

基于非接触式漫反射光谱的人体肤色检测研究

李嘉欣, 任玉, 蔡红星, 王婷婷, 花扬扬, 周建伟, 李栋梁

长春理工大学, 物理学院, 吉林省光谱探测科学与技术重点实验室, 吉林 长春

收稿日期: 2024年4月1日; 录用日期: 2024年5月17日; 发布日期: 2024年5月28日

摘要

当前有许多肤色检测技术出现, 但在环境光变化的情况下很难检测出肤色。为了准确的检测肤色, 本文提出了一种基于非接触式漫反射光谱的肤色检测方法, 利用非接触式测量装置采集人体皮肤的漫反射光谱数据并将其作为测试样本, 以采集的标准色卡的皮肤色号作为参考样本, 随后建立支持向量机分类模型训练测试样本和参考样本, 为测试样本定标色号, 最后模型定标准确率达到了93.5%。结果表明, 基于非接触式漫反射光谱的人体肤色检测, 能够极大地提高肤色检测的准确性。

关键词

肤色检测, 漫反射光谱, 非接触测量, 支持向量机

Research on Human Skin Color Detection Based on Non-Contact Diffuse Reflectance Spectroscopy

Jiaxin Li, Yu Ren, Hongxing Cai, Tingting Wang, Yangyang Hua, Jianwei Zhou, Douliang Li

Key Laboratory of Jilin Province for Spectral Detection Science and Technology, School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Apr. 1st, 2024; accepted: May 17th, 2024; published: May 28th, 2024

Abstract

At present, there are many skin color detection technologies, but it is difficult to detect skin color when the ambient light changes. In order to accurately detect skin color, a method of skin color detection based on non-contact diffuse reflection spectrum was proposed. Using a non-contact measuring device to collect the diffuse reflection spectrum data of human skin and use it as a test

sample, with the color number of the standard color card collected as the reference sample, then support vector machine classification model was established to train test samples and reference samples, and the color number of test samples was calibrated. Finally, the accuracy of model calibration reached 93.5%. The results show that the detection of human skin color based on non-contact diffuse reflection spectrum can greatly improve the accuracy of skin color detection.

Keywords

Skin Color Detection, Diffuse Reflection Spectrum, Non-Contact Measurement, Support Vector Machine

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

肤色是人体的一个重要特征,其变化能够反映皮肤的健康状况,所以肤色检测一直以来都是医学美容学的研究热点[1] [2]。对肤色的检测主要有两种方法,一种是基于统计的肤色检测法[3],主要是在图像中选取对应于人体肤色像素的过程。Chai [4]采用 YCbCr 色彩空间的 Cb-Cr 平面,输入颜色像素落入 $Cr = [133; 173]$ 和 $Cb = [77; 127]$ 类似矩形的区域,就认为是属于肤色像素。肤色模型包括静态和动态模型两种,静态模型包括高斯模型[5]、直方图模型[6]等;动态模型包括均值漂移[7]、肤色轨迹白平衡[8]等。但是基于统计的方法在寻找最优空间和各种肤色模型之间如何更好的搭配以及模型规则参数调节是一大难点,并且在环境光发生变化的条件下容易出现高光区或阴影区,使相同的肤色区域分割成不同的区域,导致肤色区域分割失败。另一种方法是基于物理的肤色检测法,其考虑到光波与皮肤之间的相互物理作用以及皮肤的波谱特性,从成像机理上克服光照对肤色的不利影响,从光线与皮肤层结构之间的相互作用入手,进而研究分析皮肤对光的漫反射光谱(Diffuse Reflectance Spectrum, DRS)去实现肤色检测。漫反射光谱作为一种很有前途的非接触无创式[9] [10]测量、分析和表征生物组织的工具,其能够检测各种皮肤病变,被广泛的应用在医疗领域[11] [12] [13] [14];还能定量评估影响肤色的发色团物质,比如黑色素、含氧和脱氧两种形式的血红蛋白[15] [16]以及其他发色团物质。

