

DOI:10.13475/j.fzxb.20220905601

基于色度特征化的乾隆色谱跨设备色彩再现

苏森^{1,2}, 李赛权^{1,2,3}, 杨丽梅^{1,2}, 段怡婷⁴, 鲁佳亮^{1,2}, 周凯丽^{1,2}

(1. 浙江理工大学 纺织科学与工程学院(国际丝绸学院), 浙江 杭州 310018; 2. 浙江理工大学 国际丝绸与丝绸之路研究中心, 浙江 杭州 310018; 3. 浙江理工大学 嵊州创新研究院, 浙江 绍兴 311800; 4. 利兹大学 设计学院, 英国 利兹 LS2 9JT)

摘要 色彩失真现象普遍存在于图像在不同设备之间传输的过程中,为保证纺织文物图像跨设备的色彩真实再现,继而推进博物馆数字化发展,在乾隆色谱染色丝织物的基础上,分别对数码相机和显示屏进行色度特征化,并讨论了不同图像格式、不同训练数据集、多项式不同阶数对相机预测模型精度的影响,同时采用增益-偏置-伽马模型(GOG模型)对显示屏进行色度特征化,然后对乾隆色谱跨设备再现情况进行色差分析以确定最优特征化模型,最后采用中国丝绸博物馆馆藏纺织品文物对建立模型进行检验。结果表明:选择 RAW 格式图像和三阶多项式对相机进行色度特征化处理,并使用采集的纺织品颜色数据集训练模型,模型的精度可达到 2.18(ΔE_{ab}^*) (CIEDE2000 色差值);显示器特征化模型精度为 0.58(ΔE_{ab}^*);乾隆色谱跨设备再现的色差均值为 2.16(ΔE_{ab}^*),真实丝绸文物跨设备再现的色差值为 2.38(ΔE_{ab}^*),表明该特征化模型具有优异的跨设备色彩再现效果。

关键词 乾隆色谱;色度特征化;丝绸文物;跨设备;色彩再现

中图分类号:O 432.3 **文献标志码**:A

当代博物馆依托全景影像等虚拟现实技术实现对文化遗产的数字化保护,在丰富了展览内容和表现形式的同时也提升了观众的互动体验^[1-3]。数字博物馆突破了空间和时间的壁垒,以视频和图像等形式扩大了藏品的展示范围,使馆藏文物能够“云游”世界^[4-5]。然而,博物馆在进行文物图像采集或者线上展示的过程中,由于颜色设备相关性的特点以及没有规范图像采集条件等原因,导致图像在跨设备再现时易出现丢色、偏色等色彩失真现象,影响图像视觉效果。数码相机是数字博物馆图像采集的主流工具之一^[6],而图像则需要通过显示器才能向大众展示。尽管现在市面上的数码相机和显示器基本都自带颜色管理系统,但还是无法避免图像在跨设备再现时的色彩失真现象。丝绸文物是世界遗产的重要组成部分,研究其图像在跨设备过程中的色彩再现情况,对于纺织文物的数字化保存、数字博物馆的建设具有重要的意义。

由于文物的不可再生性和损伤的不可逆性,本文选用自制乾隆色谱作为样品集。乾隆色谱被用于指代乾隆年间 1 份染作档案中记载的颜色,它不仅是乾隆时期的颜色品种,而且是清代鼎盛时期(17~

19 世纪)的整个丝绸染色工艺的概括性复原,体现了整个清代丝绸染色的特点^[7]。目前学者们通过档案的记载对清乾隆年间所采用的染色材料和染色技术进行了一定的研究与探索^[7-9],且为不同媒介间的色彩精确再现而开发的色彩管理系统已成功应用于图形艺术行业^[10],但对丝织物或其它纺织材料的色彩跨媒介再现的研究非常有限,因此本文着重对此方面加以阐述。

数码相机色彩特征化主要有查找表法、多项式拟合法、神经网络模型法等^[11-12]方法,其中对神经网络的训练既困难又耗时,查找表法则需要大量的样本去训练模型才能获得较高的模型精度;而多项式拟合法不仅适用于非线性关系的转换,且只需较少的样本,因此是最好实现且精度较高的方法^[13]。一般的显示器色度特征化模型需要满足 2 个前提条件,即色品恒定性以及通道独立性,由此产生了基于 CRT 物理显色特性的增益-偏置-伽马模型(Gain-offset-Gamma,简称 GOG 模型),同样是只需少量样本就能实现且精度较高的方法^[14-16]。

本文基于乾隆色谱染色丝织物,通过多项式拟合法对相机进行色度特征化,并用相机特征化模型

收稿日期:2022-09-21 修回日期:2023-07-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1521301);浙江省文物保护专项(2021016);国家社科基金项目(20WYSB006)

第一作者:苏森(1980—),女,教授,博士。主要研究方向为丝绸之路与传统丝绸技艺、纺织品设计与数字化。E-mail:sumiao2008@qq.com。

对乾隆色谱预测精度的影响因素,如不同的训练数据集、映射方法和图像格式^[17]进行综合研究。同时,采用 GOG 模型对显示器进行色度特征化校正和精度分析,研究了乾隆色谱跨设备(以相机为输入端,显示屏为输出端)的色彩再现情况,并采用中国丝绸博物馆馆藏的清代丝织品文物进行验证。

