

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.80231

基于暗室系统特征灰度系列苹果糖度预测

Prediction of apple sugar content based on correlation of characteristic gray series in darkroom system

马晟童 黎俊汶 欧阳浩艺 谭穗妍 杨初平

MA Sheng-tong LI Jun-wen OUYANG Hao-yi TAN Sui-yan YANG Chu-ping

(华南农业大学电子工程学院[人工智能学院], 广东 广州 510642)

(College of Electronic Engineering & Artificial Intelligence, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

摘要:目的:实现苹果糖度的无损检测。方法:以苹果吸收峰值波长 670 nm 的激光作为照明光源从积分球的照明端口入射,苹果样品放置于积分球的样品端口,在积分球测量端口获得苹果样品的反射光斑。通过手机采集图像,研究此波长照射下苹果产生的反射光斑图像灰度信息,并利用偏最小二乘(PLS)算法对训练集 3 个苹果种类共 90 个样品,以反射光斑图像的外环区域中灰度值处于 90~110 的像素频数(即特征灰度系列)为糖度相关成分进行建模和糖度预测。结果:训练集中 3 个种类苹果的预测相关系数分别为 0.89, 0.84, 0.94, 验证集中 3 个种类苹果糖度的预测相关系数分别可达 0.70, 0.73, 0.76。结论:基于暗室系统苹果反射光斑图像特征灰度系列无损预测苹果糖度的方法可以作为苹果糖度预测的依据。

关键词:反射光谱;偏最小二乘法;苹果;糖度预测

Abstract; Objective: in order to realize the detection of apple sugar content, a nondestructive prediction method of apple sugar content based on the characteristic gray series of apple reflection spot image in darkroom system is proposed. **Methods:** The laser with the peak wavelength of 670 nm absorbed by the apple was used as the illumination light source, which was incident from the illumination port of the integrating sphere. The apple sample was placed at the sample port of the integrating sphere, and the reflection spot of the apple sample was obtained at the measuring port of the integrating sphere. Through the image collected by mobile phone, the gray information of the reflection spot image of apple under the irradiation of this wavelength was studied. It was found that the gray distribution of the reflection spot image of apple with different sugar content was different. Using partial

least squares (PLS) algorithm, for 90 samples of three apple species in the training set, taking the pixel frequency (i.e. characteristic Gray Series) with gray value between 90~110 in the outer ring area of the reflected spot image as the sugar content related component, the three apple species were modeled and predicted respectively, so as to realize the nondestructive and rapid measurement of apple sugar content. **Results:** The predictive correlation coefficients of three kinds of apples in the training set were 0.89, 0.84 and 0.94 respectively. Based on the designed three kinds of apple sugar content prediction model, another 60 samples of the three apple species are verified. The prediction correlation coefficients of the three corresponding kinds of apple sugar degree in the verification set can reach 0.70, 0.73 and 0.76 respectively. **Conclusion:** Compared with the method of using multi wavelength fusion to predict apple sugar content, using a single strong absorption wavelength and the characteristic gray series of apple reflection spot image in darkroom system can be used as the basis of apple sugar content prediction, which provides a new research idea for apple sugar content prediction.

Keywords: reflection spectrum; partial least squares; apple; sugar content prediction

水果糖度的无损测量近年来已成为中国农业生产中的重要技术之一、是保证商品质量的重要举措。基于可见光—近红外光谱分析技术的糖度快速无损检测近年来被广泛应用于苹果^[1-5]、猕猴桃^[6]、哈密瓜^[7]、水蜜桃^[8]、柑橘^[9]、红提^[10]等多种水果中。乔鑫等^[1]设计了手机联用的基于可见—近红外光谱技术的多特征波长的苹果糖度便携式检测装置,预测相关系数可达 0.882 2;刘昊辰^[3]开展了苹果缺陷和糖度的近红外光谱技术动态在线检测研究,实时预测准确率可保持在 66.67% 以上;彭发等^[4]基于傅里叶变换近红外光谱、偏最小二乘法和深度学习技术,建立了不同苹果糖度预测模型,最高预测相关系数

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51505156)

