

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416499

基于机器视觉的双光源烟用香精外观质量检测仪^{*}

刘伟华¹ 杨小娜¹ 吴启东¹ 解静¹ 陈姿颖² 李红莲²

(1.河北白沙烟草有限责任公司保定卷烟厂 保定 071000; 2.河北大学质量技术监督学院 保定 071000)

摘要: 烟用香精的应用配方和工艺是烟草工业的核心技术,国内各烟草工业把香型品类构建作为新一轮发展战略的选择,其差异化是各香烟品牌竞争的一个技术关键点。本文针对烟用香精配置加工过程中人工判别质量差的问题提出了一种结合双光源照明的机器视觉方法,并基于此设计并制作了烟用香精的外观质量合格性检测装置。以白光和红光为主要测试光源,绿光为辅助检测光源,设置了双光源同轴前向照明的环境条件;通过光学平板固定照明装置和图像采集模块为一体,并组合滑台随着步进电机转动定点启停;基于机器视觉方法剔除反光点后自动分析色彩模型参数并检测其外观质量合格性。结果显示,单管样液图像平行测试的相对标准偏差均低于0.9968%,同批次样液平行测试的相对标准偏差均低于0.0217%。实验结果表明,所设计的仪器检测精度和重复性良好,可为进一步促进烟用香精配置检测行业智能化管理提供支持。

关键词: 机器视觉;烟用香精;色彩模型参数;双光源

中图分类号: TN98;TP23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Machine vision-based dual-light-source tobacco flavor appearance quality inspection device

Liu Weihua¹ Yang Xiaona¹ Wu Qidong¹ Xie Jing¹ Chen Ziyang² Li Honglian²

(1. Baoding Cigarette Factory, Hebei Baisha Tobacco Co., Ltd., Baoding 071000, China;

2. School of Quality and Technology Supervising, Hebei University, Baoding 071000, China)

Abstract: The application formula and process of tobacco fragrance are the core technology of the tobacco industry. In China, each tobacco industry has chosen the construction of fragrance categories as the next round of strategic choices. Its differentiation is a technical key point for the competition among various cigarette brands. This paper proposes a machine vision method combining dual light source illumination to solve the problem of poor quality judgment by manual judgement in the processing of tobacco fragrance configuration and preparation, and designs and manufactures an appearance quality qualification detection device for tobacco fragrance based on this. Using white light and red light as the main test light sources and green light as auxiliary detection light source, a dual light source coaxial forward illumination environment is set up; by fixing the optical plate for lighting and image acquisition module as a whole and combining the slide table with the stepping motor to rotate and stop at designated points, the machine vision method is used to eliminate reflections and automatically analyze color model parameters and detect the appearance quality qualification of the tobacco fragrance. The results show that the relative standard deviation of the parallel test of single tube sample image is less than 0.9968%, and the relative standard deviation of the parallel test of the same batch sample is less than 0.0217%. The experimental results show that the precision and repeatability of the instrument are good, and can provide support for further promoting the intelligent management of the tobacco fragrance configuration detection industry.

Keywords: machine vision; tobacco flavor; color model parameters; double light source

0 引言

烟用香精香料能为烟草制品加香矫味,改善卷烟的吸

味,弥补降焦所带来的香气损失,明显提高卷烟的抽吸口感。但目前受加工工艺影响烟用香精香料配置与合格检测过程中许多工序无法实现机械化操作,色差等质量参数均

收稿日期:2024-07-23

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(62173122)、河北中烟工业有限责任公司科技项目(2023130600301002)资助

为人工识别检测,加之缺乏相关的检测设备降低了可靠性,影响生产过程中进行科学有效的外观质量智能检测。

近年来,针对烟用香精香料的外观质量已有较多研究,黄扬明等^[1]采用中红外技术结合计量学建立不同香精香料的定性模型,发现经过数据预处理可以明显改善准确率,当贡献率为 99.5%时,准确率为 100%,实现了香精香料品质的快速判断。惠非琼等^[2]利用顶空-气相色谱-质谱指纹图谱法对不同批次的烟用香精的成分进行分离鉴定,比较标准图谱并计算不同批次间的相似度判断出样品的合格性。陈毅等^[3]结合烟用料液具有高糖的特点,基于近红外光谱建立了快速预测其含量的定量分析模型,用以评价烟用料液配制质量的稳定性。上述研究方法虽然能够精准地分析出烟用香精香料成分中的不同,但对所用测试仪器要求较高,步骤复杂且检测时间较长,结果易受测试环境影响,对于实际生产中仅需判断合格状态的情况实用性较低。同时有学者致力于颜色空间直方图^[4]、色差原理^[5]、三刺激值^[6]和颜色测量^[7]的研究,将颜色作为衡量产品质量的重要指标。郭文等^[8]发明了一种采用色差仪检测烟用香精的质量快速判别方法,并定量分析了以三乙酸甘油酯为溶剂的烟用香精色度,发现与相对密度、折光指数两个指标相比,色泽指标更能反映成分复杂以及溶质浓度不高的烟用香精的质量波动。但色差仪的测量结果会受到光源和光谱范围的影响,导致不同的颜色表现引起一定程度的评判误差。