1 实验部分

1.1 实验设备

本文研究以相机作为图像输入系统,显示屏作为图像输出系统,使用的仪器包括:1)影像设备。目前市场比较具有代表性的佳能 EOS 5D Mark IV 数码相机、EIZO CG246 显示屏、相机支架;2)测色设备。柯尼卡美能达 CM700d 分光光度计、JETI Spectral 1501(简称 JETI)远程光谱辐射计;3)标准色卡。GretagMacbeth ColorChecker DC 240 色卡(简称 DC 色卡)、标准白卡(平均反射率为 93%);4)采集装置。唯一光源为 2 个 D65,6 500 K 且带 PC 灯罩的 LED 灯,2 个 LED 与灯架底板呈 30°分布于左右两侧,光线呈 60°均匀照射在实验目标表面,具体设置如图 1 所示,相机或 JETI 位于 2 个 LED 灯的水平中心。

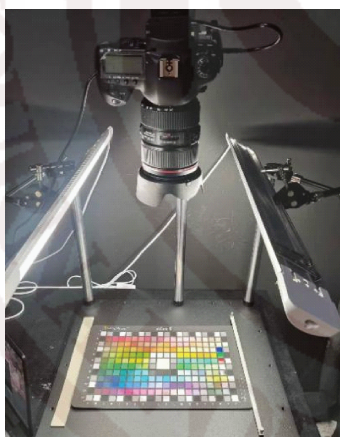


图 1 照明装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of lighting device

将白板置于灯架下,从灯光打开开始用 JETI 对着白板中心每 10 s 测 1 次,其亮度变化如图 2 所示。由图可知,灯光打开 25 min 之后亮度逐渐趋于稳定,所以每次使用前要先预热 25 min。待光源亮度稳定后,测得光源的实际色温为 6 350 K,光源的相对光谱功率分布如图 3 所示。

1.2 染色丝织物准备

乾隆色谱根据染色配方中使用的主要染料类别可分为蓝色系(含 8 个色名),黄色系(含 12 个色名),绿色系(含 8 个色名),紫色系(含 5 个色名),

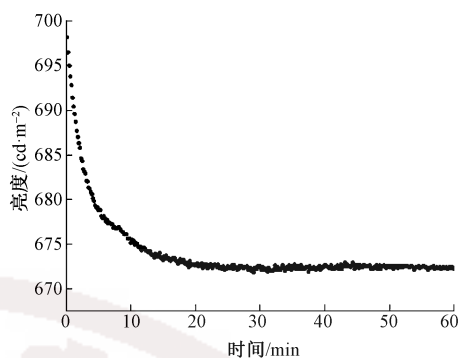


图 2 光源亮度随时间的变化趋势

Fig. 2 Trend of brightness of light source over time

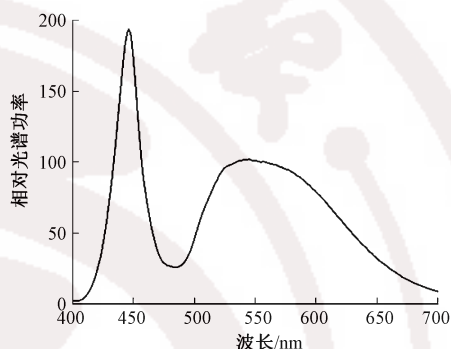


图 3 照明光源的相对光谱功率分布曲线

Fig. 3 Relative spectral power distribution curve of illumination light source

红色系(含 5 个色名)和其它颜色(含灰色、墨色等)^[18]。表 1 示出了清代常见服饰的主要用色,乾隆色谱 42 色涵盖了这些色彩。

表 1 清代常见服饰主要用色

Tab. 1 Main colors of common clothing in Qing dynasty

服饰	主要颜色
袍	宝蓝、酱色、古铜、驼色、墨色(用得较少)
匹料、装饰	深蓝、宝蓝、部分用黄色系和绿色系
褂	红青色、元青色(少部分)
搭襟裙、套袖	蓝色系和黄色系
彩织、彩绣的绣纸、妆花绒	红色、绿色

依据档案记载,选用红花、靛青、苏木、黄檗、大黄、橡碗子、五倍子、黄栌、梔子 9 种植物染料,以及明矾、黑矾、碱、柠檬酸、果糖等染色助剂来进行染制实验。为保证充足的颜色样本量,将 42 个色名分别染 5 块样品,染料用量比的关系呈 40%、70%、100%、130%、160%变化,共计 210 块染色试样。

乾隆色谱染色方法主要包括直接染色法、媒染法、还原染色法。有些颜色使用 1 种染色方法,有些颜色组合多种染色方法,每个颜色所用的染料、用量和染色条件也都不同。本文仅以染红色系中的粉红色 100%用量为例介绍染制过程:准备

5 g 洗净的 100% 桑蚕素绉缎 (面密度为 68.59 g/m²), 选用蚕丝是因为它是当时宫廷面料的主要材料, 而且丝是对大多数天然染料具有较好亲和力的织物材料之一^[19]。再称取 10 g 苏木加 100 g 纯水加热至沸腾, 然后小火煮 30 min, 重复 3 次滤出染液备用。最后将蚕丝放入明矾染液中处理一段时间后放入苏木染液, 在 60 ℃ 温度下浸染 30 min, 洗净阴干。

为方便后续实验操作, 将染好的 210 块素绉缎分别裁出 4.5 cm×4.5 cm 大小的均匀色块粘贴在黑卡纸 (CIE 色彩空间色度值 $L^* = 27.54, a^* = 0.77, b^* = -0.52$) 上以制成色卡, 如图 4 所示。以同色名的 5 个颜色从左至右以颜色由浅至深排成一行, 制成 3 行 5 列的 15 色色卡, 共制成 14 张, 后文统称乾隆色卡。