作者简介:马晟童,男,华南农业大学在读本科生。

通信作者:杨初平(1970—),男,华南农业大学副教授,博士。

E-mail: yangchp@scau.edu.cn

收稿日期:2022-02-19

可达 0.933 3; 乔正明等^[5]将近红外光谱与 SSA-ELM 结合用于苹果糖度无损检测, 测试集相关系数可达 0.945 7。在上述苹果糖度测量方法中, 采用多个特征波长进行糖度预测模型拟合是常用的手段, 多特征波长拟合有利于提高预测的准确性, 但也增加了测量装置的复杂性, 如果实现单一波长的检测将能够大大简化装置。对于苹果糖度预测, 苹果在可见—近红外反射光谱中有几个明显的强吸收波长如 675, 760, 835 nm^[1], 能否采用苹果某个单一强吸收波长的反射光特征进行苹果糖度预测是一个值得探索的问题, 而有关该方面的研究尚未见报道。

研究拟以苹果吸收峰值波长 670 nm 的反射光为试验手段, 提出基于暗室系统苹果反射光斑图像特征灰度系列预测苹果糖度的测量方案。暗室系统以手机应用程序为平台, 使用手机的图像拍照功能、积分球和 670 nm 激光光源, 采集样品的反射光斑图像特征灰度系列, 并通过偏最小二乘法^[11]进行建模分析, 以实现苹果的无损糖度测量, 为苹果糖度无损预测提供一种更简便的新研究思路 and 可能的技术手段。

1 测量原理

1.1 试验材料

挑选直径为 80~85 mm 的红富士(山西运城)、糖心(新疆阿克苏)及黄元帅苹果(山东烟台)共 150 个, 其中训练集 90 个, 验证集 60 个。按种类对苹果样品依次进行测量编号, 其中红富士、糖心、黄元帅的种类编号分别为样品 A、B、C, 为在糖度测量的取样区域汲取足够的果肉用于糖度仪的检测, 同时获得更多更精确的数据, 每个苹果划出 3 个直径为 6 cm 的黑圈范围为测量区域, 同时这些区域也作为光谱测量的检测区域。

1.2 苹果反射光谱测量

为了测量苹果的反射光谱, 搭建的光谱采集平台包括: FLAME-S 微型光纤光谱仪(响应波长范围 200~1 100 nm)、ISP-30-6-R 积分球、处理光谱数据软件 Spectra Suite。对于每个样品, 在不同测量面特征下采集 3 个测量区域的光谱值, 以其平均值作为样品反射光谱的最终值。同种类不同苹果的反射光谱如图 1 所示, 波长介于 650~700 nm 的波段有一个明显的吸收峰, 吸收峰位于 670~675 nm 的阴影区域, 其中中心波长为 670 nm。

吸收峰深度表征苹果中对应物质含量的多少。吸收强度越大, 说明对应样品在被照射区域的对应化合物含量越高。据此, 可以通过对碳水化合物, 即糖分对应的吸收峰所处波段的特征进行分析, 找出吸收强度与样品糖度的关系, 进一步对样品糖度进行分析和预测。

