

不同环境下移动终端显示色光谱特性研究

丁桂芝, 王晓红

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 分析不同环境下移动终端显示器显示色的光谱特性, 研究外界环境对移动终端颜色显示的影响。 **方法** 分别在暗室和D50光源下测量移动终端显示色的光谱值, 利用高斯-马尔科夫线性回归, 改进显示色与三原色之间的光谱叠加模型, 并根据显示色光谱函数之间存在的线性叠加关系, 建立同一显示色在2种环境下的光谱关系模型。 **结果** 外界环境对同一显示色的光谱值影响显著, 但不影响各通道独立性, 2种环境下移动终端都具备良好的通道独立性。模型预测值与实测值之间的光谱均方误差和DE 2000色差的结果表明, 改进后的线性叠加模型较原模型的光谱计算精度提高了6倍, 色差降低到0.1以下; 同一显示色在2种环境下光谱关系模型的光谱预测值与实测值非常接近, 色差均值小于1。 **结论** 改进后的光谱叠加模型更精确地量化了移动终端的颜色显示特征, 并且光谱转换模型的建立, 可以有效去除环境对移动终端颜色显示的影响, 为研究移动终端显示图像效果的增强提供了方法。

关键词: 移动终端; 光谱值关系模型; 环境; 光谱叠加性; 显示色

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)07-0123-06

Spectral Characteristics of Mobile Terminal Displayed Color under Different Ambient Illuminants

DING Gui-zhi, WANG Xiao-hong

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: Spectral characteristics of the displayed color of the mobile terminal were analyzed in different environments, to study the influence of ambient environment on the LCD display of the mobile terminal. The spectral radiance curves of the displayed colors of the mobile terminal LCD display were measured in darkroom and under D50 illuminant, respectively. The spectral superposition model between displayed color and the three primary colors was improved based on Gauss - Markov linear regression. Then a conversion model of display color spectral radiance under two different environmental conditions was established on the basis of the linear superposition of color spectral radiance functions. The results showed that the ambient environment had an obvious influence on the spectral radiance of the same displayed color, but there was no influence on the independence of the channels. In both environments, the mobile terminal had good channel independence. The spectral mean square error and CIEDE2000 color difference between the model predicted values and measured values showed that the spectral radiance calculation accuracy of the improved linear superposition model was enhanced by 6 folds as compared to that of the original model, and the mean color difference was reduced to less than 0.1 NBS. The predicted values of the spectral model and the measured values of the same displayed color were very close in the two different environments, with a mean color difference of less than 1 NBS. The improved spectral superposition model quantified the color display characteristics of the mobile terminal more accurately, and the establishment of the spectral transfer model could effectively remove the influence of ambient environment on the color display of the mobile terminal, which provided method for the enhancement of image display of the mobile terminal.

KEY WORDS: mobile terminal; spectrum switching model; environment; spectrum superposition; displayed color

收稿日期: 2014-09-11

基金项目: 上海市研究生创新基金(JWCXSL1302)

作者简介: 丁桂芝(1989—), 女, 山东人, 上海理工大学硕士生, 主攻色彩再现理论与应用。

通讯作者: 王晓红(1971—), 女, 陕西人, 上海理工大学教授、硕士生导师, 主要从事色彩再现理论与应用、色彩管理方面研究。

大多数显示设备(液晶显示器)通常仅限于室内使用,但移动终端的自身特点决定其使用的环境范围非常广泛。由于外界光对显示器显示图文信息在色域、亮度、对比度和彩度等方面的影响,使显示的图文信息可读性大大降低^[1-7]。众所周知,颜色是由光反射或透射到人眼后产生的视觉感知,光源对颜色光谱功率分布特性的影响,决定了人眼的颜色感觉^[8]。可见,环境对颜色影响的根本是对其光谱值的影响,因此,对光谱值而非色度值进行颜色信息的分析和处理可使颜色再现更精确^[9]。在此,从移动终端显示器显示色的光谱特性出发,探讨了在暗室和D50光源等2种环境下,移动终端显示器三原色通道的独立性和叠加性,改进了LCD显示器显示色与三原色之间的线性叠加模型,建立了不同环境下同一显示色的光谱值转换关系模型,对于精确度量移动终端显示色之间的光谱叠加关系,以及从光谱特性出发去除环境光干扰,保证图像自身的色彩光谱特性,进而实现图像增强具有重要意义。

