

基于嗅觉可视化与图像处理的食醋醋龄检测

林 颢 宋奔腾 金鸿娟 管彬彬

(江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013)

摘要: 应用基于色敏传感器阵列的嗅觉可视化系统对不同醋龄的食醋进行鉴别。运用系统的图像处理模块, 比较了不同方法对目标图像的中心点定位和特征区域选取的影响。尤其在基于不同颜色空间提取特征值方面, 对比了RGB、HSV、Lab颜色空间, 结果表明Lab的效果最好。利用3种颜色空间中获得的特征数据并结合主成分分析(PCA)和线性判别分析(LDA)等模式识别方法, 鉴别食醋醋龄, Lab颜色空间下的训练集和预测集识别率均大于90%。

关键词: 食醋醋龄; 检测; 可视化传感器; 图像处理

中图分类号: TS202.7; TP242.6⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)01-0275-06

Age Discrimination of Vinegar Based on Artificial Olfaction Visualization and Image Processing

LIN Hao SONG Benteng JIN Hongjuan GUAN Binbin

(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: An artificial olfaction system based on visualization sensor array was employed to identify different ages of vinegar. In the image processing module of this system, the influence of different methods on the localization of the target image center was compared, including minimum enclosing rectangle, ellipse fitting and one-order moment. Since the target image was similar to the circle, all of the three methods could obtain center coordinates exactly, except that the last method consumed less time. Moreover, the characteristic region was reselected, which could better represent features of the target image. Usually, feature values are extracted based on the RGB color space. Then, each component and coordinate value in RGB, HSV and Lab color spaces were extracted and used as eigenvalues. The result showed that the data obtained from the Lab space had high stability. In order to identify different ages of vinegar, five different years of vinegar samples from 2011 to 2015 were selected in the experiment. The characteristic data from three kinds of color spaces was analyzed with principal component analysis (PCA) and linear discriminant analysis (LDA). Although the samples of vinegar in different years had a certain clustering tendency, especially in the Lab color space, there were still some samples overlapping each other and difficult to separate by PCA alone. Then this data was used as the input of LDA classifier for discriminate analysis. The recognition accuracy rate in the training set and testing set achieved 98% and 94% respectively in Lab color space, while the detection accuracies were not higher than 90% in other color spaces.

Key words: vinegar age; detection; visualization sensor; image processing

引言

醋龄是消费者购买食醋时的一个重要参考依据。醋龄的改变伴随着食醋中风味成分及其含量的变化, 食醋中的挥发性物质(比如吡嗪、恶唑类杂环

类化合物)会随着时间的延长而显著增加^[1-2]。目前对食醋挥发性气味检测的研究已发展成为一个相对独立的分支领域, 各种新技术和新方法逐渐应用于研究之中, 嗅觉可视化技术便是一种方便、快捷、直观地表征挥发性气体的方法。嗅觉可视化技术首

先由 RAKOW 等^[3]提出设想,它利用传感气敏材料与待检测气体发生反应,根据色敏材料反应前后的颜色变化对挥发性有机化合物进行定性定量分析,并且能把气味信息以直观可视的图像方式表达出来。目前,该技术已经用于对白酒品种、鱼肉新鲜度、食醋发酵过程等的研究^[4-8]。因此,针对能够表征醋龄的气味活性物质而开发相应的色敏传感器,即可利用传感器与活性物质的颜色反应区分不同年限的食醋。

一般地,图像处理是提取色敏传感器区域反应前后的 RGB 特征差值矩阵^[9]。尽管图像处理技术应用的好坏影响着检测系统的精确度和稳定性,但目前的图像处理方法依然十分粗糙,相关研究较少。因此,本文进一步对嗅觉可视化系统的相关图像处理技术进行研究,以提高整个检测系统的性能,并且对不同醋龄的镇江香醋进行区分。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