制备完成后, 利用 CM700d 对乾隆色卡和 DC 色卡进行测色。仪器充分预热后使用, 选择 3 mm 小孔径和不包含镜面反射 (此模式更符合人眼视觉看到的颜色), 测量每个色块 3 个不同位置, 数据取平均值。选择导出 CIELAB 值以及光谱反射率数据 (范围为 400~700 nm, 间隔为 10 nm) 和 Munsell 颜色系统的色度值 (Hue, Value, Chroma), 测色完成后将色卡保存在避光且干燥环境中并防止样品在使用期间变黄和沾污^[20]。

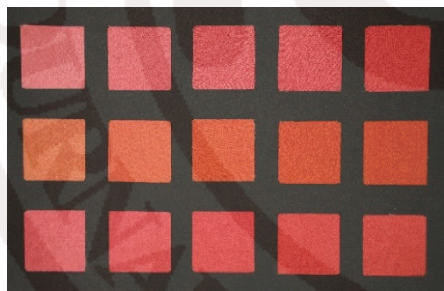


图 4 14 张乾隆色卡之一

Fig. 4 One of 14 Qianlong color charts

1.3 相机色度特征化模型的确定

假设 n 个训练样本的相机响应值为 F , F 包含由样本 RGB 值形成的向量 $f = [r_j, g_j, b_j]$ ($j = 1, 2, \dots, n$), 其对应的三刺激值为 M , 则三刺激值与响应值之间的映射关系可用式 (1) 表示:

$$M = CF \quad (1)$$

其中转换矩阵 C 可通过最小二乘法确定, 如式 (2) (即线性色度特征化模型) 所示。

$$C = (F^T F)^{-1} F^T H \quad (2)$$

式中: F^T 为相机响应值 F 的转置矩阵; $(F^T F)^{-1}$ 为矩阵 $(F^T F)$ 的逆矩阵; H 为由每个样本 XYZ 值构成的一个 $n \times 3$ 矩阵。Hong 等^[21] 提出了多项式色度

特征化模型 (polynomial regression, 下文简称 PR), 通过引入由 RGB 值交叉构成的多项式项, 更加准确地拟合了相机响应值与三刺激值之间的非线性映射关系。由 RGB 值的不同组合可形成不同的多项式, 如一阶 4 项 (见式 (3))、二阶 11 项 (见式 (4))、三阶 20 项 (见式 (5)) 多项式, 向量 f_j 可扩展为含有相应项数元素的向量, 即

$$f_j^4 = [r, g, b, 1] \quad (3)$$

$$f_j^{11} = [r, g, b, rg, rb, gb, r^2, g^2, b^2, 1] \quad (4)$$

$$f_j^{20} = [r, g, b, rg, rb, gb, r^2, g^2, b^2, \dots, r^3, g^3, b^3, 1] \quad (5)$$

此时, 采用 n 个样本的多项式向量 f_j 重新构成响应值矩阵 F , 利用式 (2) 可再次计算转换矩阵 C , 得到多项式色度特征化模型。

1.3.1 图像格式

所用的佳能相机可获取的照片格式有 JPG 和 RAW 2 种, 用于建模效果比较。JPG 格式是经过相机内置的 ISP 芯片对图像进行处理, 而 RAW 格式则是由感光元件直接输出的结果, 并未经过图像处理步骤, 更能表征“原始”的照明场景。为对比 2 种图像格式对所建模型精度的影响, 在图像采集时相机设置为 RAW 和 JPG 存储方式。在暗室环境下进行图像采集, 将色卡置于灯架底板中心并与相机镜头之间的垂直距离为 60 cm。将相机的其它参数固定, 详细设置如表 2 所示。

表 2 相机各参数设置

Tab. 2 Camera parameters settings

参数	设置	参数	设置
色彩空间	sRGB	光圈值	5.6
焦距/mm	50	纵横比	3:2
对焦方式	AF	分辨率/ppi	6 720×4 480
存储方式	RAW, JPG	拍摄模式	手动档
曝光时间/s	1/80	白平衡/K	6 500
闪光灯	关闭		

1.3.2 训练数据集和测试数据集

采用 DC 色卡 232 个色块 (剔除了与织物色彩特性不同的 8 个高光泽彩色块) 和乾隆色卡 210 个色块的测量数据和图像数据为训练数据集。为检验所训练模型对蚕丝织物的预测效果, DC 色卡和乾隆色卡也作为测试数据集, 具体设置如表 3 所示。测量数据指的是先用分光光度计测量的每个色块光谱反射率, 后使用 CIE1964 标准色度观察者的光谱三刺激值数据和测得的照明光源 SPD 计算每个色块相应的 CIE XYZ 三刺激值; 图像数据指的是经相机获取的每个色块图像中间位置的平均 RGB 值。

表 3 训练和测试数据集

Tab. 3 Training dataset and testing dataset

训练数据集	测试数据集
DC 标准色卡	DC 标准色卡
DC 标准色卡	乾隆色卡
乾隆色卡	乾隆色卡

1.3.3 多项式阶数

采用多项式回归 (PR) 映射方法将图像数据 RGB 值转换为 CIE XYZ 三刺激值。实际上多项式模型的不同项及项数对模型的颜色预测精度有较大影响,应根据实际需求选择适合的项及项数。理论上所选多项式的阶数越高,预测越准确,但是四阶以上多项式的运行成本较大,故本研究以一阶 4 项、二阶 11 项和三阶 20 项的多项式来确定最适合乾隆色谱的高精度模型。

1.4 显示器色度特征化模型的确定

由于要同时在显示器上显示多个色块,且整个实验过程需要一定的时间,所以显示器需具备良好的空间均匀性和时间稳定性。固定 EIZO 显示器的参数设置,详细设置如表 4 所示。

