



# GOG 模型对平板电脑特征化的适用性研究

苏 森<sup>a,b</sup>, 周凯丽<sup>a,b</sup>, 段怡婷<sup>a</sup>, 鲁佳亮<sup>a,b</sup>, 杨丽梅<sup>a,b</sup>

(浙江理工大学, a. 纺织科学与工程学院(国际丝绸学院); b. 国际丝绸与丝绸之路研究中心, 杭州 310018)

**摘 要:** 为了研究 GOG 模型是否适用于平板电脑的特征化, 对 ipad、ipad pro、Huawei matepad 和 Huawei matepad pro 进行了呈色性能测试, 然后用 GOG 模型对 4 个平板电脑进行特征化, 并使用多项式模型对预测结果进行修正, 测试了模型对纯色色块以及纯色纺织品图像三刺激值的预测精度。结果表明: 不同的平板电脑的呈色性能存在差异, 对于通道独立性与色品恒定性较好的平板电脑, 用 GOG 模型进行特征化可以获得较高的预测精度; 对于通道独立性与色品恒定性较差的平板电脑, 用 GOG 模型进行特征化获得的预测精度较低, 即使经过多项式模型对预测结果进行修正, 其预测精度也不够理想。该结果为平板电脑的特征化模型的选择提供了参考。

**关键词:** 纺织品色彩管理; 平板电脑; 呈色性能; GOG 模型; 多项式修正模型; 色度特征化

**中图分类号:** O432.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2022)11-0841-07

## Research on the applicability of GOG model for tablet characterization

SU Miao<sup>a,b</sup>, ZHOU Kaili<sup>a,b</sup>, DUAN Yiting<sup>a</sup>, LU Jialiang<sup>a,b</sup>, YANG Limei<sup>a,b</sup>

(a. College of Textile Science and Engineering (International Institute of Silk); b. World Silk and Silk Road International Research Center, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to study whether the GOG model was suitable for the characterization of tablets, the chromogenic properties of ipad, ipad pro, Huawei matepad and Huawei matepad pro were tested. Then, the GOG model was used to characterize four tablets, and a polynomial model was used to modify the prediction results. The prediction accuracy of the model for the tristimulus values of pure colors and pure color textile images was tested. The results implied that different tablets had different chromogenic properties. For tablets with better channel independence and chroma consistency, the GOG model can obtain higher prediction accuracy. For tablets with poor channel independence and chroma constancy, the prediction accuracy obtained by GOG model was low. Even if the prediction results were modified by the polynomial model, the prediction accuracy was not ideal. These results provide a reference for the selection of characteristic model of tablets.

**Key words:** textile color management; tablet; chromogenic property; GOG model; polynomial correction model; colorimetric characterization

## 0 引 言

色彩是纺织品的一个重要属性<sup>[1-2]</sup>, 在纺织品的

设计与销售环节中, 往往会用到显示屏作为交流媒介。如设计师与客户之间通过显示设备交流样稿, 既方便又快捷; 再如商家可以提供图片给顾客作为

收稿日期: 2022-03-04 网络出版日期: 2022-06-02

基金项目: 国家重点研发计划课题(2019YFC1521301); 浙江省文物保护专项(2021016); 浙江理工大学科研启动基金(20202214-Y)

作者简介: 苏 森(1980—), 女, 山东青岛人, 副教授, 博士, 主要从事纺织品设计、丝绸艺术史方面的研究。

网上购物的参考。这时在显示屏上能否显示正确的颜色就变得十分重要。现代移动终端如智能手机、平板电脑等以其便捷、多功能、易携带的特点逐渐成为重要的显示设备,而平板电脑相比手机性能较好、屏幕更大,是人们用来作为交流媒介的更优选择。要在平板电脑上显示正确的颜色,还需进行色彩管理,其中特征化是色彩管理的前置条件与基础。常用的特征化方法有经验法和模型法。经验法包括神经网络法<sup>[3]</sup>、三维查找表<sup>[4]</sup>等方法,一般需要测量大量的样本数据才能得到较高的精度。模型法是根据显示设备的呈色特性构建函数,一般情况下确定参数需要的样本数量比经验法要少。模型法中增益—偏置—伽马(Gain-offset-Gamma, GOG)模型是十分经典的特征化模型,但是使用 GOG 模型需要显示设备满足通道独立性与色品恒定性<sup>[5-6]</sup>,平板电脑是否满足这两个特性会影响 GOG 模型的预测精度。张建青等<sup>[7]</sup>对 ipad 和 iPhone 的显示性能进行测试,发现 ipad 的显示性能接近专业显示器,刘奔等<sup>[8]</sup>经过测试发现 Huawei、ipad 和 iPhone 具有良好的呈色性能。基于此,苹果与华为产品或可使用 GOG 模型进行特征化,但平板电脑更新换代快,现在的产品呈色性能如何以及用 GOG 模型进行特征化获得的精度如何,还需进一步实验验证。

