

激光投影电视中图像细节层次感的恰可察觉差

王飞霞, 王俊轶, 李晓华*, 王坚, 刘皓天, 屠彦

东南大学电子科学与工程学院教育部信息显示与可视化国际合作联合实验室, 江苏 南京 210096

摘要 细节层次感是影响激光投影电视整体画质的重要因素之一。通过二项迫选法和“一上二下”阶梯法的主观视觉感知实验, 测量并确定了激光投影电视细节层次感的恰可察觉差(JND); 分析了其影响因素, 并进一步比较了激光投影电视与液晶电视两个显示平台上细节层次感的异同点。结果表明: 激光投影电视细节层次感的JND受图像的纹理特征影响较大; 与液晶电视的细节层次感相比, 两个显示平台细节层次感失真1个JND对应的 σ 值相差大, 相邻JND的差值比较接近。利用本文的实验结果, 结合峰值亮度、暗场亮度、色饱和度等图像属性的恰可察觉差, 可以进一步建立包含上述多种属性的激光投影电视主观图像质量评价模型, 有助于画质的优化。

关键词 视觉光学; 图像质量评价; 恰可察觉差; 主观视觉感知实验; 激光投影电视; 细节层次感

中图分类号 TN949.6+1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0533001

Just-Noticeable Difference of Image Contour Rendering for a Laser Projection Television

Wang Feixia, Wang Junyi, Li Xiaohua*, Wang Jian, Liu Haotian, Tu Yan

Joint International Research Laboratory of Information Display and Visualization, Ministry of Education,
School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

Abstract Contour rendering is one of the most influential factors with respect to the image quality of a laser projection television (TV). Herein, the just-noticeable differences of contour rendering for a laser projection TV are measured and determined using the two-alternative forced-choice method and the staircase 1-up 2-down method. Further, the influential factors with respect to the just-noticeable differences (JNDs) are analyzed, and the similarities and differences of contour rendering with respect to a laser projection TV and a liquid crystal display (LCD) TV are presented. The results denote that the JNDs are considerably affected by the texture features of the image in case of a laser projection TV. The values expressed by σ of one JND differ considerably in case of a laser projection TV and an LCD TV, and the differences between the adjacent JNDs are observed to be similar in case of both the TVs. Finally, a subjective image quality evaluation model, which is helpful for optimizing the image quality, can be established for a laser projection TV based on the experimental results and JNDs with respect to the image attributes, including the white level, black level, and color saturation.

Key words visual optics; image quality assessment; just noticeable difference; subjective visual perception experiment; laser projection television; contour rendering

OCIS codes 330.5020; 330.6130; 110.3000

1 引 言

激光投影电视具有色域广、光效高、功耗低、屏幕大等优点, 近年来, 逐渐进入人们的日常生活中。同时, 图像质量是影响消费者选择和购买显示设备的决定性因素之一, 因此建立基于激光投影电视的图像质量模型, 有助于生产厂家优化激光投影电视

的显示画质。

目前, 图像质量评价主要包括主观图像质量评价法^[1]和客观图像质量评价法^[2-5]两大类。主观图像质量评价法主要是基于被试者观看图像时的主观感受; 客观图像质量评价法主要是基于图像呈现的物理上可量化的参数, 通过设计算法来评估图像的质量。客观评价法具有计算方法较稳定, 易于量化

收稿日期: 2019-10-15; 修回日期: 2019-11-12; 录用日期: 2019-11-27

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFB0401201)

* E-mail: lxh@seu.edu.cn

比较,不会因为人的偶然因素或时空的变化而导致评价偏差等优点,但是其评价结果与人的主观感受可能出现比较大的差异,而主观评价法能够比较准确地反映人对图像质量的真实感受,但在工程应用中费时费力。

文献[6-12]中基于液晶电视,确定了影响图像质量的4个客观图像属性[色饱和度、峰值亮度、暗场亮度和细节层次感(CR)],通过主观实验测得一般观测条件下自然图像的这4个属性的恰可察觉差(JND),最后利用得到的JND值,建立主观图像质量模型。如果图像的某一属性的变化会导致75%以上的人能够察觉到图像质量的变化,则该变化即为该属性的一个JND。JND可以将单位不同的自然图像属性归一化,以便于度量各属性变化对主观图像质量的影响。

