

液晶显示动态图像感知效果补偿技术

宋玉, 夏振平*, 胡伏原, 程成

苏州科技大学电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009

摘要 运动模糊是影响液晶显示系统所得图像质量的关键因素之一, 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导致了动态图像感知模糊。为了研究提升液晶显示动态图像质量的方法, 基于人眼平滑追踪理论建立了图像运动补偿预处理及液晶显示动态图像人眼感知效果模拟模型, 同时针对二进制 8 位显示系统和二进制 10 位显示系统提出了不同的自适应运动补偿预处理方法。研究通过视觉感知实验对动态图像运动补偿效果进行了主观评价和统计分析。结果表明, 针对 8 位显示系统的补偿方法对动态图像感知效果有显著性提升, 提升率为 11.11%; 而针对 10 位显示系统的补偿方法则可以达到接近原静止图像的感知效果, 提升率为 112.75%。研究结果可为液晶显示系统所得动态图像质量的提升提供理论参考。

关键词 图像处理; 液晶响应; 视觉感知; 动态调制传递函数; 运动补偿

中图分类号 TN27

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2410004

Compensation Technology of Dynamic Image Perception Effect of Liquid Crystal Display

Song Yu, Xia Zhenping*, Hu Fuyuan, Cheng Cheng

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

Abstract Motion blur is one of the key factors that affect the image quality obtained by liquid crystal display (LCD) systems. The slow response of display systems, the hold type display characteristic, the smooth eye tracking, and the visual integral effect lead to the perceptual blur of dynamic images. In order to study the method for improving the dynamic image quality of LCD, the image motion compensation preprocessing model and LCD dynamic image perception effect simulation model are established based on the theory of smooth eye tracking. At the same time, different adaptive motion compensation preprocessing methods are proposed for binary eight-bit display systems and binary ten-bit display systems. Through visual perception experiments, the research carries out subjective evaluation and statistical analysis on the effect of dynamic image motion compensation. The results show that the compensation method for eight-bit display systems can significantly improve the perception effect of dynamic images, and the improvement rate is 11.11%; while the compensation method for ten-bit display systems can achieve the perception effect close to the original still images, and the improvement rate is 112.75%. The research results can provide a theoretical reference for improving the dynamic image quality of LCD systems.

Key words image processing; liquid crystal response; visual perception; dynamic modulation transfer function; motion compensation

OCIS codes 100.2960; 110.2990; 100.1160; 110.3000

收稿日期: 2020-12-22; 修回日期: 2021-01-22; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(62002254, 61876121)、江苏省自然科学基金项目(BK20200988)、江苏省重点研发计划项目(BE2017663)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX20_2755)

通信作者: *xzp@usts.edu.cn

1 引言

近年来,基于迅猛增长的信息需求,信息显示技术得到快速发展^[1]。随着市场的不断向前发展以及生活水平的提高,人们对图像显示质量也不断地提出新的要求^[2-5]。液晶显示(LCD)技术作为当今主流的平板显示技术,灵活运用动态背光调制和可变帧率等技术,实现图像显示质量的不断优化^[6]。

运动模糊是显示系统动态图像质量的一个重要影响因素^[7],其形成原因分可为两类:显示系统自身特性和人眼视觉特性^[8]。其中,显示系统自身特性导致的运动模糊主要由保持型显示特性和慢响应体现^[9]。在观看运动图像时,人眼眼球的平滑追踪运动和视觉积分效应也是人眼感知运动模糊的根本原因^[10]。已有研究表明:人眼平滑追踪速度达到上限 75 (°)/s 时,人眼平滑追踪速度比(人眼追踪速度与目标运动速度的比值)约为 0.9;人眼平滑追踪速度低于上限速度时,人眼平滑追踪表现为线性特征,对应的平滑追踪比接近 1^[11-12]。传统的运动模糊模型是基于视觉完美的平滑追踪,即人眼追踪速度与目标运动速度一致的假设^[13]。验证动态调制传递函数(DMTF)运动模糊模型的主观实验(人眼追踪速度比为 1)表明,在 DMTF 零点处,即运动速度和空间频率相乘结果是整数时,观测者难以选择模拟的运动速度,从而导致相应的匹配评分很低^[14]。

研究者提出了各种图像处理技术以提升图像显示质量。为解决运动图像中保持型显示的空间频率响应具有零点导致预补偿方法的有效性仅限于较低空间频域的问题,Usui 等^[15]提出采用三角波形发射的预补偿方法改善了图像运动模糊。然而,该方法要求将传统显示器件发光机制(保持型显示)改为三角波形发射方式,这对传统显示技术提出了新的要求。张晓迪^[16]阐明遥感图像处理常采用调制传递函数补偿(MTFC),利用成像系统的调制传递函数(MTF)进行图像复原,提高遥感影像 MTF 数值,使得光学成像系统总体 MTF 达到较为理想水平,从而提高航空面阵成像系统的成像质量。然而,MTFC 技术复原的图像质量取决于精准的去噪处理和图像 MTF 值的准确获取。

