

基于人因的液晶显示动态图像质量研究

宋玉, 夏振平, 胡伏原, 程成

引用本文:

宋玉, 夏振平, 胡伏原, 等. 基于人因的液晶显示动态图像质量研究[J]. 液晶与显示, 2020, 35(10): 1051–1058.

SONG Yu, XIA Zhen-ping, HU Fu-yuan, et al. Moving image quality of liquid crystal display based on human factor[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(10): 1051–1058.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203510.1051>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于图像局部亮度的液晶显示器动态调光算法

Dynamic dimming algorithm for liquid crystal display based on local brightness of image

液晶与显示. 2020, 35(3): 234–241 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203503.0234>

具有CRT式快速运动图像响应时间的高性能液晶显示器

High performance LCDs with CRT-like motion picture response time

液晶与显示. 2017, 32(8): 581–589 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173208.0581>

CRT与LCD技术的视觉刺激显示性能评价

Assessment of CRT and LCD technologies for the presentation of visual stimuli

液晶与显示. 2017, 32(11): 934–942 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173211.0934>

快速响应的共面转换型液晶显示器

Fast-response in-plane switching liquid crystal display

液晶与显示. 2017, 32(9): 685–691 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173209.0685>

带电子聚焦的氧化锌场发射背光源

Electron focused ZnO field emission backlight unit

液晶与显示. 2015, 30(1): 64–69 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153001.0064>

文章编号:1007-2780(2020)10-1051-08

基于人因的液晶显示动态图像质量研究

宋 玉¹, 夏振平^{1,2*}, 胡伏原^{1,2}, 程 成^{1,2}

(1. 苏州科技大学 电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009;

2. 苏州科技大学 苏州智慧城市研究院, 江苏 苏州 215009)

摘要:液晶显示系统中,保持型显示特性以及慢响应是造成动态图像质量低下的主要原因。为了研究液晶显示动态图像质量的影响因素,建立了液晶显示动态图像感知效果的模拟模型。模拟模型以显示器的不同响应速度、帧频、背光占空比为参数,同时针对不同类型的显示图像模拟出人眼最终感知的动态图像效果。通过视觉感知实验对模拟图像进行评价并统计分析实验结果。结果表明,背光占空比调制可有效提高动态图像质量,响应速度的快慢与动态图像质量呈正相关关系,帧频提高对动态图像质量的提升受响应速度的限制,即两者之间存在交叉影响。研究结果可为液晶显示系统动态图像质量的提升途径提供理论参考。

关键词:运动模糊;液晶响应;视觉感知;动态调制传递函数

中图分类号:TN27 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/YJYXS20203510.1051

Moving image quality of liquid crystal display based on human factor

SONG Yu¹, XIA Zhen-ping^{1,2*}, HU Fu-yuan^{1,2}, CHENG Cheng^{1,2}(1. College of Electronic and Information Engineering,
Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;2. Suzhou Smart City Research Institute,
Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: In the liquid crystal display (LCD) system, the main reasons for the low quality of moving image are the characteristic of holding type display and the slow response. In order to study the influencing factors of moving image quality of LCD, a simulation model of moving image perception effect of LCD is established. The simulation model takes the different response speeds of the display, frame rates and backlight duty ratios as parameters, and simulates the moving image effect of the final perception of the human eye for different types of display images. Through the visual perception experiment, the simulation image is evaluated and the experimental results are statistically analyzed. The results show that the backlight duty ratio modulation can effectively improve the quality of moving

收稿日期:2020-04-17;修订日期:2020-05-28.

基金项目:国家自然科学基金(No.61876121);江苏省重点研发计划项目(No.BE2017663);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(No.KYCX20_2755)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61876121); Key Research & Development Plan of Jiangsu Province (No.BE2017663); Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No.KYCX20_2755)

* 通信联系人, E-mail: xzp@usts.edu.cn

image. The speed of response is positively related to the quality of moving image. The improvement of frame rate on the quality of moving image is limited by the response speed, that is, there is a cross influence between the two. The research results can provide theoretical reference for improving the moving image quality of LCD system.