虽然已有基于液晶电视的主观图像质量评价模型,但是激光投影电视与液晶电视在成像原理上有着很大的区别,因此,有必要建立基于激光投影电视平台的主观图像质量模型。本文是该模型研究的一部分,通过设计主观实验,测量并确定激光投影电视细节层次感失真1~4个JND值,分析其影响因素,并与液晶电视的实验结果进行比较和分析。

2 实验设置与方法

2.1 实验设置

实验选用100英寸(1 in=2.54 cm)的双色激光(红色和蓝色使用激光)数字光处理(DLP)投影电视,分辨率为4K,白场的色品坐标为($x=0.2768$, $y=0.2969$),显示屏峰值亮度为 275.93 cd/m^2 ,暗场亮度为 0.17 cd/m^2 。实验在暗室($<0.5 \text{ lx}$)中进行,投影机设置为标准模式。

正常视力(视力在1.0左右)的人在中等亮度和对比度下的可分辨视角为 $1'$ 左右。当屏幕呈现4K图像时,为了使被试者在观看屏幕的位置处观看每一个像素的视角为 $1'$,将观测距离设为1.97 m。文献[9]中的液晶电视为19英寸液晶监视器,物理分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,观测距离为1.2 m。为了便于与文献[6-10]中的液晶电视的细节层次感的JND进行比较,设置在观测位置处激光投影电视的实验界面对人眼所张的视角与液晶电视中一致,如图1所示。实验在屏幕中央的 $1115 \text{ pixel} \times 801 \text{ pixel}$ (视角为 $18.22^\circ \times 13.27^\circ$)范围内进行,图片像素为 $434 \text{ pixel} \times 434 \text{ pixel}$ (视角为 $7.30^\circ \times 7.30^\circ$),

两张图片之间的距离设为69 pixel(视角为 1.17°)。图片外的实验区域的灰阶等级设置为125,实验区域外的屏幕灰阶等级设置为0。

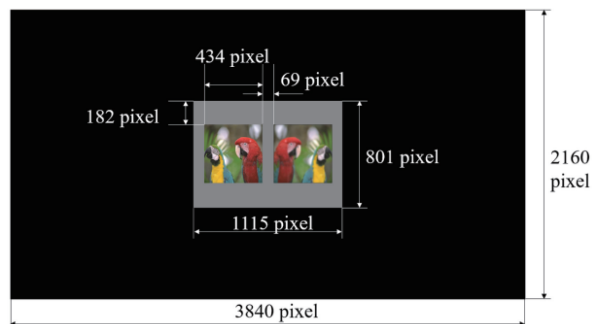


图1 实验界面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental interface

实验选择9幅自然图片,包括气球、花车、孩子、植物、穹顶、鹦鹉、兔子、房子、积木,如图2所示。

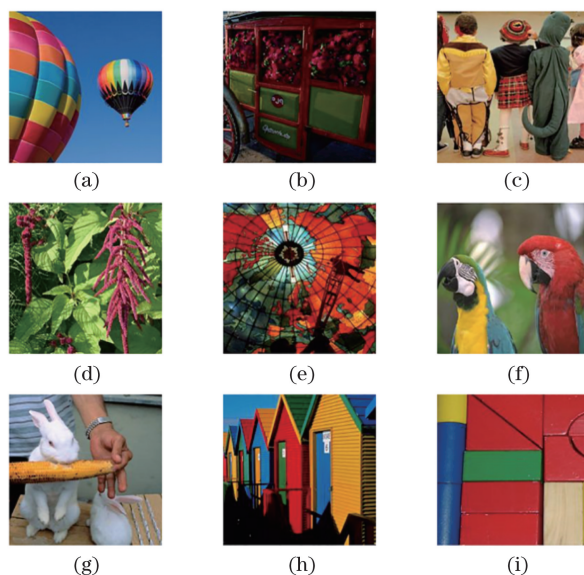


图2 CR的JND实验测试图片。(a)气球;(b)花车;(c)孩子;(d)植物;(e)穹顶;(f)鹦鹉;(g)兔子;(h)房子;(i)积木

Fig. 2 Test images of JND for CR. (a) Balloon; (b) carriage; (c) children; (d) plant; (e) globe; (f) parrot; (g) rabbit; (h) house; (i) toy block