肤色的变化影响皮肤的光学特性,从而导致皮肤漫反射光谱发生变化,基于皮肤的漫反射光谱或颜色等特征信息可以对皮肤病变进行检测。STAMATAS G.N [17]等对发生红斑和色素沉着等病变皮肤的漫反射光谱进行了检测,获得了与医学临床视觉评估一样的效果;SHELDON F. B [18]等利用一种手持式漫反射光谱成像(DRSi)系统仪器,不仅能基于漫反射光谱去诊断检测皮肤疾病,还能获得皮肤组织的高光谱图像,使得 DRSi 可以成为皮肤癌治疗的工具。但是实际人体皮肤的生理参数复杂,并且以上方法都与皮肤相接触产生压力改变皮肤的原有状态,导致不能准确的描述肤色信息。近年来,研究者们越来越多在光谱学分析中应用机器学习技术[19]来弥补传统光谱分析的不足,所以用蒙特卡罗模拟的方法来实现光在人体组织中的模拟[20] [21]被广泛应用于生物医学领域。ZHENG Junsheng [22]等对不同肤色条件下的新生儿皮肤可见光漫反射光谱进行了研究,使用蒙特卡罗方法模拟了光在不同肤色条件下的传播情况,论证了肤色差异影响了新生儿黄疸检测准确性的一大因素。然而人体皮肤组织结构复杂,皮层与皮层之间分布并不均匀,且预测模型的训练需要大量的时间,虽然蒙特卡罗模拟作为正向模型是生物光子学领域的“黄金标准[23]”,但这些模拟数据是理想条件下的结果,应用于实际测量时结果仍然差强人意。

针对以上问题,本文利用非接触式皮肤漫反射光谱采集装置采集了受试者的手臂以及面部皮肤的漫

反射光谱数据,使用色差仪采集了受试者的皮肤色号,统计了受试者色度学分布范围并探究了色度值 $L^*a^*b^*$ 对于皮肤漫反射光谱与颜色特征的关系。同时将漫反射光谱数据和皮肤色号存储在样本数据库中,最后采用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)分类算法模型对数据库中的漫反射光谱数据以及色号进行训练,实现了对皮肤漫反射光谱数据较高的皮肤色号定标准准确率。该方法为肤色检测在医疗以及美容领域奠定了基础。

2. 基本原理

从生理学的角度讲,人体的皮肤通常可以分为三层结构,表皮、真皮和皮下组织[24]。每一层组织的光传输特性不同。表皮层是皮肤最外部的浅层结构,上面覆盖着已经死亡的角质化细胞,它对光的反射是无规律的。表皮层中主要分布着黑色素,其在可见光波段具有强吸收特性;真皮层位于表皮之下,由纤维、基质和细胞组成,该层有丰富的血管,血管中的血红蛋白在可见光波段也具有强吸收特性,同时该层还含有胆红素,该成分也会在可见光的部分波段具有吸收作用;皮下组织主要吸光物质是水和脂质,这些物质对可见光的吸收较微弱。入射到皮肤表面的光,在表皮层中被黑色素吸收,而在真皮层中则同时发生吸收以及折射,折射光进入皮肤,由皮肤内各组织和细胞吸收和散射。皮肤内的各种细胞元素,如黑色素、血红蛋白、胆红素等决定了光的吸收和散射的情况,未被吸收的散射光重新通过皮肤表面而进入空气中,可以通过光谱仪等设备接收到各个光谱下的反射强度信息来得到皮肤的反射谱线,其物理过程如图1所示。

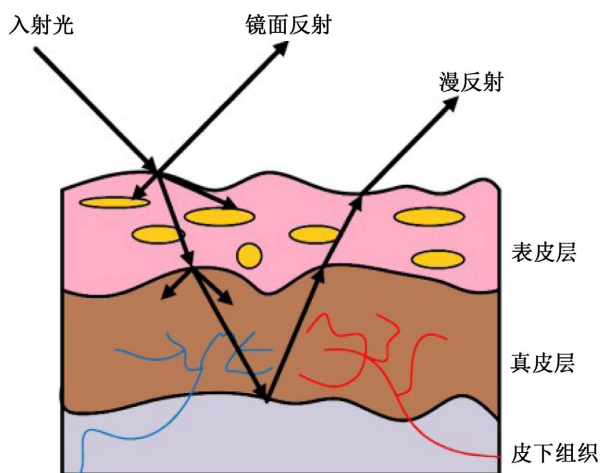


Figure 1. The physical process of light transmission in the skin
图1. 光在皮肤中传输的物理过程

文中以白板的反射强度作为参考,由人体皮肤检测到的反射强度比上白板的反射强度,计算得到人体皮肤的漫反射率光谱。如式(1)。

$$R(\lambda) = I(\lambda) / I_0(\lambda) \quad (1)$$

实验中设 $I_0(\lambda)$ 为测的白板的反射光强, $I(\lambda)$ 为皮肤反射光强, $R(\lambda)$ 为皮肤的漫反射率, λ (400 nm~1000 nm) 表示光谱中不同的波长。