Key words: motion blur; liquid crystal response; visual perception; dynamic modulation transfer function

1 引言

近年来,基于信息需求的爆发式增长,信息显示技术发展迅猛。其中,液晶显示(Liquid Crystal Display, LCD)技术更是努力克服自身短板,从而更好地与有机发光二极管(Organic Light-Emitting Diode, OLED)显示技术抗衡^[1-3]。随着市场不断向前发展和人们生活水平的提升,人们对图像显示质量的追求也随之提高。由显示器件显示机制和人眼视觉特性共同作用形成的运动模糊,是影响显示系统动态图像质量的一个重要因素。就显示器自身特性而言,LCD的保持型显示特性和慢响应是导致其动态图像质量低下的主要原因^[4];而 OLED 同样具有保持型的显示特性,但其响应速度却非常快,响应时间在 0.1 ms 左右^[5]。

本文所研究的动态图像质量的影响因素决定了表征图像感知效果的函数选择。显示系统的运动模糊源于显示系统慢响应、保持型显示特性、人眼平滑追踪及视觉积分效应共同作用导致的调制传递函数特性的降低,因此可以采用动态调制传递函数(Dynamic Modulation Transfer Function, DMTF)来表达。DMTF 是基于正弦图像运动,通过亮度响应序列在人眼视觉特性下的积分,计算出频率域的调制度^[6]。DMTF 可以用来模拟人眼感知到的动态图像效果。

本文提出了液晶显示动态图像感知效果模拟模型的建立方法以研究不同类型的显示图像受到显示器的不同响应速度、帧频及背光占空比对动态图像显示质量的影响。该模拟模型的核心是基于显示系统自身特性与人眼视觉特性,建立动态图像感知模型。设计了运动模糊视觉感知实验以评价各参数下模拟图像质量,对实验数据进行分析得到各参数对动态图像运动模糊的影响趋势,可为液晶显示系统动态图

像质量的提升提供数据支撑。

2 运动模糊产生的机理

人眼感知的显示系统运动模糊形成原因分为两类:显示系统自身特性和人眼视觉特性^[7]。其中,显示系统自身特性导致运动模糊主要体现在:保持型显示特性和慢响应。保持型显示特性是 LCD 和 OLED 所共有的特性,显示器呈现的图像将在约 $1/f$ 秒的帧周期内持续,即为保持型显示特性^[8]。OLED 显示的保持型响应曲线如图 1 的实线部分所示。液晶的慢响应指的是液晶的亮度响应速度慢,无法瞬间响应至目标亮度,如图 1 的虚线部分所示^[9]。由于液晶慢响应特性,在显示运动图像时,LCD 通常表现出比 OLED 更严重的图像模糊效果^[10]。

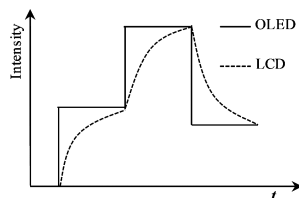


图 1 OLED 和 LCD 亮度响应曲线

Fig.1 Brightness response curves of OLED and LCD

人眼视觉特性导致感知图像模糊,主要体现在人眼平滑追踪运动和视觉积分效应。人眼会对缓慢运动的观察对象进行自然的视觉平滑追踪,结合人眼感光积分效应,人眼在视网膜某位置感受的亮度是视线扫过的多个像素发光亮度积分的效果,最终表现出感知的运动模糊效果。对于 OLED 具有极快的响应速度,可以将其视为理想化的瞬间响应状态。保持型显示的 OLED 人眼感知到的图像边缘模糊效果如图 2(a)所示。对应较慢响应的保持型 LCD 显示器,人眼感知到的图像边缘模糊效果如图 2(b)所示^[11]。

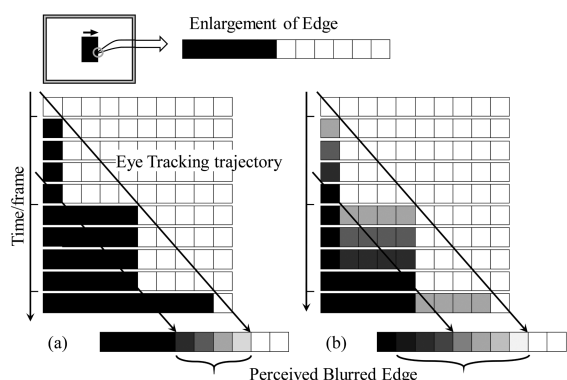


图 2 显示系统自身特性和人眼视觉特性共同作用下的运动模糊效果。(a)OLED 显示系统;(b) LCD 显示系统。

Fig.2 Motion blur effect under the joint action of display system's own characteristics and human visual characteristics. (a) OLED display system; (b) LCD display system.