因此,基于更符合实际的人眼平滑追踪速度,本文提出了液晶显示图像自适应运动补偿预处理方法,建立图像运动补偿模型,研究预处理后动态图像质量。该模型的核心是基于更符合实际人眼平滑追踪速度比的 DMTF,提出基于 DMTF 的自适应运

动补偿函数(DMTFC),实现图像运动补偿。市场上二进制液晶显示器像素显示位数主要有 6 位、8 位和 10 位等。其中,二进制 8 位显示器占据目前的主要市场,二进制 10 位显示器是新兴的理想显示器件。本文分别针对二进制 8 位显示器和二进制 10 位显示器提出自适应运动补偿优化方案。

2 动态调制传递函数优化

液晶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、人眼平滑追踪和视觉积分效应的共同作用造成的调制传递函数值的降低,因此 DMTF 可用于描述图像运动模糊。基于正弦图像运动,DMTF 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^[17]。DMTF 考虑不同空间频率下显示系统的响应特性,从信号系统角度分析图像运动模糊。DMTF 可用于描述动态图像信号感知系统的系统特性,该感知系统由显示系统与人类视觉感知系统共同组成^[18]。

基于正弦光栅成像方法,将 DMTF 定义为像与物之间对比度的比值。对于一幅空间频率为 f 、单位为周期每像素(cycle/pixel)的正弦图像,将其对比度记为 $C_i(f)$ 。当该正弦图像的运动速度为 V ,单位为像素每帧(pixel/frame)时,由于运动模糊的产生,人眼感知的正弦图像对比度下降为 $C_p(V, f)$,则动态调制传递函数可表示为

$$f_{\text{DMTF}}(V, f) = \frac{C_p(V, f)}{C_i(f)} \quad (1)$$

根据在特定液晶显示器件上测得的正弦图像亮度响应序列,结合 f_{DMTF} 定义与人眼平滑追踪运动的亮度积分原理,可计算出不同运动速度、不同空间频率下特定液晶显示器件的 f_{DMTF} 值^[19]。

前文提及的验证 DMTF 运动模糊模型的主观实验结果表明,采用追踪速度比为 1 建立的模型与实际感知效果不相符。因此,为了更真实地模拟及重现人眼实际观察到的运动模糊图像效果,本研究团队在前期的研究工作中建立了融入人眼平滑追踪速度比的运动模糊模型,提高了显示系统动态图像质量评价的准确性^[20]。人眼平滑追踪实验表明实际人眼平滑追踪速度低于物体运动速度,完美追踪速度比的显示系统过于理想化,与绝大多数情况下人眼追踪速度比小于 1 的实验结果不符。研究最后提出小于 1 的追踪速度比($g < 1$),建立优化后新的 DMTF,解决了传统 DMTF 存在零点导致在预补偿处理时高频空间效果极差的问题。

存在零点(或接近零点)的 DMTF,零点对应空间频率处 DMTFC 幅值极大导致预处理图像像素光强度饱和。优化的无零点 DMTF 对应的 DMTFC 在全频率处尤其在高频空间的函数值明显降低,这解决了预补偿处理时高频空间效果极差的问题。因此,本文采用更符合实际人眼追踪速度比

的优化后 DMTF,提出图像运动补偿处理方法并构建预处理图像人眼感知动态效果模型。基于本团队前期研究成果,不同目标运动速度和人眼平滑追踪速度比下的 f_{DMTF} 对比如图 1 所示,其中追踪速度比 g 的取值分别为 1 和 0.9。

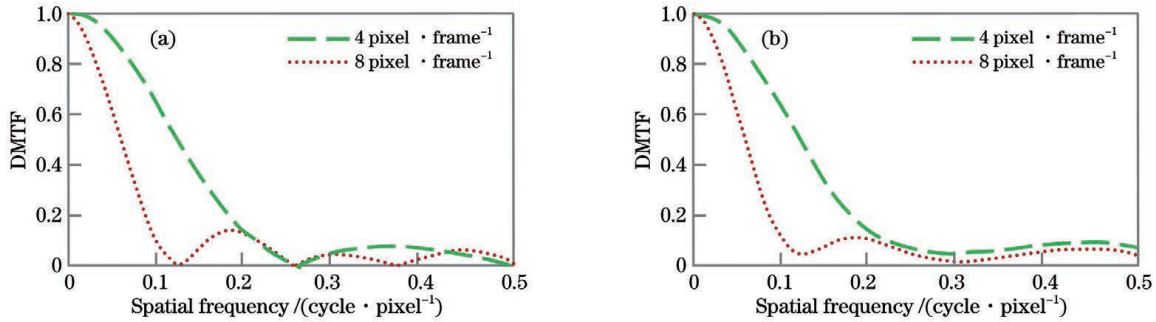


图 1 不同运动速度和追踪速度比 g 下的 DMTF。(a) $g=1$;(b) $g<1$

Fig. 1 DMTF at different moving velocities and tracking speed ratio g . (a) $g=1$; (b) $g<1$