食醋样本由江苏恒顺醋业股份有限公司提供,生产年份分别为 2011~2015 年、共 5 种不同醋龄的镇江香醋,每种醋龄香醋含 30 个样本。

通过大量前期试验,筛选出 4 种色敏材料:购买于美国 Sigma-Aldrich 公司的 meso-四(4-甲氧基苯基)卟啉(CH_3OTPP),购买于国药集团化学试剂有限公司的溴甲酚绿酸碱指示剂,以及由实验室合成的 meso-四(4-氟苯基)卟啉锌(TPPZnF)和 CH_3OTPP 。基底材料选用德国默克公司生产的反相硅胶板,以保护材料免受空气湿度的影响。采用毛细管手工点样在疏水的基底材料上,制成 2×2 的可视化传感器阵列。制好的传感器阵列随即进行试验,防止传感器贮存过程中可能带来的影响。

1.2 试验设备

本试验采用江苏大学自制的嗅觉可视化系统仪器(图 1)。系统主要由硬件和软件 2 部分组成,硬件部分主要包括:用于图像采集的 JAI CV-M9GE 型 3CCD 相机,可将光线分成 R 、 G 、 B 三原色,并通过 3 块独立的 CCD 传感器处理,能确保颜色的真实性;OPT-RID150 型漫反射 LED 球积分光源,可以均匀反射从底部 360° 发射出的光线,使整个图像十分均匀;可移动的气体反应室以及作为信号输出系统的计算机。软件部分由图像获取装置驱动控制程序、图像处理程序、数据库等组成。

1.3 数据采集

试验数据的采集过程如下:

(1)反应前,先将传感器放于反应室,打开设

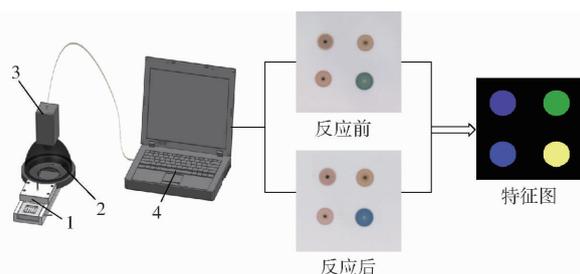


图 1 嗅觉可视化检测装置示意图

Fig. 1 Diagram of artificial olfaction visualization system

1. 反应室(放置可视化阵列传感器) 2. 漫反射 LED 积分球光源
3. 3CCD 相机 4. 计算机

备,并用相机拍摄硅胶板,得到初始图像。

(2)用移液管移取 10 mL 香醋样本于烧杯中,用橡胶双面胶固定传感器阵列硅胶板于保鲜膜上,而保鲜膜密封烧杯口,以使传感器能暴露在香醋挥发性气体环境中,并于 45°C 的干燥箱中反应。待传感器与醋挥发性气体反应 18 min 达到平衡后取出阵列传感器,立即用相机获取反应后图像。

(3)通过图像处理程序获得传感器反应前后的特征图像和数量为 $3n$ 的特征变量(n 种色敏材料 \times 3 个颜色分量),本试验则共有 12 个特征变量,将它们作为原始数据进行模式识别分析。

1.4 色敏传感器图像处理方 法

1.4.1 颜色反应区域的中心点定位

为便于反应前后相对应的颜色反应区域准确地相减,需要先确定所采集图像中各目标色敏区域的准确位置,中心点便是各个目标区域的标识,同时中心点的精确度也可能影响下一步提取各目标区域的准确度。于是分别用最小外接矩形、椭圆拟合和一阶矩的方法,求目标中心点坐标,并对它们进行比较。

最小外接矩形法是先找出目标图像的轮廓,然后求出包围轮廓的外包正矩形,并通过旋转其主、副轴得到最小外接矩形^[10],然后获得外接矩形的 4 个顶点坐标 $p_1 \sim p_4$,并用这 4 个点算出图形的中心点坐标 $O(x, y)$,如图 2 所示。

椭圆拟合法则采用最小二乘椭圆拟合算法^[11]。

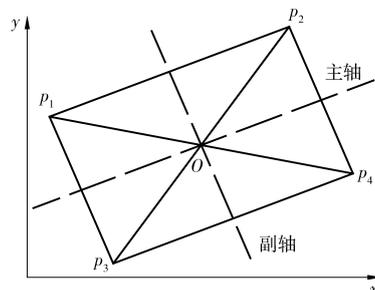


图 2 最小外接矩形法示意图

Fig. 2 Diagram of method of minimum enclosing rectangle

该方法的原理是,将椭圆表示为 2 个向量相乘的隐式方程,即

$$f(\boldsymbol{\alpha}, \mathbf{X}) = \boldsymbol{\alpha}\mathbf{X} = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (1)$$