3 动态图像感知效果模型构建

为了更深入地研究提高显示系统动态图像质量的方法,基于正弦图像的运动调制下降原理,建立了动态图像感知效果模型。

3.1 亮度响应模拟

考虑液晶的慢响应显示特性,模拟 LCD 亮度响应曲线依赖于液晶响应曲线的表达。液晶响应曲线由与时间相关的光衰减曲线 $T_{LC_decay}(t)$ 和光上升曲线 $T_{LC_rise}(t)$ [12] 组成。其中,衰减曲线 $T_{LC_decay}(t)$ 的具体表达如式(1)所示。

$$T_{LC_decay}(t) = \sin^2\left(\frac{\delta_0 \exp(-2t/\tau_0)}{2}\right), \quad (1)$$

其中: δ_0 为相位延迟变化, τ_0 为液晶控制器重新定向时间,在本文中作为影响液晶响应时间(Liquid Crystal Response Time, LCRT)的变量。LCRT 是指在驱动电压作用下,液晶单元由亮变暗和由暗变亮所需的时间,通常采用亮度从 10% 至 90% 和 90% 至 10% 变化所需的时间 [13]。

由于光上升曲线受施加电压的影响十分复杂,这里假设上升曲线与衰减曲线对称 [14]。上升曲线 $T_{LC_rise}(t)$ 的具体表达如式(2)所示。

$$T_{LC_rise}(t) = 1 - \sin^2\left(\frac{\delta_0 \exp(-2t/\tau_0)}{2}\right), \quad (2)$$

根据式(1)与式(2),可以模拟出具有不同响应速度的液晶响应曲线(LCD_1 和 LCD_2),同时

OLED 响应曲线作为液晶的理想情况也可以进行表示,如图 3 所示。

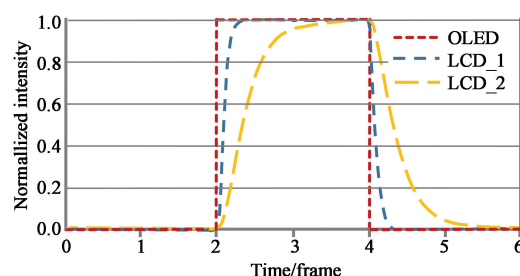


图 3 具有不同响应速度显示系统的亮度响应曲线
Fig.3 Brightness response curves of the display system with different response speeds

3.2 动态图像质量影响因素

为了研究液晶响应速度对图像感知效果的影响,液晶响应曲线模拟中的 τ_0 取值为 2, 8, 16 ms, 对应 LCRT 分别为 1.4, 5.4, 10.9 ms, 3 种响应速度的液晶显示分别命名为 LCD_1、LCD_2 和 LCD_3。理想化的 OLED 表征亮度响应时间为零的显示系统, τ_0 取值 0 ms, 对应 LCRT 为 0 ms [15]。

动态图像质量的另一影响因素是显示系统的帧频(Frame rate),为保证不同显示系统中人眼实际感知的运动图像为同一运动速度,设置帧频与以像素每帧(Pixel per frame, ppf)为单位的运动速度的乘积为相同值。考虑帧频取值分别为 60, 120, 240, 480 Hz, 则对应的以 ppf 为单位的运动速度分别为 8, 4, 2, 1 ppf。

背光调制技术也将影响动态图像感知效果,背光调制原理如图 4 所示,图中背光占空比为 A/T_f 。模拟模型中选择的背光占空比参数为 25%、50%、75% 和 100%。

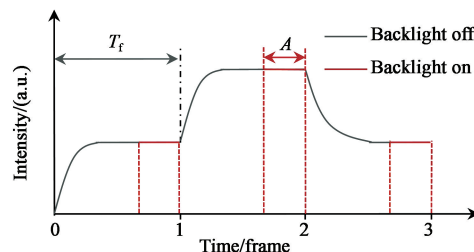


图 4 背光调制技术

Fig.4 Backlight modulation technology

3.3 动态调制传递函数

DMTF 是从信号系统角度分析运动图像模糊,考虑了显示系统对不同空间频率的响应特性。

对于由显示系统和视觉感知系统组成的一个动态图像信号感知系统,可用 DMTF 的概念来表征其系统特性。根据显示系统正弦图像的亮度响应序列,结合人眼平滑追踪运动的亮度积分原理,可计算不同运动速度及空间频率下信号系统的 DMTF^[16]。