3 运动补偿模型构建

为了深入研究降低图像运动模糊程度、提升动态图像质量的方法,基于正弦图像运动调制下降可表征显示系统特性的原理,提出基于 DMTF 的自适应运动补偿函数,以对原始图像进行运动补偿,建立了基于运动补偿预处理的动态图像人眼感知效果模型。模型框架示意图如图 2 所示,模型原理为:首先对输入至系统模型中图像序列的相邻帧进行运动估计,根据运动估计结果对其进行相应运动补偿预处理,最后模拟预处理图像动态感知效果。

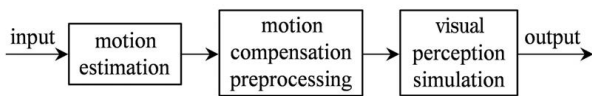


图 2 动态图像感知效果补偿模型框架示意图

Fig. 2 Schematic diagram of compensation model framework for dynamic image perception effect

3.1 运动补偿函数

基于 DMTF 可表征显示系统的动态图像模糊的原理,提出近似等于系统 DMTF 的倒数的运动补偿函数,用于对原始图像进行预处理,以消除图像经显示系统及人眼感知后产生的运动模糊。如果直接取系统 DMTF 的倒数作为运动补偿函数,由于较高空间频率处 DMTF 值较低,则对应的运动补偿函数值较大,采用该函数对图像进行预处理时,大量像素值超出理想显示系统(10 位显示系统)的显示范围,从而造成预处理图像及感知图像的失真。因此,需要对运动补偿函数的上界进行约束,DMTFC 为

$$DMTFC(i) = \frac{DMTF(i)}{DMTF^2(i) + B^2}, \quad (2)$$

式中: i 为空间频率; B 为待求参数。由(2)式可知,DMTF 取最小值时,对应补偿系统 DMTFC 取得最大值。通过对(2)式求导可得,待求参数 B 等于 DMTF 时,DMTFC 取得最大值 $1/(2B)$ 。则有

$$\frac{\text{Min}[DMTF(i)]}{\text{Min}[DMTF(i)]^2 + B^2} = \frac{1}{2B}, \quad (3)$$

通过求解(3)式可得参数 B , 回代至(2)式可得补偿函数表达式,用于进行补偿函数构建。

3.2 自适应运动补偿

目前,二进制 8 位显示系统占据主要市场,二进制 10 位显示系统作为新兴的理想显示系统正在崛起。针对这两种显示系统,本文提出了自适应的图像运动补偿预处理方法。图像经运动补偿函数的预处理后,理想显示亮度高于 8 位系统亮度显示范围,导致像素光强度饱和,从而影响 8 位显示系统预处理后的动态图像质量。采用二进制 10 位显示系统显示运动补偿预处理图像,可完美呈现预处理后图像理想亮度。

实验表明,针对二进制 8 位显示系统进行图像运动补偿,预处理后图像大量像素光强度饱和,使得人眼感知动态预处理图像质量不理想。因此,对前文模型中运动补偿函数 DMTFC 进行函数优化,通过设置可调参数 I 提升函数自适应性,自适应运动补偿函数 DMTFC' 可表示为

$$DMTFC'(i) = [DMTFC(i) - 1] \cdot I + 1, \quad (4)$$

式中: I 为可调参数, 其取值范围为 $0 \sim 1$ 。 I 值大小与运动补偿效果呈正相关。 I 取 0 时, $DMTFC'$ 值恒为 1, 运动补偿后图像与原始图像相同(无效补偿); I 取 1 时, $DMTFC'$ 总体数值较大, 预处理图像的大量像素值超出 8 位显示系统亮度显示范围, 导致图像较多区域呈现白色(像素光强度饱和)。为提高 I 取值的合理性, 设置辅助参数 P , 用于描述预处理后图像像素灰度值溢出的百分比。基于参数 I 调节后预处理图像质量及预处理图像动态感知效果, 本研究得出以下结论: 预处理图像 P 值在 8% 以内, 表明 I 取值合理且该图像经运动补偿函数处理后无明显失真。图像自身特性及运动估计所得的运动速

