

基于光谱反射率的智能试妆技术研究与应用

李家乡 高程*

辽宁科技大学计算机与软件工程学院, 辽宁鞍山, 114051;

摘要: 随着科技的快速发展, AR/VR 等技术在生活中得到了广泛应用, 人脸的面部肤色准确再现这一背景下变得尤为重要。一种不受设备和光源所影响的智能试妆技术, 是学术界和商业界均关注的热点课题。本研究基于粉底液的光谱反射率, 通过在 CIELAB 颜色空间引入浓度因子 α , 将粉底液和原始面部肤色的亮度值、彩度值、色调值进行线性组合, 实现准确的智能试妆效果。根据仿真效果可知, 随着 α 值的增加, 粉底液对肤色的覆盖能力逐渐增强, 同时对皮肤纹理的遮盖效果也愈发明显。当 α 接近 1 时, 肤色几乎完全被粉底液的颜色所替代。同时, 本研究也发现在实际生活中, 人们的妆后效果普遍对应妆容浓度 $\alpha=0.4-0.7$ 之间。本研究提出的智能试妆系统具有较好的仿真效果, 可直接应用于皮肤色彩研究的心理物理实验, 不仅具有重要的学术价值, 也展现了巨大的商业潜力。

关键词: 智能试妆; 面部肤色; 光谱反射率; 粉底液

DOI: 10.69979/3041-0673.25.06.002

引言

随着人工智能技术的迅猛发展, 人们在生活中也开始尝试利用虚拟妆容迁移 (Facial Makeup) 技术来改变面部肤色, 以此提升情绪价值。在这一领域, 深度学习、生成式对抗网络 (Generative Adversarial Network, GAN)^[1]和循环一致性对抗网络 (CycleGAN)^[2]等算法得到了广泛应用。这些妆容迁移技术通常在 RGB 图像空间内进行变换, 重建后的面部肤色容易超出生态有效的范围 (即正常肤色的色域)。由于图像的 RGB 值会受到成像设备和光照环境的影响, 导致目前普遍算法很难准确反映出面部肤色的真实光谱反射率信息。因此, 具有较高复杂度的生成式对抗网络等方法很难直接用于皮肤色彩的视觉研究中。本研究则是基于粉底液光谱反射率和妆容浓度因子 α 提出一种覆盖淡妆及浓妆仿真系统, 可广泛应用于智能试妆系统, 减小将化妆品直接涂抹在脸上可能会引起皮肤刺激或不适问题, 提升化妆品试妆的用户体验。同时可以降低商家的试妆成本, 和针对于普通试妆优势的营销策略和品牌店铺效应。

1 智能试妆的基本原理

传统的线上、线下智能试妆技术普遍是基于 RGB 空间实现的像素值替换, 所以容易产生较大的视觉感知差。本文推荐的智能试妆技术则是将获取的人脸图像 RGB 值转换至与设备无关的 CIEXYZ 空间和 CIELAB 空间, 基于独立的色彩空间能够还原颜色的一致性。首先, 本系统

需要将输入的人脸图像 RGB 转换至 YC_bC_r 空间进行图像预处理, 获取人脸面部肤色的像素位置, 即面部肤色模板。

1.1 人脸面部肤色模版自动获取

基于姜等人^[3,4]和肖等人^[5,6]测量的皮肤光谱反射率数据集, 我们能够计算出每组数据对应的 CIEXYZ 值, 计算方法采用李等人提出的 LWL 方法^[7]。接着, 依据 GO G 显示器特征化模型, 将 CIEXYZ 值转换至 RGB 色彩空间。随后, 再根据 Rec. ITU-R BT. 601 推荐^[8]的公式将 RGB 转换到 YC_bC_r 颜色空间。 YC_bC_r 中的 Y 表示亮度, C_b 表示蓝色亮度与 Y 的差值, C_r 表示红色亮度与 Y 的差值, 该空间被广泛应用于皮肤色检测。在 YC_bC_r 色彩空间内, 我们能够依据皮肤光谱反射率数据集确定肤色的 Y 、 C_b 、 C_r 值的分布范围, 并以此作为识别面部肤色的阈值。当然, 在某些细节特征区域可能会有一些噪声干扰, 导致通过 YC_bC_r 空间只能大致确定人脸面部肤色的像素位置。为了减少这些噪声的影响, 本文继续使用中值滤波对 YC_bC_r 空间的模板图像进行处理。最终, 再将处理后的彩色图像转换成二值图像, 获得人脸面部肤色模板, 如图 1 所示。从图 1 可以清晰地看到, 右侧图的白色区域与左侧图的肤色像素相匹配, 表示面部肤色像素: R_1, G_1, B_1 。