1 实验设备与条件

设备与条件:测量显示器为安卓智能手机,2.2英寸,480像素×320像素,TFT—LCD材质;测量仪器为CS2000分光辐射亮度仪和T-10A照度计。不同环境照度与移动终端显示器亮度见表1^[11]。

表1 环境与移动终端亮度配置及实验测量条件
Tab.1 Configuration between ambient light and mobile terminal brightness and measurement conditions

周围环境 照度/lux	移动终端显示器亮度 <i>L</i> /(cd·m ⁻²)		
	<i>L</i> _{min}	<i>L</i> _{max}	Michelson 对比度
≤0.05(暗室)	0.430	285.790	0.998
≈680(D50)	2.090	291.850	0.986

2 移动终端三原色光谱叠加模型

2.1 三原色叠加模型

理论上移动终端显示器的显示色与三原色之间存在线性叠加关系:

$$c_{\lambda}(d_1,d_2,d_3)=r(\lambda_1,d_1)+g(\lambda_2,d_2)+b(\lambda_3,d_3)-ic_0(\lambda_0)$$

(1)

式中: $\gamma(\lambda,d)$ 为数字驱动值为 d 时的三原色光

谱值; $c_{\lambda}(d_1,d_2,d_3)$ 为移动终端数字驱动值为 (d_1,d_2,d_3) 时显示色的光谱值; $c_0(\lambda_0)$ 为显示器全黑时的光谱值分布,但实际上除受到液晶显示器黑点的影响外,LCD显示器各通道之间也存在相互影响,使得光谱叠加过程中该原理未必完全成立^[10]。

2.2 高斯-马尔科夫线性模型

高斯-马尔科夫线性模型,即:

$$\begin{cases} Y = X\beta + \varepsilon \\ E(\varepsilon) = 0, \text{Cov}(\varepsilon, \varepsilon) = 0 \end{cases}$$

(2)

式中: β 为参数; X 为自变量; ε 为随机误差; Y 为随机变量。该模型利用最小二乘法求得参数 β 的估计量,使离差平方和 $Q = \sum_i^n (y_i - \beta_0 - \beta_1x_{i1} - \cdots - \beta_kx_{ik})^2$ 达到最小。

若在可见光380~780 nm内,以10 nm为间隔进行采样,则原色光谱可以用 41×1 的列向量表示:

$$\boldsymbol{I}(\lambda,d)=[r(\lambda_1,d),r(\lambda_2,d),\cdots,r(\lambda_{41},d)]^T$$

(3)

式中: $\boldsymbol{I}(\lambda,d)$ 为RGB各通道驱动值为 d 时的光谱值,原色和黑点光谱值函数构成变量矩阵:

$$\boldsymbol{X}=[\boldsymbol{E},\boldsymbol{I}_r(\lambda,d)=[\boldsymbol{I}_g(\lambda_1,d),\boldsymbol{I}_b(\lambda_2,d),\boldsymbol{C}_0(\lambda)]]$$

(4)

式中: $\boldsymbol{E}$ 为 41×1 的单位矩阵; $\boldsymbol{C}_0(\lambda)$ 为黑点光谱值矩阵。

将式(4)代入式(2),即可得到移动终端显示色的三原色光谱值叠加系数矩阵 β ,则移动终端任意显示色与原色光谱的叠加关系为:

$$c_{\lambda}(d_1,d_2,d_3)=\beta_0+\beta_1r(\lambda,d_1)+\beta_2g(\lambda,d_1)+\beta_3b(\lambda,d_1)+\beta_4c_0(\lambda)$$

(5)

可见,改进后的叠加模型确定了移动终端各原色分量,以及黑点之间的系数权重,从而充分考虑了光谱叠加时各波长处分量之间的叠加关系,使得显示色与原色之间的光谱叠加关系更精确。

2.3 结果与分析

2.3.1 不同环境下移动终端通道独立性检验与分析

显示器颜色再现遵循三刺激值可加性原理,其确定的条件为三通道相互独立。根据亮、中、暗调及黑场、白场,设置驱动值为0,64,128,192和255,检验各通道三刺激值受其他通道的影响变化,确定其独立性情况^[12]。