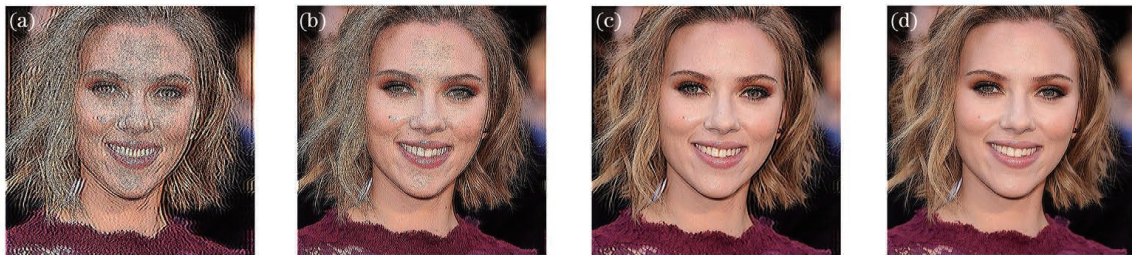


图 3 预处理图像显示于 8 位显示系统。(a) 针对 10 位显示系统的 $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ 预处理图像 ($I=1$); (b) 针对 10 位显示系统的 $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ 预处理图像 ($I=1$); (c) 针对 8 位显示系统的 $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ 预处理图像 ($I=0.1$); (d) 针对 8 位显示系统的 $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ 预处理图像 ($I=0.18$)

Fig. 3 Preprocessing images displayed in eight-bit display system. (a) $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ preprocessing image for 10 bit display system ($I=1$); (b) $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ preprocessing image for 10 bit display system ($I=1$); (c) $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ preprocessing image for 8 bit display system ($I=0.1$); (d) $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ preprocessing image for 8 bit display system ($I=0.18$)

为呈现预处理图像像素的理想亮度, 本文采用二进制 10 位显示系统显示预处理图像。取模型中 I 的最大值 1, 对图像进行理想运动补偿, 于 10 位显示系统上显示。10 位显示系统呈现的预处理图像 P 值为 0, 即图像未产生失真。预处理图像经人眼感知效果模拟后质量较未处理图像有极大提升。图 4(a) 是运动速度为 $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ 时不同调节

度, 可保证在较小的 P 取值范围内得到最大的 I 。针对二进制 8 位液晶显示图像, 基于客观参数 P 值及预处理图像动态感知效果, 并考虑不同类型图像及运动速度, 本文 I 的取值范围为 $0.1 \sim 0.3$ 。

图 3 是不同运动速度和 I 取值情况下预处理图像显示于 8 位显示系统的对比(为对比预处理效果, 所有预处理图像均显示于 8 位显示系统)。 I 取值相同时, 运动速度大的 $DMTF$ 总体偏小, 对应的 $DMTFC'$ 总体较大, 图像运动补偿较明显[图 3(a) 的图像运动补偿效果明显于图 3(b)]。相同运动速度时, I 取值越大, 对应的 $DMTFC'$ 越大, 图像运动补偿效果越明显[图 3(a) 的图像运动补偿效果明显于图 3(c)]。

系数下 $DMTFC'$ 的对比。

原始图像经运动补偿函数预处理后作为动态图像感知效果模拟系统的输入图像, 经该系统处理, 得到运动补偿图像的人眼感知动态图像效果。以图 1(b) 中运动速度为 $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ 的优化 $DMTF$ 曲线表征运动模糊, 预处理图像经过动态图像感知效果模拟模型后的 $DMTF$ 曲线如图 4(b) 所示。

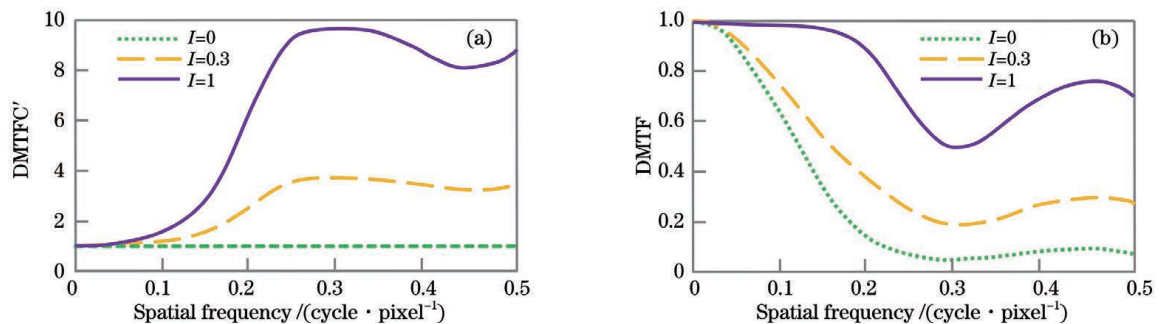


图 4 运动速度为 $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ 时的函数曲线。(a) 不同 I 值时的 $DMTFC'$; (b) 图像经预处理后人眼感知的 $DMTF$
Fig. 4 Function curves at moving speed of $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$. (a) $DMTFC'$ for different I values; (b) $DMTF$ obtained by visual perception after image preprocessing

