

基于人眼平滑追踪的液晶显示运动模糊研究

夏振平

苏州科技大学电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009

摘要 为了更为精确地研究液晶显示中的运动模糊现象,研究了基于眼动跟踪装置的正弦图像的人眼平滑追踪。实验测试了9种不同空间频率的正弦图像在4种运动速度下的人眼平滑追踪情况。结果表明,人眼的追踪速度往往小于目标图像的运动速度,且运动速度对追踪速度比有显著性影响。建立了基于追踪速度比的人眼实际感知改进模型。模拟结果对比表明,在正弦图像的空间频率与运动速度乘积为整数时,模型之间的差异很明显,而其他情况差别很小。研究结果对液晶显示中运动模糊现象的优化以及视觉舒适度的提高具有指导作用。

关键词 图像处理; 液晶显示模型; 追踪速度比; 人眼平滑追踪; 运动模糊

中图分类号 TN27 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.091003

Motion Blur Analysis of Liquid Crystal Display Based on Smooth Pursuit Eye Tracking

Xia Zhenping

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

Abstract To study the motion blur of liquid crystal display more precisely, the smooth pursuit eye tracking with sinusoidal patterns is investigated based on the eye movement tracking apparatus. The experiment tests the smooth pursuit eye tracking using nine kinds of sinusoidal images with different spatial frequencies at four kinds of motion velocities. The results show that the eye tracking velocity is always a little bit less than the moving velocity of the target image. Besides, the pursuit gain is significantly affected by the target moving velocity. The study puts forward an improved model which can simulate the eye perception results more precisely based on the pursuit gain. Simulation comparison results show that there is obvious difference between the proposed and traditional models when the product of spatial frequency and motion velocity is an integer while there is no big difference in other situations. The investigation results will play a guiding role in the optimization of motion blur and the improvement of visual comfort in liquid crystal displays.

Key words image processing; liquid crystal display model; pursuit gain; smooth pursuit eye tracking; motion blur

OCIS codes 100.2960; 110.2990; 110.3000; 120.2040

1 引言

近年来,显示技术发展迅速。随着市场需求与日俱增,人们对显示图像的质量提出了更高的要求^[1-8],其中,运动模糊是影响动态图像显示质量的主要因素之一。人眼感知到的运动图像模糊是器件显示特性和人眼视觉特性共同作用的结果。液晶显示的慢响应和维持效应是产生运动模糊的主要原因^[9],研究者提出了很多方法以减小响应时间、降低维持效应,与此同时也提出了诸多评价运动模糊的方法,其中包括用动态调制传递函数(DMTF)^[10]来描述液晶显示的时间响应特性。DMTF基于正弦图像,利用测试灰度序列的亮度响应计算而得。验证DMTF运动模糊模型的视觉感知实验结果显示,当运动速度 V (单位为 $\text{pixel}\cdot\text{frame}^{-1}$)

收稿日期: 2017-03-27; 收到修改稿日期: 2017-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(61472267)、江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJB510030)

作者简介: 夏振平(1985—),男,博士,讲师,主要从事立体显示图像质量测量、评价和优化方面的研究。

E-mail: xzp@usts.edu.cn

和正弦图像的空间频率 f (单位为 $\text{cycle}\cdot\text{pixel}^{-1}$) 相乘结果为整数时 (DMTF 上的零点), 观察者很难选择模拟的运动速度, 这也导致相应的匹配评分很低^[11]。

人眼在观看运动图像时, 眼球的平滑跟随运动和视觉暂留特性是人眼感知运动模糊的根本原因。传统运动模糊的模型基于人眼的完美平滑追踪假设^[12], 即人眼的追踪速度和观察目标运动速度完全相同。已有研究表明, 人眼平滑追踪的上限速度约为 $75\text{ }(^{\circ})/\text{s}$, 此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。低于此速度时, 人眼平滑追踪表现为线性特性, 平滑追踪比接近 1^[13-14]。基于本文 DMTF 模型正弦运动图像的特性, 利用眼动追踪装置, 研究人眼对不同空间频率以及运动速度的正弦图像的平滑追踪特性。继而建立融入平滑追踪速度比的运动模糊模型, 从而更真实地模拟和重现了人眼实际观察到的运动模糊图像, 更准确地评价显示系统的动态图像质量。