表 4 EIZO 显示器参数设置

Tab. 4 EIZO display parameters settings

参数	设置	参数	设置
亮度/($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)	120	节能模式	关
色温/K	6 500	模式	标准
伽马	2.2	色彩空间	sRGB

对显示器的时间稳定性进行测试。待显示器开机 1 h 稳定后,用 JETI 测量显示器显示的纯白色块的 CIE XYZ 值,每隔 1 h 再次测量,测量 5 次。计算得平均色差为 $0.17(\Delta E_{ab}^*)$,其值足够低,说明满足时间稳定性。

对显示器的空间均匀性进行测试。将显示器划分为 9 个相同的区域,然后用 JETI 分别对 9 个区域进行颜色测量,并计算周围 8 个区域与中心区域的平均值,测量结果如表 5 所示。可以看出,设备的空间均匀性较好。

表 5 显示设备空间均匀性色差

Tab. 5 Display device space uniformity color difference

颜色	平均色差(ΔE_{ab}^*)
白	0.42
灰	0.56
红	0.47
绿	0.66
蓝	0.51

对显示器的通道独立性进行测试,一般以灰通道的输出值与红、绿、蓝单通道的输出值之和的色差来衡量。用 JETI 测量驱动值为 (D, D, D) 的灰通

道的输出三刺激值和驱动值为 ($D, 0, 0$)、($0, D, 0$)、($0, 0, D$) 的红、绿、蓝单通道输出三刺激值,其中 D 的取值范围为 $0\sim 255$,以 15 为间隔,最后计算灰通道的输出值与红绿蓝单通道的输出值之和的色差。可得平均色差为 $0.68(\Delta E_{ab}^*)$,最大色差为 $1.76(\Delta E_{ab}^*)$,说明 EIZO CG26 显示屏的通道独立性较好。

最后对显示器的基元恒定性进行测试,结果如图 5 所示。当红、绿、蓝单通道的驱动值发生变化时,EIZO CG26 显示器的 3 个单通道色品坐标 u', v' 变化较小,说明该显示设备的基元恒定性较好。

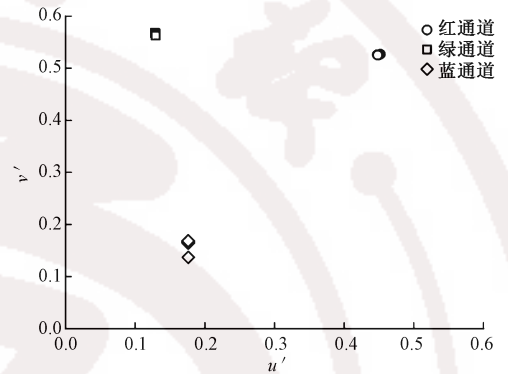


图 5 3 个单通道色品坐标

Fig. 5 Three single channel color coordinates

在显示器满足基元恒定性以及通道独立性的基础上,本文采用 GOG 模型对其进行色度特征化。采用纯红、绿、蓝色块和驱动值为 (D, D, D) (其中 D 的取值范围为 $0\sim 255$,以 15 为间隔) 的一系列灰色块作为 GOG 模型参数拟合的训练数据集。用随机生成的 100 个乾隆色卡色块作为测试数据集,最后通过计算模型预测值与仪器测量值的平均色差 ΔE_{ab}^* 来评估模型的精度。

1.5 乾隆色谱跨设备再现评估

本研究以相机作为图像输入系统,显示屏作为图像输出系统,通过佳能相机获得的图像先经过相机特征化模型处理,然后再通过显示器特征化模型逆处理,最终显示在 EIZO 显示屏上。通过计算每个经特征化模型处理后的图像色块与实物的色差值 ΔE_{ab}^* 以评估乾隆色谱跨设备的色彩再现情况。相机参数和拍照条件以及显示屏参数如表 2、4 所示。

2 实验结果

2.1 乾隆色谱色域

采集乾隆色卡的 210 个色块颜色信息和图像信息,其在孟塞尔颜色系统中色调 (HUE) 分布如图 6 所示。乾隆色谱在蓝调 (B) 和蓝绿调 (BG) 没有分

布,这可能是由于靛蓝是本研究中选择的唯一蓝色天然染料,而较浓的染料浴可能会使靛蓝染色样品偏向紫色调^[22]。

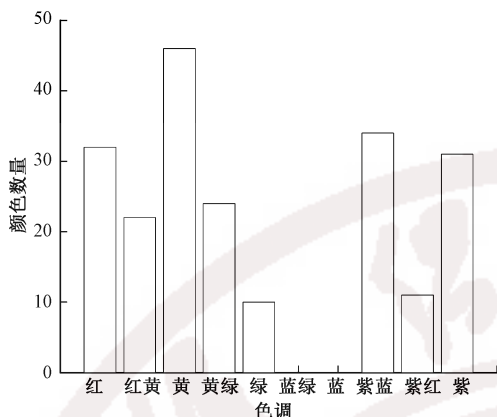


图 6 色调分布图

Fig. 6 Tone distribution diagram

乾隆色卡 210 色彩数据在 $L^* a^* b^*$ 色彩空间的分布如图 7 所示。由图可见:210 个样品的明度值范围在 17.85~78.13 之间;黄色系在 22.89~76.67 之间,且其中多数的黄色样品明度值介于 60~70 之间,明度中等偏上;红色系分布于 50~78 之间;其余色系大致分布在 15~50 之间。