将 DMTFC' 用于图像运动补偿预处理,对液晶显示系统特征及人眼视觉系统造成的运动模糊进行预处理,即在图像产生运动模糊之前,对其进行预处理以降低图像经过显示系统及人眼视觉系统造成的

运动模糊。考虑 DMTFC' 曲线的频域特性,针对二进制 10 位显示系统图像运动补偿效果的处理过程如图 5 所示。图中预处理图像实际应显示于 10 位显示系统,此处为进行图像对比,显示于 8 位显示系统。

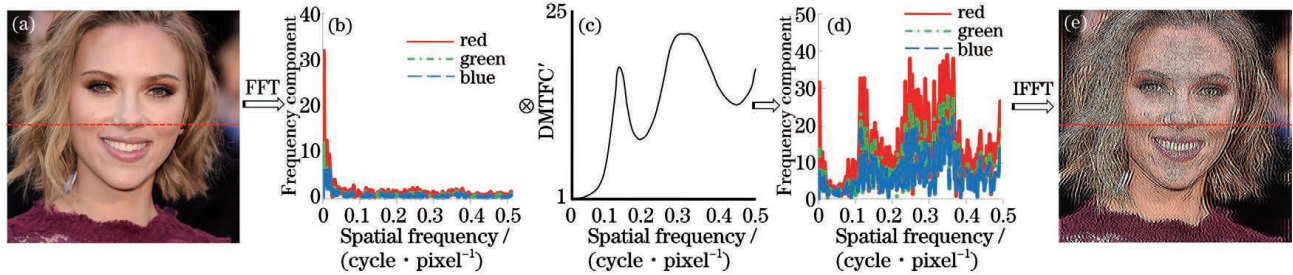


图 5 图像运动补偿预处理过程。(a)原始图像;(b)图像像素(虚线处)频谱图;(c)自适应 DMTFC';(d)预处理后频谱图;(e)预处理后图像

Fig. 5 Image motion compensation preprocessing process. (a) Original image; (b) spectra of image pixels (dotted line); (c) adaptive DMTFC'; (d) spectra after preprocessing; (e) image after preprocessing

3.3 运动补偿感知效果模拟

运动补偿处理后运动模糊人眼感知图像可由动态图像感知效果模拟模型获得。DMTF 可表征液晶显示系统特征及人眼视觉系统的特性,因此可用

于表征人眼最终感知图像效果。考虑 DMTF 曲线的频域特性,对运动速度为 $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ 的动态图像感知效果的模拟过程如图 6 所示。图中运动补偿后人眼感知效果图显示于 8 位显示系统。

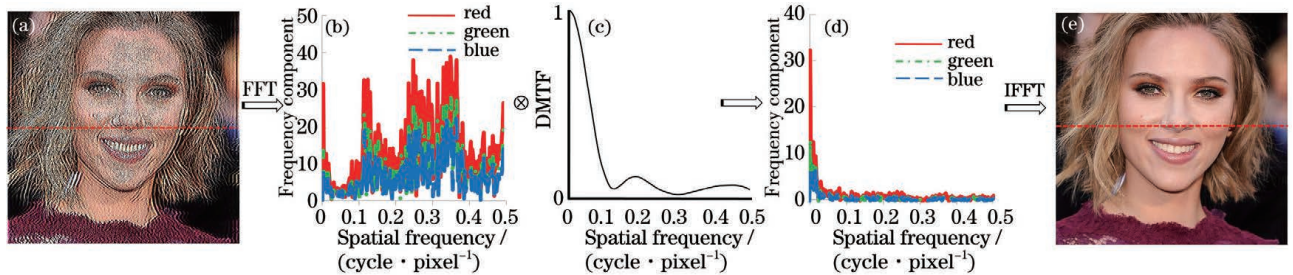


图 6 动态图像感知模拟过程。(a)预处理后图像;(b)图像像素(虚线处)频谱图;(c)运动速度为 $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ 时的 DMTF;(d)运动模糊处理后频谱图;(e)运动补偿后人眼感知效果图

Fig. 6 Simulation process of dynamic image perception effect. (a) Image after preprocessing; (b) spectra of image pixels (dotted line); (c) DMTF at moving speed of $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$; (d) spectra after motion blur processing; (e) visual perception image after motion compensation