色差仪是一款色彩测量和色差对比工具,其采用 CIEL^{*}a^{*}b^{*} 颜色空间进行测量并计算色差,该空间属于 CIE(国际照明委员会)的一个颜色空间系统[25],是一个表色体系,用于确定某种颜色的数值信息,其中所计算的色差越小,越接近真实肤色。空间中 L^* 代表颜色的亮度($L^* = 0$ 是黑色, $L^* = 100$ 是白色), a^*

是介于红色/品红色和绿色之间的位置(a^* 负值为绿色, 正值为品红或红色), b^* 是黄色与蓝色之间的位置(b^* 负值为蓝色, 正值为黄色)。CIEL^{*}a^{*}b^{*}颜色空间如图 2 所示。

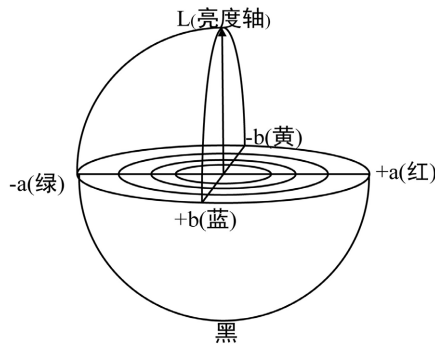


Figure 2. CIEL^{*}a^{*}b^{*} color space display
图 2. CIEL^{*}a^{*}b^{*}空间展示

利用色差仪测量皮肤的 L^* 、 a^* 、 b^* 值减去 pantone 肤色色卡的标准 L^* 、 a^* 、 b^* 值得到 ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* 并以计算色差 ΔE , 如式(2)。

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2)$$

整套 pantone 肤色色卡有 110 个色号, 共分 10 组分别是: 第 1 组: 1Y01 到 1Y14; 第 2 组: 2Y01 到 2Y13; 第 3 组: 3Y01 到 3Y12; 第 4 组: 4Y01 到 4Y11; 第 5 组: 5Y01 到 5Y09; 第 6 组: 1R02 到 1R15; 第 7 组: 2R03 到 2R15; 第 8 组: 3R04 到 3R15; 第 9 组: 4R04 到 4R10; 4R14、4R15; 第 10 组: 5R04 到 5R07。

3. 实验数据采集

实验受试者共 12 名, 并完成一份询问年龄、性别的调研问卷: 年龄为 20~30 岁之间, 男性有 7 名, 女性有 5 名。为了评估皮肤反射率和其他重要表型特征之间的关系, 还调查了受试者的晒黑能力、皮肤白化现象, 这 12 名受试者皮肤都没有病变且都受到不同程度的太阳光照射, 其中有 4 名受试者肤色偏白, 8 名受试者肤色偏黑。

非接触式漫反射光谱主要实验仪器: 溴钨灯(卓立汉光, 型号 LSP-T50, 光源范围 330~2500 nm, 额定功率 50 w), 光谱仪(海洋光学, QE65pro, 光谱范围 185~1100 nm, 光谱分辨率为 0.14~7.7 nm), 聚焦透镜($f = 150 \text{ mm}$), 漫反射标准白板(反射率 $\geq 97\%$)。该实验的装置图如下图 3 所示。

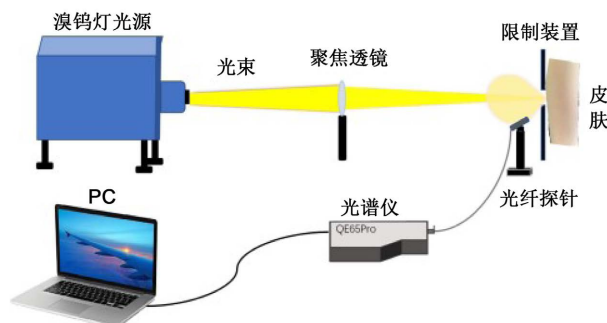


Figure 3. Experimental setup diagram
图 3. 实验装置图

装置如上图 3 所示, 为了避免背景光影响, 此实验是在标准光学暗室中进行。实验中由溴钨灯提供光源射出光束, 然后通过聚焦透镜对光束进行聚焦收束, 最终到达限制装置后的皮肤部位上形成圆斑, 限制装置的作用就是防止受试者人为活动从而影响最终的测量结果。为了消除皮肤表面的镜面反射, 将光纤探头放置在距离皮肤表面 2 cm 处并与水平入射光呈 30°角的方向上接受皮肤反射出承载着皮肤内部信息的光信号, 最终传输到光谱仪中, 经过 SpectraSuite 光谱采集软件将样本的光谱信息保存在计算机中。