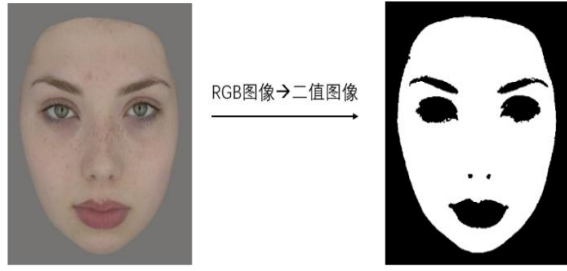


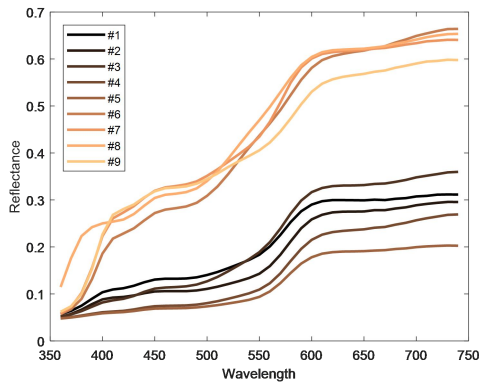
图 1. 图像预处理获取人脸面部肤色模版

1.2 粉底液样本光谱反射率测量

粉底液的光谱反射特性与自然肤色存在差异，并不包含孙等人^[9]所描述的“V”和“W”特征。因此，本研究利用柯尼卡美能达 CM2600d 分光测色仪对 9 种不同色号的粉底液样本进行了测量，其对应的颜色和光谱反射率数据如图 2 所示。具体来说，#1 至#5 号样本颜色较深，通常适用于非洲等地区深色皮肤的族群；而#6 至#9 号样本颜色较浅，适合亚洲女性使用。



(a) 9 种粉底液样本的颜色



(b) 9 种粉底液样本的光谱反射率

图 2. 测试粉底液的种类及其光谱反射率

1.3 粉底液浓度值 α 的引入

为了方便描述粉底液浓度对面部肤色的影响，本文引入浓度因子 α ， α 取值为 0-1， $\alpha=0$ 时表示未涂抹粉底液， $\alpha=1$ 时表示涂抹了较高浓度的粉底液，完全覆盖了面部纹理特征。以深浅适中的粉底液为例，随着试妆浓度 α 的增加，皮肤的初始亮度会逐渐接近粉底液的亮度，直至两者相等 $L_1^* = L_2^*, C_1^* = C_2^*, h_1 = h_2$ 。无论初始肤色的亮度值是低 $L_1^{(Low)}$ 还是高 $L_1^{(High)}$ ，都会逐渐趋近于粉底液的亮度值 L_2^* 。同样地，初始肤色的彩度值和色调值也会随着粉底液涂抹浓度的增加而逐渐接近粉底液的彩度值 C_2^* 和色调值 h_2 。特别地，当涂抹较深的粉底液时 $L_2^* < L_1^{(Low)}$ ，或涂抹较浅的粉底液时 $L_2^* > L_1^{(High)}$ 时，随着涂抹浓度的增加，初始肤色也会逐渐趋近于粉底液的颜色值 L_2^*, C_2^*, h_2 。基于这一特性，本文提出试妆后的肤色 L_3^*, C_3^*, h_3 是初始肤色 L_1^*, C_1^*, h_1 和粉底液颜色 L_2^*, C_2^*, h_2 线性组合，如公式 (1) 所示。

$$\begin{cases} L_3^* = (1-\alpha) \cdot L_1^* + \alpha \cdot L_2^* \\ C_3^* = (1-\alpha) \cdot C_1^* + \alpha \cdot C_2^* \\ h_3 = (1-\alpha) \cdot h_1 + \alpha \cdot h_2 \end{cases} \quad (1)$$

1.4 基于 CIELAB 颜色空间的智能试妆技术原理

基于上述 2.1-2.3，本文推荐的智能试妆技术框架可概括为以下三个步骤：

(1) 先将输入图像的肤色 R_1, G_1, B_1 经过显示器特征化模型转换到与设备无关的 CIEXYZ 空间。再将 CIEXYZ 转换到 CIELAB 均匀颜色空间，计算出图像中所有肤色像素的颜色属性：明度 L_1^* 、彩度 C_1^* 、色调 h_1 值。