1.3 反射光斑图像采集

设计一个暗室测量系统用于无损糖度检测, 暗室系统光路图与外设系统模型图见图 2。其中, 暗室框架内部即为搭建的暗室系统, 外设系统是方便手机采集和处理

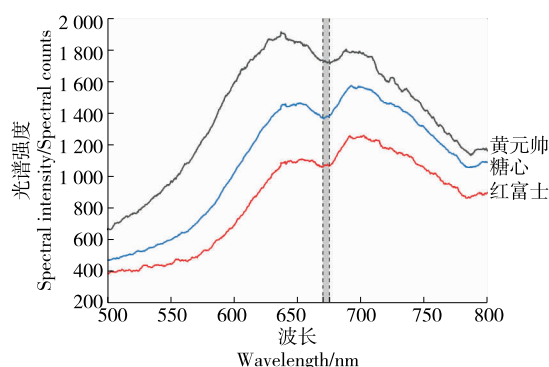


图 1 苹果反射光谱

Figure 1 Reflection spectrum of apple

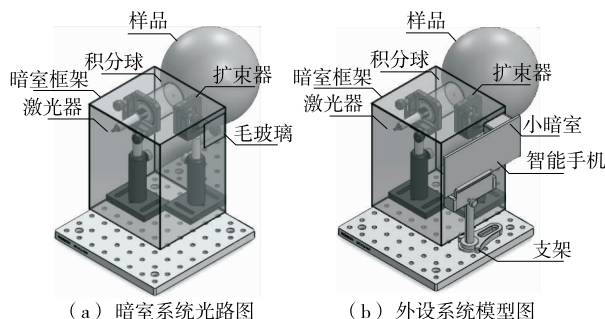


图 2 暗室测量系统

Figure 2 Darkroom measurement system

数据、减小误差而设计的。

系统工作原理: 积分球有 3 个端口, 分别是照明端口、样品端口和测量端口, 激光束(CPS670F 激光二极管, 功率 4.5 MW、波长 670 nm)从照明端口入射, 将苹果样品的测量面置于样品端口, 激光被样品吸收后, 反射光经过积分球的漫反射后一部分光从测量端口出射, 照射到毛玻璃上, 形成一个从中心到边缘光强逐渐减弱的圆形光斑, 使用手机对光斑进行图像采集。

在上述激光器功率照射下, 经多次试验, 确定合适的反射光图像手机采集参数: 感光度(ISO)1 000, 曝光时间 0.2 s, 镜头放大倍数 1.8×。

由图 3 可知, 不同条件下采集到的图像中光斑大小和灰度分布会发生变化, 苹果样品的反射光斑图像不同于激光器产生的背景光斑图像(即测量激光器产生的背景光斑图像时, 积分球样品端口处无任何反射物体), 也

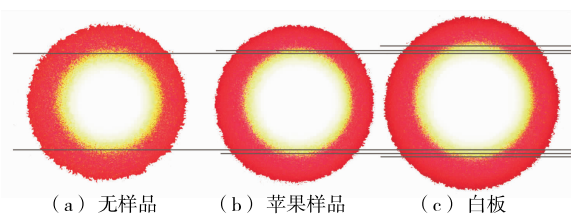


图 3 测量端口不同样品的光斑图像

Figure 3 Spot images of different samples

不同于在样品端口处放置光谱仪白板下产生的反射光斑图像。背景光斑图像中的光斑直径最小,苹果样品的其次,光谱仪白板的最大。

1.4 特征灰度系列与建模

光斑中心区域的亮度过高,是光斑图像过饱和的结果,而阴暗部分受其他因素干扰(如环境中的光噪声),因此确定反射光斑图像数据的采集和分析范围是光斑图像外环区域灰度范围从 90~110 的各个灰度的像素数,称这个范围的灰度值分布为特征灰度系列,如图 4 所示。由图 3 可知,提取的特征灰度系列与苹果糖度有较好的相关关系;若偏离这些采集参数,提取的特征灰度系列与苹果糖度的相关关系将变差;灰度值范围在此基础上变大或者变小均会导致相关关系变差。在此基础上采用偏最小二乘法(PLS)算法对反射光斑图像特征灰度系列数据与对应样品糖度进行拟合。根据相关系数、预测结果散点图等对所建模型进行评价分析。

设 $S(x_i)$ 为苹果样品反射光斑图像 P 的特征灰度系列中灰度为 x_i 的像素的个数, N 为图像中的特征灰度所对应的像素数的总和 ($N = \sum_i S(x_i)$, $x_1 = 90, x_2 = 91, \dots, x_{21} = 110$), 对 $S(x_i)$ 作归一化处理,得

$$h(x_i) = \frac{S(x_i)}{N} = \frac{S(x_i)}{\sum_i S(x_i)} (i = 1, 2, \dots, 21). \quad (1)$$

则图像 P 的特征灰度系列直方图表示为:

$$H(P) = [h(x_1), h(x_2), \dots, h(x_{21})]. \quad (2)$$

由于反射光斑形成的图像本身就携带苹果样品糖度成分的信息,所以可以利用图像的特征灰度系列对苹果样品糖度进行分析,以期找出苹果糖度 T 与特征灰度系列的函数关系,即

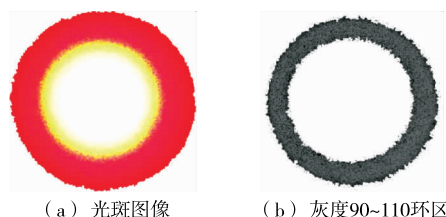


图 4 光斑灰度处理

Figure 4 Grayscale processing of light spot

$$T(P) = T[h(x_1), h(x_2), \dots, h(x_n)] = b_0 + \sum_{i=1}^{21} b_i h(x_i), \quad (3)$$