令 $\boldsymbol{\alpha}$ 为 (A, B, C, D, E, F) , $\mathbf{X}_i = (x_i^2, x_i y_i, y_i^2, x_i, y_i, 1)$, 误差会导致 $f(\boldsymbol{\alpha}, \mathbf{X}_i)$ 在点 (x_i, y_i) 不为零, 将 $f(\boldsymbol{\alpha}, \mathbf{X}_i)$ 看成是点 (x_i, y_i) 到方程 $f(\boldsymbol{\alpha}, \mathbf{X})$ 的代数距离, 于是问题可以通过将距离平方和

$$f(A, B, C, D, E, F) = \sum_{i=1}^n (Ax_i^2 + Bx_i y_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + F)^2 \quad (2)$$

最小化来实现, 这样就转化为求线性方程组解的问题来求出椭圆方程, 进而得到椭圆的中心。

一阶矩的方法原理是求取二值图像的重心^[12]。因为图像上的点是二维离散的, 图像的 $p+q$ 阶矩可定义为

$$m_{p,q} = \sum \sum x^p y^q f(x, y) \quad (3)$$

则二值化图像的中心点 (x, y) 可以用 $\left(\frac{m_{1,0}}{m_{0,0}}, \frac{m_{0,1}}{m_{0,0}}\right)$ 求得。

1.4.2 目标图像特征区域的选取

由于色敏材料在介质中存在分布不均匀的现象, 目标图像往往由中心到边缘会形成不同层次的颜色。然而哪一层次的颜色更能表现色敏材料与气味反应前后的特征仍然不清楚。本研究选用 2 种方法: ①传统的中心点定位取圆为感兴趣区域, 即以目标图像的中心点为圆心, 依据经验选择一定半径得到的圆形区域, 如图 3b 所示。②漫水填充算法^[13]。其目的一是选取中心区域作为图像特征提取的区域, 二是选取剔除中心区域颜色层的外围区域为特征区域, 示意图分别见图 3c 和图 3d。漫水填充法是区域填充法的一种, 这种方法可对颜色或亮度非常相似的区域进行填充。首先需要选取该区域内的一个点作为种子点, 然后通过一定的颜色判定规则判定种子点的邻域像素是否属于同一区域, 最后用新的像素值取代区域中各点的原值。其中, 颜色判断规则一般是在某种颜色空间中, 对各颜色分量人为地设置阈值, 如果一个点的各颜色分量在阈值之内即可判断此点与种子点相似。得到中心区域后, 只需要将此区域减去, 即可获得外围区域。当得到不同特征区域后, 求取颜色反应前后区域的 R, G, B 值并相减, 即得色敏区域反应前后的 R, G, B 分量的变化。

1.4.3 不同颜色空间下的特征值提取

目标图像特征的提取一般是在 RGB 颜色空间

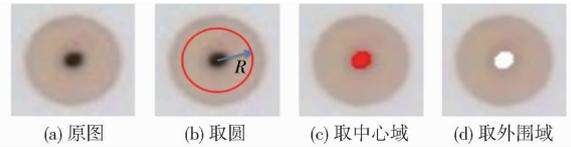


图 3 特征区域选取的不同方式

Fig. 3 Different ways to find characteristic region

模型下进行的^[14], 而只有极少数是在 HSV 和 Lab 空间^[15-16], 然而并不确定是最适宜本系统模式识别的模型。HSV 颜色空间模型用色调 (Hue)、饱和度 (Saturation)、亮度 (Value) 来标志颜色^[17-18]。CIE Lab 颜色空间简称为 Lab。它有 3 个基本坐标 L, a, b , 其中 L 代表亮度分量 (值域 $0 \sim 100$), a, b 代表色度分量 (值域均为 $-120 \sim 120$), 其中 a 分量代表颜色由绿色到红色, b 分量代表由蓝色到黄色^[19-20]。本研究分别利用 RGB、HSV、Lab 3 种不同的颜色空间模型在图像的特征区域中提取特征值, 并将它们均归一化到 $0 \sim 255$ 之间, 以便对它们进行比较。