2 人眼平滑追踪

人眼平滑追踪指人眼自然追踪缓慢运动对象时视线的连续移动, 它是人眼感知图像模糊的主要原因之一, 观察者可以预测对象的运动方向和速度。运动对象速度过大时, 平滑跟随运动就不能及时捕捉到运动对象, 需要通过快速的跳跃运动来弥补。平滑追踪过程存在视线追踪速度和目标运动速度差异的问题, 追踪速度比受到目标特性、运动速度和运动方向等因素的影响。因此, 有必要针对性地研究人眼对不同空间频率和运动速度下正弦图像的平滑追踪特性。

2.1 视觉追踪实验设置

视觉追踪实验采用高速的眼动追踪装置 (iView X Hi-Velocity, SMI, 德国), 单眼采样率为 500 Hz 。测试图像为正弦灰度图像, 选择的频率为 $1/2, 1/4, 1/6, 1/8, 1/12, 1/16, 1/24, 1/32, 1/48, 1/64\text{ cycle}\cdot\text{pixel}^{-1}$ 。图像的运动速度为 $4, 8, 12, 16\text{ pixel}\cdot\text{frame}^{-1}$, 被试者的观察距离为 77 cm (三倍屏高), 最大角速度为 $19.6\text{ }(^{\circ})/\text{s}$, 低于平滑追踪上限速度。测试用显示器为 19 英寸 (48.26 cm) 液晶显示器, 分辨率为 $1440\text{ pixel}\times 900\text{ pixel}$ 。测试图像静止在显示器左侧 3 s 后以指定的速度从左侧运动到右侧, 显示器随后全屏显示中间灰度图像, 持续 3 s , 以让被试眼睛得到休息后再开始下一个测试, 被试眼睛观察图像时, 眼动追踪装置下记录人眼的运动轨迹, 用于数据分析, 如图 1 所示。

共 16 人参加了测试实验, 包括 8 名男性和 8 名女性, 年龄范围为 $22\sim 27$ 岁, 平均年龄为 24.25 岁。整个实验在暗室中进行, 在显示器中央位置照度计感光面朝向被试者的方向测量, 环境照度为 0.29 lx 。其他实验条件也均符合标准^[15]。

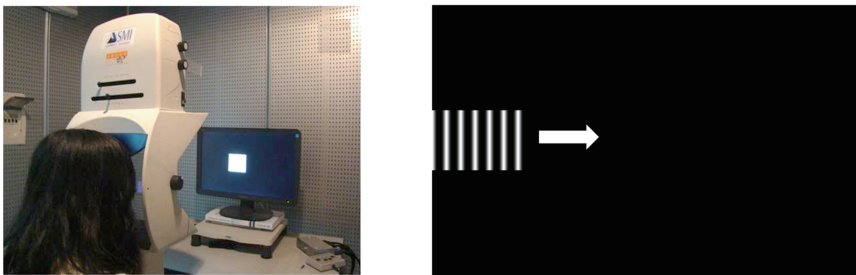


图 1 人眼追踪实验显示器界面

Fig. 1 Display interface of eye tracking experiment

2.2 实验结果分析

经过校准, 眼动装置可以准确记录人眼在显示屏上注视的位置, 该位置随时间变化即形成人眼的视线轨迹。图 2 所示为实验结果中一个具有代表性的人眼视线运动轨迹, 纵坐标所示为显示屏上的水平位置。按照实验设置, 被试眼睛注视静止图像 3 s 后视线跟随测试图像从显示器左侧运动到右侧, 起始位置有正常的延迟和快速的跳跃。视觉平滑追踪实验的目的是研究人眼观看不同空间频率、不同运动速度正弦图像时视线跟随运动的效果。对于所得测量数据, 主要研究其中的平滑追踪部分, 并且采用平滑追踪速度比定量描述人眼平滑追踪的效果。