平板电脑的品牌繁多,其中苹果与华为是占据

表 1 实验选用平板电脑的型号与技术参数

设备名称	ipad	ipad pro	Huawei matepad	Huawei matepad pro
型号	ipad(第七代)	ipad pro(第三代)	DBY-W09	MRX-W19
显示面板	IPS	IPS	IPS	OLED
对角线尺寸/cm(inch)	25.91(10.2)	27.94(11)	27.81(10.95)	32.00(12.6)
分辨率	2160×1620	2388×1668	2560×1600	2560×1600
像素密度/ppi	264	264	275	240
相关色温/K	6729	6516	8116	8024
实测白场亮度/(cd•m <sup>-2</sup> )	402	380	407	401

颜色测量设备为德国 JETI 光谱辐射计 spectraval 1511,测量结果的数据类型为 CIE 1931 XYZ。数据处理软件为 Matlab 2019a,Origin 2018 以及 Excel 2018。显示和测量工作均在暗室中进行,所有的显示设备开机后都进行 1 h 预热再进行实验。

1.2 平板电脑呈色性能测试

1.2.1 时间稳定性测试

时间稳定性是指显示器的色彩随着时间改变的变化情况。如果随着时间改变,显示器的显示色彩变化比较小,说明其时间稳定性越好。在本文中,将显示设备开机预热 1 h 后,通过 JETI 分别对 4 个平

板电脑市场份额较大品牌之一,同时也是产品品控做得较好的品牌,苹果平板电脑与华为平板电脑在一定程度上能够代表国内外平板电脑的发展水平。因此,选择苹果平板电脑与华为平板电脑作为研究对象,每个品牌选择一个基础版与一个专业版平板电脑,对所选平板电脑进行呈色性能测试,然后采用 GOG 模型对平板电脑进行特征化建模,并进行精度分析;以往色度特征化模型的检验样本一般都是纯色色块(每个像素的 RGB 值相同),本文的检验样本除了纯色色块以外,还选择了一些均匀染色的单色纺织品图像(由不同的 RGB 值的像素组成,具有纹理特征的纯色),从而研究特征化模型对具有一定特征的纯色图像的三刺激值的预测精度。

1 平板电脑呈色性能研究

1.1 实验设备与条件

选取了两款苹果平板与两款华为平板电脑作为实验设备,具体型号与技术参数见表 1。测试时调节平板亮度为 100%,苹果与华为平板电脑在显示设置方面可调节的参数不同,其中苹果平板设定为浅色模式,关闭自动调节亮度;华为平板设定为浅色模式,关闭自动调节亮度,色彩模式设定为标准,色温设定为默认。在后续实验过程中,所有显示设备设定的参数都保持不变。

板电脑显示驱动值为(255,255,255)的纯白色块的颜色信息进行测量,测量间隔为 10 s,测量总时长 2 h。ipad 与 ipad pro 在 2 h 内的平均色差为 0.47、0.36,Huawei matepad 与 Huawei matepad pro 在 2 h 内的平均色差分别为 0.58、0.87。四个平板电脑的时间稳定性均能满足实验要求。

1.2.2 通道独立性测试

通道独立性是指显示设备三通道之间相互干扰的程度,一般以灰通道的输出值与红绿蓝单通道输出值之和的色差来衡量<sup>[9]</sup>。在本文中,用 JETI 分别测量驱动值为(D,0,0)的红通道输出三刺激值

$(X_{D,R}, Y_{D,R}, Z_{D,R})$ , 驱动值为  $(0, D, 0)$  的绿通道输出三刺激值  $(X_{D,G}, Y_{D,G}, Z_{D,G})$ , 驱动值为  $(0, 0, D)$  的蓝通道输出三刺激值  $(X_{D,B}, Y_{D,B}, Z_{D,B})$ , 以及驱动值为  $(D, D, D)$  的灰通道的输出三刺激值  $(X_{D,H}, Y_{D,H}, Z_{D,H})$ , 其中  $D$  的取值范围为  $0 \sim 255$ , 以 15 为间隔取值。将获取的红、绿、蓝单通道以及灰阶三刺激值都进行去黑点处理, 然后将红绿蓝单通道的三刺激值相加得到单通道的输出三刺激值之和, 再根据式 (1) 将单通道输出三刺激值之和与灰通道三刺激值转换至 CIELAB 空间得到对应的  $L^* a^* b^*$  值, 通过 CIE2000(1:1:1) 色差公式<sup>[10]</sup> 计算两者之间的色差。

$$\begin{cases} L^* = 116f(Y/Y_w) - 16, \\ a^* = 500[f(X/X_w) - f(X/X_w)], \\ b^* = 200[f(Y/Y_w) + f(Z/Z_w)] \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $f(I) = \begin{cases} I^{1/3}, & I > 0.008856; \\ 7.787I + \frac{16}{116}, & I \leq 0.008856; \end{cases}$   $X, Y, Z$  为样本三刺激值,  $X_w, Y_w, Z_w$  为参考白三刺激值, 本文中以显示设备的白场三刺激值作为参考白。