被试者共有17人(其中10名男士,7名女士),年龄分布在22~27岁。所有被试者的视力(或矫正视力)均在1.0以上,无色盲或色弱。

2.2 实验方法

2.2.1 细节层次感调整

细节层次感可以用来表征显示器件呈现图像内容的轮廓细节的清晰程度。电视图像的细节层次感的丢失现象,可以通过二维高斯(Gaussian)函数对原始图片进行卷积来模拟。卷积中使用的二维高斯函数的表达式为^[13]

$$f(x,y) = c \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right)\right], \quad (1)$$

式中： c 为常数； σ 为控制卷积函数对图片清晰度的影响值。本文中，细节层次感的 JND 用参数 σ 的值来表示， σ 值越大，表示图片越模糊。

2.2.2 JND 确定方法

主观视觉感知实验是研究人眼主观感知阈值的基本方法。常用的阈值检测方法包括传统的心理物理学方法(如:极限法、平均误差法、恒定刺激法)、适应性方法(如:阶梯法、系列实验的参数评定法)以及信号检测论方法(如:有无法、评价法、迫选法、异同法)。为了能够同时满足精度要求和实验的高效性,本文采用二项迫选法^[14-15]和“一上二下”阶梯法^[9,16]进行细节层次感 JND 值的确定。如图 1 所示,在屏幕上同时显示两张图,其中一张为参考图,一张为失真图,参考图和失真图的位置随机呈现,呈轴对称分布。如图 3 所示,实验开始时,失真图与参考图的 CR 差异明显,被试者需要在失真图和参考图中选择失真图,如果被试者连续两次选择正确,失真图与参考图的差异会减少一个步长;如果回答错误一次,则生成一个拐点,同时失真图与参考图的差异会扩大 3 个步长,并生成一个拐点,步长减半。每次选择结束后,为了让眼睛稍作休息,以及减少两组图片之间的干扰,中间会出现 0.5 s 的灰色图片过渡。实验在达到 7 个拐点后,每生成一个拐点,步长不再减半,当达到 10 个拐点时,实验结束。将最后 6 个拐点的 σ 的平均值,作为对于参考图的 CR 失真 1 个 JND 的值。实验开始时,为保证阈值处于可调的范围内,失真图 σ 设置为 2,与参考图的 CR 差异明显。设置初始步长 $\Delta\sigma = 0.4$ 。

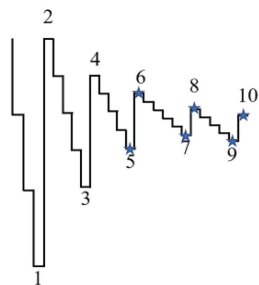


图 3 “一上二下”阶梯法示意图。
最后 6 个标星的拐点用来计算 JND

Fig. 3 Illustration of the staircase method of 1 up 2 down. The last 6 reversals indicated as stars were used for JND calculation

对于原始参考图(图 2)的 CR 失真 2~4 个 JND 的测量,本研究仍然采用二项迫选法和“一上

二下”阶梯法进行。与测量 1 个 JND 不同,失真 n 个 JND 的测量实验中(其中, $n = 2, 3, 4$),图 1 中的参考图选用的是 CR 失真 $(n - 1)$ 个 JND 测量实验中最终得到的失真图,而不是原始参考图,例如失真 3 个 JND 的测量实验中,图 1 中的参考图选用的是 CR 失真 2 个 JND 测量实验中最终得到的失真图;但是测量失真 n 个 JND 与测量失真 1 个 JND 一样,图 1 中所示的失真图均是在原始参考图上进行高斯滤波得到的。

3 实验结果

将 17 位被试者的实验数据导入统计产品与服务解决方案(SPSS)软件中,以图片为自变量,使用箱形图去除异常值。异常值以外的变量值称为本体值。箱形图中上截止横线是变量值本体最大值,下截止横线是变量值本体最小值;箱形图中箱体的上中下三条线分别表示变量值的第 75, 50, 25 百分位数。异常值包括奇异值(用圆圈“·”表示)和极值(用星号“*”表示)。奇异值是指变量值大于或小于本体 1.5 倍的值,极值是变量值大于或小于本体 3 倍的值。

图 4(a)为 9 张图片的细节层次感失真 1 个 JND 的箱形图,对得到的箱形图剔除异常值之后,继续作箱形图,直到无异常值,如图 4(b)所示。图 4(c)、(d)、(e)分别为 9 张图片的细节层次感失真 2、3、4 个 JND 的剔除所有异常值之后的箱形图。