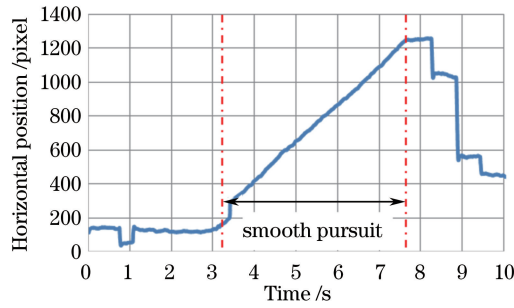


图2 水平方向的人眼追踪轨迹

Fig. 2 Eye tracking trace on the horizontal direction

实验结果采用统计分析软件 IBM SPSS Statistics 22.0 进行分析。在方差分析(ANOVA)中,固定因素为运动速度和空间频率以及两者的交叉作用,变量为追踪速度比。如表 1 所示,ANOVA 结果表明,运动速度对追踪速度比有显著性影响($p < 0.05$)。而空间频率及其与运动速度的交叉作用对追踪速度比没有显著性影响。表 1 中 X_{DOF} 表示自由度, F 表示组方差值, p 表示显著性水平。

表 1 运动速度、空间频率及其交叉作用对追踪速度比影响的 ANOVA

Table 1 ANOVA of effects of moving velocity, spatial frequency and their interaction on pursuit gain

Factor	Pursuit gain		
	X_{DOF}	F	p
Moving velocity	3	3.674	0.012
Spatial frequency	9	0.481	0.887
Product of moving velocity and spatial frequency	27	1.080	0.360

当人眼完全平滑追踪时,追踪速度比为 1;当人眼完全不追踪时,追踪速度比为 0^[11]。实验结果中的人眼对正弦图像的追踪速度比为 0.9~1。各速度下的平均追踪速度比及其 95% 的置信区间如图 3 所示。当运动速度从 4 pixel·frame⁻¹ 增加到 8 pixel·frame⁻¹ 再到 12 pixel·frame⁻¹ 时,相应的平均追踪速度比依次上升,分别为 0.928, 0.939, 0.942。当运动速度继续增加到 16 pixel·frame⁻¹ 时,平均追踪速度比下降到 0.915,为 4 个速度中的最小值。从这个趋势可以看出,刺激图像的运动速度太大或者太小时,人眼都不能很好地追踪。

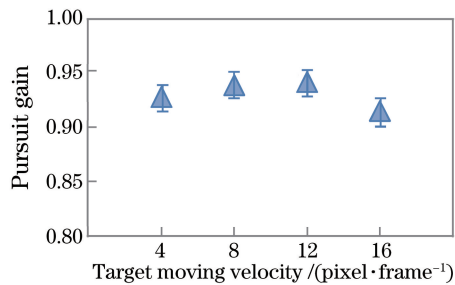


图3 不同目标速度下的人眼平滑追踪速度比

Fig. 3 Eye smooth pursuit gain at different moving velocities of the target

3 基于正弦图像的运动模糊

人眼观看显示设备呈现的运动图像时,所感知的运动模糊是器件显示特性与人眼视觉特性共同作用的结果。液晶显示器中的显示特性即液晶显示的维持效应和慢响应特性,人眼视觉特性即人眼平滑追踪运动和视觉积分效果。传统的液晶显示运动模糊模型基于完美的视觉平滑追踪假设(追踪速度比 $g = 1$),然而以上结果表明实际并非如此,说明完美的视觉平滑追踪过于理想化。尽管在绝大多数情况下可以忽略这种细微的差别,但是在一些特殊的情况下其差别很明显,比如当图像的运动速度和空间频率的乘积为整数时。因此有必要根据实际人眼平滑追踪情况,对传统运动模糊模型进行改进,使其更符合人眼观察液晶显示运动图像时的实际效果。