实验中先校准色差仪, 进行色号采集, 为了增加稳定性和准确性, 采集分为 5 次, 取色差最小时的色号, 这样更接近人体肤色。随后用标准白板采集了光源的参考光谱, 之后在受试者胳膊及面部上的几个近乎平整的位置采集了漫反射光谱, 分别是左右胳膊的肘部位, 上臂外侧, 下臂内外侧以及额头脸颊部位, 为了获得精确的漫反射光谱, 每个皮肤部位都进行了三次采集并取平均。

4. 结果与分析

4.1. 色号采集结果及漫反射光谱分析

本文统计了采集的所有皮肤色号, 为了更好的运行后续 SVM 分类算法模型, 共提取了 9 个色差范围很小的皮肤色号, 本次研究设置的色差值 ΔE 标志是 $\Delta E \leq 3$, 大于 3 全部剔除, 提取的皮肤色号色差范围如下图 4 箱线图所示。

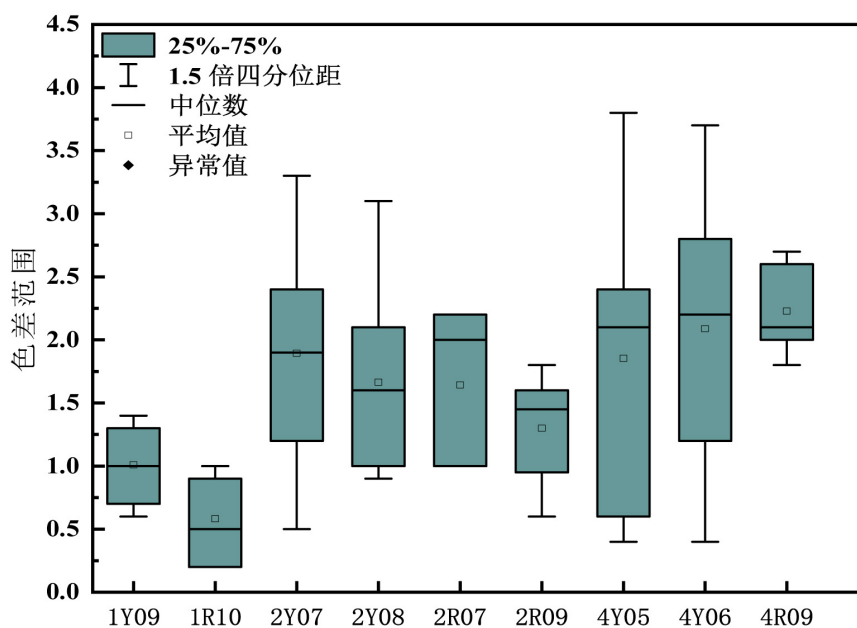


Figure 4. Box diagram of color difference range corresponding to color number

图 4. 色号对应色差范围箱线图

本文建立箱线图是为了更好的反映色差值范围, 上图 4 中 9 个皮肤色号所对应的色差 ΔE 范围, 包括色差最大值以及最小值(“I”形状最上端和最下端分别代表最大值与最小值), 箱体宽窄长度代表数据的波动性差异, 越窄越扁代表数据波动性越小, 可以看到除 4Y05 和 4Y06 两组数据波动性较大之外, 其他皮肤色号对应的色差都很均匀, 且色差没有异常值。本文所测的志愿者都是皮肤中黑色素含量较低的人种, 故肤色相差不是很大。

通过校正色差仪对志愿者的左右胳膊的肘部位, 上臂外侧, 下臂内外侧以及额头、脸颊部位的皮肤采集色号, 结果表明志愿者皮肤部位亮度值 L^* 的分布范围在 53.5~67.1 内, 按照肤色黑白程度把志愿者皮

肤部位分为四级，如下表 1 所示。

Table 1. Skin brightness classification of volunteers
表 1. 志愿者皮肤亮度分级

皮肤亮度分级	L^* 值范围
I (黑)	53.0~57.0
II (偏黑)	57.1~61.0
III (偏白)	61.1~65.0
IV (白)	65.1~68.0

按照表 1，分别从皮肤亮度等级 II (偏黑)和 III (偏白)中各抽取一位志愿者的 5 个皮肤部位色号进行对比，如下表 2 所示。

Table 2. Measure the skin L^* , a^* , b^* values and color numbers of subjects with white and black skin tones
表 2. 测量肤色偏白和偏黑受试者皮肤 L^* 、 a^* 、 b^* 值及色号