1.5 模式识别方法

为了建立判别模型对不同醋龄食醋进行识别, 同时进一步验证 3 种颜色空间下提取特征值的优劣, 将 3 种颜色空间下获得的特征数据均用于模式识别。本研究分别利用主成分分析 (PCA) 和线性判别分析 (LDA) 2 种分析方法区分不同醋龄食醋^[21]。由于试验中每种颜色空间下均可得到 150 个样本 (5 种年份 \times 30 样本), 于是将 $2/3$ 作为训练集, $1/3$ 作为预测集。所有数据分析都是在 Matlab Version 7.9.0 环境下进行。

2 试验结果与分析

2.1 颜色反应区域的中心点定位

运用 1.4.1 节所述的各种方法对如图 4 所示的各种图像求取中心点坐标。为便于比较, 各图形并非都是圆形区域, 所得结果见表 1。

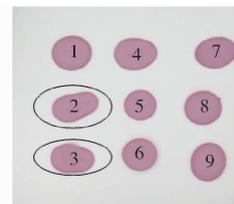


图 4 一些不同程度近似圆的图形

Fig. 4 Images similar to circle at different degrees

由表 1 可知, 除了 2 号和 3 号目标图形比其他图形更加不规则, 而求得的中心点稍有差别外, 3 种方法所得结果均非常相近。而由于真正的点样图形都与圆相似, 所以 3 种方法均可得到较准确的中心坐标。鉴于算法在同样满足要求的前提下, 应尽量

表 1 不同方法获得的中心坐标

Tab.1 Center coordinates calculated by different methods

| 序号 | 最小外接矩形法 | | 椭圆拟合法 | | 一阶矩法 | |
|----|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | x | y | x | y | x | y |
| 1 | 80.00 | 70.50 | 79.80 | 70.25 | 79.82 | 70.25 |
| 2 | 84.81 | 150.04 | 83.49 | 149.08 | 83.73 | 149.13 |
| 3 | 80.50 | 225.00 | 79.66 | 226.04 | 79.92 | 225.83 |
| 4 | 163.50 | 71.50 | 163.03 | 71.48 | 163.07 | 71.56 |
| 5 | 170.00 | 147.00 | 169.82 | 146.95 | 169.82 | 146.97 |
| 6 | 169.00 | 219.50 | 169.01 | 219.49 | 168.99 | 219.46 |
| 7 | 268.50 | 70.00 | 268.92 | 69.58 | 268.93 | 69.64 |
| 8 | 252.50 | 151.00 | 252.37 | 150.85 | 252.34 | 150.91 |
| 9 | 259.00 | 230.50 | 259.31 | 230.52 | 259.38 | 230.48 |

少占内存,减小耗时,而本系统中最小外接矩形法的耗时是一阶矩法的 6 倍,椭圆拟合法耗时为一阶矩

表 2 基于溴甲酚绿传感器的不同特征区域特征值结果

Tab.2 Eigenvalues extracted from different regions based on Bromocresol green sensor