对正弦图像的周期性进行分析发现,当图像运动速度为 V 时,人眼感知的图像模型中只需构造 V 种亮度响应序列 $L_V^i(t)$ ($i=0, 1, 2, \dots, V-1$)。图 5 是模拟运动速度为 4 ppf 时正弦运动图像的 LCD 亮度响应序列。

基于人眼平滑追踪运动的亮度感知是顺着观察轴在 1 帧时间内的亮度积分,其表达式 $B(x)$

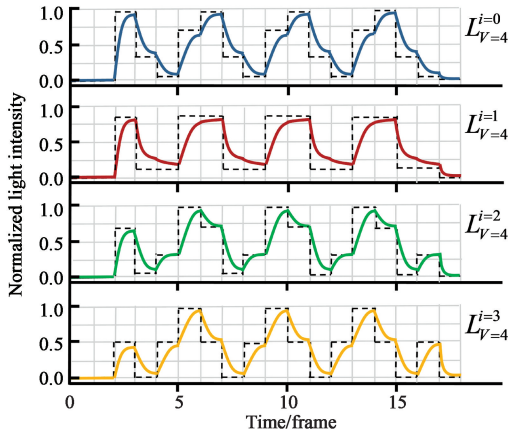


图 5 运动速度为 4 ppf 时 LCD 亮度响应序列

Fig.5 Brightness response sequences of LCD at a velocity of 4 ppf

如式(3)所示。

$$B(x) = \frac{1}{T_f} \int_{-\frac{x}{V}}^{\frac{x}{V} + T_f} L_V^i(t) dt, \quad (3)$$

其中: x 为观察轴上人眼所在位置, T_f 为帧周期, V 为图像运动速度, $L_V^i(t)$ 为编号为 i 的时间响应序列, i 从 0 取到 $V-1$ 。

基于正弦光栅成像方法,DMTF 可对像与物之间的对比度关系进行分析。空间频率为 f 的正弦图像,其单位表示为周期每像素(Cycle per pixel, cpp),其对比度记为 $C_i(f)$ 。当图像运动速度为 V 时,由于运动模糊的产生,人眼可感知的图像对比度下降至 $C_p(V, f)$,则有:

$$f_{\text{DMTF}}(V, f) = \frac{C_p(V, f)}{C_i(f)}, \quad (4)$$

根据各个显示系统上正弦图像的亮度响应序列,由式(3)的人眼平滑追踪运动的亮度积分原理与式(4) f_{DMTF} 的定义,可以计算出不同运动速度、不同空间频率下各显示系统的 f_{DMTF} 值。图 6 是不同运动速度下 DMTF 的对比^[17]。

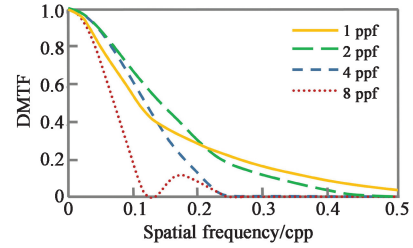


图 6 不同运动速度下的 DMTF

Fig.6 DMTF at different motion speeds

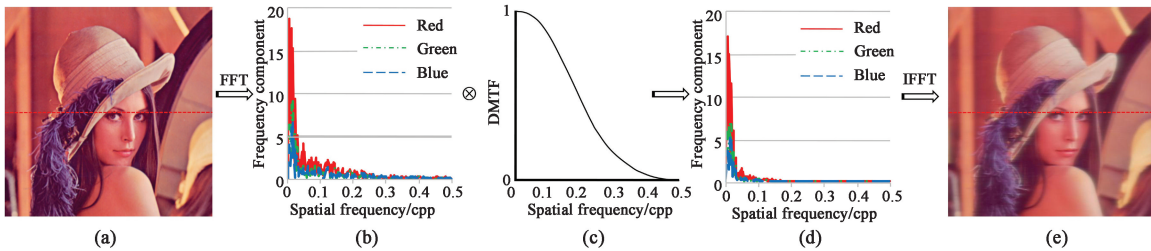


图 7 动态图像感知效果的模拟过程。(a)原始图像;(b)原始图像水平方向上像素(红色虚线处)经过 FFT 变换得到频域特征;(c)特定显示器响应速度、帧频和背光占空比参数下的 DMTF;(d)经过运动模糊处理后的频域特征;(e)人眼感知效果图。

Fig.7 Simulation process of dynamic image perception effect. (a) Original image; (b) Pixels (red dotted line) in the horizontal direction of the original image are FFT transformed to obtain the frequency domain features; (c) DMTF under the parameters of specific display response speed, frame rate and backlight duty ratio; (d) Frequency domain feature after motion blur processing; (e) Human eye perception effect.