4 个平板电脑的通道独立性测试结果如图 1 所示, 通过计算得到 ipad 的通道独立性的平均色差为 1.56, 最大色差为 2.37; ipad pro 的通道独立性的平均色差为 1.38, 最大色差为 2.53; Huawei matepad 的通道独立性的平均色差为 6.6, 最大色差为 15.13; Huawei matepad pro 的通道独立性的平均色差为 1.80, 最大色差为 3.49。以上结果表明: ipad、ipad pro、Huawei matepad pro 的通道独立性相对较好, 而 Huawei matepad 的通道独立性较差, 随着驱动值增加, 3 个通道之间的串扰程度也在增加。

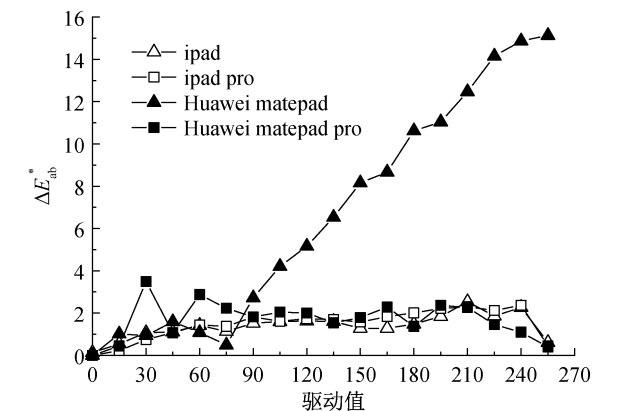


图 1 平板电脑通道独立性色差

1.2.3 空间均匀性测试

空间均匀性是指显示设备在显示颜色时, 在屏幕的不同位置所显现的颜色的差异情况, 显示屏幕

的不同位置的颜色差异越小, 说明空间均匀性越好。在本中, 使显示设备分别呈现驱动值为  $(255, 255, 255)$  的纯白色、驱动值为  $(255, 0, 0)$  的纯红色, 驱动值为  $(0, 255, 0)$  的纯绿色, 驱动值为  $(0, 0, 255)$  的纯蓝色, 以及驱动值为  $(128, 128, 128)$  的灰色。将显示设备的屏幕划分为 9 个相同的区域, 从左到右, 从上至下标记为 1~9, 并用 JETI 分别对 9 个区域进行颜色测量, 以显示屏幕的中心为参考, 计算其余 8 个区域与中心区域 (标记为 5) 的色差, 并计算平均值。4 个平板电脑的空间均匀性测量结果如表 2 所示, 可以看出 ipad、ipad pro 和 Huawei matepad pro 的空间均匀性都较好, 而 Huawei matepad 空间均匀性略差。

设备名称	平均色差				
	白	灰	红	绿	蓝
ipad	0.91	0.72	0.92	0.97	1.25
ipad pro	0.41	0.32	0.37	0.67	0.73
Huawei matepad	2.77	1.83	1.38	1.99	2.33
Huawei matepad pro	0.69	0.94	0.62	0.54	0.36

1.2.4 空间独立性测试

显示设备是自发光的设备, 每个像素点都是独立发光, 不同像素点之间会相互影响。空间独立性就是指显示设备在同一驱动值下, 在不同的背景当中, 其颜色输出值的一致性。在不同的背景下, 其颜色输出值的差异越小, 说明空间独立性越好。在本文中, 分别以驱动值为  $(0, 0, 0)$  的黑色, 驱动值为  $(255, 0, 0)$  的纯红色, 驱动值为  $(0, 255, 0)$  的纯绿色, 驱动值为  $(0, 0, 255)$  纯蓝色为背景, 中心放置大小为  $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 、驱动值为  $(128, 128, 128)$  的灰色色块, 然后用 JETI 分别测量不同背景下的灰色色块的颜色值并计算色差。测试结果为 ipad 的平均色差为 1.15, ipad pro 的平均色差为 1.23, Huawei matepad 的平均色差为 2.67, Huawei matepad pro 的平均色差为 1.87。在不同的测试背景下, 同一驱动值也会有不同的输出, 所以在本文的特征化数据采集时, 统一在驱动值为  $(128, 128, 128)$  的灰色背景下进行测量。