| 特征分量 | 年份 | 中心点定位取圆法 | | | | | | 漫水填充法 | |
|------------|------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | r=5 | r=7 | r=11 | r=13 | r=15 | r=17 | 中心区域 | 外围区域 |
| ΔR | 2011 | 67.20 | 74.06 | 76.79 | 79.18 | 81.35 | 82.90 | 64.34 | 84.79 |
| | 2012 | 67.06 | 74.05 | 76.84 | 79.23 | 81.42 | 83.11 | 64.01 | 84.96 |
| | 2013 | 66.64 | 73.35 | 76.07 | 78.44 | 80.59 | 82.21 | 64.14 | 84.12 |
| | 2014 | 72.71 | 79.17 | 81.70 | 84.06 | 86.27 | 87.50 | 70.83 | 89.47 |
| | 2015 | 59.11 | 64.83 | 66.97 | 69.06 | 70.92 | 71.85 | 56.96 | 73.78 |
| ΔG | 2011 | 47.59 | 53.01 | 55.30 | 57.31 | 59.16 | 61.20 | 44.86 | 62.34 |
| | 2012 | 47.82 | 53.33 | 55.67 | 57.74 | 59.65 | 61.89 | 44.98 | 63.03 |
| | 2013 | 46.71 | 51.95 | 54.21 | 56.18 | 58.02 | 60.20 | 44.29 | 61.29 |
| | 2014 | 51.42 | 56.56 | 58.69 | 60.62 | 62.40 | 64.60 | 49.47 | 65.06 |
| | 2015 | 43.33 | 47.96 | 49.83 | 51.72 | 53.41 | 55.02 | 41.27 | 56.32 |
| ΔB | 2011 | -21.99 | -27.61 | -30.61 | -32.86 | -34.63 | -36.45 | -17.66 | -38.57 |
| | 2012 | -21.51 | -27.23 | -30.39 | -32.76 | -34.62 | -36.49 | -17.21 | -38.96 |
| | 2013 | -22.73 | -28.24 | -31.21 | -33.49 | -35.38 | -37.13 | -18.66 | -39.52 |
| | 2014 | -20.71 | -25.51 | -28.19 | -30.21 | -31.82 | -32.70 | -17.25 | -35.26 |
| | 2015 | -20.88 | -25.96 | -28.83 | -30.99 | -32.84 | -35.04 | -17.13 | -37.06 |

由表 2(表中 r 表示圆的半径)可知,中心区域提取的特征差值最小,而去掉中心区域的外围区域特征差值最大,在中心点定位取圆法中随着半径增大所得的特征差值逐渐增大,并逐渐趋近外围区域的数值,可见中心区域的特征值实际上削弱了整个色敏区域的特征。因此选择剔除中心区域的外围区域为特征区域更为合理。

2.3 不同颜色空间下的特征值提取

以材料为 TPPZnF 制成的传感器与 30 份 2012 年份的食醋反应,分别于 RGB、HSV、Lab 颜色空间下提取相应的特征值,并归一化到区间 $[0, 255]$,图 5 是前 10 个样本在不同颜色空间下部分特征分量相对应的特征图。由图可见 Lab 颜色空间下 a 分量图像的颜色变化不明显,说明其稳定性更高。

法的近 20 倍,因此用一阶矩的方法求目标图像的中心较为合理。

2.2 目标图像特征区域的选取

以色敏材料溴甲酚绿制作传感器为例,分别与不同醋龄的食醋反应,样本数各为 30,然后用 1.4.2 节的方法求取不同特征区域 RGB 分量的特征差值,最后各将 30 个样本取平均值。其中,漫水填充算法的连通域取八邻域,种子点取图像的中心点(方法见 2.1 节),阈值设定为: $[\text{种子点分量值} - 30, \text{种子点分量值} + 30]$ 。另外,为了便于比较,在以图形的中心点为圆心,以不同的半径选取圆形特征区域时,半径的取值从略大于中心区域边界到略小于图像最外围边界为范围,以 2 个像素递增。所得各特征值见表 2。

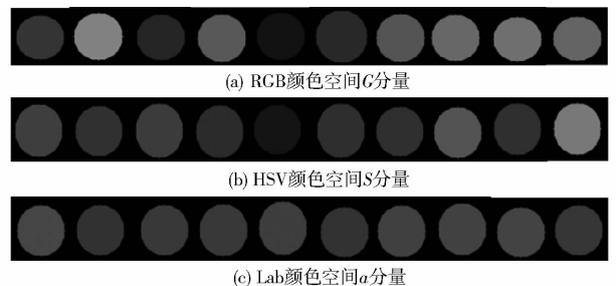


图 5 不同颜色模型下分量的特征图

Fig.5 Feature images of some components under different color models

然后用 4 种色敏材料和 30 份 2012 年的食醋反应,计算出不同颜色空间下反应前后的特征分量差值的标准差,结果见表 3。由表 3 可知,在 Lab 颜色模型下,各种分量特征值的标准差明显较小,尤其是