剔除所有异常值之后,所有测试图片的细节层次感失真 1、2、3、4 个 JND 对应的 σ 的均值分别为 0.81、1.11、1.42 和 1.68。

4 实验分析

4.1 单因素方差分析

将 17 位被试者关于每幅图片的细节层次感的 1 个 JND 的平均值导入 SPSS 软件中,对数据进行方差齐次性检验,发现 Levene 统计量为 6.621,差异性显著的检验值 Sig. 为 0.000,具有统计学差异,表示方差不齐。用 Welch 和 Brown-Forsythe 统计量代替 Levene 统计量进行方差分析,发现两者的显著性均小于 0.05。因此,激光投影电视的细节层次感的 JND 与图像内容显著相关。

4.2 一元线性回归分析

单因素方差分析表明激光投影电视的细节层次感的 JND 与图像内容有关,本节通过一元线性回归分析来研究细节层次感的 JND 的影响要素。

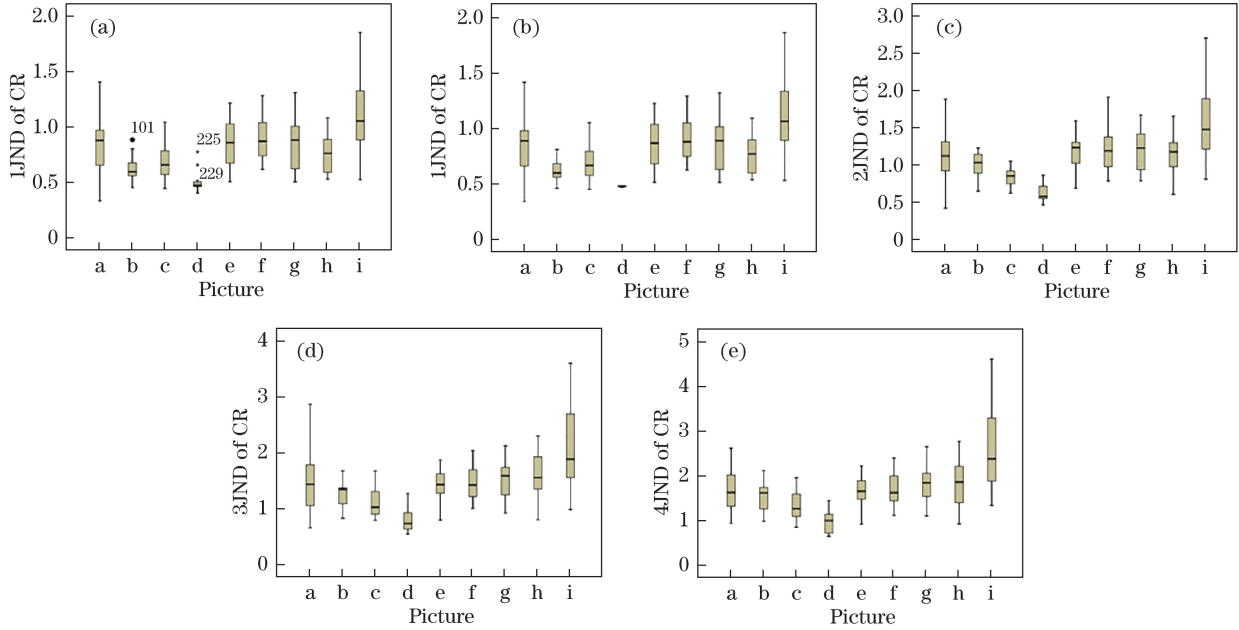


图 4 9 张图片的细节层次感的 JND 剔除异常值之后的箱形图。(a) 1 个 JND(原始数据);(b) 1 个 JND;
(c) 2 个 JND;(d) 3 个 JND;(e) 4 个 JND

Fig. 4 Box-plots of JND of contour rendering for nine pictures after excluding outliers. (a) One JND (original data);
(b) One JND; (c) two JND; (d) three JND; (e) four JND