3.4 动态图像感知模拟

DMTF 表征了各因素参数下显示系统特征及人眼视觉系统的特性,因此可用于表征原始图像经过运动模糊模拟系统后的感知效果。考虑 DMTF 曲线的频域特性,动态图像感知效果的模拟过程如图 7 所示。所模拟的图像运动为水平方向的运动,因此图像在水平方向上逐行进行傅里叶变换,得到的频率域特征再与特定的 DMTF 相乘,最终通过傅里叶逆变换得到动态图像的感知效果。

4 视觉感知实验

4.1 实验设计

为了研究各因素对人眼感知动态图像质量的

影响效果,设计了相应的视觉感知实验。受测者通过主观实验对模型模拟出的动态感知效果图进行评价。实验挑选了 3 幅不同类型的图像:高鉴别度的人物图像 Lena、特征为自然风景的 Scenery 和由钢琴键和字符构成主体特征的 Character(图 8),研究对不同特征的图像,人眼感知的运动模糊程度。除此之外,实验涉及的因素还包括:4 种响应速度的显示系统、4 种帧频和 4 种背光占空比。

实验中受测者需要主观评价的图像共有 192 幅,测试图像随机呈现在显示屏上,受测者进行无时间限制的图像观察后对动态图像质量进行评分。受测者端坐在距离显示屏 3 倍图像高度的距离处^[18],正对显示屏中央位置观察图像(图 9)。