皮肤部位	色度值		L^*		a^*		b^*		色差(ΔE)		色号	
	III	II	III	II	III	II	III	II	III	II	III	II
上臂	65.36	62.68	7.39	10.81	13.76	13.34	2.4	1.5	4Y05	2Y07		
肘部	61.74	61.32	8.74	9.97	14.64	13.13	2.3	2.6	4Y06	2Y08		
下臂	62.75	57.78	10.25	12.73	13.31	15.18	2	1.7	2Y07	2Y08		
脸颊	63.32	59.23	8.95	13.27	13.01	12.07	2.4	2.8	4Y06	2R09		
额头	65.87	58.12	8.56	11.46	12.39	13.96	1.8	2.6	4Y05	2Y08		
平均值	63.81	59.83	8.78	11.65	13.42	13.54						

从 CIEL^{*}a^{*}b^{*}颜色空间可知，血红蛋白是影响 a^* 值的主要发色团，但是在实验之前并没有对志愿者的皮肤进行干预，一直保持原有状态。表 2 中 a^* 值不尽相同，原因是由于志愿者不同的皮肤区域真皮层中毛细血管丰富度不同导致的。黑色素是影响肤色亮度 L^* 的主要发色团[26]，表皮中黑色素的含量越多 L^* 值越小。III (偏白)的志愿者的亮度 L^* 值普遍很大，而 II (偏黑)的志愿者亮度 L^* 值都偏小；从表 2 中还可以看到，III (偏白)的志愿者 a^* 平均值小于 II (偏黑)的志愿者，说明 II (偏黑)的人的皮肤中红色的血红蛋白也有一定的贡献；相对于 b^* 值来说，志愿者都是皮肤中黑色素分布较小的人种， b^* 平均值相差不大，没有对肤色造成影响。色差之间的差异没有受到皮肤本身黑白的影响，是由于同一个志愿者不同皮肤部位肤色不均匀导致的。从两个表中看到给 II (偏黑)的志愿者采集的皮肤色号后两位数字相较于 III (偏白)的志愿者的色号后两位数字普遍偏大，采集的皮肤色号与第二节介绍的 pantone 色卡呈现的规律一样。

对 II (偏黑)和 III (偏白)两组志愿者进行采集，利用所测得的数据，根据公式(1)，所求得的两组志愿者的皮肤漫反射率光谱，从两组志愿者中各抽取一名志愿者进行皮肤光谱对比，如下所示。所计算的反射率光谱图如图 5(a)、图 5(b)所示。

影响人体肤色的最主要发色团是黑色素以及血红蛋白，但黑色素比之后者影响更甚。由图 5(a)和图 5(b)可知：III (偏白)的志愿者的皮肤漫反射率普遍高于 II (偏黑)的志愿者的皮肤漫反射率，这是由于 III (偏白)志愿者皮肤表皮黑色素含量低于 II (偏黑)志愿者导致的；并且看到每个人的不同的皮肤位置由于表皮黑色素含量不同表现出肤色不一致，胳膊上臂的位置都偏白一些，额头和肘部都偏黑一些。