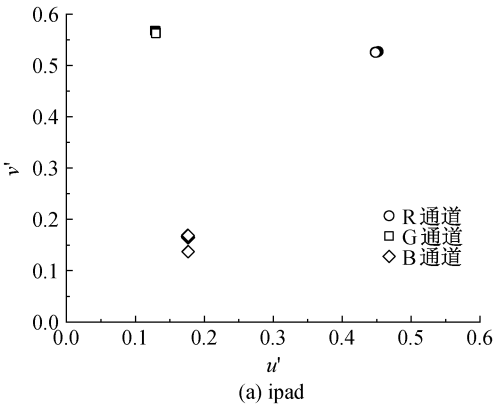
1.2.5 基元恒定性测试

基元恒定性也称色品恒定性<sup>[11]</sup>, 是指单一通道输出状态下, 驱动值变化时, 其输出色品坐标保持恒定不变的性质。当驱动值变化时, 输出颜色的色品坐标变化较小, 说明显示设备的色品恒定性较好, 显示设备的色品恒定性越好, 显示的颜色就越准确<sup>[12]</sup>。

在本文中,通过通道独立性测试数据中获得单通道驱动值增加时,输出颜色的三刺激值,减去黑点三刺激值后,根据式(2)–(3)计算出对应的色品坐标:

$$u' = 4X / (X + 15Y + 3Z) \tag{2}$$

$$v' = 9Y / (X + 15Y + 3Z) \tag{3}$$



其中: $u'$ 、 $v'$ 表示色品坐标。  
4个平板电脑的三个单通道色品坐标分布如图2所示。ipad、ipad pro 基元恒定性较好,Huawei matepad pro 基元恒定性略次于ipad,而 Huawei matepad 基元恒定性相对较差(见图2)。

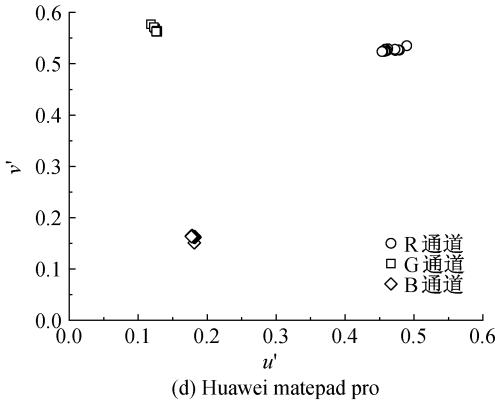
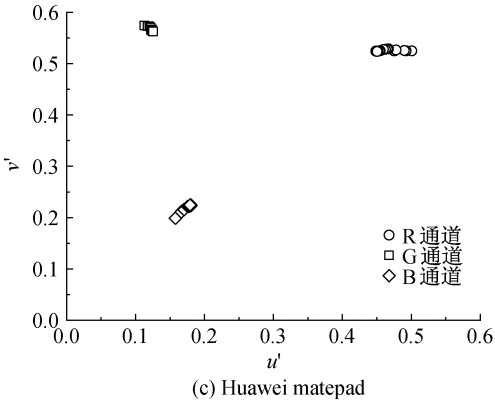
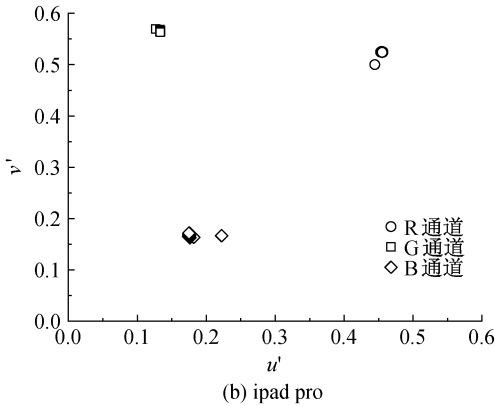


图2 平板电脑的红、绿、蓝通道色品坐标

2 GOG 模型对平板特征化的效果评价

2.1 GOG 模型

GOG 模型的计算是建立在满足通道独立性和基元恒定性的基础上进行的。假设显示设备满足通道独立性,则由三刺激值的可叠加性可知,驱动值为 $(r,g,b)$ 的色块的输出三刺激值应该等于驱动值为 $(r,0,0)$ 、 $(0,g,0)$ 、 $(0,0,b)$ 的单通道输出三刺激值之和,即式(4)所示:

$$\begin{cases} X_{(r,g,b)} = X_{(r,0,0)} + X_{(0,g,0)} + X_{(0,0,b)}, \\ Y_{(r,g,b)} = Y_{(r,0,0)} + Y_{(0,g,0)} + Y_{(0,0,b)}, \\ Z_{(r,g,b)} = Z_{(r,0,0)} + Z_{(0,g,0)} + Z_{(0,0,b)} \end{cases} \tag{4}$$