3.1 改进的运动模糊模型

在基于正弦图像的运动模糊模型中,图像的空间频率和运动速度以及人眼的追踪速度是至关重要的参数,它们决定了运动模糊模拟的效果。实验结果表明,绝大多数情况下追踪速度比小于1($g < 1$),而追踪速度比决定了人眼观察模型的积分轨迹,如图4所示。因此,在改进的运动模糊模型中加入追踪速度比这一因素,可以更为准确地模拟和重现人眼所感知到的运动模糊图像。

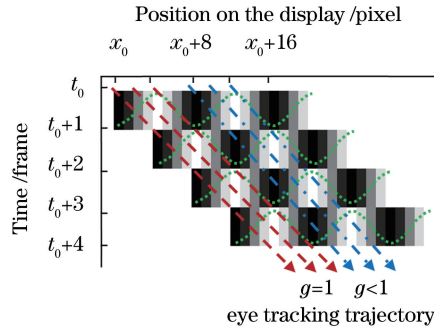


图4 基于正弦图像的运动模糊模型

Fig. 4 Motion blur model based on sinusoidal patterns

人眼感知的图像亮度是眼追踪轨迹上亮度的积分,如果直接计算,则需要测量大量数据并进行大量计算。经过分析发现,由于正弦图像的周期性,当运动速度为 v 时,人眼感知图像模型中只需要测量 v 种亮度响应序列 $L_i(t)$ ($i=0,1,2,\dots,v-1$)。图5是模拟运动速度为 $4 \text{ pixel}\cdot\text{frame}^{-1}$ 正弦运动图像时需要测量的亮度响应序列及其实际亮度响应曲线,人眼所感知到的亮度是1 frame内人眼追踪轨迹上所有亮度的积分^[12]。

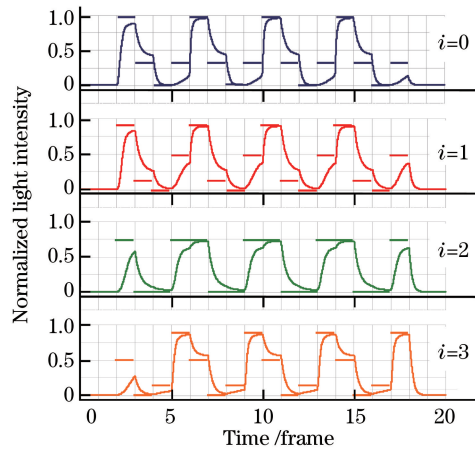


图5 运动速度为 $4 \text{ pixel}\cdot\text{frame}^{-1}$ 时的亮度响应序列

Fig. 5 Brightness response sequence at a velocity of $4 \text{ pixel}\cdot\text{frame}^{-1}$

实际眼追踪轨迹与理想眼追踪轨迹存在差异,模拟的人眼感知亮度也就不同,涵盖人眼追踪速度比的改进运动模糊模型的亮度积分表达式为

$$B(x) = \frac{1}{T_f} \int_{-x/(vg)T_f}^{-x/(vg)T_f + T_f} L(i, t) dt, \quad (1)$$

式中 x 为人眼在观察轴上的位置, T_f 为帧周期, v 为图像运动速度, g 为追踪速度比, $L(i, t)$ 是编号为 i 的时间响应序列, i 从0到 $v-1$ 取值。 $B(x)$ 是沿着观察轴在1 frame时间内积分的亮度。当 $g < 1$ 时,人眼在每一个像素上积分的时间不全相等。图6所示为 $g=0.9$ 时的积分情况,4 pixel的积分时间分别为 $5/18, 5/18, 5/18, 3/18$ 帧周期。