Δa 和 Δb 的差别基本小于 0.7, 而其他 2 种颜色模型各分量的标准差基本在 1~4 之间, 这说明在 Lab 颜色模型下提取的特征值具有更高的稳定性。

表 3 不同特征分量的标准差

Tab. 3 Standard deviation of different characteristic components

| 分量名 | CH ₃ OTPP* | TPPZnF | CH ₃ OTPP** | 溴甲酚绿 |
|------------|-----------------------|-----------|------------------------|-----------|
| ΔR | 1.838 396 | 1.296 014 | 1.833 668 | 4.231 472 |
| ΔG | 1.477 748 | 1.683 118 | 1.574 292 | 2.895 183 |
| ΔB | 1.355 167 | 1.567 875 | 1.172 637 | 1.560 442 |
| ΔH | 0.464 657 | 2.717 797 | 0.349 755 | 1.610 835 |
| ΔS | 1.332 705 | 1.681 002 | 1.185 52 | 3.158 022 |
| ΔV | 1.838 396 | 1.296 014 | 1.833 668 | 3.112 589 |
| ΔL | 1.413 471 | 1.362 762 | 1.488 475 | 2.791 019 |
| Δa | 0.276 906 | 0.534 999 | 0.179 625 | 0.642 246 |
| Δb | 0.681 224 | 0.411 915 | 0.596 393 | 1.539 278 |

注: *表示实验室合成; **表示购于美国 Sigma - Aldrich 公司。

2.4 模式识别结果

2.4.1 3 种颜色空间下的主成分分析(PCA)

主成分分析是一种重要的统计方法, 可以将多

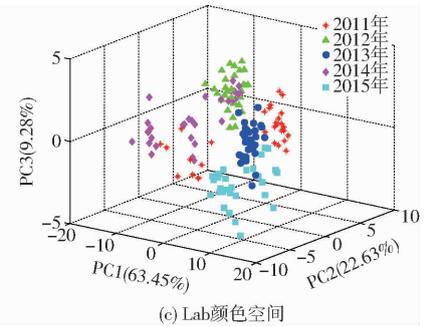
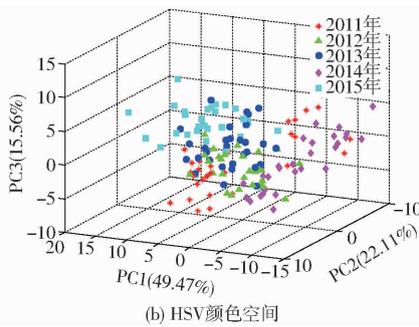
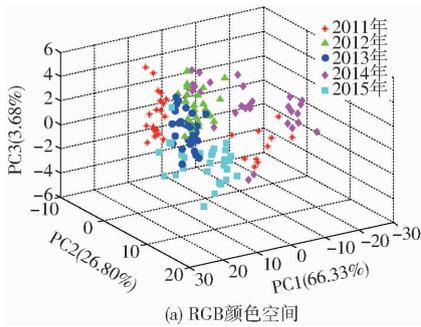


图 6 不同颜色空间时的三维主成分得分图

Fig. 6 Diagrams of three dimensional principal component scores in different color spaces

离与组内距离的比值最大化, 以获得最大的类别区分。本研究中, PCs 作为潜变量被用来作为 LDA 分类器的向量输入。

表 4 分别是颜色空间为 RGB、HSV、Lab 时不同醋龄食醋的 LDA 判别分析识别结果。在 RGB 空间中, 当主成分数为 10 时, 模型训练集中有 90% 的样本被正确识别出来, 预测集中有 86% 的样本被正确识别出来。在 HSV 颜色空间下, 当主成分数为 10 时, 训练集中 LDA 模型的识别率为 89%, 预测集中 LDA 模型的识别率为 76%。当颜色空间为 Lab, 主成分数为 9 时, 模型的训练集和预测集中分别有 98% 和 94% 的样本被识别出来。可见, 颜色空间为 Lab 模型时, 食醋年限的鉴别效果最好。一方面, 相较于其他颜色模型 Lab 颜色模型拥有最广的色域, 并且弥补了 RGB 空间中颜色表示与实际颜色非线性关系的缺点, 因此 Lab 颜色模型能够更加真实地标识颜色, 甚至可以反映其他模型丢失的颜色信息。