其中: $X_{(r,g,b)}$ 、 $Y_{(r,g,b)}$ 、 $Z_{(r,g,b)}$ 表示驱动值为 $(r,g,b)$ 的输出三刺激值,而 $X_{(r,0,0)}$ 、 $Y_{(r,0,0)}$ 、 $Z_{(r,0,0)}$ 表示驱动值为 $(r,0,0)$ 的红通道输出三刺激值; $X_{(0,g,0)}$ 、 $Y_{(0,g,0)}$ 、 $Z_{(0,g,0)}$ 表示驱动值为 $(0,g,0)$ 的绿通道输出三刺激值; $X_{(0,0,b)}$ 、 $Y_{(0,0,b)}$ 、 $Z_{(0,0,b)}$ 表示驱动值为 $(0,0,b)$ 的蓝通道输出三刺激值。

如果该显示设备具有较好的基元恒定性,则其单通道的输出三刺激值与归一化亮度的关系可以由式(5)表示:

$$\begin{cases} X_{(r,0,0)} = L_{(r,0,0)} X_{(255,0,0)}, \\ Y_{(r,0,0)} = L_{(r,0,0)} Y_{(255,0,0)}, \\ Z_{(r,0,0)} = L_{(r,0,0)} Z_{(255,0,0)}, \\ X_{(0,g,0)} = L_{(0,g,0)} X_{(0,255,0)}, \\ Y_{(0,g,0)} = L_{(0,g,0)} Y_{(0,255,0)}, \\ Z_{(0,g,0)} = L_{(0,g,0)} Z_{(0,255,0)}, \\ X_{(0,0,b)} = L_{(0,0,b)} X_{(0,0,255)}, \\ Y_{(0,0,b)} = L_{(0,0,b)} Y_{(0,0,255)}, \\ Z_{(0,0,b)} = L_{(0,0,b)} Z_{(0,0,255)} \end{cases} \tag{5}$$

其中: $L_{(r,0,0)}$ 表示驱动值为 $(r,0,0)$ 的红通道的归一化亮度, $L_{(0,g,0)}$ 表示驱动值为 $(0,g,0)$ 的绿通道的归一化亮度, $L_{(0,0,b)}$ 表示驱动值为 $(0,0,b)$ 的蓝通道的归一化亮度。



将式(5)带入式(4),可以得到驱动值为 $(r, g, b)$ 的颜色输出三刺激值计算公式,转换为矩阵形式后可以由式(6)—(9)表示:

$$\begin{bmatrix} X_{(r,g,b)} \\ Y_{(r,g,b)} \\ Z_{(r,g,b)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{R,255} & X_{G,255} & X_{B,255} \\ Y_{R,255} & Y_{G,255} & Y_{B,255} \\ Z_{R,255} & Z_{G,255} & Z_{B,255} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{(r,0,0)} \\ L_{(0,g,0)} \\ L_{(0,0,b)} \end{bmatrix}$$

(6)

$$L_{(r,0,0)} = \begin{cases} \left(k_{R,p} \frac{r}{255} + k_{R,o}\right)^{\gamma_R} \left(k_{R,p} \frac{r}{255} + k_{R,o}\right)^{\gamma_R} \geq 0, \\ 0 \quad \left(k_{R,p} \frac{r}{255} + k_{R,o}\right)^{\gamma_R} < 0 \end{cases}$$

(7)

$$L_{(0,g,0)} = \begin{cases} \left(k_{G,p} \frac{g}{255} + k_{G,o}\right)^{\gamma_G} \left(k_{G,p} \frac{g}{255} + k_{G,o}\right)^{\gamma_G} \geq 0, \\ 0 \quad \left(k_{G,p} \frac{g}{255} + k_{G,o}\right)^{\gamma_G} < 0 \end{cases}$$

(8)

$$L_{(0,0,b)} = \begin{cases} \left(k_{B,p} \frac{b}{255} + k_{B,o}\right)^{\gamma_B} \left(k_{B,p} \frac{b}{255} + k_{B,o}\right)^{\gamma_B} \geq 0, \\ 0 \quad \left(k_{B,p} \frac{b}{255} + k_{B,o}\right)^{\gamma_B} < 0 \end{cases}$$

(9)