基于上述因素,本文以河北白沙烟草有限责任公司保定卷烟厂提供的标准烟用香精香料为检测对象,选取相对标准偏差进行量化评估。在系统结构方面,综合考虑测试环境、光源照明条件、检测步骤等要素,以彩色工业相机为图像采集基础,结合双光源照明设置,构建基于机器视觉的烟用香精外观质量检测装置。在智能检测方面,通过对比色彩模型分量和总参数指标,自动或手动评定质量合格性,实现烟用香精外观质量检测的快速、准确检测。

1 实验系统及原理

1.1 系统结构组成

烟用香精外观质量智能检测系统由彩色工业相机(华谷动力 WP-UC600 USB3.0)、工业相机镜头(海康威视 SA3520M-10MP)、双光源 LED 灯、位移滑台、DM542 驱动器、24 V 5 A 直流电源、红外控制器、图像传输线等部分组成,其核心是采集图像保存的上位机设置、双光源照明方式、位移滑台定点控制以及质量评估参数设置,如图 1 所示。系统评估的数据来自彩色工业相机模块、双光源光学模块和移动位移平台。其中,具有极高采集和传输速度的彩色工业相机模块采用 USB 接入计算机进行图像捕捉,上位机界面设置色彩方案 microscope、解码算法 normal 和固定数字增益,其中红增益 2.08,绿增益 1.00,蓝增益 1.87 最佳,与实物对比几乎无色差。双光源照明 LED 灯通过红外控制器调节白光和红光主光源以及绿光辅助光源的交

替照明保证合格性检测结果的可靠性。固定开放式光轴丝杆模组,DM542 驱动器连接步进电机和控制器,综合试管间距、试管管径和一个周期试管采集个数等因素编程设置 SPEED 速度值、G-LEN 位移值和 LOOP 循环指令实现滑块的定点移动。最后通过计算机编写上位机程序设置参数阈值进行核心的数据分析和过程控制。该装置实现了烟用香精料液外观质量合格性的快速、准确判断,克服了常用单光源检测的不稳定性和传统质谱法预处理繁琐的困难。

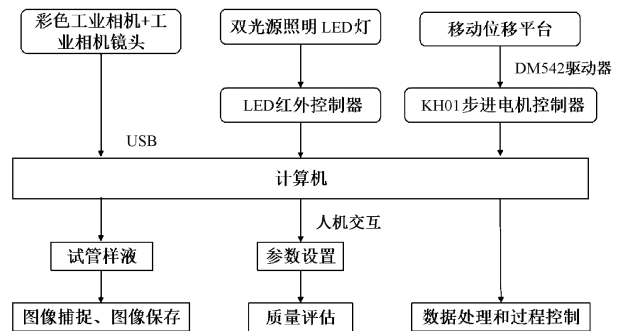


图 1 智能检测系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of intelligent detection system

经测试调整检测装置结构示意图如图 2 所示,图 2(a)为试管支架内部结构,图 2(b)为设备外部结构。试管仓内侧设置红色背景板,背景板前固定一排载有试管的试管架。移动位移平台通过位移控制器定点启停,承载双光源模块和彩色工业相机模块实现对试管的移动定点拍摄。彩色工业相机透过双光源 LED 灯中间的通光孔与试管中心在同一水平线上进行拍摄获取图像,并采用图像传输线与计算机连接保存图像。本结构能使工业相机对烟用香精溶液的颜色特征进行拍摄,获得清晰的有色溶液图像,满足检测系统图像采集要求。

光源照明模块:双光源模块中光源的照明方式主要有前向照明、背向照明和结构光照明^[9]。其中前向照明是将光源置于待测物前方对物体正面照明,主要检测静止或低速运动物体表面的细节特征。LED 光源按几何形状分为同轴光源、环形光源、背光源和对位光源^[10]。同轴光源能克服表面反光造成的干扰,削弱阴影对测试结果的影响;环形光源可提供不同的照射角度,突出待测物体信息弥补对角照射阴影缺陷。根据静置深褐色香精溶液的研究对象,结合试管结构的立体性需要削弱阴影的干扰,故确定同轴环形光源前向照明结构。