4 视觉感知实验

4.1 实验设计

为了研究基于运动补偿的图像预处理系统对人眼感知动态图像质量的提升效果,设计了相应的视觉感知实验。受测者通过视觉感知实验对模型模拟

出的运动补偿后动态感知效果图进行评价。本文挑选了 6 幅不同类型的图像(高鉴别度的人物图像 human、自然环境中的动物 animal、自然风景 scenery、元素多样的动画 animation、色彩丰富的夜景建筑 architecture 和海上快艇 vehicle)进行实验,原图如图 7 所示。以运动估计速度为 $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$

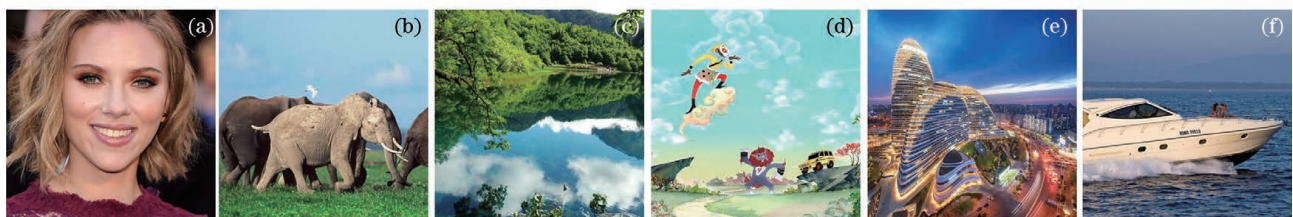


图 7 不同类型的 6 张图像。(a)人物;(b)动物;(c)风景;(d)动画;(e)建筑;(f)交通工具

Fig. 7 Six original images of different types. (a) Human; (b) animal; (c) scenery; (d) animation; (e) architecture; (f) vehicle

为例,研究不同特征的图像自适应预处理操作,人眼

感知的动态图像效果如图 8 所示。

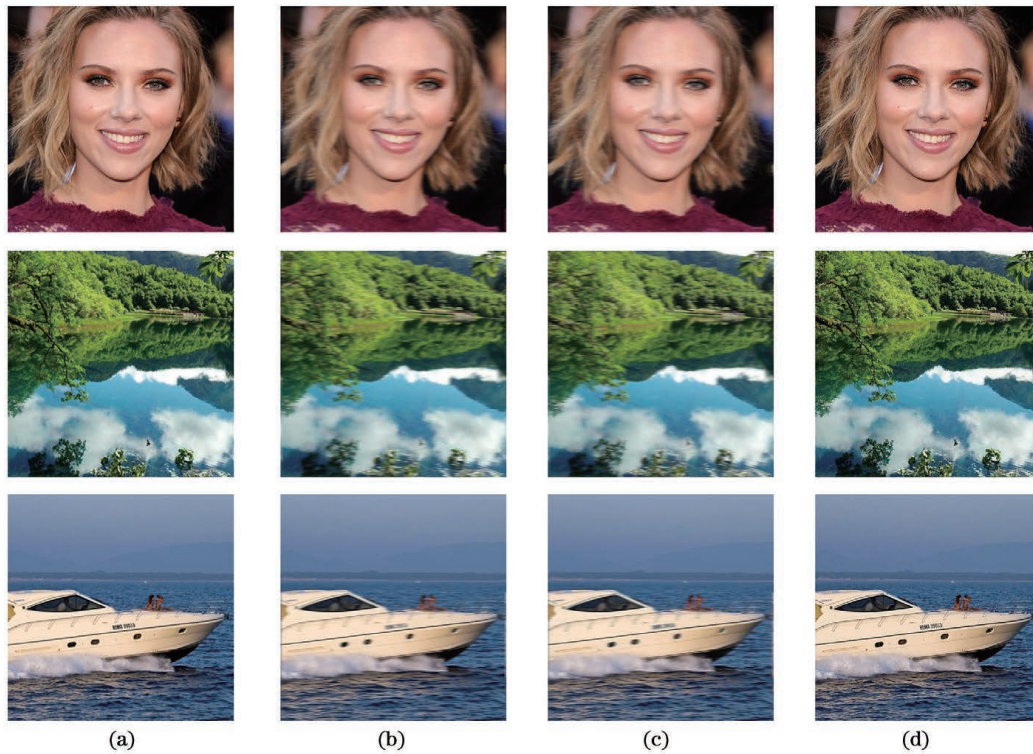


图 8 动态图像感知效果模拟。(a)原始图像;(b)原始图像动态感知效果;(c)8 位显示系统预处理视觉感知图;(d)10 位显示系统预处理视觉感知图

Fig. 8 Simulation of dynamic image perception effect. (a) Original images; (b) dynamic perception effect of original images; (c) preprocessing visual perception images of 8 bit display system; (d) preprocessing visual perception images of 10 bit display system