式中:

b_0 ——模型修正系数;

$b_i (i=0, 1, 2, \dots, 21)$ ——特征系数(通过偏最小二乘法拟合得到)。

2 结果与讨论

2.1 3 种苹果的糖度理化值

分别使用 3 组训练集和验证集建立了针对红富士(样品 A)、糖心(样品 B)和黄元帅(样品 C)的糖度预测模型并对模型的预测效果进行分析,依据国家标准使用糖度计测得苹果样品的糖度理化值见表 1。

由表 1 可知,验证集中的苹果样品糖度数据范围大体上覆盖了训练集中样品的糖度数据范围,对构建糖度的预测模型是有利的。

2.2 训练集预测模型

获取苹果样品的反射光斑外环区灰度信息后,采用 Origin 2018 软件对训练集中 90 个样品的 90~110 灰度数据和相应的糖度数据进行偏最小二乘回归模型构建,预测模型散点图分别如图 5~图 7 所示。

使用的红富士、糖心、黄元帅样本数分别为 30, 25, 35, 拟合结果相关系数 R^2 分别为 0.89, 0.84, 0.94。训练集中 3 种类型苹果的糖度预测值靠近参考线,说明预测值与实际测量值很接近,预测值离散程度比较小,样品 A、B、C 的预测均方根误差分别为 1.10, 1.00, 0.93。因此,以图像中灰度值为 90~110 的像素的出现频数作为糖度预测模型的特征向量具有良好的建模效果。

2.3 验证集糖度预测

在预测模型基础上,另取 3 个种类共 60 个苹果进行糖度预测,结果如图 8~图 10 所示。

由图 8~图 10 可知,预测糖度值靠近参考线,但比训练集离散度大,每个预测模型的相关系数 R^2 均在 0.7 以上。图 8 使用了 20 个样本,预测结果 R^2 值为 0.70,实际糖度值与预测糖度值的均方根误差为 0.9。图 9 使用了 10 个样本,预测结果 R^2 值为 0.73,实际糖度值与预测糖度值的均方根误差为 1.44。图 10 使用了 30 个样本,预测

表 1 3 种苹果的糖度

Table 1 Sugar content among three kinds of apple samples

样品种类	训练集			验证集		
	糖度/Brix	平均值	标准偏差	糖度/Brix	平均值	标准偏差
样品 A	9.0~13.7	11.446	1.156	9.8~12.5	11.025	0.775
样品 B	11.8~15.5	13.540	1.081	10.9~16.1	13.820	1.547
样品 C	9.6~13.7	11.937	0.959	9.2~14.6	11.430	1.513