为了研究图像内容的影响,分别提取图像内容的亮度、颜色和纹理等主要图像特征。其中表征亮度的参数包括图像的平均亮度、亮度标准差,表征颜色的参数包括图像的平均色饱和度、色饱和度标准差、平均色调、色调标准差,表征纹理的参数包括对比度(或称为反差,CON)、角二阶矩(或称为能量,ASM)、熵(ENT)和相关性(COR)。本文选取表征纹理特征的 4 个量,使用灰度共生矩阵(GLDM)来计算,即

$$S_{CON} = \sum_h \sum_k (h - k)^2 a(h, k), \quad (2)$$

$$S_{ASM} = \sum_h \sum_k a(h, k)^2, \quad (3)$$

$$S_{ENT} = - \sum_h \sum_k a(h, k) \log a(h, k), \quad (4)$$

$$S_{COR} = \left[\sum_h \sum_k hka(h, k) - \mu_x \mu_y \right] / (\delta_x \delta_y), \quad (5)$$

式中: S_{CON} 、 S_{ASM} 、 S_{ENT} 和 S_{COR} 分别表示对比度、角二阶矩、熵和相关性的值; $a(h, k)$ 表示灰度共生矩阵的第 h 行 k 列的元素; μ_x 、 δ_x 和 μ_y 、 δ_y 分别表示 m_x 、 m_y 的均值和标准差,其中 m_x 是共生矩阵每列所有元素之和, m_y 是矩阵每行所有元素之和。

采用一元线性回归分析对第 3 节得到的无异常值的数据进行分析,可以得到上述影响要素对细节层次感的影响。对于 1 个 JND,分别以图像的平均亮度、亮度标准差、平均色饱和度、色饱和度标准差、

平均色调、色调标准差、对比度、角二阶矩、熵和相关性等 10 个量为自变量,JND 为因变量,进行一元线性回归拟合。拟合结果表明,以相关性为自变量时,对应的相关系数 R^2 最大,为 0.337,对应的表达式为

$$F_{JND} = -1.265 + 2.199 \times S_{COR}, \quad (6)$$

式中: F_{JND} 、 S_{COR} 分别表示 JND 和 COR 的值,其他参数见表 1。对于 2、3、4 个 JND,也分别以上述 10 个量为自变量,JND 为因变量,进行一元线性回归拟合,发现 2~4 个 JND 中 ASM 的拟合度最好,具体参数见表 1,对应的表达式未一一列出。CON 和 ASM 都属于图像的纹理特征,可见 CR 的 JND 主要受纹理特征的影响。

表 1 揭示如下特征:

1) 在一元线性回归分析中,CR 的 1 个 JND 的 Sig. 为 0.059,略大于 0.05。这表明 1 个 JND 的值虽然受 COR 影响不显著,但是处于受 COR 显著影响和不显著影响的临界状态;

2) 随着 JND 数量的增加,JND 数值与纹理特征的拟合度越来越高。这是由于当测量第 n 个 JND 时,图 1 中的参考图是第 $(n-1)$ 个 JND 测量实验中最后生成的失真图,在实验的过程中,随机误差会被逐渐消除,产生了测量多次取平均值的效果。

3) 随着 JND 数量的增加,JND 数值受纹理特征的影响越来越显著。

表 1 细节层次感的 JND 回归分析
Table 1 Regression analysis for JND of contour rendering

Number of JND	Adjusted R-square	Variable	Coefficient	T-statistic	Sig.
1	0.337	Constant	-1.265	-1.383	0.209
		COR	2.199	2.250	0.059
2	0.358	Constant	0.893	7.761	0.000
		ASM	13.990	2.336	0.052
3	0.551	Constant	1.086	8.632	0.000
		ASM	21.531	3.288	0.013
4	0.554	Constant	1.262	7.950	0.000
		ASM	27.301	3.305	0.013

4.3 激光投影电视与液晶电视的差异比较与分析

文献[6-10]对液晶电视的 CR 的 JND 进行研究,研究结果表明 CR 的 JND 与图像内容无关,1 个 JND 的 $\sigma=0.5$ 左右,对应于高斯滤波模糊宽度在显示器上约 $1'30''$ 的视角。该视角比视力为 1.0 的人眼能观察到视力表中字母对应的角度略大。而对于激光投影电视,根据 4.1 节和 4.2 节的分析,其 CR 与图像内容显著相关,并且主要受纹理特征的影响。

文献[6-10]中也给出了液晶电视的 CR 的 JND 倍数关系,2JND、3JND、4JND 对应 σ 的分别是

1JND 的 1.59、2.27、2.94 倍。因为液晶电视 CR 的 1 个 JND 对应 σ 的值为 0.5,所以可以计算出 1~4 个 JND 对应 σ 的值,如表 2 所示,并计算出相邻两个 JND 之间对应 σ 的差值以及差值的平均值,如表 3 所示。同时,将激光投影电视的实验结果列在表 2 和表 3 中。

