 28-3: mini-LED backlight for HDR compatible mobile displays[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 390-393.
- [4] Kikuchi S, Shibata Y, Ishinabe T, et al. Thin mini-LED backlight using reflective mirror dots with high luminance uniformity for mobile LCDs[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 26724-26735.
- [5] Kwon J U, Bang S, Kang D, et al. 65-2: the required attribute of displays for high dynamic range[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 884-887.
- [6] Deng Z, Zheng B Y, Zheng J P, et al. High dynamic range incell LCD with excellent performance[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 996-998.
- [7] Chansin G. LCD fights back against OLED with MiniLED backlight technology[J]. *Information Display*, 2021, 37(2): 49-51.
- [8] Hsiang E L, Yang Q, He Z Q, et al. Halo effect in high-dynamic-range mini-LED backlit LCDs[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 36822-36837.
- [9] 冯奇斌, 苏凯, 王梓, 等. 基于视角补偿的双层液晶显示图像分割算法研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(10): 1005001.
Feng Q B, Su K, Wang Z, et al. Viewing-angle-compensation-based image segmentation algorithm for dual-layer LCDs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 1005001.
- [10] He J X, Ang K L, Hao Z X, et al. The comparison between novel and traditional three-dimensional image system in thoracoscopy: glasses-less vs. glass[J]. *Journal of Thoracic Disease*, 2016, 8(11): 3075-3080.
- [11] Huang Y G, Hsiang E L, Deng M Y, et al. Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 105.
- [12] Chen E G, Guo J, Jiang Z Z, et al. Edge/direct-lit hybrid mini-LED backlight with U-grooved light Guiding plates for local dimming[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 12179-12194.
- [13] Xia Z P, Hu F Y, Cheng C. Perceptual artifacts on the liquid crystal displays with a mini-LED backlight[C]// *Proceedings of the International Display Workshops*, Nov 27-29, 2019, Sapporo Convention Center. [S.l.: s. n.], 2019: 1200-1202.
- [14] Seetzen H, Heidrich W, Stuerzlinger W, et al. High dynamic range display systems[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 760-768.
- [15] Lin F C, Liao C Y, Liao L Y, et al. 39.4: inverse of mapping function (IMF) method for image quality enhancement of high dynamic range LCD TVs[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2007, 38(1): 1343-1346.
- [16] Cho H, Kwon O K. A backlight dimming algorithm for low power and high image quality LCD applications[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, 55(2): 839-844.
- [17] Bellman S, Schweda A, Varan D. Viewing angle matters: screen type does not[J]. *Journal of Communication*, 2009, 59(3): 609-634.
- [18] Tan G J, Huang Y G, Li M C, et al. High dynamic range liquid crystal displays with a mini-LED backlight [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16572-16584.
- [19] Weaver B, Wuensch K L. SPSS and SAS programs for comparing Pearson correlations and OLS regression coefficients[J]. *Behavior Research Methods*, 2013, 45(3): 880-895.