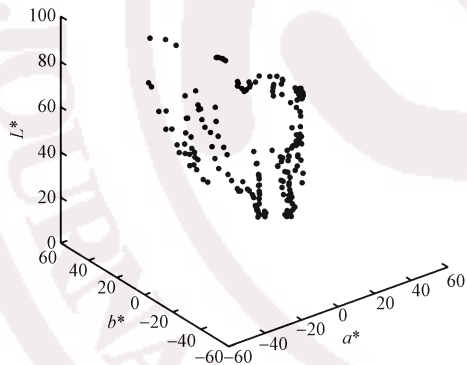


图 7 乾隆色卡 210 色在 $L^* a^* b^*$ 色彩空间的分布

Fig. 7 Distribution of 210 colors in $L^* a^* b^*$ color space of Qianlong palette

乾隆色卡 210 色彩数据在 $a^* - b^*$ 平面分布如图 8 所示。可见:它们在 4 个象限均有分布,且在第一象限分布比较广, a^* 和 b^* 值超过 50;在第二象限, a^* 值处于 $(-20, 0)$ 区间,且在色相角为 $(152^\circ, -135^\circ)$ 区间没有分布,绿色为低彩度的绿;在第三、四象限, b^* 值处于 $(-20^\circ, 0^\circ)$ 区间,且在色相角为 $(-122^\circ, 0^\circ)$ 区间没有分布,蓝色为低彩度的蓝。这些颜色数据生成了本研究获得的乾隆色谱染色织物的近似色域。

2.2 相机模型精度分析

基于每个具有已知 CIE XYZ 三刺激值的数据

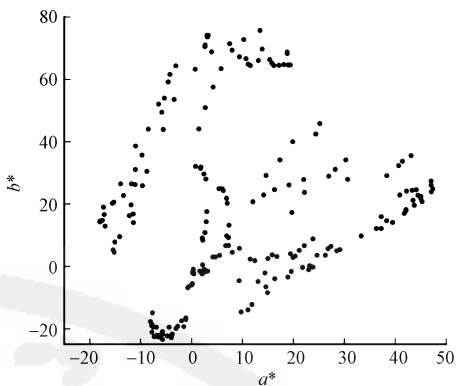


图 8 乾隆色卡 210 色在 $a^* - b^*$ 坐标系的分布

Fig. 8 Distribution of Qianlong palette with 210 colors in $a^* - b^*$ diagram

集,分别用 2 种图像格式(RAW 格式和 JPG 格式)、2 个训练数据集(DC 色卡和乾隆色卡)和 3 种数学映射方法(一阶、二阶、三阶多项式)建立相机预测模型,将每个模型应用于乾隆色卡图像预测输出,则图像数据转换为相应的 CIE $X_1 Y_1 Z_1$ 值,将三刺激值转换至 CIELAB 空间,在 CIELAB 空间里使用仪器测量值与测试颜色的相应预测值之间的平均色差 ΔE_{ab}^* 量化颜色以表征预测精度。

首先计算了使用不同图像格式以及不同训练数据集和测试数据集建模的色差(以三阶为例),结果如表 6 所示。相较于 JPG 格式图像,RAW 格式图像具有更高的建模精度,这可能是由于 JPG 格式图像在数字信号响应和光强之间具有复杂的非线性幂律关系,因此在输入和输出向量之间找到最佳映射较为困难^[23]。由此建议将 RAW 格式图像数据作为模型预测的相机数字信号。

表 6 不同训练数据集和预测数据集的建模结果

Tab. 6 Modeling results of different training

datasets and prediction datasets

数据集类型		平均色差 (ΔE_{ab}^*)	
训练数据集	预测数据集	JPG 格式	RAW 格式
DC 色卡	乾隆色卡	3.31	1.30
DC 色卡	乾隆色卡	8.83	6.68
乾隆色卡	乾隆色卡	4.20	3.20

用 2 种色卡本身数据作为训练数据集建立模型卡预测色卡本身色彩,所建立的模型精度均较高,但当用 DC 色卡作为训练数据集预测乾隆色卡的颜色时,无论是 RAW 格式还是 JPG 格式,平均色差都超过 6 (ΔE_{ab}^*)。可知:DC 标准色卡应用面虽广,但其不是从图像预测纺织品色彩的最合适的训练数据集;用乾隆色卡数据集训练特征化模型会比较好,因为采集的训练数据集涵盖了乾隆色卡色彩。为实现更准确的织物颜色预测效果,真实织物颜色数据是

首选的训练数据集。

以乾隆色卡颜色数据和 RAW 格式图像数据为训练和测试数据集,对比各项式建模的精度结果发现,以一阶多项式建模的精度为 $4.15 (\Delta E_{ab}^*)$,以二阶多项式建模的精度为 $3.86 (\Delta E_{ab}^*)$,以三阶多项式建模的精度为 $3.20 (\Delta E_{ab}^*)$ 。可见,在保持其它条件一致时,三阶多项式模型预测精度最高,其次是二阶和一阶多项式。由此可知,在映射方法方面,高阶多项式模型比低阶模型在相机颜色特征预测精度方面表现更好。

为进一步验证模型对乾隆色谱的预测效果,将乾隆色卡色彩按顺序编号,选择乾隆色卡颜色数据的不同子集作为训练和测试数据集,以 RAW 格式图像和三阶多项式建立模型,结果如表 7 所示。

表 7 不同乾隆色卡数据子集建模结果

Tab. 7 Different Qianlong palette data subset modeling results

训练数据集	测试数据集	平均色差 (ΔE_{ab}^*)
乾隆色卡 (210)	乾隆色卡 (210)	3.20
乾隆色卡 (105, $2n-1$)	乾隆色卡 (105, $2n$)	2.18
乾隆色卡 (106~210)	乾隆色卡 (1~105)	43.60