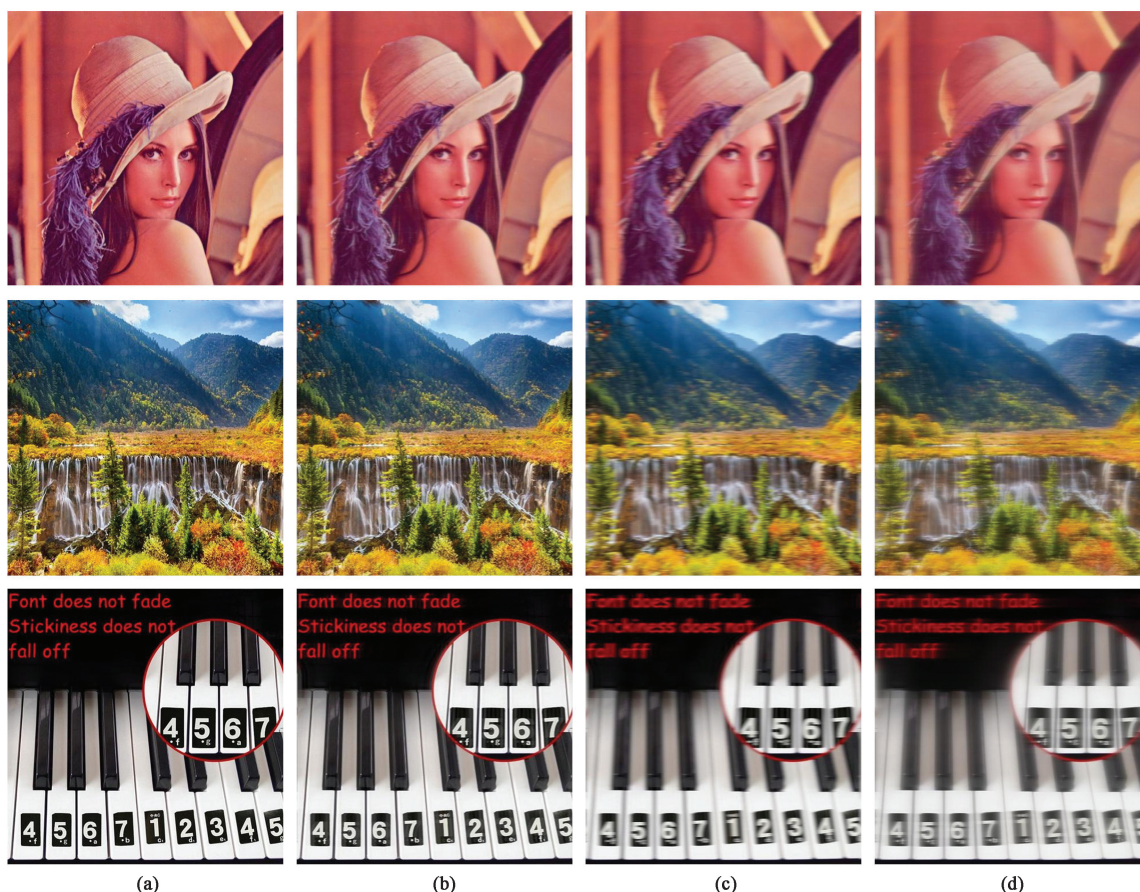


图 8 动态图像感知效果模拟。(a) OLED, 帧频为 480 Hz, 背光占空比为 25%;(b) LCD_3, 帧频为 60 Hz, 背光占空比为 25%;(c) LCD_3, 帧频为 60 Hz, 背光占空比为 100%;(d) LCD_3, 帧频为 480 Hz, 背光占空比为 25%。

Fig.8 Simulation of dynamic image perception effect. (a) OLED, frame rate of 480 Hz, duty ratio of 25%; (b) LCD_3, frame rate of 60 Hz, duty ratio of 25%; (c) LCD_3, frame rate of 60 Hz, duty ratio of 100%; (d) LCD_3, frame rate of 480 Hz, duty ratio of 25%.

评分标准采用 5 分制^[19]:5 分为极佳,4 分为不错,3 分为一般,2 分为较差,1 分为糟糕。实验共邀请 26 名受测者参与,包含 13 名女性,年龄在 19 至 25 岁之间,平均年龄 22 岁。所有受测的视力均正常或矫正至正常水平。为了使实验数据更可靠,正式实验前通过练习实验对受测者进行实验方法的训练。

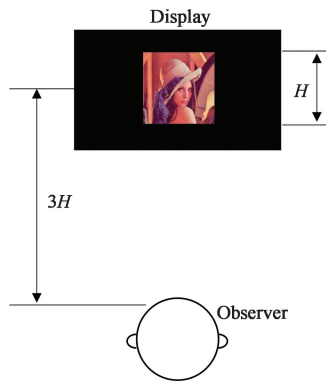


图 9 视觉感知实验设置

Fig.9 Visual perception experiment settings

4.2 实验结果分析

实验数据经过整理后,使用 SPSS 软件(IBM SPSS Statistics 23.0)进行分析。方差分析(ANOVA)(表 1)结果表明,图像类型、响应速度、帧频和背光占空比对运动图像质量均有显著的影响($p < 0.01$),响应速度和帧频的交叉作用对运动模糊也有显著的影响($p < 0.01$)。表 1 中,df 是自由度, F 是组方差值,sig.是显著性检验值。

表 1 各变量因素对运动模糊程度评分的 ANOVA 分析结果

Tab.1 Results of ANOVA analysis for different factors on motion blur

Factor	Motion blur		
	df	F	Sig.
Image	2	165.875	<0.001
Display	3	2 370.56	<0.001
Frame_rate	3	285.857	<0.001
Duty ratio	3	516.312	<0.001
Display×Frame_rate	9	271.02	<0.001

图像类型对动态图像感知质量有显著性影响。Lena 是轮廓清晰的人物图像,Character 是

黑白分明背景下的字符图像,这两者整体轮廓相对清晰。而 Scenery 是远景的自然风景图像,其细节相对更丰富,微小的模糊都会让整体动态图像质量感知大大下降。因此整体评分中,Scenery 评分显著偏低,如图 10(a)所示。背光调制技术可削弱显示器的保持型特性导致的运动模糊,背光占空比的降低对削弱运动模糊程度具有明确的正向作用,如图 10(b)所示。