比较发现,液晶电视和激光投影电视 CR 的 1 个 JND 对应 σ 的值相差较大,但是两种电视中相邻两个 JND 之间对应 σ 的差值的平均值接近。下面将对其原因进行具体分析。

表 2 液晶电视和激光投影电视的细节层次感的 JND 对应 σ 的值

Table 2 JND values expressed by σ of contour rendering for LCD TV and laser projection TV

Number of JND	1	2	3	4
LCD TV	0.50	0.80	1.14	1.47
Laser projection TV	0.81	1.11	1.42	1.68

表 3 液晶电视和激光投影电视细节层次感的 JND 对应 σ 的差值及平均值

Table 3 Differences and mean values of JND values expressed by σ of contour rendering for LCD TV and laser projection TV

Number of JND	2JND-1JND	3JND-2JND	4JND-3JND	Mean value
LCD TV	0.30	0.34	0.33	0.32
Laser projection TV	0.30	0.31	0.26	0.29

文献[6-10]中液晶电视的物理分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,如果输入分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 的图像源,当图像源的像素与液晶的像素一一对应时,液晶电视能够清晰地呈现该图像。对于本文的激光投影电视,其使用的是德州仪器 0.66 英寸的 DLP,该 DLP 采用了像素分辨率扩张(XPR)技术^[17-18]。图 5 为该技术的示意图,数字微镜器件(DMD)芯片的物理分辨率是 $2716 \text{ pixel} \times 1528 \text{ pixel}$,以一定的频率来回对角移动,通过两次叠加,利用人眼的视觉暂留现象,形成

4K(830 万像素)画面。虽然屏幕上达到了 830 万像素,但这是由 2716×1528 个像素通过两次叠加得到的。因此,分析液晶电视和激光投影电视 CR 的 1 个 JND 对应 σ 的值相差较大与 DLP XPR 技术有关。

进一步使用 Matlab 软件生成多张分辨率为 4K 的原始图片,每张图中有 3 条条纹,条纹的宽度分别为 1、2、3、4、5 pixel,不同宽度的条纹的间隔随机取 1~10 pixel 中的 3 个,条纹的灰阶为 255,背景灰阶为 0,每种相同像素和间隔的条纹有横、纵两张图。

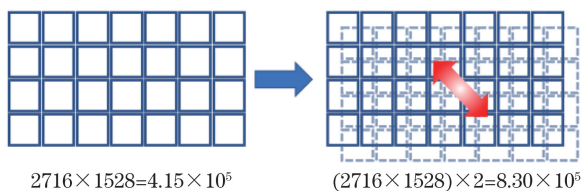


图 5 DLP XPR 技术示意图

Fig. 5 Schematic diagram of DLP XPR technology

本研究仅以宽度为 5 pixel、间隔为 5 pixel 的横条纹图片为例进行展示。将横条纹的原始图片[图 6(a)]输入到激光投影电视中,用单反相机近距离对屏幕上的图片进行拍摄,得到的照片[Raw 格式,图 6(b)]的分辨率为 6720 pixel × 4480 pixel。为了消除激光投影电视散斑影响,使用 Matlab 软件对条纹的亮度按照横的方向(如果是纵条纹,则取纵的方向)求平均值。为了便于处理,将条纹的亮度分布线性压缩到 45 pixel × 1 pixel,并提取出归一化的亮度信息(图 7 中实线)。对输入到激光投影电视中的原始图片进行高斯滤波,滤波窗口设置为 21 × 21,从小到大不断调整高斯函数的 σ 值,以调整高斯函数的宽度。结果表明当 $\sigma=1.35$ 时,用 Matlab 软件高斯滤波后的归一化亮度分布(图 7 中虚线)与提取的归一化亮度分布基本重合。

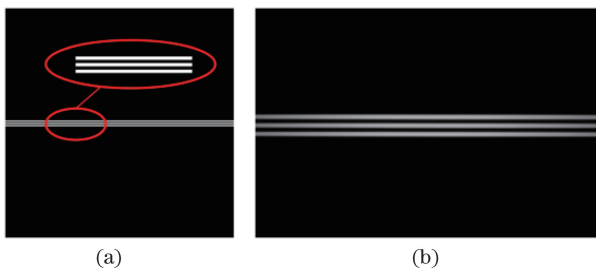


图 6 宽度为 5 pixel、间隔为 5 pixel 的条纹。

(a)原始图片;(b)照片

Fig. 6 Stripes with width of five pixel and spacing of five pixel. (a) Original image; (b) photo