其中: $k_{R,p}$ 、 $k_{R,o}$ 、 $\gamma_R$  分别表示红通道的增益、偏置和伽马参数,且  $k_{R,p} + k_{R,o} = 1$ ;  $k_{G,p}$ 、 $k_{G,o}$ 、 $\gamma_G$  分别表示绿通道的增益、偏置和伽马参数,且  $k_{G,p} + k_{G,o} = 1$ ;  $k_{B,p}$ 、 $k_{B,o}$ 、 $\gamma_B$  分别表示蓝通道的增益、偏置和伽马参数,且  $k_{B,p} + k_{B,o} = 1$ 。

本文采用的训练样本包括归一化亮度到三刺激值的转换矩阵样本,驱动值为 $(255, 0, 0)$ 、 $(0, 255, 0)$ 、 $(0, 0, 255)$ ,以及拟合归一化驱动值与归一化亮度关系的样本,本文中采用驱动值为 $(D, D, D)$ 的灰阶样本进行模型参数拟合,其中 $D$ 的取值范围为 $0 \sim 255$ ,以 15 为间隔均匀采样。将训练样本逐个显示在屏幕中央,背景设置为 $(128, 128, 128)$ 的灰色,采用 JETI 测量各个样本的 CIE 1931 XYZ 三刺激值,获取数据后进行去黑点处理再进行模型参数计算。根据式(6)—(7)拟合得到 4 个平板电脑的 GOG 模型参数,结果如表 3 所示。

使用 Matlab2019a 随机生成 RGB 空间的 100 个纯色块(每个像素 RGB 值相同)作为检验数据,记

录色块驱动值并用 JETI 测量得到其真实三刺激值,并进行去黑点处理。将色块的驱动值代入式(7)计算得到对应的归一化亮度,再带入式(6)计算得到预测的三刺激值。根据式(1)将预测三刺激值与真实三刺激值转换至 CIELAB 空间,通过 CIE2000 色差公式计算两者之间的色差。

表 3 拟合 GOG 模型参数

设备名称	R 通道		G 通道		B 通道	
	$k_p$	$\gamma$	$k_p$	$\gamma$	$k_p$	$\gamma$
ipad	0.95	2.45	0.99	2.28	1.00	2.22
ipad pro	1.00	2.22	1.00	2.22	1.00	2.22
Huawei matepad	0.74	3.58	0.91	2.61	1.00	1.42
Huawei matepad pro	1.00	2.12	1.00	2.14	1.00	2.04

GOG 模型对 ipad 的预测平均色差为 1.80,最大色差为 5.64;对 ipad pro 的预测平均色差为 1.49,最大色差为 4.93;对 Huawei matepad 的预测平均色差为 8.73,最大色差为 16.49;对 Huawei matepad pro 的预测平均色差为 5.11,最大色差为 12.87。表明 GOG 模型对 ipad 和 ipad pro 的预测精度基本满足颜色复制的要求,对 Huawei matepad 与 Huawei matepad pro 的预测精度不够理想。

2.2 多项式修正模型

本文通过建立多项式修正模型<sup>[13]</sup>对 GOG 模型的预测结果进行修正,具体方法是以 GOG 模型进行预测得到三刺激值初值,计算真实值与预测初值之间的三刺激值差值,对于第  $j$  个个数据样本,可以通过式(10)来表达三刺激差值  $\Delta XYZ_j$  与驱动值之间的变换:

$$\Delta XYZ_{j,i} = a_{1,i} + a_{2,i}r_j + a_{3,i}g_j + a_{4,i}b_j + a_{5,i}r_j^2 + a_{6,i}g_j^2 + a_{7,i}b_j^2 + \cdots$$

(10)

其中: $i=1, 2, 3$  分别表示三刺激值差值  $\Delta XYZ_j$  中的  $X, Y, Z$  项; $a_{k,i}$  ( $k=1, 2, 3, \cdots, m$ , 其中  $m$  为多项式的项数)表示  $i$  刺激值对应的多项式系数,对于所有的数据样本,三刺激值差值与驱动值的关系可以用矩阵形式表达为式(11):

$$P = UA$$

(11)

其中: $P$  是所有样本三刺激值预测值和测量值的差值矩阵, $P$  可以表示为式(12); $A$  是多项式系数矩阵,表示为式(13):

$$P = \begin{bmatrix} \Delta XYZ_1 \\ \Delta XYZ_2 \\ \Delta XYZ_3 \\ \vdots \\ \Delta XYZ_n \end{bmatrix}$$

(12)

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1}, a_{1,2}, a_{1,3} \\ a_{2,1}, a_{2,2}, a_{2,3} \\ a_{3,1}, a_{3,2}, a_{3,3} \\ \vdots \\ a_{m,1}, a_{m,2}, a_{m,3} \end{bmatrix}$$

(13)