注: $n=1, 2, \dots, 105$; $2n$ 和 $2n-1$ 分别代表乾隆色卡的单数和双数编号。

选择乾隆色谱色域内均匀的训练数据集和测试数据集,相机模型的预测精度最高,达到 $2.18 (\Delta E_{ab}^*)$ 。由此可知,用相近色预测,建模精度会大大提高。在以后用于预测纺织文物的色度特征化模型研究中,通过选择相同材制、同种规格的织物,用于染相近色并采集其颜色数据作为建模训练数据集,能得到较好的预测精度。同时,同种材质、同种规格的织物,其光泽度、反射率比较接近,所以采集到的颜色数据会更加准确,预测效果也会更好。

综上所述,用真实织物颜色数据且色域涵盖乾隆色谱的颜色作为训练数据集,采用 RAW 图像格式,以三阶多项式建模能达到 $2.18 \Delta E_{ab}^*$ 的建模精度,这也是本研究得到的预测精度最高的预测模型。

2.3 显示器色度特征化模型

本文用 100 个随机生成的乾隆色卡色块作为测试集来检验通过训练后的 GOG 模型对蚕丝织物色彩预测的精度。记录 100 个随机生成的乾隆色卡色块的真实三刺激值,再计算通过模型处理后的预测三刺激值,将三刺激值转换至 CIELAB 空间,在 CIELAB 空间里使用仪器测量值与测试颜色的相应预测值之间的平均色差 ΔE_{ab}^* 来量化模型预测精度。

未经过特征化模型处理的平均色差为 $3.58 (\Delta E_{ab}^*)$,经过特征化模型处理后的结果最大

色差为 $2.28 (\Delta E_{ab}^*)$,最小色差为 $0.11 (\Delta E_{ab}^*)$,平均色差为 $0.58 (\Delta E_{ab}^*)$,表明显示器特征化模型的精度足够高,可满足纺织色彩复现的需要。

2.4 乾隆色谱跨设备色彩再现效果分析

经过相机和显示器预测模型处理后的乾隆色谱图像跨设备色彩再现的情况如图 9 所示。可知,乾隆色谱跨设备的色差值均值为 $2.16 (\Delta E_{ab}^*)$,且各色调色差均值都小于 $3 (\Delta E_{ab}^*)$,这说明选用的特征化模型适用于乾隆色谱染色织物图像的色彩预测,且预测效果较好,尤其是绿色调的预测效果最佳,色差值为 $1.48 (\Delta E_{ab}^*)$ 。

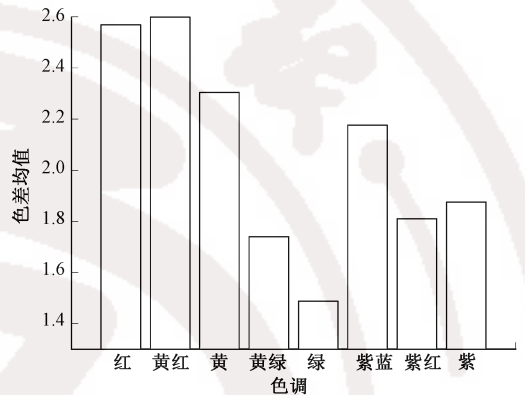


图 9 乾隆色谱各色调跨设备的色差均值

Fig. 9 Mean value of color difference between different hues of Qianlong palette

3 实例验证

为验证所建立的相机和显示器色度特征化模型对真实文物的适用性,以佳能 EOS 5D Mark IV 相机为输入端,EIZO CG246 显示屏为输出端,对中国丝绸博物馆馆藏清代丝织品(清代浅蓝地云缎料)跨设备色彩再现情况进行研究。

首先在 D65 标准光源下用 JETI 非接触式测量测得在文物所标记 3 个点处的光谱反射率,其设置如图 10 所示。使用计算得到的文物的 CIE XYZ 值作为标准参考值然后使用佳能数码相机 EOS 5D Mark IV 对文物进行拍摄,以 RAW 图像格式保存。将 RAW 格式图像的 RGB 值先通过数码相机特征化模型处理转换为三刺激值 CIE $X_1 Y_1 Z_1$,再通过显示器特征化模型逆运算将 CIE $X_1 Y_1 Z_1$ 转换为 $R_1 G_1 B_1$ 并最终显示在 EIZO CG26 显示器上,校正前后的文物图片如图 11 所示。最终测量显示器上经模型处理后所标记点的三刺激值 CIE $X_2 Y_2 Z_2$,将 CIE XYZ 与 CIE $X_2 Y_2 Z_2$ 转换到标准色空间中计算,得到其色差为 $2.38 (\Delta E_{ab}^*)$,表明用真实文物来验证模型对色彩再现的效果良好。

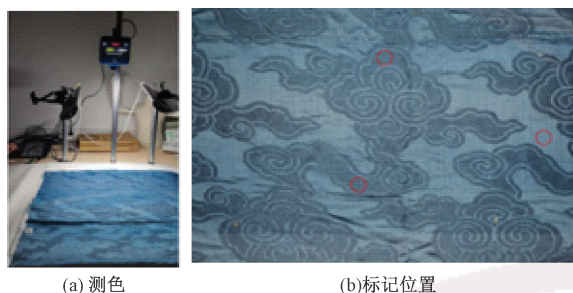


图 10 测取文物的反射率过程

Fig. 10 Process map for measure reflectivity of cultural relics. (a) Color measuring; (b) Mark location



图 11 文物校正前后对比

Fig. 11 Comparison of cultural relics before correction (a) and after correction (b)