另一方面,光源颜色会放大待测样本与背景环境之间的颜色差异,影响图片对比度。结合实际工业检测环境,以红色方直板作为检测背景板,将深色的样本溶液分别在白光、红光、绿光和蓝光四种普遍使用的照明光源下比对。白色光源下采集到的图片颜色还原度高,所有颜色信息都不会丢失,基本满足机器视觉检测的需求^[11];红色光源下对

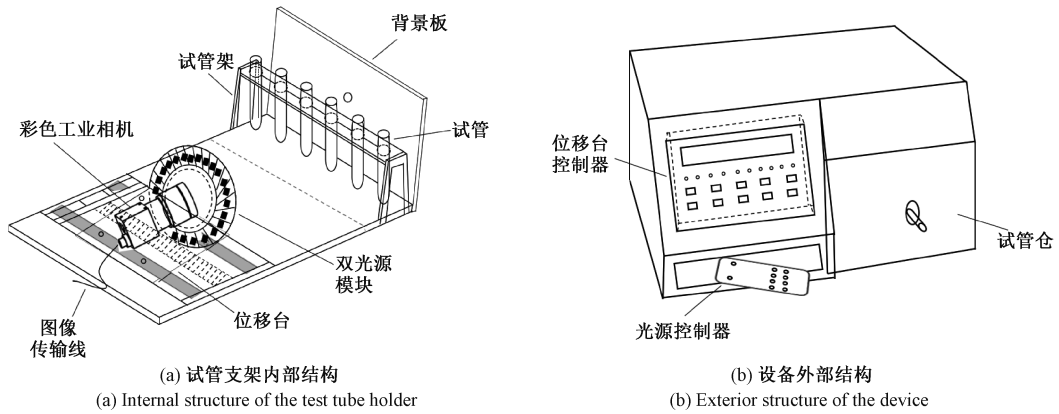


图 2 检测装置结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of detection device

比度高,对于微小色差有放大作用;绿色光源对于以红色作为背景的检测对象有突出作用,降低了后续区分背景与检测目标的算法难度;蓝色光源对图像的清晰度有较低的提高,照明效果不佳。因此,为了提高图片清晰度和系统精度,选用白光和红光作为主要照明光源,绿光作为辅助检测光源的双光源结构增强检测结果的可靠性。

1.2 技术原理

基于机器视觉的图片由光信号捕捉而成,包含从红外到紫外的各种波长。在数字图像中,每个像素都有其颜色信息,工业相机直接采集的图像颜色特征均基于 RGB 颜色空间模型^[12]。RGB 颜色空间是非均匀颜色空间,工作环境发生变化会引起本应完全相同的像素颜色值和 RGB 颜色向量出现差异,在不同程度上影响检测结果导致误判,因此转换为 Lab 颜色空间模型^[13]均匀颜色空间使用。由于 RGB 颜色空间与 Lab 颜色空间之间没有直接转换的关系,因此需要通过 XYZ 颜色空间实现该转换,计算公式^[14]如下:

$$\begin{cases} X = (0.490r + 0.310g + 0.200b) / (0.667r + 1.132g + 1.200b) \\ Y = (0.177r + 0.812g + 0.010b) / (0.667r + 1.132g + 1.200b) \\ Z = (0.000r + 0.010g + 0.990b) / (0.667r + 1.132g + 1.200b) \\ L^* = 116(Y/Y_0) - 16 \\ a^* = 500[(X/X_0) - (Y/Y_0)] \\ b^* = 200[(Y/Y_0) - (Z/Z_0)] \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L^* = 116(Y/Y_0) - 16 \\ a^* = 500[(X/X_0) - (Y/Y_0)] \\ b^* = 200[(Y/Y_0) - (Z/Z_0)] \end{cases} \quad (2)$$

式中: r, g, b 代表像素 3 个通道; X, Y, Z 代表颜色三刺激值; L^* 代表明度值, a^* 代表红绿值, b^* 代表黄蓝值; X_0, Y_0, Z_0 为标准漫反射体在光源照射下的颜色三刺激值, Y_0 的值规定为 100。当 $X/X_0, Y/Y_0, Z/Z_0$ 中任意一个值小于 0.008 856 时,使用式(3)计算^[15]:

$$\begin{cases} L^* = 903.3(Y/Y_0) \\ a^* = 3893.5(X/X_0 - Y/Y_0) \\ b^* = 1557.4(Y/Y_0 - Z/Z_0) \end{cases} \quad (3)$$