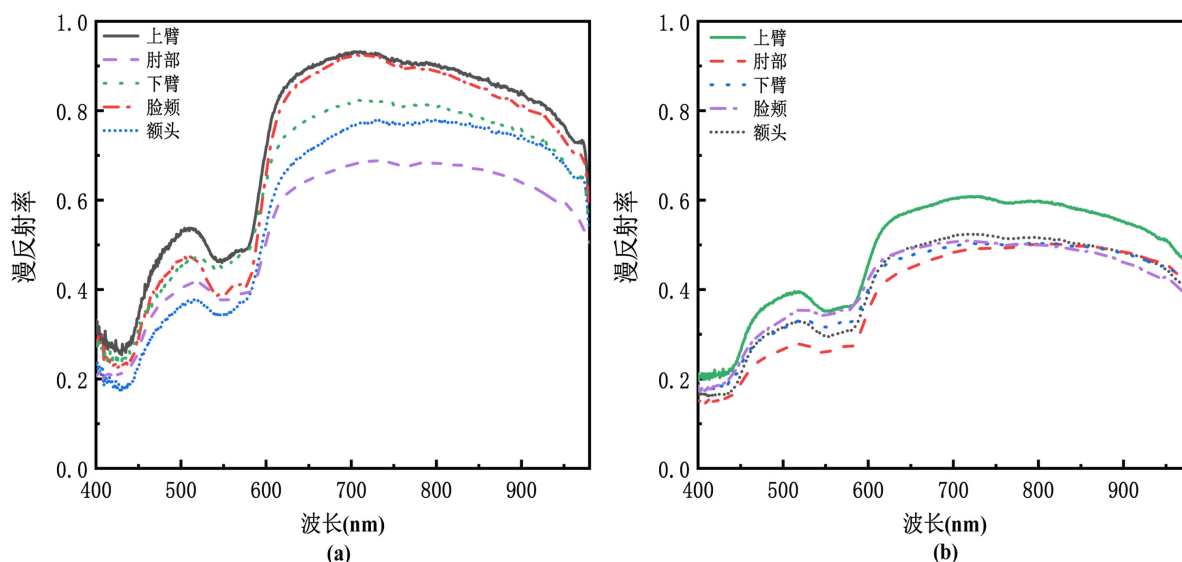


Figure 5. Skin reflectance spectrogram. In figures (a) and (b), the solid line represents the upper arm, the crossed line represents the elbow, the dotted line represents the lower arm, the dotted line represents the cheek, and the short dotted line represents the forehead. (a) Spectral map of skin reflectance of subjects with III pale skin tone; (b) Spectral map of skin reflectance in subjects with II darker skin tone

图 5. 皮肤反射率光谱图, (a)、(b)两图中实线代表上臂, 划线代表肘部, 点线代表下臂, 点划线代表脸颊, 短点线代表额头。(a) III (偏白)受试者的皮肤反射率光谱图。(b) II (偏黑)受试者的皮肤反射率光谱图

同时可以看到漫反射率光谱中都有典型的“W”状吸收带, 吸收峰在 542 nm 和 577 nm [27], 但 II (偏黑)的志愿者一些皮肤部位的“W”状吸收带特征不明显; 在 400 nm 到 450 nm 处谱线存在不稳定锯齿状, 原因是溴钨灯光源在此部分亮度较低并且背景噪声较大导致的, 并且此处呈现波谷是由于有较强的黑色素以及血红蛋白的吸收。在 960 nm 左右有一个小峰, 正是皮肤组织中水分的吸收峰。在波长小于 600 nm 时, 黑色素、血红蛋白的吸收起着关键作用, 由于这两种发色团对光吸收的影响, 使较短波长范围内的总漫反射率很低[28]; 在 600~900 nm 的较长波长下, 黑色素、血红蛋白这两种皮肤发色团物质吸收光总量减少, 导致总漫反射率在这个阶段处于很高的水平。

4.2. 样本数据库建立及 SVM 模型训练结果分析

在开发支持向量机训练模型之前, 需要建立一个样本数据库, 该数据库不仅能够存储实验中采集到的样本数据, 还能更便捷的导入算法模型中运行。在之后的实验研究中会采集到更多的数据样本存储到数据库中, 样本越多算法模型运行的准确率越高。本文所建立提到的样本数据库有两个特点: 首先, 实验前对溴钨灯进行亮度校准, 避免过高或者过低光强对实验结果的干扰, 并在实验中放置一个限制装置防止受试者人为活动影响实验测量结果; 其次, 以标准白板作为参考, 可以由采集到的光谱强度信息直接计算得到人体皮肤漫反射率。所存储的样本主要包括: 受试者的脸颊、额头、左右胳膊部位所采集的漫反射光谱数据以及色号。

支持向量机算法是目前比较流行的机器学习算法之一[29]。本文建立支持向量机训练模型使用 MATLAB2022 版本对其进行编程运行, 将样本数据库导入支持向量机训练模型中进行运行。根据实验数据, SVM 训练模型分类器用的是 fitcecoc 线性分类核函数和 predictFcn 预测函数对输入的测试样本和参考样本进行训练, 通过交叉验证方式来计算分类模型准确度, 本次机器学习用 KFlod 10 来对测试样本和参考样本进行交叉验证, 对测试样本以及参考样本进行训练并计算评分, 最后测试样本的定标准确率由混淆矩阵(Confusion Matrix) [30]评价指标来表达。如图 6 所示。