4 结 论

为保证纺织文物图像跨设备的色彩真实再现,推进博物馆数字化发展,本文研究分别对数码相机和显示屏进行色度特征化,分析了乾隆色谱跨设备的再现情况,得出了以下结论。

1) 乾隆色谱颜色主要分布在孟塞尔颜色系统的黄调,绿调和紫调颜色较少,在蓝调和蓝绿调没有分布。在 $L^* a^* b^*$ 色彩空间,乾隆色谱的明度值范围为 17.85~78.13,黄色调的明度值在中等偏上,其它色调的明度值在中等偏下。乾隆色谱在 CIELAB 色彩空间 $a^* - b^*$ 平面的 4 个象限都有分布,在第一象限分布比较广,蓝色系和绿色系的彩度较低。

2) 在博物馆图像采集时,建议规范照明光源,其中主要包括选择标准照明体以及相对应的色温,保证照明均匀性;同时规范拍摄条件,选择并固定合适相机参数设置、拍摄距离,选择遥控拍摄避免人为操作带来误差等。

对于相机特征化预测模型,使用同种材料、同规格的纺织品颜色数据集作为训练数据集,采用高阶多项式以及 RAW 格式图像建模,能获得更高的预测精度,从而准确地预测纺织品还原后的色彩。

3) 所建立的相机和显示器色度特征化模型是以均匀色块预测整个图像,故此模型对素织物或少纹样织物具有一定的适用性,而对表面色块不均匀

或者纹样复杂织物适用性欠佳,应考虑改进模型。

本研究为确定明清丝织文物色彩预测模型提供了支持,为古代特定时期纺织文物色彩预测提供了有力参考。

FZXB

参考文献:

- [1] HU Y T. Panoramic image acquisition method of the Tang dynasty based on virtual reality [C]//2021 13th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). Los Alamitos: IEEE Publishers Ltd, 2021: 287-294.
- [2] WANG Y C, CHEN C L, DENG Y Y. Museum-authorization of digital rights: a sustainable and traceable cultural relics exhibition mechanism [J]. Sustainability, 2021, 13(4): 2046.
- [3] SHI Y W. The digital protection of intangible cultural heritage: the construction of digital museum [C]//HAO J F, SUN S Q. 2008 9th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design. NY: IEEE Publishers Ltd, 2008: 1196-1199.
- [4] 苏一飞. 博物馆数字化展示技术与虚拟展示研究[J]. 时代报告(奔流), 2021(8): 70-71.
SU Yifei. Research on museum digital display technology and virtual display [J]. Time Report, 2021(8): 70-71.
- [5] 李淋明. 数字技术在博物馆藏品陈列展示中的应用[J]. 收藏与投资, 2021, 12(11): 55-57.
LI Linming. The application of digital technology in the display of museum collections [J]. Collection & Investment, 2021, 12(11): 55-57.
- [6] 尚玉平, 欧阳盼, 刁常宇, 等. 新疆尼雅墓地出土纺织品文物的数字化信息采集: 以 95MNIM8: 15“五星出东方利中国”织锦护臂为例[J]. 文物, 2020(5): 80-88.
SHANG Yuping, OUYANG Pan, DIAO Changyu, et al. Digitisation of textiles found in the Niya cemetery in Xinjiang: a case study of the five stars rising in the East Benefit China Arm Protector (95MNIM8: 15) [J]. Cultural Relics, 2020(5): 80-88.
- [7] 刘剑, 王业宏, 金鉴梅, 等. 乾隆色谱[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2020: 15-36.
LIU Jian, WANG Yehong, JIN Jianmei, et al. The Qianlong palette [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2020: 15-36.
- [8] 王业宏, 刘剑, 金鉴梅. 从舒妃服装遗物看乾隆中期色彩时尚及染色工艺[J]. 艺术设计研究, 2018(4): 40-45.
WANG Yehong, LIU Jian, JIN Jianmei. A study on color fashion and dyeing techniques in the Middle Qianlong imperial regime according to the costumes of Shu Fei the imperial consort [J]. Art & Design Research, 2018(4): 40-45.
- [9] 金鉴梅, 赵丰, 刘剑, 等. 清宫礼吉服中的黄色及槐子黄枧染色研究[J]. 丝绸, 2021, 58(5): 26-33.
JIN Jianmei, ZHAO Feng, LIU Jian, et al. A study on yellow and dyeing with sophora japonica and cotinus coggyria in the royal dress of Qing dynasty palace [J]. Journal of Silk, 2021, 58(5): 26-33.
- [10] HUNT R W G. The reproduction of colour [M].

- Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004: 163–178.
- [11] CHEUNG T L V. Color camera characterization using artificial networks [C]//WESTLAND S. Proceedings of Color and Imaging Conference. Scottsdale: IEEE Publishers Ltd, 2002: 137–144.
- [12] CHOU Y F, LUO M R, LI C J, et al. Methods for designing characterisation targets for digital cameras[J]. Coloration Technology, 2013, 129(3): 203–213.
- [13] CHEUNG T L V, WESTLAND S, CONNAH D R, et al. A comparative study of the characterization of color cameras by means of neural networks and polynomial transforms [J]. Coloration Technology, 2004 (120): 19–25.
- [14] BERNS R S. Methods for characterizing CRT displays[J]. Displays, 1996, 16(4): 173–182.
- [15] BERNS R S. The science of digitizing paintings for color-accurate image archives: a review [J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2001, 45(4): 305–325.
- [16] LEE C, LEE E, AHN S, et al. Color space conversion via gamut-based color samples of printer [J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2001, 45(5): 427–435.
- [17] HE R, XIAO K D, POINTER M, et al. A novel camera colour characterisation model for the colour measurement of human skin[J]. Electronic Imaging, 2021, 33: 221–222.
- [18] 王业宏, 刘剑, 童永纪. 清代织染局染色方法及色彩[J]. 历史档案, 2011(2): 125–127.
- WANG Yehong, LIU Jian, TONG Yongji. Dyeing methods and related colors used in Qing dynasty dyeing workshops[J]. Historical Archives, 2011(2): 125–127.
- [19] MUSSAK R A M. Natural colorants in textile dyeing[M]//BECHTOLD T. Handbook of natural colorants. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2009: 314–337.
- [20] PARK J. Engineered textile colour standards [J]. Coloration Technology, 2007, 123(1): 1–7.
- [21] HONG G W, LUO M R, AHODES P A. A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modeling [J]. Color Research and Application, 2001, 26(1): 76–84.
- [22] YANG L M. Color analysis of silk fabrics dyed based on "the Qianlong palette" [C]//SU M, DUAN Y T, ZHOU K L, et al. Proceedings 2021 14th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). Scottsdale: IEEE Publishers Ltd, 2021: 69–72.
- [23] HE R L, XIAO K D, POINTER M, et al. Development of an image-based measurement system for human facial skin colour[J]. Color Research and Application, 2022, 47(2): 288–300.

Cross-media reproduction of Qianlong palette color based on characterization model

SU Miao^{1,2}, LI Saiquan^{1,2,3}, YANG Limei^{1,2}, DUAN Yiting⁴,
LU Jialiang^{1,2}, ZHOU Kaili^{1,2}

(1. College of Textile Science and Engineering (International Institute of Silk), Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China; 2. International Center for Silk and Silk Road Studies, Hangzhou, Zhejiang 310018, China; 3. Zhejiang Sci-Tech University Shengzhou Innovation Research Institute, Shaoxing, Zhejiang 311800, China; 4. School of Design, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK)

Abstract

Objective Digital museums break through the barriers of space and time, expanding the range of collections in the form of video and images. However, in the process of museum relic image collection or online display, image reproduction across equipment is prone to color distortion phenomena such as eclipse, color deviation, affecting the visual effect of the image due to the correlation characteristics of color equipment and the lack of standard image collection conditions. In order to solve this problem, the Qianlong palette silk fabric was taken as the research objective to carry out the cross-device color reproduction of textile relic images, aiming to provide support for the establishment of digital museum.

Method On the basis of Qianlong palette silk fabric, the color characterization of digital camera and display screen were carried out respectively. The influences of different image formats, different training data sets and different order of polynomial on the accuracy of camera prediction model were discussed. At the same time, the Gain-Offset-Gamma (GOG) model was used to characterize the chrominance of display screen. Then color difference analysis was carried out to determine the optimal characteristic model of Qianlong chromatography reappearance across equipment. Finally, textile relics collected in the Silk Museum of China were used to test the model.

Results In this study, color information and image information were collected from 210 colors of Qianlong palette. The absence of Qianlong palette in blues (B) and blue-green tones (BG) may be due to the fact that indigo was the only natural blue dye selected in this study, and a stronger dye bath may have biased indigo stained

samples towards purple tones (Fig. 6). The L^* values of all 210 colors ranges from 17.85 to 78.13 (Fig. 7), 210 colors are distributed in four quadrants of the $a^* - b^*$ plane of CIELAB color space, and is widely distributed in the first quadrant (Fig. 8). The Qianlong palette covers different color series. Among all the colors, red and yellow are the main color series, which are the most important color representations of the royal costume in the Qing Dynasty. The color reproduction accuracy for the silk fabrics has been significantly influenced by the training datasets and the mathematical mapping methods and image format. Using both color charts, the RAW image format shows the better predictive accuracy, followed by the JPG format (Tab. 6), and the 3rd polynomial regression shows the best predictive accuracy (3.20 (ΔE_{ab}^*)), followed by the 2nd (3.86 (ΔE_{ab}^*)) and the 1st order polynomial regression (4.15 (ΔE_{ab}^*)). Finally, the RAW image and third-order polynomial were selected to characterize the chrominance of the camera, and the collected textile color data set was used to train the model. The accuracy of the model can reach 2.18 (ΔE_{ab}^*), this is the highest precision camera characterization model in this study. The accuracy of display characterization model is 0.58 (ΔE_{ab}^*). The mean color difference value of Qianlong palette and silk relics is 2.16 (ΔE_{ab}^*), and 2.38 (ΔE_{ab}^*), indicating that this characteristic model has excellent cross-equipment color reproduction effect.

Conclusion The Qianlong palette is mainly distributed in the yellow tones of the Munsell color system, with less color in the green and purple tones, and no distribution in the blues and blue-green tones. In the color space of $L^* a^* b^*$, the brightness value of Qianlong chromatographic ranges from 17.85 to 78.13. The brightness value of yellow tone is above medium, and the brightness value of other tones is below medium. For museum image acquisition, it is suggested to standardize the lighting source, which mainly includes the selection of standard lighting body and corresponding color temperature to ensure the uniformity of lighting. At the same time, standardize shooting conditions: select and fix appropriate camera parameter settings, shooting distance, choose remote control shooting to avoid human operation error. For the characteristic prediction model of camera: the textile color data set of the same material and the same specification is used as the training data set, and the image modeling in high order polynomial and RAW format is adopted to obtain higher prediction accuracy and accurately predict the color after textile reduction.

Keywords Qianlong palette; color characterization; silk cultural relic; cross-media; color reproduction