式中: L^* 代表明度值, a^* 代表红绿值, b^* 代表黄蓝值。软件程序设置颜色空间模型转换后,利用图形用户界面定义窗口、图标、按钮和菜单,通过调用函数,实现人机交互界面的设置。界面设计包括读取图片、颜色数据采集、测试条件和结果合格性判定等,可视化检测界面如图 3 所示。

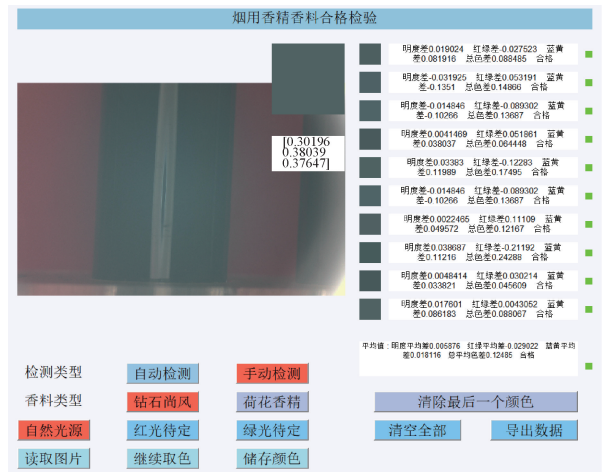


图 3 可视化检测界面

Fig. 3 Detection step block diagram

结合实际生产过程中的不同需求,系统设置自动检测和手动检测两种检测模式,检测判定步骤如图 4 所示。在自动检测模式下,剔除背景颜色和反光点后自动获取待测液图片的像素点颜色数据,并自动选取出现次数较多的前 10 组颜色作为合格性判定测试值,手动检测模式则需要人为选择测试像素点,以选中点的的数据作为合格性判定测试值,实现定点或定区域的检测,人为排除异常的颜色偏差点。

2 实验结果与分析

2.1 实验设计

在烟草中添加外源的香料对提高低焦卷烟吃味起着重要作用。香精品类的竞争是一个系统竞争,在竞争中料

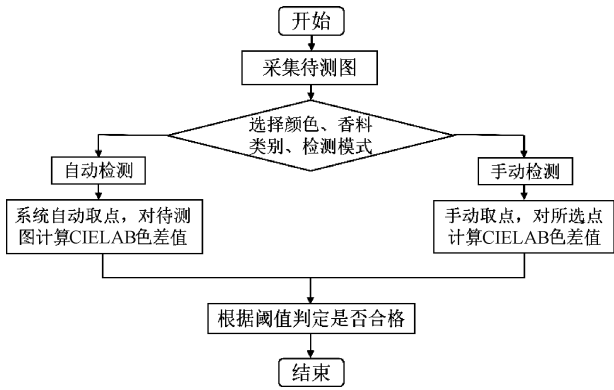
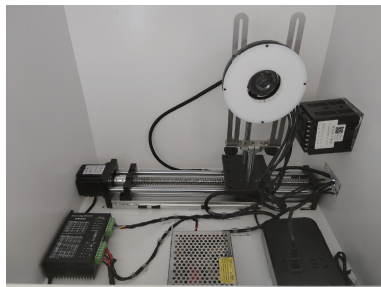


图 4 检测步骤框图

Fig. 4 Visual detection interface

液工艺的外观质量智能检测无疑是当前的重中之重。

本文以河北白沙烟草有限责任公司保定卷烟厂提供的“钻石尚风”牌标准烟用香精样液和“荷花”牌标准烟用香精样液为研究对象, 一组 5 支试管, 每次分别提取 15 mL 样液装入试管中, 运行位移滑台使用彩色工业相机拍摄样液图像并存储。在上位机界面导出数据获取颜色模型 L^* 、 a^* 和 b^* 的数据, 并利用箱线图和取平均算法计算出标准 ΔE_{Lab}^* 阈值的范围。在不同光源条件下分别和对应的阈值自动比对, 决策判断以满足十点平均 ΔE_{Lab}^* 阈值范围为合格反之则为不合格。最后进行单管样液平行测试和两种牌类同批次样液平行测试验证检测精度和重复性。实验设备如图 5 所示, 其中图 5(a) 为设备核心部分, 图 5(b) 为试管架部分。