混淆矩阵

输出类	(1R10)	11 12.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	(1Y09)	0 0.0%	11 12.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	(2R07)	0 0.0%	0 0.0%	7 7.6%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	(2R09)	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	9 9.8%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 1.1%	0 0.0%	90.0% 10.0%
	(2Y07)	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	14 15.2%	1 1.1%	0 0.0%	0 0.0%	1 1.1%	87.5% 12.5%
	(2Y08)	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	12 13.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	(4R09)	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	7 7.6%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	(4Y05)	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 1.1%	0 0.0%	0 0.0%	10 10.9%	2 2.2%	76.9% 23.1%
	(4Y06)	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	5 5.4%	100% 0.0%
			100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	93.3% 6.7%	92.3% 7.7%	100% 0.0%	90.9% 9.1%	62.5% 37.5%
		(1R10)	(1Y09)	(2R07)	(2R09)	(2Y07)	(2Y08)	(4R09)	(4Y05)	(4Y06)	
		目标类									

Figure 6. Confusion matrix evaluation index
图 6. 混淆矩阵评价指标

用混淆矩阵评价指标来验证该模型的可行性。最后测试样本训练的定标准确率达到了 93.5%，证实了本文所研究的方法的可行性及优势。

5. 结论

本论文提出一种利用非接触式皮肤漫反射光谱装置采集人体皮肤的光谱数据与肤色色号相结合的方法实现肤色检测，用 MATLAB2022 编码运行支持向量机分类模型进行训练实现对漫反射光谱数据的色号定标，最后模型的定标准确率为 93.5%。实验结果表明了本文提出的方法不仅避免了因接触皮肤而改变皮肤原有状态对实验结果的影响，还能实现更精准的肤色检测，证实了非接触式漫反射光谱技术对人体肤色的检测识别的可行性。

参考文献

- [1] 陈锻生, 刘政凯. 肤色检测技术综述[J]. 计算机学报, 2006, 29(2): 194-207.
- [2] Munidasa, D., Schlippe, G. and Abeyakirithi, S. (2018) Measurements of Skin Colour. In: Kumarasinghe, P., Ed., *Pigmentary Skin Disorders. Updates in Clinical Dermatology*, Springer, Cham, 55-61. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70419-7_3
- [3] Yang, J., Lu, W. and Waibel, A. (1998) Skin Color Modeling and Adaptation. *Proceedings of the 3rd Asian Conference on Computer Vision*, Hong Kong, 8-10 January 1998, 687-694. https://doi.org/10.1007/3-540-63931-4_278
- [4] Chai, D. and Ngan, K.N. (1998) Locating Facial Region of a Head-and-Shoulders Color Image. *Proceedings of the 3rd International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, Nara, 14-16 April 1998, 124-129.