(2) 再将目标粉底液的光谱反射率也转换到 CIELAB 均匀颜色空间，计算出粉底液的一组颜色属性：明度 L_2^* 、彩度 C_2^* 、色调 h_2 值。

(3) 考虑粉底液的浓度会对肤色产生影响，我们需要对输入图像（图 3 中 Initial Skin）的明度值 L_1^* ，彩度 C_1^* ，色调值 h_1 与目标粉底液的明度值 L_2^* ，彩度值 C_2^* 和色调值 h_2 分别进行线性组合，变换后的肤色值统一写成 L_3^*, C_3^*, h_3 。最后，再将 L_3^*, C_3^*, h_3 转回至图像空间得到： R_2, G_2, B_2 。

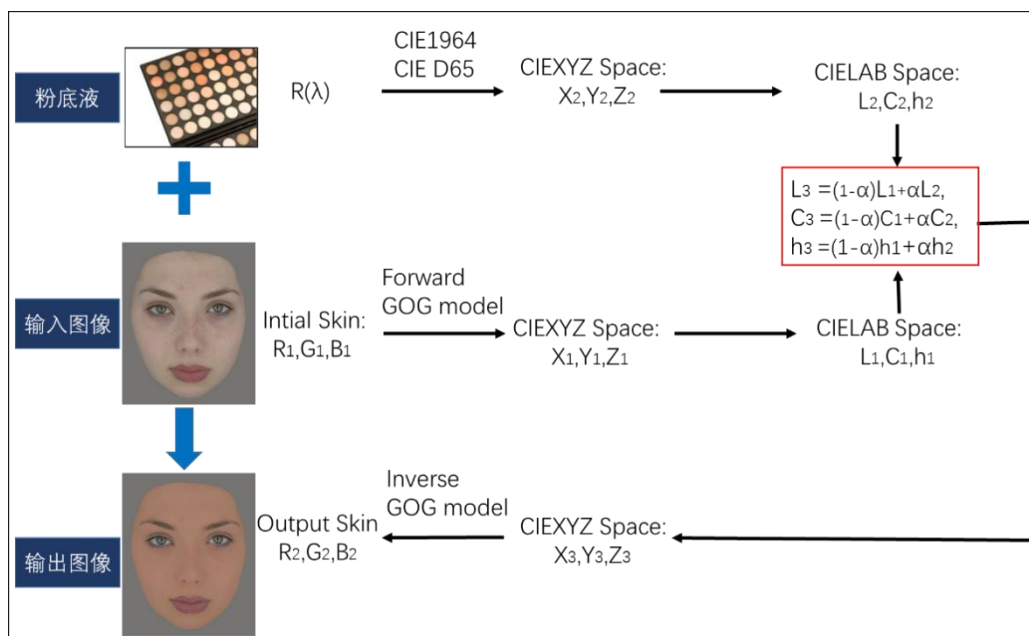


图 3. 基于粉底液光谱反射率的智能试妆技术路线图

2 智能试妆效果

涂抹粉底液引起的肤色变化具有覆盖性质，能够遮挡皮肤原有的纹理特征，这通常被称为遮瑕。人们通过涂抹粉底液来掩盖肤色的不完美之处，并且会根据需要遮盖的特征的严重程度或范围来调整粉底液的用量。仿真效果表明，当 α 接近 1 时，肤色几乎完全被粉底液的颜色所替代；而当 α 较小时，原始肤色和纹理特征得以更多保留。结合测量的光谱反射率和线性组合模型，本

研究利用计算机仿真技术重建了不同浓度 α 下的人脸效果（如图 4 所示）。通过对比不同浓度下的仿真结果，可以直观地观察到粉底液透明度和遮盖度的变化规律。图 4 显示，随着浓度 α 的增加，人脸肤色逐渐接近粉底液本身的颜色，当 $\alpha=1$ 时， $L_3^* = L_2^*, C_3^* = C_2^*, h_3 = h_2$ 。当然，在实际化妆中，即使是浓妆也很少达到 $\alpha=1$ 的极端情况，一般认为 $\alpha=0.7$ 时的效果接近于日常生活中的浓妆效果。