(a) 设备核心部分
(a) Core part of the equipment



(b) 试管架部分
(b) Tube rack part

图 5 实验设备实物图

Fig. 5 Physical picture of experimental equipment

2.2 数据分析

本文构建白光和红光为主光源, 绿光为辅助光源的双光源照明系统进行实验, 不同光源照射样液如图 6 所示, 其中图 6(a) 为白光样本图片, 图 6(b) 为红光样本图片, 图 6(c) 为绿光样本图片。同一批次“钻石尚风”牌香精样液分别提取 15 mL 装入试管 1~试管 5, 标记为 1.1~1.5; 同一批次“荷花”牌香精样液分别提取 15 mL 装入试管 6~试管 10, 标记为 2.1~2.5。在白光检测光源下, “白光尚风”试管 1~试管 5 标记为 $W_{1.1} \sim W_{1.5}$, “白光荷花”试管 6~试管 10 标记为 $W_{2.1} \sim W_{2.5}$; 在红光检测光源下, “红光尚风”试管 1~试管 5 标记为 $R_{1.1} \sim R_{1.5}$, “红光荷花”试管 6~试管 10 标记为 $R_{2.1} \sim R_{2.5}$; 在绿光检测光源下, “绿光尚风”试管 1~试管 5 标记为 $G_{1.1} \sim G_{1.5}$, “绿光荷花”试管 6~试管 10 标记为 $G_{2.1} \sim G_{2.5}$ 。每管样液采集 10 张图像, 同批次同牌类样液平行测试 5 次。自动剔除背景颜色和反光点后, 每张图像提取 20 个样本点, 每管共获取 200 次 $L^* a^* b^*$ 值。

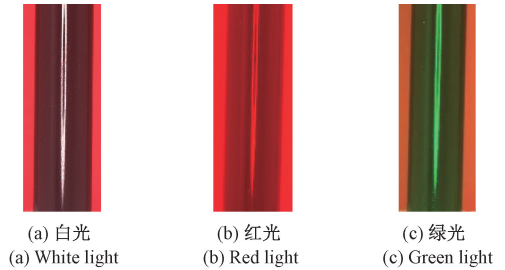


图 6 样本图片

Fig. 6 Sample picture

两种牌类 3 种光源共获得 6 000 个 L^* 、 a^* 、 b^* 值。根据测试数据集分布情况在箱线图背景下, 利用 1.5 IQR (Interquartile Range, 四分位距) 定义异常值的阈值判断数据集中异常值的位置和数量。分别对测试的 L^* 、 a^* 、 b^* 值进行异常值分析, 以便更准确地确定标准色彩模型分量范围和总参数指标量值范围。图 7 所示为不同检测光源中两种牌类样液 L^* 值的箱线图, 其中图 7(a) 为白光检测光源, W_1 中无异常值, $W_2 \geq 47.5999$ 则为异常值; 图 7(b) 为红光检测光源, $R_1 \leq 46.4379$ 且 ≥ 46.7015 为异常值, $R_2 \geq 47.6739$ 则为异常值; 图 7(c) 为绿光检测光源, $G_1 \leq 50.8793$ 为异常值, G_2 中则无异常值。

剔除异常值后, 取平均值作为烟用香精色彩模型分量的标准值。在 CIE Lab 色彩空间中, 明度 L^* 数值越高, 颜色越明亮; 红绿色度 a^* 取值范围从负值到正值, 正值为红色, 负值为绿色; 黄蓝色度 b^* 中的正值为黄色, 负值为蓝色^[16]。

相对标准偏差 (Relative standard deviation, RSD) 可以反映数据集中的变异程度或分散程度。单管样液平行测试 10 次, 取平均值作为烟用香精的颜色模型分量指标, 并计算平行测试结果的 RSD, 计算公式为:

$$RSD = \frac{SD}{\bar{x}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\bar{x}} \quad (4)$$

式中:SD 为标准偏差(%),n 为试样总数或测量次数(n ≥ 5),i 为各次测量值。计算结果显示单管各模型分量测试结果的相对标准偏差均低于 0.996 8%,仪器的检测精度和重复性良好。