2种环境下R通道 X,Y,Z 受 G 和 B 通道影响的变化趋势分别见图1和图2,其中,横坐标为数字驱动值

[0, 255], 纵坐标为三刺激值。由图1和图2可见, 在2种环境条件下, R通道三刺激值受其他通道影响的变

化曲线接近平行, 且未发生交叉现象, G和B通道的检测结果与之相似。

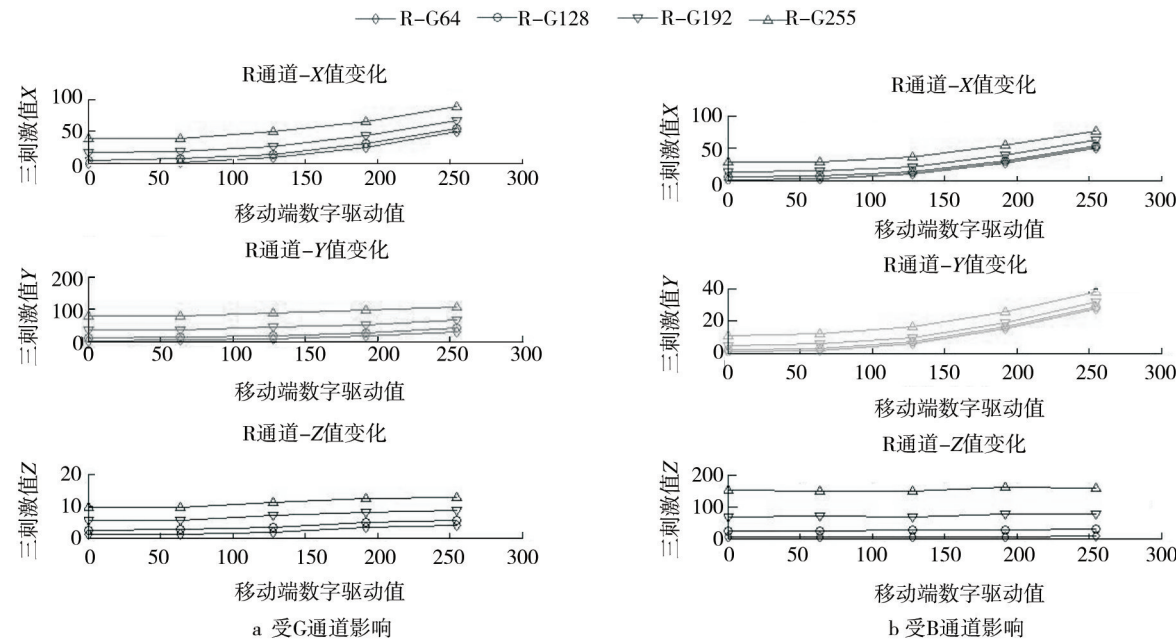


图1 暗室条件下R通道三刺激值受G和B通道影响变化

Fig.1 Change of tristimulus values of R channel by G and B channels in darkroom

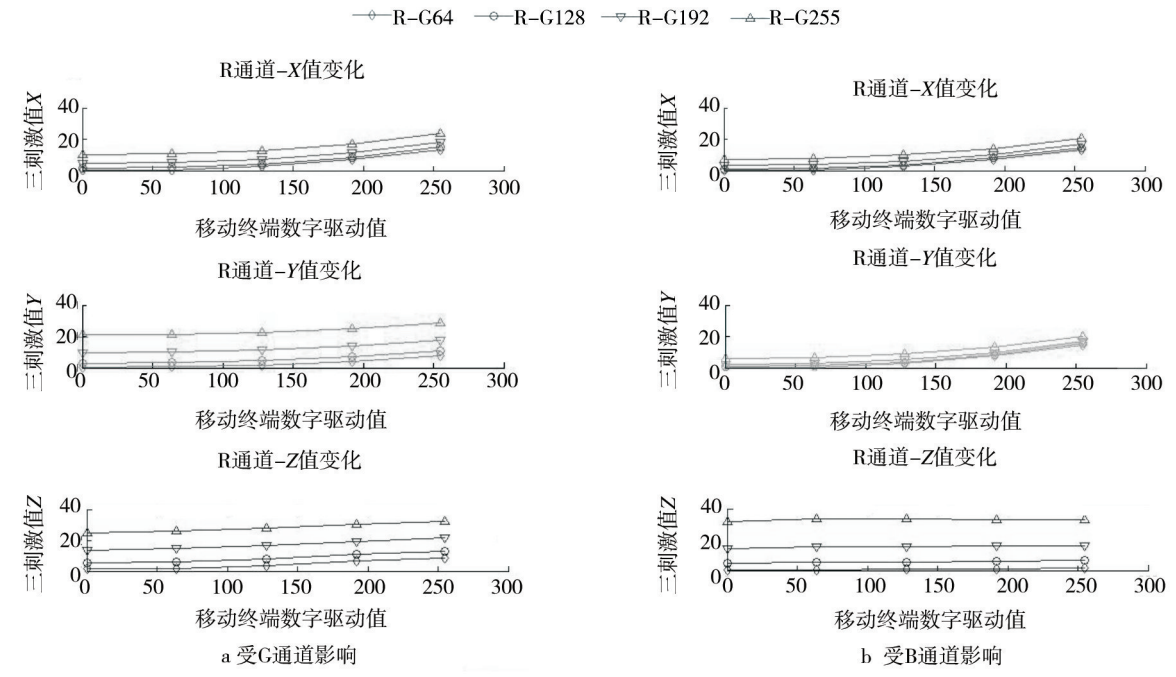


图2 D50光源下R通道三刺激值受G和B通道影响变化

Fig.2 Change of tristimulus values of R channel by G and B channels under D_{50}

在2种环境下, 各通道直线斜率偏差统计结果的平均值(A_{ve})和标准差(S_{ta})见表2。表2中数据显示, 各直线斜率偏差非常小, 移动终端3通道之间具有非常好的独立性。表2中还给出了在B和G通道影响下, R通道直线斜率差和截距差的均值, 分别用 S_{lope} 和 $I_{intercept}$ 表示(R通道受B通道的影响减去受G通道的影响); E_x, E_y, E_z 表示对X, Y, Z测量值的计算结果。由图1—2及表2可知, 在斜率上G和B通道对R通道的影响程度接近, 但在截距上B通道对R通道Z值的影响远大于G通道对X值的影响, 这与显示器显示效果偏蓝一