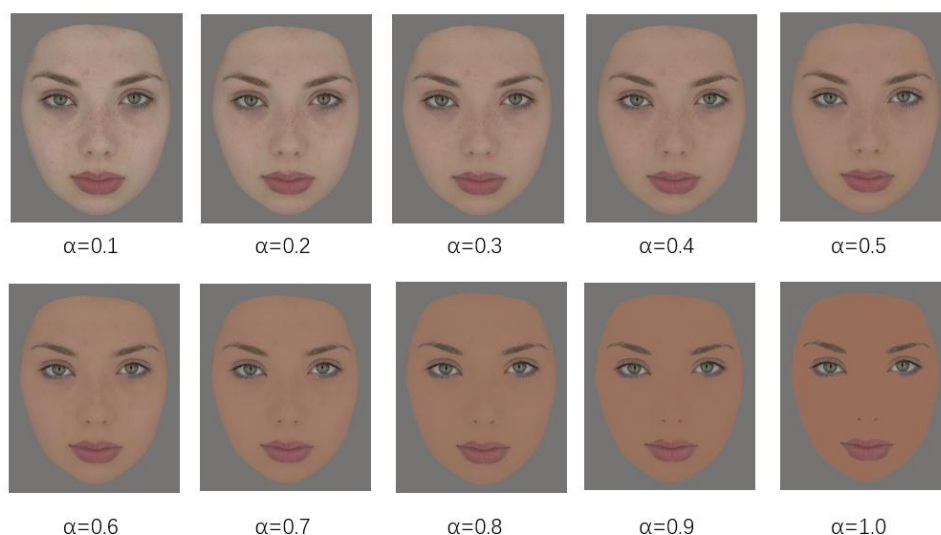


图 4. 采用#5 号粉底液的光谱反射率仿真效果

3 总结

本研究提出了一种基于粉底液光谱反射率和妆容浓度因子 α 的淡妆及浓妆仿真系统。通过分析粉底

液的覆盖特性，我们总结出了初始肤色与粉底液颜色属性线性组合的肤色重建理论。以#5 号粉底液样本为例，仿真出不同浓度因子下的妆后效果，结果表明

随着妆容浓度的增加,面部肤色逐渐接近粉底液颜色 $L_3^* = L_2^*, C_3^* = C_2^*, h_3 = h_2$ 。同时,我们发现在实际生活中, #5 号粉底液很少达到 $\alpha = 1$ 的极端浓度,一般妆后效果在 $\alpha = 0.4-0.7$ 之间。通过对比 9 种不同色号的粉底液,本研究揭示了浅色系粉底液 (#6 至 #9) 在实际应用中涂抹浓度较低即可达到理想效果。本研究提出的智能试妆系统仿真结果具有高真实度,可直接应用于皮肤色彩研究的心理物理实验,不仅具有重要的学术价值,也展现了巨大的商业潜力。

参考文献

- [1]Chen Y, Xie J, Xue J, et al. A robust transformer GAN for unpaired data makeup transfer [J]. Concurrency and Computation Practice and Experience, 2023, 36(9): e7994.
- [2]Zhu X, Cao X Y, Wang L, et al. DCCMF-GAN: double cycle consistently constrained multi-feature discrimination GAN for makeup transfer[J]. Multimedia Tools and Applications, 2023, 83(15):1-14.
- [3]Jiang L, Wang H, Zhang X H, et al. Characterizing Skin Colour before and after the 100-Meter Sprinting[J]. Color Research & Application, 2021,46(6): 1255-1264 .
- [4]Jiang L, Wang H, Gao C, et al. Skin Colour Measurements Before and After Two Weeks of Military Training[J]. Vision Research, 2022, 192: 107976 .
- [5]Xiao K D, Liao N F, Zardawi F, et al. Investigation of Chinese skin colour and appearance for skin colour reproduction[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(8): 74-78.
- [6]Xiao K D, Yates J M, Zardawi F, et al. Characterising the variations in ethnic skin colours: a new calibrated data base for human skin [J]. Skin Research and Technology, 2017, 23(1): 21-29.
- [7]郝铁鑫,李林璐,李长军.最小二乘加权表法计算三刺激值[J]. 数字印刷, 2020, 205(02):108-114.
- [8]Rec. ITU-R BT.601-5, Studio Encoding Parameters of Digital Television for Standard 4:3 and Wide-screen 16:9 Aspect Ratios, (1982-1986-1990-1992-1994-1995), Section 3.5.
- [9]Sun M, Gao C, Li C J. W and V shape features based on measured skin spectral reflectance [J]. Color Research & Application, 2024, 50(1): 36-47.

基金项目: 本论文由辽宁科技大学大学生创新创业训练计划项目经费支持。