3.2 人眼感知运动模糊图像

正弦图像视觉平滑追踪实验结果表明,只有图像运动速度对追踪速度比有显著性影响。因此在改进运动模糊模拟模型中,可以将追踪速度比参数设置成各个速度下的平均追踪速度比,再对运动正弦图像进行模

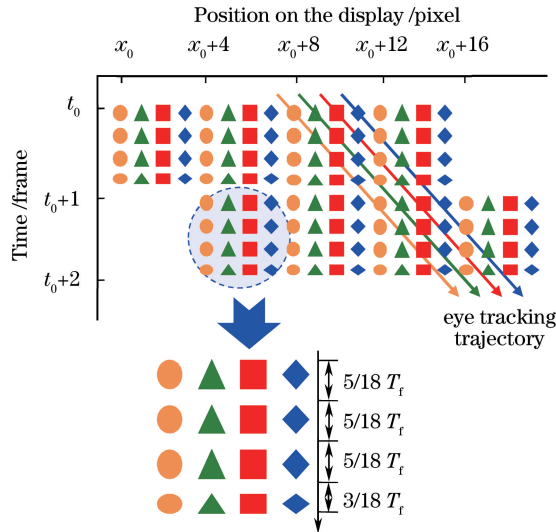


图6 基于实际人眼追踪轨迹的亮度积分模型

Fig. 6 Model of luminance integration based on practical eye tracking trace

拟。图7是模拟运动正弦图像的亮度分布,其中将改进模型($g < 1$)与传统模型($g = 1$)进行了比较。图7(a)、(d)是正弦图像的空间频率与运动速度乘积为整数的情况,图7(b)、(c)为其他情况。图7(a)、(d)中,两种模型模拟波形的振幅差异非常明显,而图7(b)、(c)中的差异很微小。为了进一步对比,图8给出了对应图7中4种情况下的实际模拟图像,包含静止正弦图像以及不同追踪速度比下的模拟正弦图像。这些都验证了基于传统模型的视觉感知实验中出现的特殊现象^[11],即传统模拟模型没有考虑人眼平滑追踪速度比因素,在重现一般情况下感知运动模糊图像时,与人眼实际观察到的模糊图像只有极小差异;而在一些特殊的情况下,比如正弦图像的空间频率与运动速度的乘积为整数时,传统模型重现与人眼实际观察到的模糊图像就会出现很大差异,导致难以选择模拟速度以及相应匹配评分偏低。

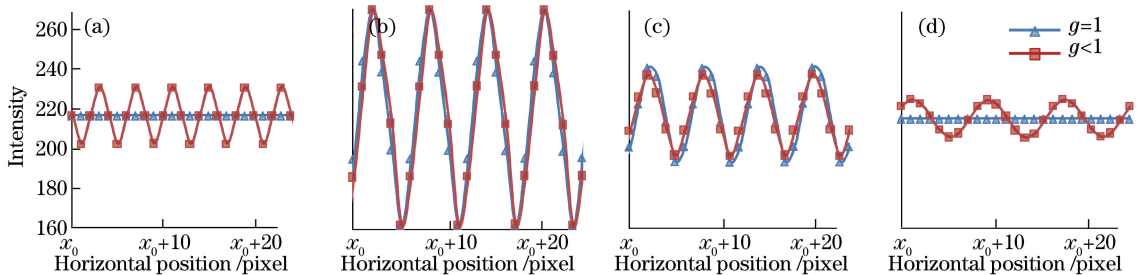


图7 改进和传统模型模拟的正弦运动图像亮度比较。(a)空间频率为 $1/4 \text{ cycle} \cdot \text{pixel}^{-1}$, 运动速度为 $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$; (b)空间频率为 $1/6 \text{ cycle} \cdot \text{pixel}^{-1}$, 运动速度为 $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$; (c)空间频率为 $1/6 \text{ cycle} \cdot \text{pixel}^{-1}$, 运动速度为 $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$; (d)空间频率为 $1/8 \text{ cycle} \cdot \text{pixel}^{-1}$, 运动速度为 $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$

Fig. 7 Brightness comparison of simulated sinusoidal moving pattern between improved and traditional models.