致;同时,外界环境影响颜色三刺激值,但不影响各通道的独立性。

表2 2种环境下移动终端各通道独立性
Tab.2 Channel independence of mobile terminal in 2 different environments

	暗室				D50 光源			
	A_{ve}	S_{ta}	S_{lope}	$I_{ntercept}$	A_{ve}	S_{ta}	S_{lope}	$I_{ntercept}$
E_x	0.0523	0.0013	-0.0492	-1.23	0.0519	0.0013	-0.0444	-4.25
E_y	0.0303	0.0004	-0.1119	-7.34	0.0519	0.0009	-0.2286	-27.78
E_z	0.0030	0.0000	0.2291	14.73	0.0066	0.0000	0.6113	57.21

2.3.2 移动终端三原色光谱叠加模型检验与分析

在 D50 光源下,当移动终端数字驱动值 R 和 G 通道均为 128 及 R,G 和 B 通道均为 128 时,光谱叠加模型改进前、后的光谱叠加效果分别见图 3 和图 4。在图

3 中,部分波段上原模型预测值与实测值出现较大差值;而在图 4 中,相同驱动值下各波长处的光谱叠加预测值与实测值接近一致,并且改进后叠加模型拟合优度检验的相关系数 γ 达到 0.99。

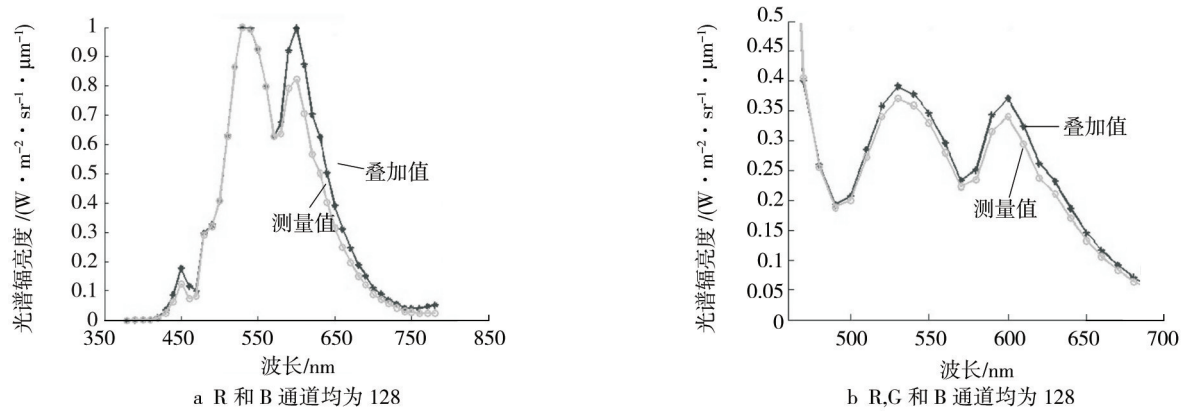


图3 D50 光源下移动终端光谱叠加模型改进前
Fig.3 Mobile terminal spectrum superposition model under D50 before improvement