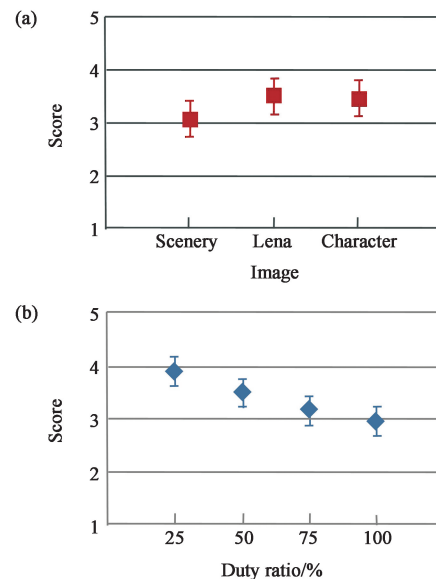


图 10 图像类型与背光占空比对应的运动模糊评分平均值。(a)不同图像特征;(b)不同背光占空比。

Fig.10 Mean score of motion blur corresponding to backlight duty ratio and image type. (a) Mean score of different image features; (b) Mean score of different duty ratio.

物理上削弱液晶的慢响应特性可显著降低 LCD 运动模糊效果,液晶显示响应速度的提高可有效抑制运动模糊,如图 11(a)所示。实验结果表明,LCD_1 与 OLED 不相上下,实际因液晶显示响应速度造成可感知的动态图像质量下降对应的 LCRT 阈值在 1.4~5.4 ms 区间内,具体阈值有待进一步实验进行验证。

帧频对动态图像感知质量的影响如图 11(b)所示。整体而言,随着帧频的提高,动态图像感知质量先上升后下降,这实际上是帧频与响应速度对动态图像质量产生交叉影响的体现。如图 11(c)所示,在响应速度较快时(OLED 和 LCD_1),帧频的提高直接削弱了保持型显示特性,从而体

现出帧频越高动态图像质量越好;在响应速度较慢时(LCD_2 和 LCD_3),液晶需要更多的时间完成响应,过高的帧频使得液晶还未完成响应便进

入下一帧响应过程,从而加剧了运动模糊的效果。极端情况下直接反转,形成帧频越高动态图像质量越差的效果。

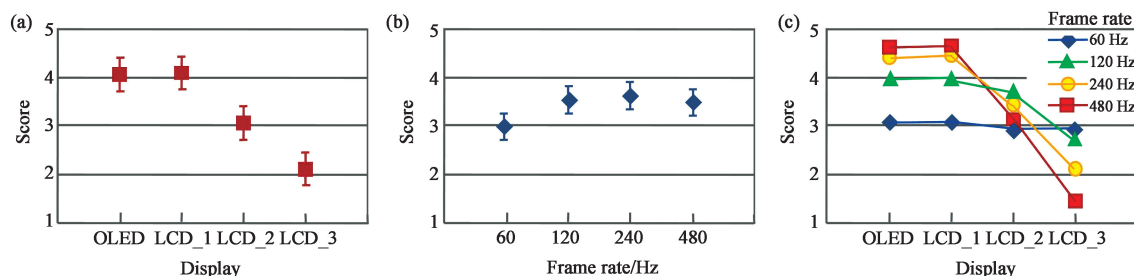


图 11 响应速度和帧频对应运动模糊评分平均值。(a)不同响应速度;(b)不同帧频;(c)不同响应速度与帧频交叉。

Fig.11 Mean score of motion blurscore corresponding to response speed and frame rate. (a) Mean score of different response speeds; (b) Mean score of different frame rate; (c) Cross influence of display type and refresh frequency on motion blur.

5 结 论

对于液晶显示系统,保持型的显示特性和慢响应是导致其动态图像质量低下的主要原因。为了研究液晶显示系统的动态图像质量提升方法,建立了液晶显示动态图像感知效果的模拟模型。该模型可以模拟不同类型的显示图像在不同液晶响应速度、帧频及背光占空比情况下的动态图像

感知效果。研究通过视觉感知实验对模拟图像进行评价并统计分析实验结果。实验结果表明,背光占空比调制可有效提升动态图像质量;显示器件响应速度的快慢与动态图像质量呈正相关关系,LCD 的响应速度达到一定程度后可忽略慢响应对人眼感知动态图像效果的影响,从而使 LCD 与 OLED 相媲美;帧频与响应速度对动态图像质量产生交叉影响。研究结果可为液晶显示系统动态图像质量的提升途径提供理论参考。

参 考 文 献:

- [1] 赵晨,吕国强,吴磊,等.基于图像局部亮度的液晶显示器动态调光算法[J].液晶与显示,2020,35(3):234-241.
ZHAO C, LYU G Q, WU L, et al. Dynamic dimming algorithm for liquid crystal display based on local brightness of image [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(3): 234-241. (in Chinese)
- [2] 刘硕,吴仁杰,杨贤,等.基于有限元的 Mini-LED 灭灯分析[J].液晶与显示,2020,35(1):53-61.
LIU S, WU R J, YANG X, et al. Analysis of Mini-LED light-off phenomenon based on FEM simulation [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(1): 53-61. (in Chinese)
- [3] 王骁,苏寒松,李昌禄.一种基于 LCD-LED 双调制显示器的 HDR 图像显示方法[J].液晶与显示,2019,34(1):14-23.
WANG X, SU H S, LI C L. HDR image display algorithm based on LCD-LED dual modulation HDR display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(1): 14-23. (in Chinese)
- [4] YAMAMOTO T, SASAKI S, IGARASHI Y, et al. Guiding principles for high-quality moving picture in LCD TVs [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2006, 14(10): 933-940.
- [5] 王煦.液晶显示器运动模糊检测方法验证系统的开发[D].成都:电子科技大学,2014.
WANG X. Liquid crystal display motion blur detection method development and validation of the system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [6] ZHANG Y N, TEUNISSEN K, SONG W, et al. Dynamic modulation transfer function: a method to characterize the temporal performance of liquid-crystal displays [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(6): 533-535.

- [7] GOU F W, CHEN H W, LI M C, *et al.* Motion-blur-free LCD for high-resolution virtual reality displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, 26(4): 223-228.
- [8] Zhang Y N, Li X H, Xu Y Q, *et al.* Motion-blur characterization with simulation method for mobile LCDs [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2008, 16(11): 1115-1123.
- [9] KURITA T. Moving picture quality improvement for hold-type AM-LCDs [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2001, 32(1): 986-989.
- [10] PENG F L, CHEN H W, GOU F W, *et al.* A LCD with submillisecond motion picture response time [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 1826-1829.
- [11] SOMEYA J, SUGIURA H. Evaluation of liquid-crystal-display motion blur with moving-picture response time and human perception [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2007, 15(1): 79-86.
- [12] PENG F L, CHEN H W, GOU F W, *et al.* Analytical equation for the motion picture response time of display devices [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(2): 023108.
- [13] SONG W, Li X H, Zhang Y N, *et al.* Motion-blur characterization on liquid-crystal displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2008, 16(5): 587-593.
- [14] WANG H Y, WU T X, ZHU X Y, *et al.* Correlations between liquid crystal director reorientation and optical response time of a homeotropic cell [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(10): 5502-5508.
- [15] PENG F L, CHEN H W, WU S T. Can LCDs outperform OLED displays in motion picture response time? [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 478-481.
- [16] 张宇宁. 平板显示器件视觉现象研究[D]. 南京: 东南大学, 2008.
ZHANG Y N. Study on the visual artifacts of flat panel display[D]. Nanjing: Southeast University, 2008. (in Chinese)
- [17] 夏振平. 基于人眼平滑追踪的液晶显示运动模糊研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 091003.
XIA Z P. Motion blur analysis of liquid crystal display based on smooth pursuit eye tracking [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091003. (in Chinese)
- [18] KAWANO T, YAMAGISHI K, HAYASHI T. Performance comparison of subjective assessment methods for 3D video quality [C]//*Proceedings of the 4th International Workshop on Quality of Multimedia Experience*. Yarra Valley, VIC, Australia: IEEE, 2012: 218-223.
- [19] 夏振平, 程成. 基于视觉显著性的立体显示图像深度调整[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0133001.
XIA Z P, CHENG C. Stereoscopic display image depth adjustment based on visual saliency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0133001. (in Chinese)

作者简介:



宋 玉(1997—), 女, 河南信阳人, 硕士研究生, 2019 年于嘉兴学院获得学士学位, 主要从事液晶显示图像质量方面的研究。E-mail: sy_june@163.com



夏振平(1985—), 男, 江苏兴化人, 博士, 讲师, 2014 年于东南大学获得博士学位, 主要从事视觉相关的显示图像质量测量、评价和优化方面的研究。E-mail: xzp@usts.edu.cn