对于其他横、纵条纹, σ 也都在 1.35 附近。因此,对于分辨率为 4K 的图像,通过激光投影电视呈现到人眼时,相当于对图像进行了 $\sigma=1.35$ 的高斯滤波。CR 失真 1、2、3 和 4 个 JND 的情况,分别相当于对原始图片经过 σ 为 0.81、1.11、1.42 和 1.68 (第三节实验结果)的高斯滤波后,再经过一个 $\sigma=1.35$ 的高斯滤波。

为了进一步比较激光投影电视与液晶电视的 JND 的区别与联系,使用 Matlab 软件模拟了通过激光投影电视呈现 1 pixel 条纹的原始图片、CR 失真 1~4 个 JND 的显示效果,如图 8 中 5 条实线所

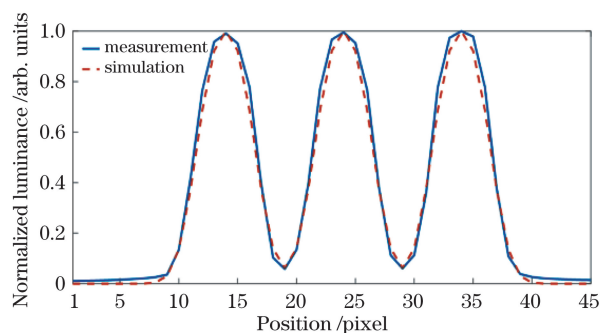


图 7 宽度为 5 pixel、间隔为 5 pixel 的条纹的归一化亮度分布

Fig. 7 Normalized luminance distribution of stripes with width of five pixel and spacing of five pixel

示(根据最高点所在位置,从上至下分布)。5 条水平虚线从上至下依次表示上述 5 种情况对应的最高亮度为 50% 的位置。线段 AB、BC、CD 和 DE 表示像素单边扩展的宽度。

可见,在 50% 的最高亮度处,原始图片的 CR 每降低 1 个 JND,条纹宽度单边扩展的绝对值大概是 1/4 pixel,条纹整体扩展 1/2 pixel。对于液晶电视,在设置的观测距离处,一个像素的视角为 1',当 CR 失真 1 个 JND(σ 约为 0.5)时,高斯模糊宽度对应的视角为 1'30",即失真 1 个 JND 相当于像素整体扩展约半个像素宽度。因此,虽然激光投影电视和液晶电视的 JND 值在数值上不一样,但是从像素扩展的角度,原始图像的 CR 失真 1 个 JND 在两个平台上都是单边扩展 1/4 pixel,整体扩展 1/2 pixel。

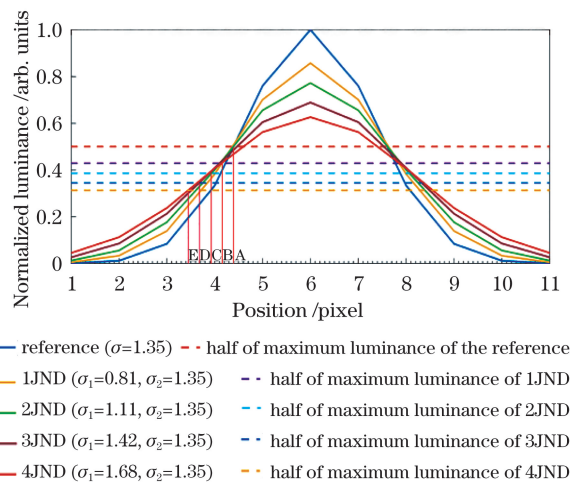


图 8 1 pixel 条纹扩展模拟

Fig. 8 Simulation of the extension of a stripe with width of one pixel

5 结 论

通过主观视觉感知实验,使用二项迫选法和“一

上二下”阶梯法,测量并确定了 100 英寸双色激光投影电视的细节层次感失真 1、2、3 和 4 个 JND 对应 σ 的值分别为 0.81、1.11、1.42 和 1.68;细节层次感与图像内容显著相关,JND 主要受纹理特征的影响。激光投影电视与液晶电视的 JND 相比,两个平台的细节层次感失真 1 个 JND 对应 σ 的值相差大,相邻 JND 对应 σ 的差值比较接近。虽然两个平台的 JND 对应 σ 的不同,但通过两个平台呈现出的图像,当原始图像的 CR 降低 1 个 JND 时,对应的条纹宽度单边扩展 1/4 pixel,整体扩展 1/2 pixel。