实验中共有 42 幅图像待受测者进行主观评价,测试图像随机呈现于液晶显示屏上,受测者对图像进行无时间限制的观察,对模拟人眼感知的动态图像质量进行评分。受测者端坐于距离显示屏三倍图像高度的距离处^[21],正对液晶显示屏中央位置观察图像(图 9,图中 H 为图像高度)。采用 5 分制评分标准^[22]: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。具体分值对应的图像质量如表 1 所示。为了确保实验数据的可靠性,于正式实

表 1 视觉感知实验评分标准

Table 1 Grading standard of visual perception experiment

Grade	Motion image quality
5	Excellent
4	Good
3	Fair
2	Poor
1	Bad

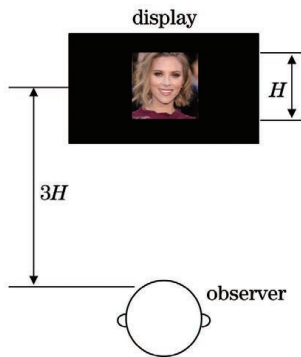


图 9 视觉感知实验设置

Fig. 9 Visual perception experiment settings

验前安排练习实验对受测者进行实验方法的训练。实验共邀请 30 名受测者参与,包含 13 名女性,年龄在 20 至 36 岁之间,平均年龄 24.1 岁。所有受测者双眼视力均正常或矫正至正常水平。

4.2 实验结果分析

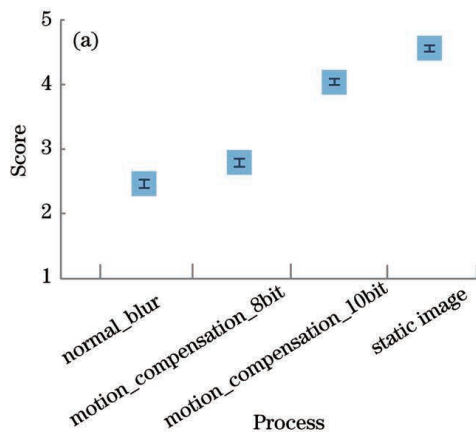
整理视觉感知实验数据,使用统计分析软件 SPSS(IBM SPSS Statistics 23.0)进行分析。方差分析(ANOVA)结果(表 2)表明,处理过程和图像类型对图像质量均有显著的影响($p < 0.01$),且两者的交叉作用对图像质量有显著的影响($p < 0.01$)。

表 2 中 d_f 是自由度, F 是组方差值, Sig. 是显著性的检验值, 该值一般与 0.05 或 0.01 比较, 若小于 0.05 或者 0.01, 则表示差异显著或极其显著。

表 2 各变量因素影响图像质量评分的 ANOVA 分析结果
Table 2 Results of ANOVA analysis for different factors influencing on image quality

Factor	d_f	F	Sig.
Process	6	249.445	<0.001
Image	5	17.517	<0.001
Processing+Image	30	1.999	0.001

针对 8 位显示系统的补偿方法对动态图像感知效果有显著提升(图 10 中 normal_blur 与 motion_



compensation_8bit 对应 Score 的误差线没有交叉), 运动速度为 $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ 和 $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ 时, 相比于未补偿图像, 补偿图像的 Score 值分别提升了 13.31% 和 8.92%, 均值约为 11.11%。10 位显示系统的补偿方法则可以达到接近原静止图像的感知效果(图 10 中 motion_compensation_10bit 与 static image 对应 Score 相近), 运动速度为 $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ 和 $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$ 时, 相比于未补偿图像, 补偿图像的 Score 值分别提升了 63.71% 和 161.78%, 均值约为 112.75%。此外, 图 10(a)、(b) 中 motion_compensation_10bit 实验结果十分相近, 表明 10 位显示系统进行运动补偿处理明显削弱了图像运动速度对图像运动模糊的影响。

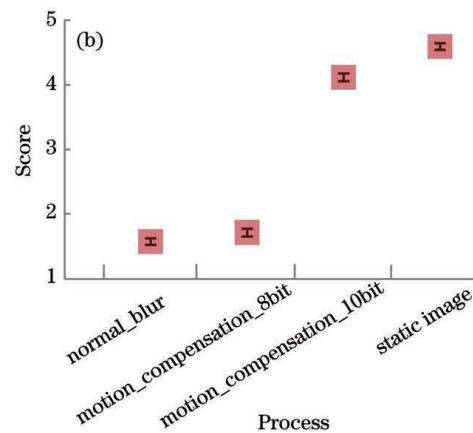


图 10 不同运动补偿过程对应的运动模糊评分平均值及其置信区间。(a)模拟速度为 $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$; (b)模拟速度为 $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$

Fig. 10 Mean score and confidence interval of motion blur corresponding to different motion compensation processes.