- (a) Spatial frequency of $1/4 \text{ cycle} \cdot \text{pixel}^{-1}$ and moving velocity of $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$;
- (b) spatial frequency of $1/6 \text{ cycle} \cdot \text{pixel}^{-1}$ and moving velocity of $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$;
- (c) spatial frequency of $1/6 \text{ cycle} \cdot \text{pixel}^{-1}$ and moving velocity of $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$;
- (d) spatial frequency of $1/8 \text{ cycle} \cdot \text{pixel}^{-1}$ and moving velocity of $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$

4 动态调制传递函数

显示器件和人眼视觉系统组成了一个信号系统,从显示器件图像的输出到人眼对图像的感知效果,可以使用光学系统中的调制传递函数(MTF)来描述该信号系统的特性。液晶显示器件的保持型显示模式和慢响应特性与人眼平滑追踪和积分效应共同作用产生的运动图像感知模糊可以理解为系统调制传递函数特性

	spatial frequency of $1/4 \text{ cycle} \cdot \text{pixel}^{-1}$ simulated speed of $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$	spatial frequency of $1/6 \text{ cycle} \cdot \text{pixel}^{-1}$ simulated speed of $4 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$	spatial frequency of $1/6 \text{ cycle} \cdot \text{pixel}^{-1}$ simulated speed of $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$	spatial frequency of $1/8 \text{ cycle} \cdot \text{pixel}^{-1}$ simulated speed of $8 \text{ pixel} \cdot \text{frame}^{-1}$
static pattern				
simulated moving pattern $g=1$				
simulated moving pattern $g<1$				

图 8 改进和传统模型模拟的正弦运动图像亮度比较

Fig. 8 Brightness comparison of simulated sinusoidal moving pattern between improved and traditional models

的下降。假设显示器件在显示静止图像时的调制传递函数为 f_{MT0} ，则显示运动图像时的调制传递函数为

$$f_{MT} = f_{MT0} \times f_{DMT}, \quad (2)$$

式中 f_{DMT} 是显示器件特性与人眼视觉特性共同作用产生的调制传递函数特性的下降，称为动态调制传递函数^[10,16]。

DMTF 基于正弦光栅成像的方法分析像和物之间的对比度关系。考虑一幅空间频率为 f 的正弦图像，其对比度记为 $C_i(f)$ 。当该正弦图像以 V 的运动速度运动时，产生的运动模糊使人眼感受到的正弦图像对比度下降，记为 $C_p(V, f)$ 。则：

$$f_{DMT}(V, f) = \frac{C_p(V, f)}{C_i(f)}. \quad (3)$$

根据在特定显示器件上测量的正弦图像亮度响应序列，结合(1)式的人眼平滑追踪亮度积分原理和(3)式的 f_{DMT} 定义，即可计算出特定显示器件在不同空间频率、不同运动速度下的 f_{DMT} 值。图 9 是不同目标运动速度和人眼平滑追踪速度比下的 f_{DMT} 对比，追踪速度比分别采用 1 和 0.9。当运动速度和正弦图像的空间频率相乘结果为整数时，不同追踪速度比的 f_{DMT} 值存在明显差异，对应图像高频细节部分作用的差异，图像高频细节成分被抑制的程度不同。