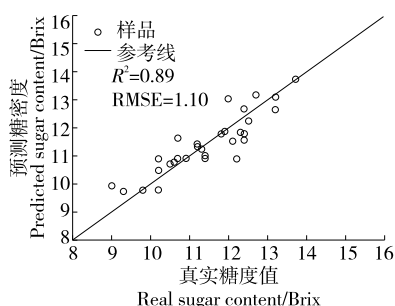


图 5 样品 A 预测模型散点图

Figure 5 Scatter plot of predict model of sample A

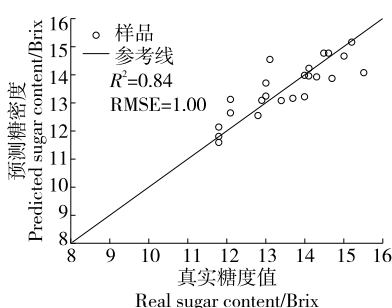


图 6 样品 B 预测模型散点图

Figure 6 Scatter plot of predict model of sample B

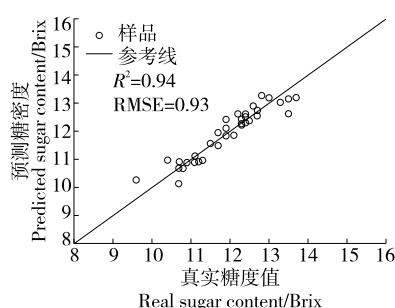


图 7 样品 C 预测模型散点图

Figure 7 Scatter plot of predict model of sample C

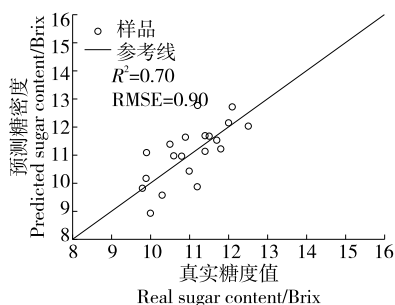


图 8 样品 A 预测结果散点图

Figure 8 Scatter plot of predict result of sample A

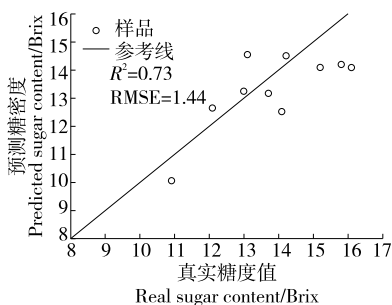


图 9 样品 B 预测结果散点图

Figure 9 Scatter plot of predict result of sample B

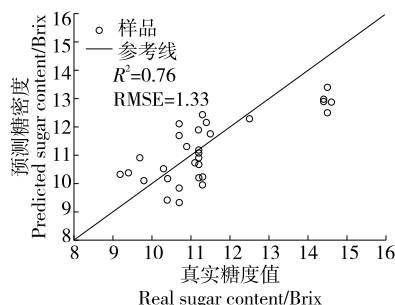


图 10 样品 C 预测结果散点图

Figure 10 Scatter plot of predict result of sample C

结果 R^2 值为 0.76, 实际糖度值与预测糖度值的均方根误差为 1.33。综合来看, 样品 A(红富士)模型预测效果最好, 其次是样品 C(黄元帅)和样品 B(糖心)。

3 结论

在苹果反射光谱基础上, 提出了一种基于暗室系统反射光斑图像特征灰度系列的苹果糖度预测方法。结果表明, 该方法建立中心波长为 670 nm 激光光源的暗室系统, 手机采集图像、处理图像即可实现无损糖度测量。对于训练集, 3 种不同苹果各自预测模型的相关系数均在 0.8 以上; 对于验证集, 每个预测模型的相关系数均在 0.7 以上, 其中红富士苹果糖度预测均方根最小, 预测效果最好。

未来需进一步研究糖度与特征灰度系列的相关关系, 期望可以减少用于糖度预测的特征灰度系列的灰度范围。由于采用单一强吸收波长, 苹果糖度的预测效果总体要略低于多波长的效果, 但是苹果反射光谱的采集比多波长要更加简单, 装置更加轻便。

参考文献

- [1] 乔鑫, 彭彦昆, 王亚丽, 等. 手机联用的苹果糖度便携式检测装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S2): 491-498.
QIAO Xin, PENG Yan-kun, WANG Ya-li, et al. Design and test of portable detection device for apple sugar content combined with

mobile phone[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 491-498.

- [2] 樊书祥, 王庆艳, 杨雨森, 等. 水果糖度可见-近红外光谱手持式检测装置开发与试验[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(10): 3 058-3 063.
FAN Shu-xiang, WANG Qing-yan, YANG Yu-sen, et al. Development and test of handheld detection device for fruit sugar content by visible near infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(10): 3 058-3 063.
- [3] 刘昊辰. 苹果缺陷和糖度的近红外光谱技术动态在线检测研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021: 21-33.
LIU Hao-chen. Dynamic on-line detection of apple defects and sugar content by near infrared spectroscopy [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021: 21-33.
- [4] 彭发, 王震, 刘双喜, 等. 基于偏最小二乘法和深度学习的近红外糖度预测[J]. 吉林农业大学学报, 2021, 43(2): 196-204.
PENG Fa, WANG Zhen, LIU Shuang-xi, et al. Near infrared sugar content prediction based on partial least squares and deep learning[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2021, 43(2): 196-204.
- [5] 乔正明, 詹成. 基于近红外光谱和 SSA-ELM 的苹果糖度预测[J]. 食品与机械, 2021, 37(9): 121-126.
QIAO Zheng-ming, ZHAN Cheng. Prediction of apple sugar content based on near infrared spectroscopy and ssa-elm[J]. Food & Machinery, 2021, 37(9): 121-126.

(下转第 36 页)