- [5] Hsu, R.L., Abdel-Mottaleb, M., *et al.* (2002) Face Detection in Color Images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **24**, 696-706. <https://doi.org/10.1109/34.1000242>
- [6] Fang, J.Z. and Qiu, G.P. (2003) A Colourhistogram Based Approach to Human Face Detection. *Proceedings of International Conference on Visual Information Engineering*, Surrey, 7-9 July 2003, 133-136.
- [7] Comaniciu, D. and Meer, P. (2000) Real-Time Tracking of Nonrigid Objects Using Mean Shift. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, South Carolina, 13-15 June 2000, 142-149.
- [8] Andersen, H. and Granum, E. (1999) Skin Colour Detection under Changing Lighting Condition. *Proceedings of the 7th Symposium on Intelligent Robotics Systems*, Coimbra, July 1999, 187-195.
- [9] 吴鹏, 倪敬书, 洪海鸥, 等. 基于荧光光谱法的皮肤胆固醇快速无创检测技术[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 98-106.
- [10] 马雪洁, 刘蓉, 李晨曦, 等. 高光谱在体组织成像方法的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(8): 080002.
- [11] Zhu, C.F., Palmer, G.M., Breslin, T.M., *et al.* (2008) Diagnosis of Breast Cancer Using Fluorescence and Diffuse Reflectance Spectroscopy: A Monte-Carlo-Model-Based Approach. *Journal of Biomedical Optics*, **13**, Article ID: 034015. <https://doi.org/10.1117/1.2931078>
- [12] Karthik, V., Kevin, C., Daniel, K., *et al.* (2011) Diffuse Reflection Spectroscopy (DRS) Systems for Estimating Tissue Optical Properties. *Applied Spectroscopy*, **65**, 206-215. <https://doi.org/10.1366/10-06052>
- [13] Jarich, W.S., Daniel, J.E., Houke, M.K., *et al.* (2013) Improved Identification of Peripheral Lung Tumors by Using Diffuse Reflectance and Fluorescence Spectroscopy. *Lung Cancer*, **80**, 165-171. <https://doi.org/10.1016/j.lungcan.2013.01.016>
- [14] Eladio, R.D., Danielle, M., Holly, C., *et al.* (2019) Optical Spectroscopy as a Method for Skin Cancer Risk Assessment. *Photochemistry and Photobiology*, **95**, 1441-1445. <https://doi.org/10.1111/php.13140>
- [15] Friedland, S., Benaron, D., Parachikov, I., *et al.* (2003) Measurement of Mucosal Capillary Hemoglobin Oxygen Saturation in the Colon by Reflectance Spectrophotometry. *Gastrointestinal Endoscopy*, **57**, 492-497. <https://doi.org/10.1067/mge.2003.162>
- [16] Kenneth, A., Schenkman and Yan, S.L. (2000) Propofol Impairment of Mitochondrial Respiration in Isolated Perfused Guinea Pig Hearts Determined by Reflectance Spectroscopy. *Critical Care Medicine*, **28**, 172-177. <https://doi.org/10.1097/00003246-200001000-00028>
- [17] Stamatias, G., Zmudzka, B., Kollias, N., *et al.* (2008) *In Vivo* Measurement of Skin Erythema and Pigmentation: New Means of Implementation of Diffuse Reflectance Spectroscopy with a Commercial Instrument. *British Journal of Dermatology*, **159**, 683-690. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2008.08642.x>
- [18] Bish, S.F., Sharma, M., Wang, Y.M., *et al.* (2014) Handheld Diffuse Reflectance Spectral Imaging (DRSi) for *In-Vivo* Characterization of Skin. *Biomedical Optics Express*, **52**, 573-586. <https://doi.org/10.1364/BOE.5.000573>
- [19] Mendez, G.I.I., Ramirez, R.A. and Barranco, G.A.I. (2023) A Review and Perspective on the Main Machine Learning Methods Applied to Physical Sciences. *Acta Polytechnica Hungarica*, **19**, 205-220. <https://doi.org/10.12700/APH.19.10.2022.10.12>
- [20] Wang, L.H., Jacques, S.L. and Zheng, L.Q. (1995) MCML-Monte Carlo Modeling of Light Transport in Multi-Layered Tissues. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **47**, 131-146. [https://doi.org/10.1016/0169-2607\(95\)01640-F](https://doi.org/10.1016/0169-2607(95)01640-F)
- [21] 徐歌, 董立泉, 孔令琴, 等. 基于神经网络模型生物组织参数反演算法[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1117001.
- [22] 郑骏笙, 吴海啸, 胡燕海. 不同肤色条件下新生儿皮肤可见光漫反射研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(16): 500-505.
- [23] Doronin, A. and Meglinski, I. (2011) Online Object Oriented Monte Carlo Computational Tool for the Needs of Biomedical Optics. *Biomedical Optics Express*, **2**, 2461-2469. <https://doi.org/10.1364/BOE.2.002461>
- [24] 陈岩. 动态皮肤光学性质的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2010.
- [25] Robertson, A.R. (1976) The CIE 1976 Color-Difference Formulae. *Color Research & Application*, **2**, 7-11. <https://doi.org/10.1002/j.1520-6378.1977.tb00104.x>
- [26] Ly, K.B.C., Dyer, B.E., Del, S.B., *et al.* (2020) Research Techniques Made Simple: Cutaneous Colorimetry: A Reliable Technique for Objective Skin Color Measurement. *The Journal of Investigative Dermatology*, **140**, 3-12.E1. <https://doi.org/10.1016/j.jid.2019.11.003>
- [27] Weersink, R.A., Marrett, L.D., Lilge, L., *et al.* (2000) Validation of Self-Reported Skin Color via Analysis of Diffuse Reflectance Spectra of Skin. *Proceedings Optical Biopsy III*, Volume 3917, 232-237. <https://doi.org/10.1117/12.382739>
- [28] Zonios, G., Bykowski, J. and Kollias, N. (2001) Skin Melanin, Hemoglobin, and Light Scattering Properties Can Be

Quantitatively Assessed *in Vivo* Using Diffuse Reflectance Spectroscopy. *The Journal of Investigative Dermatology*, **117**, 1452-1457. <https://doi.org/10.1046/j.0022-202x.2001.01577.x>

[29] 迈克尔·施泰因巴赫, 维平·库马尔. 数据挖掘导论[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.

[30] 刘林. 分类器评价指标 MCC、CEN 和 ACC 的比较研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津师范大学, 2019.