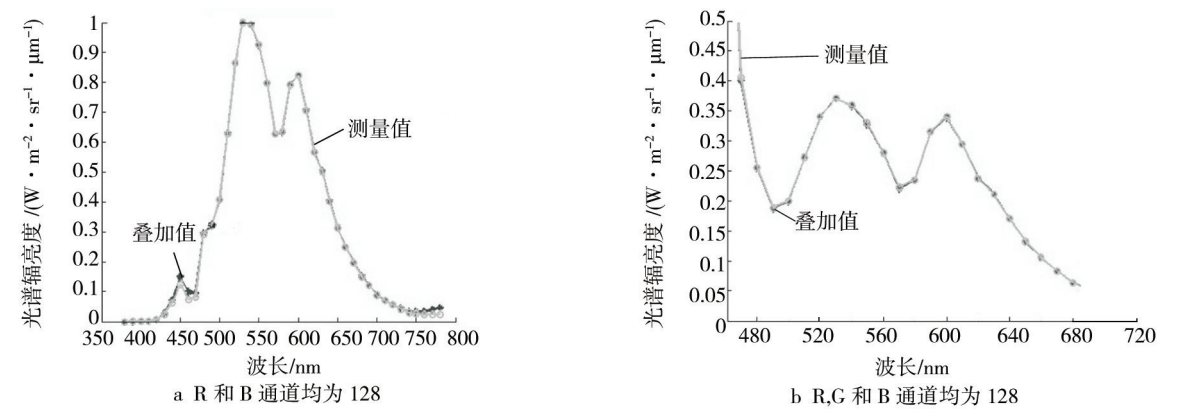


图4 D50 光源下移动终端光谱叠加模型改进后
Fig.4 Improved mobile terminal spectrum superposition model under D50

为进一步比较改进前后叠加模型的光谱值计算精度,将三原色划分 15 个等级进行单色和混合色显示,计算改进后叠加模型光谱预测值与实测值之间的光谱均方误差 (Δ_{SMS}) 和 CIE2000 色差 (Δ_{00}),从物理计算精度和视觉感知进行叠加模型准确度的验证,实验数据见表 3。其中,光谱均方误差计算方法:

$$\Delta_{SMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_{m,i} - r_{c,i})^2}{n}}$$

(6)

式中: $r_{m,i}$ 和 $r_{c,i}$ 分别是测量和计算的光谱值, $i=1, 2, \dots, n$; n 为光谱采样点数量,该实验 n 取 36。表 3 中的数据是 $\Delta_{SMS} \times 100$ 后的结果。

表3 改进前后叠加模型预测值与实测值

Tab.3 Comparison between predicted values and measured values of the superposition model before and after improvement

	暗室改进前		暗室改进后		D50光源改进前		D50光源改进后	
	Δ_{SMS}	Δ_{00}	Δ_{SMS}	Δ_{00}	Δ_{SMS}	Δ_{00}	Δ_{SMS}	Δ_{00}
预测值	0.0361	3.051	0.0058	0.0456	0.0395	1.2504	0.0077	0.0451
实测值	0.0589	4.470	0.0076	0.0513	0.0594	1.4804	0.0104	0.0807

表3数据显示,改进后叠加模型比原模型的光谱计算精度提高近6倍,色差均值小于了0.1个色差单位,人眼几乎感觉不到色差。改进后的叠加模型在光谱计算精度和视觉感知上都很好地表征了移动终端的颜色显示特性,较原模型更适用于表征移动终端的显示色与原色之间的叠加关系。

3 不同环境下移动终端显示色光谱值转换关系

3.1 不同环境下三原色光谱特性分析

三原色纯色的光谱功率分布曲线见图5,可见外界环境变化不影响三原色光谱分布曲线形状和主波长位置,移动终端显示色在色相上保持不变。分析2种环境下移动终端三原色纯色在各波长处的光谱差值(见图6),发现各波长处光谱值有较大差异,尤其是主波长附近。由此可见,外界环境光的变化对移动终端显示器颜色显示效果的影响非常显著。