$U$  是由所有样本的归一化驱动值构成的多项式扩展项矩阵,  $U$  的行向量可以从表 4 中选择。

表 4 不同项数下  $U$  的行向量

项数	$U$ 的行向量
4 项	$[1 \quad r \quad g \quad b]$
7 项	$[1 \quad r \quad g \quad b \quad r^2 \quad g^2 \quad b^2]$
10 项	$[1 \quad r \quad g \quad b \quad r^2 \quad g^2 \quad b^2 \quad rg \quad rb \quad gb]$
11 项	$[1 \quad r \quad g \quad b \quad r^2 \quad g^2 \quad b^2 \quad rg \quad rb \quad gb \quad rgb]$
17 项	$[1 \quad r \quad g \quad b \quad r^2 \quad g^2 \quad b^2 \quad rg \quad rb \quad gb \quad rgb \quad r^2g \quad rg^2 \quad r^2b \quad rb^2 \quad g^2b \quad gb^2]$

通过建模样本的数据获取  $P$  和  $U$  后, 就可以通过最小二乘法计算出多项式系数矩阵  $A$ , 即令式 (14) 达到最小值, 解得式 (15):

$$E = \sum_{j=1}^n (\Delta XYZ_j - A)^2$$

(14)

$$A = (U^T U)^{-1} U^T P$$

(15)

表 5 GOG 模型及多项式修正模型预测色差

特征化模型	ipad		ipad pro		Huawei matepad		Huawei matepad pro	
	平均色差	最大色差	平均色差	最大色差	平均色差	最大色差	平均色差	最大色差
GOG 模型	1.80	5.64	1.49	5.02	8.73	16.49	5.11	12.87
4 项多项式修正	1.51	10.03	1.21	4.02	7.38	18.89	5.76	11.82
7 项多项式修正	1.35	9.54	1.35	3.78	7.41	20.62	4.44	9.70
10 项多项式修正	0.98	6.08	1.25	2.87	5.65	12.18	2.42	6.40
11 项多项式修正	0.91	3.49	1.25	2.87	5.49	10.91	2.43	5.93
17 项多项式修正	0.80	3.43	1.20	3.31	4.78	13.31	1.76	4.81

2.3 特征化模型对纺织品图像三刺激值预测效果评价

本文准备的面料实物图片示例如图 3 所示, 共 42 张不同颜色的单色丝绸(五枚缎纹)的图片来检验 GOG 模型结合 17 项多项式对纺织品图片的三刺激值预测效果。首先将面料图片分别显示在 4 个平板电脑上, 然后用 JETI 测量面料图片在各个平板电脑上显示的真实三刺激值, 再将图片的每个像素点用平板电脑各自的模型参数进行运算, 即读取每个像素的 RGB 带入式(6)–(9), 计算 GOG 模型预测的三刺激值初值, 再将每个像素的 RGB 带入式(11)计算多项式修正模型预测的三刺激值差值, 将预测的三刺激值初值与三刺激值差值相加就得到了图片每个像素点最终的预测三刺激值, 然后计算所有像素点最终的预测三刺激值的平均值, 最后将测量得到的真实三

取驱动值为  $(r, g, b)$  的数据作为多项式修正模型的建模数据, 其中  $r, g, b$  的取值为  $\{0, 64, 128, 192, 255\}$ , 共计  $5 \times 5 \times 5 = 125$  个。记录色块驱动值并用 JETI 测量得到其真实三刺激值, 并进行去黑点处理, 将驱动值代入式(6)–(9)得到对应的预测三刺激值, 并用真实三刺激值减去预测三刺激值得到两者的差值代入式(15), 求得不同项数对应的多项式系数矩阵。通过式(11)计算 2.2 中用于检验的 100 个样本的预测误差值, 再加上 GOG 模型的预测初值就得到了最后的预测值, 将最后的预测值与真实三刺激值根据式(1)转换至 CIELAB 色彩空间, 用 CIE2000 色差公式计算色差。

4 个平板电脑的模型预测色差如表 5 所示。由表 5 可知, 应用多项式修正模型后, 4 个平板电脑的预测误差都有一定程度的改善, 其中 17 项多项式的修正效果最好; 17 项多项式进行修正对 ipad 和 ipad pro 的预测精度提高不大, 但使 GOG 模型对 Huawei matepad pro 的平均预测误差降低到 2 以内, 而对于 Huawei matepad, 经过修正后其精度仍不能满足颜色复制的要求。