DMTF 描述了整个显示器件和人眼视觉系统组成的信息系统的特性，因此可以用来描述任意图像经过

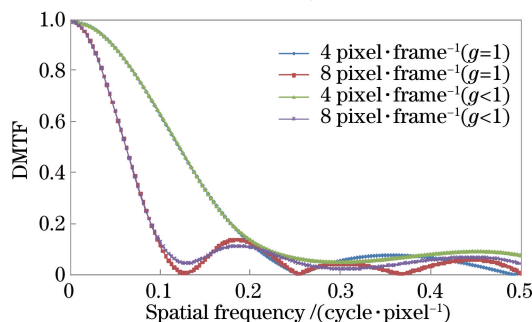


图 9 不同运动速度和追踪速度比下的 DMTF

Fig. 9 DMTF at different moving velocities and pursuit gains

系统后的效果。图 10 是基于 DMTF 模拟的不同运动速度和不同追踪速度比下人眼对复杂图像的运动感知。不同追踪速度比对细节部分的作用效果存在差异。

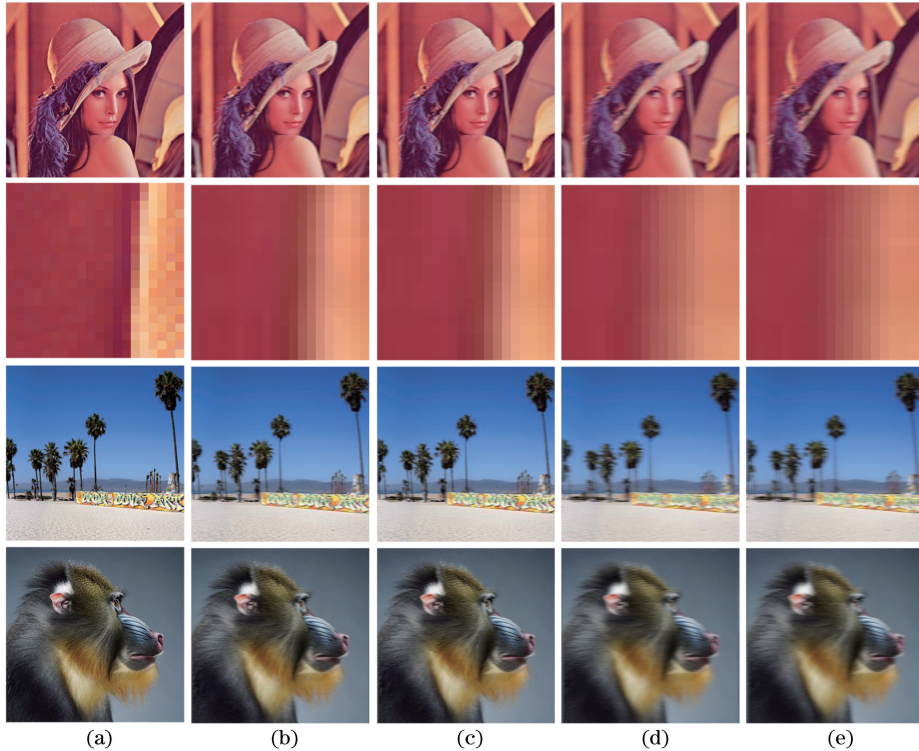


图 10 不同运动速度和追踪速度比下的运动模糊模拟。(a)运动速度为 0;(b)运动速度为 $4 \text{ pixel}\cdot\text{frame}^{-1}$, $g=1$;
(c)运动速度为 $4 \text{ pixel}\cdot\text{frame}^{-1}$, $g=0.9$;(d)运动速度为 $8 \text{ pixel}\cdot\text{frame}^{-1}$, $g=1$;
(e)运动速度为 $8 \text{ pixel}\cdot\text{frame}^{-1}$, $g=0.9$

Fig. 10 Simulated motion blur at different moving velocities and pursuit gains. (a) Moving velocity of 0; (b) moving velocity of $4 \text{ pixel}\cdot\text{frame}^{-1}$ and $g=1$; (c) moving velocity $4 \text{ pixel}\cdot\text{frame}^{-1}$ and $g=0.9$; (d) moving velocity of $8 \text{ pixel}\cdot\text{frame}^{-1}$ and $g=1$; (e) moving velocity of $8 \text{ pixel}\cdot\text{frame}^{-1}$ and $g=0.9$