在此基础上,可以利用主观实验进一步确定激光投影电视的峰值亮度、暗场亮度、色饱和度等图像属性的恰可察觉差,为建立激光投影电视的主观图像质量评价模型提供参考。

致谢 感谢青岛海信激光显示股份有限公司、青岛海信电器股份有限公司以及参与实验的被试者们的的大力支持。

参 考 文 献

- [1] International Telecommunication Union. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures[M]. Geneva: ITU, 2012: 13.
- [2] Sheikh H R, Sabir M F, Bovik A C. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(11): 3440-3451.
- [3] Leachtenauer J C. Objective quality measures assessment[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4736: 9-16.
- [4] Soundararajan R, Bovik A C. Survey of information theory in visual quality assessment[J]. Signal, Image and Video Processing, 2013, 7(3): 391-401.
- [5] Li S M, Chang Y L, Duan Z C. Objective assessment of stereoscopic image comfort based on convolutional neural network[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0610003.
李素梅,常永莉,段志成.基于卷积神经网络的立体图像舒适度客观评价[J].光学学报,2018,38(6): 0610003.
- [6] Xia J, Qin S L, Liu L, et al. Just-noticeable-difference of influential factors of subjective images quality[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2006, 36(5): 695-699.
夏军,秦少玲,刘璐,等.主观图像质量影响因素的人眼可察觉变化步长[J].东南大学学报(自然科学版),2006,36(5): 695-699.
- [7] Ge S, Yin H C, Xia J, et al. The just-noticeable-difference of natural image definition[J]. Advanced Display, 2007(8): 38-41.
葛书,尹涵春,夏军,等.自然图像清晰度的恰可识别差异[J].现代显示,2007(8): 38-41.
- [8] Qin S L, Ge S, Yin H C, et al. P-37: just noticeable difference of image attributes for natural images[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2007, 38(1): 326-329.
- [9] Qin S L. Study on image display quality model based on human vision system[D]. Nanjing: Southeast University, 2009.
秦少玲.基于视觉特性的图像显示质量模型研究[D].南京:东南大学,2009.
- [10] Xia J, Qin S L, Liu L, et al. The just noticeable difference in chromaticity, black level, white level and contour rendering in natural images[C]//IDW/AD'05-12th International Display Workshops in Conjunction with Asia Display 2005, December 6-9, 2005, Takamatsu. Amsterdam: Elsevier, 2005: 1821-1824.
- [11] Qin S L, Ge S, Yin H C, et al. Just noticeable difference in black level, white level and chroma for natural images measured in two different countries [J]. Displays, 2010, 31(1): 25-34.
- [12] Qin S L, Ge S, Yin H C, et al. Effect of experimental methodology on the JND of the black level for natural images[J]. Journal of the Society for Information Display, 2009, 17(8): 687-694.
- [13] Liu L, Xia J, Heynderickx I, et al. Visibility threshold in sharpness for people with different regional backgrounds[J]. Journal of the Society for Information Display, 2004, 12(4): 509-515.
- [14] García-Pérez M A. Forced-choice staircases with fixed step sizes: asymptotic and small-sample properties[J]. Vision Research, 1998, 38(12): 1861-1881.
- [15] McKee S P, Klein S A, Teller D Y. Statistical properties of forced-choice psychometric functions: implications of probit analysis [J]. Perception & Psychophysics, 1985, 37(4): 286-298.
- [16] Levitt H. Transformed up-down methods in psychoacoustics[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1971, 49(2B): 467-477.
- [17] Molly N, Terry A, William C, et al. Super resolution projection: leveraging the MEMS speed to double or quadruple the resolution[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10932: 109320R.
- [18] Ben Q. What do you need to know before building your 4K home theater system?[EB/OL]. (2018-08-15) [2019-10-14]. <https://www.benq.com/en/knowledge-center/knowledge/true-4k-uhd-home-projector.html>.