在解决颜色恒常性问题上可从光谱关系入手,一旦建立D50光源与暗室环境下移动终端相同显示色光谱值之间的对应关系,就可以将D50光源下显示色的光谱特性还原到暗室下显示色自身的光谱特性,确保不同环境下显示色光谱信息的一致性^[13]。

3.2 不同环境下移动终端显示色光谱值关系模型分析与检验

根据前述,任意显示色的光谱可以用 41×1 的列向量表示,依据光谱线性叠加关系和BP神经网络原理,选取2种环境下对应的125组显示色样本,其中,训练样本100个、测试样本25个^[14-15],形成2组 41×125 的光谱值矩阵。分别将D50光源和暗室下测量的同一显示色的光谱值作为变量,建立二者的光谱关系模型:

$$C_{D0}(d_1,d_2,d_3)=C_{D50}(d_1,d_2,d_3)-\alpha \times 10^{-4} \tag{7}$$

式中: $C_{D0}(d_1,d_2,d_3)$ 为暗室环境下显示色的光谱值; $C_{D50}(d_1,d_2,d_3)$ 为D50环境下显示色的光谱值; α 为参数,取值范围为[5,10]。

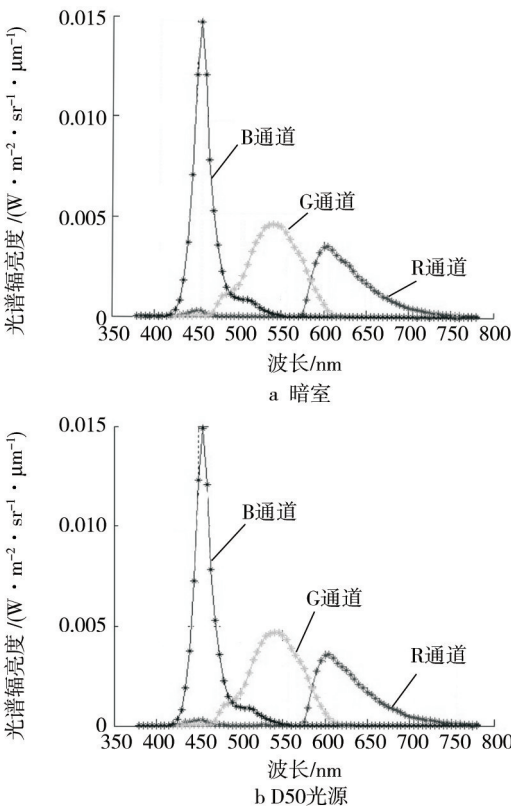


图5 不同环境下移动终端三原色光谱功率分布
Fig.5 Primaries spectral radiance curves of the mobile terminal in different environments

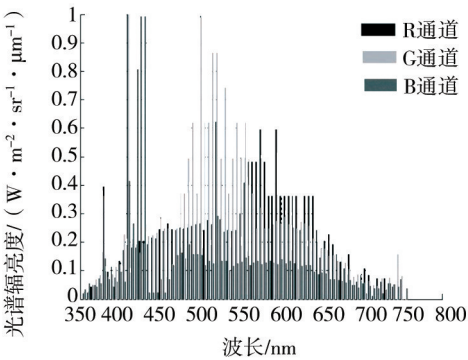


图6 2种环境下移动终端三原色各波长处的光谱差值
Fig.6 The spectral value difference at different wavelengths of the three primary colors in two different environments

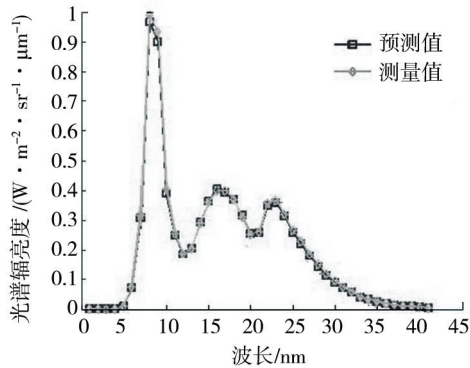
计算测试样本的预测值与实测值之间的光谱均方误差和色差,结果见表4。表4中的数据表明,2种