各牌类同批次样液平行测试 5 次,取平均值作为烟用

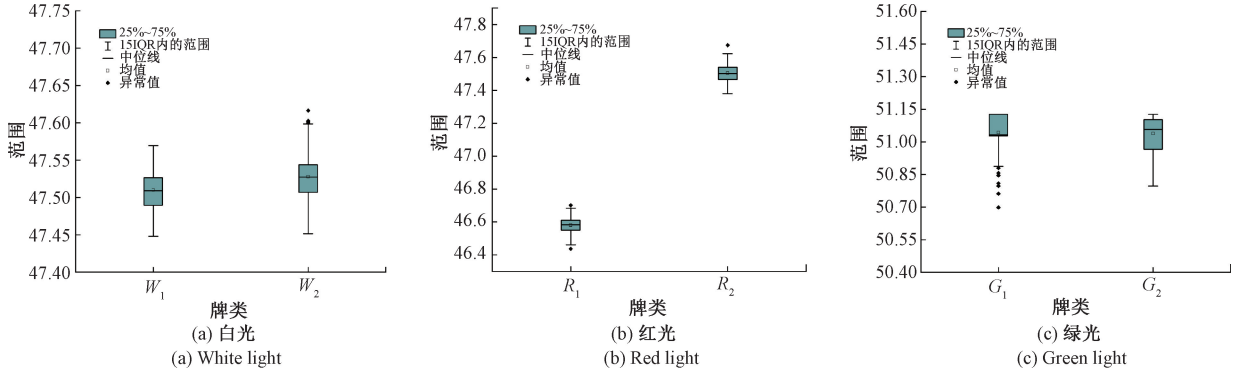


图 7 不同检测光源中样液 L* 值的箱线图

Fig. 7 Box plot of the sample solution L* value of different detected light sources

表 1 各牌类同批次各模型分量测试结果的平行测试结果

Table 1 Parallel test results of test results of each model component of the same batch

样本编号	颜色模型	平行 1	平行 2	平行 3	平行 4	平行 5	平均值	RSD/%
W ₁	L*	47.508 8	47.509 0	47.510 9	47.510 5	47.511 2	47.510 1	0.002 4
	a*	272.895 2	272.890 4	272.911 4	272.910 0	272.912 0	272.903 8	0.003 7
	b*	108.951 6	108.951 9	108.955 3	108.954 6	108.955 8	108.953 9	0.001 8
W ₂	L*	47.530 2	47.528 1	47.525 4	47.527 3	47.525 2	47.527 3	0.004 3
	a*	272.701 5	272.697 6	272.715 2	272.708 9	272.688 3	272.702 3	0.003 8
	b*	108.988 4	108.984 7	108.980 1	108.983 4	108.979 8	108.983 3	0.003 3
R ₁	L*	46.579 7	46.578 7	46.584 8	46.579 7	46.584 7	46.581 5	0.006 4
	a*	287.539 0	287.561 3	287.619 9	287.623 4	287.595 3	287.587 8	0.012 8
	b*	107.370 2	107.368 5	107.379 2	107.370 5	107.379 0	107.373 5	0.004 8
R ₂	L*	47.503 4	47.507 4	47.504 2	47.505 6	47.503 6	47.504 9	0.003 5
	a*	285.230 1	285.228 6	285.253 7	285.217 0	285.258 1	285.237 5	0.006 2
	b*	108.965 9	108.972 8	108.967 3	108.969 7	108.966 3	108.968 4	0.002 6
G ₁	L*	51.045 3	51.045 7	51.041 8	51.049 2	51.045 0	51.045 4	0.005 2
	a*	271.087 0	271.083 6	271.086 7	271.084 8	271.077 5	271.083 9	0.001 4
	b*	115.077 1	115.077 8	115.070 9	115.083 8	115.076 5	115.077 3	0.004 0
G ₂	L*	51.034 2	51.039 0	51.050 1	51.054 2	51.061 3	51.047 8	0.021 7
	a*	271.085 3	271.091 6	271.086 0	271.086 3	271.083 5	271.086 5	0.001 1
	b*	115.057 9	115.066 2	115.085 4	115.092 5	115.105 2	115.081 4	0.016 8

获得 L*, a*, b* 值后,计算总色彩模型参数指标^[18]:

$$\Delta E_{Lab}^* = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (5)$$

香精的颜色模型分量指标,并计算平行测试结果的 RSD。结果如表 1 所示,显示各模型分量测试结果的相对标准偏差均低于 0.021 7%,测量值相对一致,数据变异程度较小,表明仪器的检测稳定性和可靠性良好。文献[17]所提方法实验也是测试不同烟用香精色泽指标,RSD 值均大于 0.02%且最大达到 68.85%,可见本文设计的装置与文献[17]相比,相对标准偏差更小,稳定性和可靠性更高。

式中:L₁^{*}, a₁^{*}, b₁^{*} 为颜色 1 在该颜色空间下的色坐标;L₂^{*}, a₂^{*}, b₂^{*} 为颜色 2 在该颜色空间下的色坐标;ΔE_{Lab}^{*} 为颜色 1 与颜色 2 在 CIE1976 Lab 标准下的色差。根据计算分析