5 结 论

人眼平滑追踪实验揭示了人眼在观察运动图像的过程中,追踪速度并不与图像运动速度完全相等的事实。在人眼平滑追踪速度上限范围以内,追踪速度比介于 0.9 和 1 之间时,图像运动速度对追踪速度比有显著影响。基于实验结果改进后的运动模糊模型,在传统模型的基础上加入了追踪速度比因素,可以更真实地模拟和重现人眼实际观察到的运动模糊图像,更准确地评价显示系统的动态图像质量特性。更为精确的模型对液晶显示技术中运动模糊现象的优化以及视觉舒适度的提高具有指导作用。

参 考 文 献

- [1] Xia Zhenping, Cheng Cheng. 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.
- [2] Hao Zhicheng, Wu Chuan, Yang Hang, *et al.* Image detail enhancement method based on multi-scale bilateral texture filter[J]. Chinese Optics, 2016, 9(4): 423-431.
郝志成, 吴 川, 杨 航, 等. 基于双边纹理滤波的图像细节增强方法[J]. 中国光学, 2016, 9(4): 423-431.
- [3] Xu Tingfa, Su Chang, Luo Xuan, *et al.* Underwater range-gated image denoising based on gradient and wavelet transform[J]. Chinese Optics, 2016, 9(3): 301-311.
许廷发, 苏 畅, 罗 璇, 等. 基于梯度和小波变换的水下距离选通图像去噪[J]. 中国光学, 2016, 9(3): 301-311.

- [4] Xia Zhenping, Li Xiaohua, Chen Lei, *et al.* Study on evaluation of motion blur in binocular parallax based stereoscopic displays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0111001.
夏振平, 李晓华, 陈磊, 等. 基于双目视差的立体显示运动模糊评价方法研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0111001.
- [5] Li Yapeng, He Bin. Improving image quality by using CCD subpixel imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0211001.
李亚鹏, 何斌. 采用 CCD 错位成像技术提高图像质量[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0211001.
- [6] Fang Yong, Lu Yunlong, Wu Huaxia, *et al.* Evaluation and optimization of flicker in solid-state 3D volumetric display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0133003.
方勇, 芦云龙, 吴华夏, 等. 固态体积式真三维显示中的闪烁评价及优化[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0133003.
- [7] Gao Yin, Yun Lijun, Shi Junsheng, *et al.* Enhancement dark channel algorithm of fog image based on the TV model [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0809001.
高银, 云利军, 石俊生, 等. 基于 TV 模型的暗原色理论雾天图像复原算法[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0809001.
- [8] Wang Hongjuan, Wang Zhipeng, Hai Tao, *et al.* Lossless binary image reconstruction in diffractive encryption system with redundant data[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0709002.
王红娟, 王志鹏, 海涛, 等. 利用冗余数据在衍射加密系统中实现二值图像无损恢复[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0709002.
- [9] 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(10-12): 933-940.
- [10] 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.
- [11] Zhang Y N, Xu Y Q, Song W, *et al.* Motion-blur characterization with dynamic modulation transfer functions[C]. *International Display Week*, 2008: 2179-2182.
- [12] Li X H, Teunissen K, Song W, *et al.* Characterizing motion performance with the simulation method[C]. *IMID/IDMC/Asia Display Ilsan, Korea*, 2008: 1573-1576.
- [13] 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.
- [14] Jansson D, Medvedev A. Dynamic smooth pursuit gain estimation from eye tracking data[C]. *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, 2011: 1698-1703.
- [15] ITU-R BT. 500. Methodology for the subjective assessment of the quality of television picture[S]. Geneva: The International Telecommunication Union, 2012.
- [16] Zhang Yuning. Study on the visual artifacts of flat panel displays[J]. 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.