环境下移动终端显示色光谱值关系模型的预测值与实测值之间的光谱均方误差非常小。不同环境下移动终端显示色光谱值关系模型见图7。图7直观地表现了建立的关系模型的预测值与实测值的接近程度,2组曲线几乎完全重合,关系模型的相关系数 γ 达到0.98。在视觉感知上,预测值与实测值的色差均值小于1,人眼几乎感觉不到色差存在。由此可见,建立的关系模型能够准确地实现颜色再现。

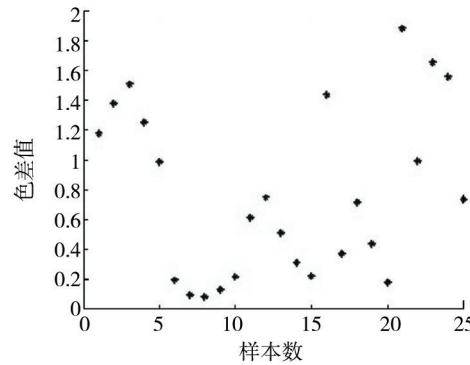
表4 光谱值关系模型精度

Tab.4 Statistics of calculation deviation about spectral radiance

	$\Delta_{\text{SMS}}(\times 10^{-2})$	$\Delta_{\text{OO}}(\times 10^{-2})$
预测值	0.0057	0.7723
实测值	0.0229	1.8782



a 预测值与测量值拟合曲线



b 关系模型色差

图7 不同环境下移动终端显示色光谱值关系模型

Fig.7 Relational model of displayed color spectral value of the mobile terminal in different environments

4 结语

改进了显示色与三原色之间的光谱叠加模型,建立了适合移动终端显示色的光谱叠加模型。根据线性叠加关系和环境光对显示色光谱值的影响,建立了

暗室与D50光源下光谱值的关系模型,预测值与实测值在光谱计算和视觉色差上均接近一致。该模型可应用于不同环境下移动终端彩色图像的光谱还原,排除了外界环境对移动终端图像色彩的影响,保持了其自身的光谱特性。这里仅对2种环境下相同移动终端显示亮度下显示色光谱特性进行了研究,对于不同环境光与不同显示亮度对颜色显示的综合影响还需进一步研究。

参考文献:

[1] PO Hung-lin, WEN Hung-kuo. Image Quality of Mobile Phone under Different Illuminations[J]. Perceptual and Motor Skills, 2011, 113(1): 215—228.

[2] JONG M, CHANG H, HEELEE C, et al. Illuminant Adaptive Color Preproduction Based on Lightness Adaptation and Flare for Mobile Phone[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2007, 51(1): 44—52.

[3] PO H, PATTERSON P. Investigation of Perceived Image Quality and Colorfulness in Mobile Displays for Different Cultures, Ambient Illumination, and Resolution[J]. Ergonomics, 2012, 55(12): 1502—1512.

[4] KIM Y J, LUO M R, CHOE W. Factors Affecting the Psychological Image Quality Evaluation of Mobile Phone Displays : the Case of Trans Missive Liquid-crystal Displays[J]. Optical Society of America, 2008, 25(9): 2215—2222 .

[5] KIM Y J. Portable LCD Image Quality: Effects of Surround Luminance[J]. InTech, 2011, 11(30): 179—211.

[6] KIM Y J, BANG Y, CHOH H. Spatial Luminance Contrast Sensitivity: Effects of Surround[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2010, 4(14): 152—162 .

[7] 徐艳芳, 刘晓宁. 环境光照对显示器呈色的影响研究(1): 显示器的特性化[J]. 北京印刷学院学报, 2012, 20(2): 1—4.

XU Yan-fang, LIU Xiao-ning. Investigation of the Impact of Surrounding Light on Monitor' s Color Showing, Part I: CharacterizatiOn of Monitor' s Color Showing[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2012, 20(2): 1—4.

[8] 胡威捷, 汤顺青, 朱正芳. 现代颜色技术原理及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.

HU Wei-jie, TANG Shun-qing, ZHU Zheng-fang. Modern Color Science and Application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007.

[9] 王莹. 多光谱图像色彩再现关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.

- Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(5): 466—470.
- [8] 刘京会,王跃宗. 套准偏差计算分色归类方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(19): 210—212.
LIU Jing-hui, WANG Yue-zong. Study on Color Division Model about Register Calculation[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(19): 210—212.
- [9] 张海燕,赵博. 基于图像处理的单张纸胶印机对角线套准及自动控制系统[J]. 包装工程, 2005, 26(2): 50—51.
ZHANG Hai-yan, ZHAO Bo. Diagonal Register and Automatic Control System Based on Image Processing for the Sheet-fed Offset Press[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(2): 50—51.
- [10] 王梅,赵荣丽,李克天,等. 印刷自动套准标记识别方法的研究[J]. 包装工程, 2007, 28(8): 60—62.
WANG Mei, ZHAO Rong-li, LI Ke-tian, et al. Research on Identification Method of Printing Automatic Registering Mark [J]. Packaging Engineering, 2007, 28(8): 60—62.
- [11] 于丽杰,李德胜. 彩色印刷套准识别方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(5): 163—165.
YU Li-jie, LI De-sheng. Study on Identifying Register State of Color Printing[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(5): 163—165.
- [12] 饶裕平. 基于视频的森林火灾识别方法研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2010.
RAO Yu-ping. Research on the Recognition of Forest Fire Recognition Based on Video[D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forest University, 2010.
- [13] HARALICK R M, SHANMUGAM K, DINSTEN I H. Texture Features for Image Classification[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1973, 3(6): 610—621.
- [14] FREUND Y, SCHIPARE R E. A Decision-theoretic Generalization of On-line Learning and an Application to Boosting [C]// Computational Learning Theory: Second European Conference, 1995: 23—37.
- [15] ZHANG Yang-liu, WEI Ming, DENG Ru-feng, et al. A New Pedestrian Detection Method Based on Diverse Ada-boost-SVM Optimization Ensemble Classifiers Algorithm[J]. Journal of Computational Information Systems, 2011, 7(14): 5076—5085.
- [16] CAO Jing-jing, KWONG S, WANG Ran. A Noise-detection Based Adaboost Algorithm for Mislabeled Data[J]. Pattern Recognition, 2012, 45(12): 4451—4465.
- [17] 王晓丹,孙东延,郑春颖,等. 一种基于 Adaboost 的 SVM 分类器[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2006, 7(6): 54—57.
WANG Xiao-dan, SUN Dong-yan, ZHENG Chun-ying, et al. A Combined SVM Classifier Based on Adaboost[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2006, 7(6): 54—57.
- [18] OWUSU E, ZHAN Y Z, MAO Q R. An SVM-adaboost Facial Expression Recognition System[J]. Applied Intelligence, 2014, 40(3): 536—545.
- [19] PAI Ping-feng, LI Lan-lin, HUNG Wei-zhan, et al. Using Adaboost and Rough Set Theory for Predicting Debris Flow Disaster[J]. Water Resources Management, 2014, 28(4): 1143—1155.
-
- (上接第 128 页)
- WANG Ying. A Study of Key Technologies in Multispectral Image Color Reproduction[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [10] 刘浩学,郑岚,代黎. 基于光谱叠加特性的液晶显示器颜色特征化方法研究[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 313—317.
LIU Hao-xue, ZHENG Lan, DAI Li. Color Characterization of LCD Based on Spectral Additive Properties[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 313—317.
- [11] KUBOTA S, OKADA S, SAKAI E. Measurement of Light Incident on Mobile Displays in Various Environment [J]. Journal of the Society for Information Display, 2006(14): 999—1002.
- [12] 刘浩学,崔桂华,黄敏,等. 按波长分区的 LCD 颜色特征化模型[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2751—2757.
LIU Hao-xue, CUI Gui-hua, HUANG Min, et al. Colorimetric Characterization of LCD Based on Wavelength Partition Spectral Model[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(10): 2751—2757.
- [13] 赵全友,潘保昌,郑胜林. 复杂光照下的两步法颜色恒常性增强[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4): 859—865.
ZHAO Quan-you, PAN Bao-chang, ZHENG Sheng-lin. Color Constancy Enhancement in Two Steps under Variable Illumination[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(4): 859—865.
- [14] 丁淑芝,姜龙. 基于 BP 神经网络的颜色补偿模型[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(10): 2294—2296.
DING Shu-zhi, JIANG Long. Color Constancy Model Based on Neural Network[J]. Computer Engineering and Design, 2010, 31(10): 2294—2296.
- [15] 丁桂芝,王晓红,刘太庆. 基于 BP 神经网络的颜色测量仪器台间差自适应修正模型[J]. 包装工程, 2013, 34(23): 102—106.
DING Gui-zhi, WANG Xiao-hong, LIU Tai-qing. Adaptive Correction Model of Difference between Color Measuring Instruments Based on Neural Network[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23): 102—106.