确定烟用香精香料合格总色彩模型参数的临界值,若总色彩参数在规定的标准样品色差波动范围内,则判定待测样液为合格品,反之则不合格。

河北白沙烟草有限责任公司保定卷烟厂提供的“钻石尚风”牌烟用香精样液和“荷花”牌烟用香精样液为标准颜色,上述测试数据集中的平均值分别对应式中的 L_2^* , a_2^* , b_2^* 值进行计算。通过分析计算, W_1 的单点 ΔE 合格阈值为 0.312 2,总色彩模型参数阈值范围:0.064 3~0.180 7 为合格; W_2 的单点 ΔE 合格阈值为 0.365 8,总色彩模型参数阈值范围:0.104 4~0.210 9 为合格; R_1 的单点 ΔE 合格阈值为 0.691 6,总色彩模型参数阈值范围:0.146 7~0.400 2 为合格; R_2 的单点 ΔE 合格阈值为 0.952 5,总色彩模型参数阈值范围:0.227 3~0.550 3 为合格; G_1 的单点 ΔE 合格阈值为 0.314 3,总色彩模型参数阈值范围:0.078 0~0.184 5 为合格; G_2 的单点 ΔE 合格阈值为 0.218 0,总色彩模型参数阈值范围:0.070 3~0.166 3 为合格。

3 结 论

本文针对烟用香精配置工艺中人工判别质量差的问题,结合光源照明和图像采集,基于机器视觉设计了一种烟用香精外观质量智能检测装置。采用双光源同轴前向照明和固定试管移动图像采集模块的检测方式,并以 CIE1976 Lab 均匀颜色空间下的色彩模型理论为色差判别基础,编程设计剔除反光点后的自动/手动分析并评价两种牌类烟用香精的外观质量合格性。以“钻石尚风”和“荷花”牌标准烟用香精的色彩特征进行对比测试,实验结果验证了此方法改善了人工评析主观性大和现有物理性质检测操作难的问题,各参数分量测试结果良好均低于 1%。同时双光源模块的应用提高了检测的准确度,保证了结果评定的可靠性。

在实际测量中发现,料液静置一定时间后试管底部会有溶质沉积,因此,底部溶质含量的检测在烟用香精香料配比溶混度测试方面很有意义,这也是本装置后续改进的方向。

参考文献

- [1] 黄扬明,田旷达,张吉雄,等. 中红外技术结合 PCA-MD 用于烟用香精香料定性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(S1): 129-130.
HUANG Y M, TIAN K D, ZHANG J X, et al. Study of tobacco flavors and fragrances based on mid-Infrared spectroscopy combined with PCA-MD[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(S1): 129-130.
- [2] 惠非琼,姬厚伟,刘剑,等. 顶空-气相色谱-质谱指纹图谱应用于烟用香精中主成分测定[J]. 理化检验(化学分册), 2018, 54(10): 1138-1141.
HUI F Q, JI H W, LIU J, et al. Application of HS-
- [3] GC-MS fingerprint spectra to determination of main components in tobacco flavor[J]. Physical Testing and Chemical Analysis(Part B: Chemical Journal), 2018, 54(10): 1138-1141.
陈毅,胡芸,何军,等. 基于近红外光谱法建立的模型预测烟用料液中水溶性糖的含量[J]. 理化检验(化学分册), 2022, 58(4): 381-386.
CHEN Y, HU Y, HE J, et al. Prediction of water-soluble sugars in tobacco casings with models based on near infrared spectrometry[J]. Physical Testing and Chemical Analysis(Part B: Chemical Journal), 2022, 58(4): 381-386.
- [4] 安国臣,刘娟娟,王雁,等. 基于模板匹配及粗糙度纹理指标的液位检测算法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(23): 168-174.
AN G CH, LIU J J, WANG Y, et al. Liquid level detection algorithm based on template matching and roughness texture index[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(23): 168-174.
- [5] 张衍旭,邱智东,高英鑫,等. 基于色差原理及指纹图谱对淡竹叶药材质量评价研究[J]. 时珍国医国药, 2022, 33(12): 3057-3061.
ZHANG Y X, QIU ZH D, GAO Y X, et al. Study on quality evaluation of phyllostachys praecox based on color difference principle and fingerprint[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2022, 33(12): 3057-3061.
- [6] 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(2): 108-114.
HAO T X, LI L L, LI CH J. Least square weighting table method for calculating tristimulus value[J]. Printing and Digital Media Technology Study, 2020, 205(2): 108-114.
- [7] 王杰,尚小燕,陈靖,等. 基于光电积分法的纺织物颜色测量系统设计[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(1): 101-104.
WANG J, SHANG X Y, CHEN J, et al. Design of textile color measurement system based on photoelectric integration method[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(1): 101-104.
- [8] 郭文,单婧,李旭华,等. 一种以三乙酸甘油酯为溶剂的烟用香精的质量快速判别方法:CN201710399487.9[P]. 2017-11-07.
GUO W, SHAN J, LI X H, et al. A rapid method for the identification of tobacco flavor quality utilizing triacetate as solvent; CN201710399487.9[P]. 2017-11-07.
- [9] 李双,王中宇. 一种面结构光三维测量系统的不确定度