指标问题转化为较少的综合指标, 将变量重组, 得到既互不相关、又能表示原变量中绝大部分信息的新变量, 即主成分 (PCs), 利用主成分分析可以从原始数据中提供有效的信息, 并且主成分图能直观地呈现出不同年份食醋的聚类趋势。

图 6a~6c 分别是颜色空间为 RGB、HSV、Lab 时的三维主成分散点图。前 3 个主成分的累计方差贡献率分别达到了 96.81% (PC1 为 66.33%, PC2 为 26.80%, PC3 为 3.68%)、87.14% (PC1 为 49.47%, PC2 为 22.11%, PC3 为 15.56%)、95.36% (PC1 为 63.45%, PC2 为 22.63%, PC3 为 9.28%)。不同年份食醋的样本在散点图中具有一定的聚类趋势, 尤其是在 Lab 颜色空间下较为明显, 但仍有一些储藏年限相近的样本互相重叠, 不易分离, 其主要原因是储藏时间比较近的食醋, 由于季节的因素及其他环境因素影响, 特征差别不是非常显著, 仅通过 PCA 难以完全区分开。

2.4.2 3 种颜色空间下的线性判别分析(LDA)

LDA 模型是通过寻找一种线性变换, 将组间距

另一方面, 由 2.4.1 节可知本系统中 Lab 模型的一致性和聚类性较好, 能较好地表征不同醋龄食醋气味特征, 模式识别的效果更好。

表 4 不同颜色空间下 LDA 判别结果

Tab. 4 Identification results of LDA model in different color spaces %

| 主成分 因子数 | RGB 空间 | | HSV 空间 | | Lab 空间 | |
|------------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| | 训练集 | 预测集 | 训练集 | 预测集 | 训练集 | 预测集 |
| 1 | 35 | 24 | 42 | 40 | 33 | 20 |
| 2 | 36 | 36 | 45 | 38 | 46 | 46 |
| 3 | 37 | 32 | 49 | 42 | 53 | 60 |
| 4 | 57 | 52 | 63 | 42 | 67 | 60 |
| 5 | 75 | 64 | 77 | 62 | 86 | 84 |
| 6 | 80 | 72 | 84 | 68 | 93 | 90 |
| 7 | 77 | 82 | 86 | 70 | 93 | 90 |
| 8 | 85 | 78 | 87 | 72 | 97 | 90 |
| 9 | 88 | 84 | 87 | 72 | 98 | 94 |
| 10 | 90 | 86 | 89 | 76 | 99 | 92 |

3 结束语

利用嗅觉可视化系统对食醋中可挥发性气体的表征可对食醋年限进行快速、简便、直观的鉴别。本文对系统中图像处理部分的不同中心点定位和特征

区域选取方法进行了比较和优化,重点是对不同颜色空间下提取的特征参数进行比较,确定了比较利于检测系统进行食醋年份识别的 Lab 空间,并发现它的识别率可达到 90% 以上,提高了嗅觉可视化系统的准确率。