刺激值与平均值用式(1)转换至 Lab 色彩空间, 用 CIE2000 色差公式计算两者之间的色差。

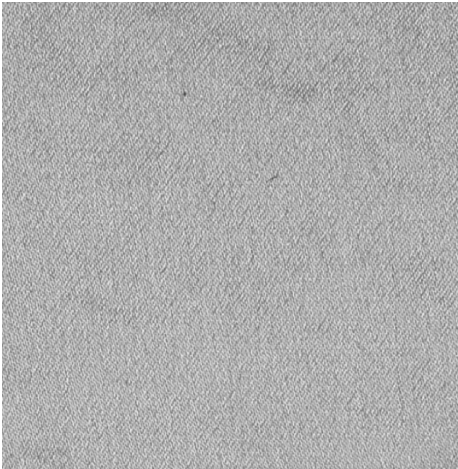


图 3 面料实物图片示例

4 个平板电脑的特征化模型对纺织品图像三刺激值的预测色差如表 6 所示,对于 ipad 与 ipad pro,模型的预测平均色差在 3 以内,是人眼可接受的色差,对于 Huawei matepad pro,模型的预测效果略次于 ipad,而对于 Huawei matepad,模型的预测平均色差为 10,说明 GOG 结合 17 项多项式的模型并不适用于 Huawei matepad;模型对单色纺织品图像三刺激值的预测精度低于纯色块(每个像素点的 RGB 值相同)的三刺激值预测精度,这或许是因为纺织品图像具有自己的某种特点,比如组织纹理使得像素点之间的颜色存在着某种关联,而在进行三刺激值预测时是对每个像素点单独做同样的处理然后求平均值,这样就并没有考虑到这种关联,从而使整体图像的平均预测三刺激值偏离真实三刺激值。

表 6  特征化模型对单色纺织品图像三刺激值预测色差

设备名称	ipad	ipad pro	Huawei matepad	Huawei matepad pro
平均色差	2.89	2.42	10.03	3.89
最大色差	5.12	4.46	23.87	7.36

3  结  论

本文选择 ipad、ipad pro、Huawei matepad 和 Huawei matepa pro 作为研究对象,对这 4 个平板电脑进行呈色性能测试,应用 GOG 模型以及多项式修正模型对这 4 个平板电脑进行色度特征化,并测试了模型精度,主要结论如下:

a)不同的平板电脑呈色性能存在差异,ipad、ipad pro 与 Huawei matepad pro 的各项呈色性能都比较好,而 Huawei matepad 的各项呈色性能与其他三个平板电脑相比较差,而且存在通道间串扰严重的问题。

b)GOG 模型能够适用于通道独立性与色品恒

定性较好的平板电脑的特征化,但是对于通道独立性或色品恒定性较差的平板电脑,用 GOG 模型进行特征化得到的精度较低,所以这种情况下不推荐使用 GOG 模型作为平板电脑的特征化模型。

参考文献:

[1] 马磊. 纺织品测色及供应链颜色集成应用技术开发[J]. 纺织导报, 2015(6): 124.

[2] 贺显伟. 色彩经济时代纺织品创新设计中的色彩策略[J]. 现代纺织技术, 2022, 30(2): 113-117.

[3] 麻祥才, 肖颖, 钱志伟等. 基于视觉特性的 LCD 显示器光谱特征化方法[J]. 包装工程, 2020, 41(5): 223-227.

[4] 聂鹏, 孔玲君. 基于胞元搜索的显示器颜色特征化模型[J]. 包装学报, 2016, 8(1): 63-67.

[5] 王勇, 徐海松, 许东晖. 显示器颜色特性化模型比较研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(6): 1085-1088, 1104.

[6] 姚建伟, 张肖辉, 李长军. 基于奇异值分解的液晶显示器光谱特征化[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 255-262.

[7] 张建青, 刘真, 卢智平等. IPAD IPHONE 显示性能测试研究[J]. 液晶与显示, 2014, 29(1): 40-47.

[8] 刘奔, 林茂海, 李志金等. 智能移动终端显色性能研究[J]. 齐鲁工业大学学报, 2017, 31(5): 42-46.

[9] 司占军, 胡媛, 张显斗. 专业显示器性能测试方法研究[J]. 包装工程, 2012, 33(5): 102-106.

[10] 杨红英, 惠志奎, 杨志晖等. 基于汉风色典的不同色差公式的色差均匀性[J]. 纺织学报, 2020, 41(2): 103-108.

[11] 张肖辉, 李雪萍, 高程, 等. 液晶显示器(LCD)光谱特征化[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(8): 2392-2396.

[12] 郅云, 穆东明. 液晶显示器显示性能的对比分析[J]. 信息记录材料, 2015, 16(3): 22-26, 43.

[13] 宫睿, 徐海松, 张显斗等. 液晶显示器色度特征化的分空间补偿模型[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 297-302.

(责任编辑:张会巍)