- 分析评定[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(1): 58-66.
- LI SH, WANG ZH Y. Uncertainty analysis and evaluation of a surface structured light 3D measurement system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(1): 58-66.
- [10] 洪存存, 王雪琨, 于文文, 等. 基于改进双边滤波的皮革缺陷检测[J]. 激光技术, 2021, 45(3): 373-377.
- HONG C C, WANG X K, YU W W, et al. Leather defect detection based on improved bilateral filtering[J]. Laser Technology, 2021, 45(3): 373-377.
- [11] 赵友全, 梁秀丽, 刘潇, 等. 非标准光源在颜色测量中的差异性分析[J]. 应用光学, 2017, 38(6): 968-973.
- ZHAO Y Q, LIANG X L, LIU X, et al. Difference analysis of non-standard light sources in color measurement[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(6): 968-973.
- [12] 沈平, 童德文, 陈郑盟, 等. 基于叶色偏态分布模式的鲜烟叶成熟度判定[J]. 烟草科技, 2021, 54(8): 26-35.
- SHEN P, TONG D W, CHEN ZH M, et al. Maturity discrimination on fresh tobacco leaves based on skewed leaf color distribution patterns[J]. Tobacco Science & Technology, 2021, 54(8): 26-35.
- [13] 卢森骧, 徐行, 张润江, 等. 基于多维度选择性搜索的小样本缺陷识别方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 220-228.
- LU S X, XU H, ZHANG R J, et al. Small sample defect recognition method based on multi-dimensional selective search [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 220-228.
- [14] WRIGHT W D. A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours [J]. Optical Society Transactions, 1929, 30(4): 141-164.
- [15] 色度学 第4部分: CIE1976L* a* b* 颜色空间: GB/T 20147. 4-2023[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2023.
- Colorimetry-Part 4: CIE 1976L* a* b* colour space: GB/T 20147. 4-2023[S]. Beijing: State Administration for Market Regulation, 2023.
- [16] 孙华义, 彭亚玲, 刘日平. 阳离子可染改性涤纶针织物计算机测配色研究[J]. 针织工业, 2017, 45(2): 51-54.
- SUN H Y, PENG Y L, LIU R P. Computer color measuring and matching for cationic dyeable modified pet[J]. Knitting Industries, 2017, 45(2): 51-54.
- [17] 郭文, 黎玉茗, 赵瑞峰, 等. 色差仪在烟用香精色泽检测中的应用[J]. 烟草科技, 2020, 53(10): 73-80, 87.
- GUO W, LI Y M, ZHAO R F, et al. Application of colorimeter in color detection for tobacco flavors[J]. Tobacco Science & Technology, 2020, 53(10): 73-80, 87.
- [18] 付靖雯, 陈昌威, 沈祥皓, 等. 响应面法优化紫贻贝脱腥及预处理加工工艺[J]. 中国调味品, 2024, 49(6): 15-21.
- FU J W, CHEN CH W, SHEN X H, et al. Hoptimization of deodorization and pretreatment processing technology of mytilus edulis by response surface methodology [J]. China Condiment, 2024, 49(6): 15-21.

作者简介

刘伟华, 本科, 工程师, 主要研究方向为智能卷烟工厂。

E-mail: 79151126@qq.com

杨小娜, 本科, 工程师, 主要研究方向为卷烟工艺质量研究与管理。

E-mail: 15128287772@163.com

吴启东, 本科, 工程师, 主要研究方向为卷烟工艺质量研究与管理。

E-mail: wqd5119@hotmail.com

解静, 本科, 工程师, 主要研究方向为卷烟工艺质量研究与管理。

E-mail: 19933562380@163.com

陈姿颖, 硕士研究生, 主要研究方向为光谱检测技术应用和颜色检测。

E-mail: m13996889863@163.com

李红莲(通信作者), 教授, 硕士生/博士生导师, 主要研究方向为光谱检测技术及其在气体以及固体测量中的应用和可调谐光纤激光器及应用。

E-mail: lihonglian@hbu.edu.cn