参 考 文 献

- 1 孙宗保. 镇江香醋挥发性成分分析及醋龄的识别研究[D]. 镇江:江苏大学,2014.
- 2 孙宗保,尹俊玲,赵杰文,等. 杂环化合物在镇江香醋陈酿过程中的变化[J]. 中国食品学报,2015,15(6):199-205.
SUN Zongbao, YIN Junling, ZHAO Jiewen, et al. The changes of heterocyclic compounds in Zhenjiang aromatic vinegar during ageing[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(6):199-205. (in Chinese)
- 3 RAKOW N A, SUSLICK K S. A colorimetric sensor array for odour visualization[J]. Nature, 2000,406(17):710-713.
- 4 邹小波,赵杰文,殷晓平,等. 嗅觉可视化技术在白酒识别中的应用[J]. 农业机械学报,2009,40(1):110-113.
ZOU Xiaobo, ZHAO Jiewen, YIN Xiaoping, et al. Chinese liquors identification by olfaction visualization technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(1):110-113. (in Chinese)
- 5 QIN H, HUO D, ZHANG L, et al. Colorimetric artificial nose for identification of Chinese liquor with different geographic origins [J]. Food Research International, 2012, 45(1):45-51.
- 6 HUANG X Y, XIN J W, ZHAO J W. A novel technique for rapid evaluation of fish freshness using colorimetric sensor array[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 105(4):632-637.
- 7 赵杰文,黄晓玮,邹小波,等. 基于嗅觉可视化技术的猪肉新鲜度检测[J]. 食品科学技术学报,2013,31(1):9-13.
ZHAO Jiewen, HUANG Xiaowei, ZOU Xiaobo, et al. Research on discrimination of dominant spoilage bacteria in pork based on porphyrins and pH indicators gas-sensing material [J]. Journal of Food Science and Technology, 2013, 31(1):9-13. (in Chinese)
- 8 CHEN Q S, LIU A P, ZHAO J W, et al. Monitoring vinegar acetic fermentation using a colorimetric sensor array[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 183:608-616.
- 9 管彬彬,赵杰文,金鸿娟,等. 基于嗅觉可视技术的醋醅理化指标分析[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):223-227.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150932&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.032.
- Guan Binbin, Zhao Jiewen, Jin Hongjuan, et al. Analysis of physicochemical index of vinegar substrate based on olfactory visualization technique[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):223-227. (in Chinese)
- 10 BRADSKI G, KAEHLER A. Learning OpenCV[M]. California: O'Reilly Media, Inc., 2008.
- 11 王万国,王仕荣,徐正飞,等. 基于边界的最小二乘椭圆拟合改进算法[J]. 计算机技术与发展,2013,23(4):67-70.
- 12 GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- 13 陈佳鑫,贾英民. 一种基于漫水填充法的实时彩色目标识别方法[J]. 计算机仿真,2012,29(3):4-9.
- 14 赵杰文,管彬彬,林颢,等. 基于嗅觉可视技术的食醋气味的表征和区分[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(10):188-192.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131030&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.030.
- ZHAO Jiewen, GUAN Binbin, LIN Hao, et al. Characterization and discrimination of vinegar flavor based on olfaction visualization technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10):188-192. (in Chinese)
- 15 CAPEL-CUEVAS S, CUÉLLAR M P, DE ORBE-PAYÁ I, et al. Full-range optical pH sensor array based on neural networks [J]. Microchemical Journal, 2011, 97(2):225-233.
- 16 ZARAGOZÁ Patricia, FUENTES Ana, RUIZ-RICO María, et al. Development of a colorimetric sensor array for squid spoilage assessment[J]. Food Chemistry, 2015, 175:315-321.
- 17 CHERNOV Vladimir, ALANDER Jarmo, BOCHKO Vladimir. Integer-based accurate conversion between RGB and HSV color spaces[J]. Computers & Electrical Engineering, 2015, 46:328-337.
- 18 张春龙,张楫,张俊雄,等. 近色背景中树上绿色苹果识别方法[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(10):277-281.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141043&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.043.
- ZHANG Chunlong, ZHANG Ji, ZHANG Junxiong, et al. Recognition of green apple in similar background[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):277-281. (in Chinese)
- 19 李小昱,库静,颜伊芸,等. 基于高光谱成像的绿皮马铃薯检测方法[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(3):228-233.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160332&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.032.
- LI Xiaoyu, KU Jing, YAN Yiyun, et al. Detection method of green potato based on hyperspectral imaging[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3):228-233. (in Chinese)
- 20 CRISTINA Gómez-Polo, MARÍA Portillo Muñoz, LUENGO Mari Cruz Lorenzo, et al. Comparison of the CIE Lab and CIE DE2000 color difference formulas[J]. The Journal of Prosthetic Dentistry, 2016, 115(1):65-70.
- 21 邹小波,赵杰文. 农产品无损检测技术与数据分析方法[M]. 北京:中国轻工业出版社,2007.