(a) Simulated velocity is $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$; (b) simulated velocity is $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$

5 结 论

运动模糊是影响液晶显示系统图像质量的一个关键因素。为了研究液晶显示动态图像质量的优化方法, 基于人眼平滑追踪理论建立了图像运动补偿预处理及液晶显示动态图像感知效果模型。模型同时针对二进制 8 位显示系统和二进制 10 位显示系统提出了不同的自适应运动补偿图像预处理方法。研究通过视觉感知实验对动态图像运动补偿效果进行评价并统计分析实验结果。实验结果表明, 针对 8 位显示系统的补偿方法对动态图像感知效果有显著提升, Score 值提升约 11.11%, 而 10 位显示系统的补偿方法则可以达到接近原静止图像的感知效果, Score 值提升约 112.75%。研究结果可为液晶显示系统图像运动补偿预处理提供理论参考。

参 考 文 献

- [1] Wang S, Zhou X L, Zhu P, et al. Remote sensing image enhancement based on non-subsampled contourlet transform and weighted guided filtering [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(12): 121018.
王圣, 周兴林, 朱攀, 等. 基于非下采样轮廓波变换和加权引导滤波的遥感图像增强 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(12): 121018.
- [2] Tao Z Y, Zhang L, Lin S. Low-illuminance texture image enhancement method based on SCBSO algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 241002.
陶志勇, 张蕾, 林森. 基于 SCBSO 算法的低照度纹理图像增强方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 241002.
- [3] Mei K, Liu X Q, Mu C, et al. Fast defogging algorithm based on adaptive exponentially weighted

- moving average filtering [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0109001.
- 梅康, 刘小勤, 沐超, 等. 基于自适应指数加权移动平均滤波的快速去雾算法 [J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0109001.
- [4] Zhu F P, Lu R Z, Bai P X, et al. Enhancement of strain measurement accuracy of two-dimensional digital image correlation based on dual-reflector imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1212002.
- 朱飞鹏, 陆润之, 白鹏翔, 等. 双反射镜成像用于二维数字图像相关应变精度提升 [J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1212002.
- [5] Li J W, Song Y S, Liu T C, et al. A preprocessing method for infrared image based on maritime target tracking performance [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 101023.
- 李金旺, 宋延嵩, 刘天赐, 等. 一种面向海上目标跟踪性能的红外图像预处理方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 101023.
- [6] Lu J. Optimizing display image quality and power consumption by varying frame rate [J]. *Power Management*, 2016, 23(9): 70-73.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Jansson D, Medvedev A. Dynamic smooth pursuit gain estimation from eye tracking data [C]//2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, December 12-15, 2011, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 2011: 1698-1703.
- [12] Buizza A, Schmid R. Velocity characteristics of smooth pursuit eye movements to different patterns of target motion [J]. *Experimental Brain Research*, 1986, 63(2): 395-401.
- [13] Li X H, Teunissen K, Song W, et al. Characterizing motion performance with the simulation method [EB/OL]. (2008-01-05) [2020-12-22]. https://www.researchgate.net/publication/292847640_Characterizing_motion_performance_with_the_simulation_method.
- [14] Zhang Y N, Xu Y Q, Song W, et al. Motion-blur characterization with dynamic modulation transfer functions [EB/OL]. (2008-01-20) [2020-12-22]. https://www.researchgate.net/publication/292847589_Motion-blur_characterization_with_dynamic_modulation_transfer_functions.
- [15] Usui T, Fujisaki Y, Shiga T. Motion blur reduction with triangular waveform emission and optimized enhance filter [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(9): 559-569.
- [16] Zhang X D. MTF measurement of aerial camera based on ground target and image restoration [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017.
- 张晓迪. 基于地面靶标的航空面阵相机 MTF 提取及图像复原 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
- [17] 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.
- [18] Zhang Y N. Study on the visual artefacts of flat panel displays [D]. Nanjing: Southeast University, 2008.
- 张宇宁. 平板显示器件视觉现象研究 [D]. 南京: 东南大学, 2008.
- [19] Song Y, Xia Z P, Hu F Y, 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.
- 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.
- [20] Xia Z P. Motion blur analysis of liquid crystal display based on smooth pursuit eye tracking [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 135-142.
- 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): 135-142.
- [21] Kawano T, Yamagishi K, Hayashi T. Performance comparison of subjective assessment methods for 3D video quality [C]//2012 Fourth International Workshop on Quality of Multimedia Experience, July 5-7, 2012, Melbourne, VIC, Australia. New York: IEEE Press, 2012: 218-223.
- [22] Xia Z P, Cheng C. Stereoscopic display image depth adjustment based on visual saliency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0133001.
- 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.