

利用荧光高光谱图像技术 无损检测猕猴桃糖度

吴彦红¹, 严霖元^{1*}, 吴瑞梅¹, 杨 勇²

(1. 江西农业大学 工学院, 江西 南昌 330045; 2 深圳市方大装饰工程有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 将 405 nm 激光照射到猕猴桃样品上, 当激光透过样品内部时, 部分单色光被样品内部成分吸收, 释放出荧光, 再用高光谱成像系统采集诱导出的荧光散射图像。在荧光散射图像上选取感兴趣荧光区域 (ROIs), 提取感兴趣区域在波长 400~ 1 000 nm 范围内的特征变量。当提取 12 个特征变量时, 建立的猕猴桃糖度多元线性回归 (MLR) 模型的校正集相关系数 R_c 为 0.932, 预测均方根误差 (RMSEC) 为 $0.4764^{\circ}\text{Brix}$, 预测集相关系数 R_p 为 0.8227, 预测均方根误差 (RMSEP) 为 $0.5645^{\circ}\text{Brix}$ 。研究表明, 采用激光诱导荧光成像技术无损检测猕猴桃糖度是可行的。

关键词: 高光谱图像; 荧光; 无损检测; 猕猴桃; 糖度

中图分类号: S123.0433.2 文献标志码: A 文章编号: 1000- 2286(2010)06- 1297- 04

Nondestructive Determination of Sugar Content in Kiwifruit Using Hyperspectral Fluorescence Imaging Technology

WU Yan-hong¹, YAN Lin-yuan^{1*}, WU Ruimei¹, YANG Yong²

(1. College of Engineering JAU, Nanchang 330045, China; 2 FangDa Decoration Engineering Ltd, Shenzhen 518057, China)

Abstract This paper attempts the feasibility to determine the sugar content in kiwifruit using hyperspectral fluorescence imaging technique. A continuous wave laser (405 nm) was used as an exciting source for inducing fluorescence in kiwifruits. Fluorescence scattering images were acquired from kiwifruit by a hyperspectral imaging system. Fluorescence scattering images were preprocessed, then the regions of interest (ROIs) of pixels were selected from the preprocessed images. Character variables were selected in the wavelength range of 400~ 1 000 nm attained by mean grey value of the ROIs. The MLR model was achieved with $R_c = 0.932$ and $RMSEC = 0.4764^{\circ}\text{Brix}$ in the calibration set, $R_p = 0.8227$ and $RMSEP = 0.5645^{\circ}\text{Brix}$ in the prediction set when 12 character variables were selected. The study demonstrated that laser-induced fluorescence hyperspectral technology could be successfully used in determination of sugar content in kiwifruits.

Key words hyperspectral imaging; fluorescence; nondestructive determination; kiwifruit; sugar content

猕猴桃是一种营养丰富的农产品, 为提高其附加值, 果农按颜色、大小、质量等外部指标进行分级处理再进入销售市场, 但其糖度是猕猴桃的重要内部品质指标之一, 直接影响消费者的接受程度。传统检测糖度的方法大多是破坏性的, 检测成本高, 无法满足消费者选购高品质水果的要求。目前相关研

收稿日期: 2010- 09- 02 修回日期: 2010- 10- 26

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目 (0630023)和江西农业科技支撑计划资助项目 (2009BNB05705)

作者简介: 吴彦红 (1959-), 女, 教授, 主要从事农产品品质研究; * 通讯作者: 严霖元, E-mail: yly_j@163.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

究^[1-3]表明,利用光谱技术可快速检测猕猴桃的内部品质,但光谱技术只能检测到水果内部的部分组织信息,而猕猴桃形状不规则,其内部组织在空间分布不一致,对检测结果影响很大。高光谱成像技术集计算机图像技术和光谱技术于一体,其特定波长下的光谱信息能充分反映出水果内部组织的物理结构、化学成分等差异,在特定波长下,各个像素点的灰度值又与其在该波长下的光谱值相对应。因此,待测对象的原始高光谱图像既包含了其内部成分在特定像素下的光谱信息,也包含了其外部特征在特定波长下的图像信息。利用高光谱数据能同时表征被测对象的外部特征和内部信息的优点,国内外学者将该技术应用于农产品品质的无损检测中^[4-10],但在猕猴桃糖度的检测方面研究得很少。近年来,有些学者利用激光诱导荧光技术检测水果的品质。Zude等^[11]利用激光诱导产生的荧光光谱研究了香蕉的褐变和损伤状况。Wulf等^[12]利用激光诱导产生的荧光光谱研究苹果、萝卜等在储存过程中胡萝卜素、叶绿素和多酚类物质含量的变化。

本文提出将高光谱成像技术和激光诱导荧光技术相结合无损检测猕猴桃糖度的方法,将激光照射到猕猴桃样品,诱导出荧光光谱后,利用高光谱成像系统采集荧光光谱,通过分析荧光光谱图像,探讨荧光高光谱图像所包含的信息与猕猴桃糖度的相关性,为实现猕猴桃内部品质的在线检测提供技术依据。

1 材料和方法

1.1 猕猴桃样本

试验用猕猴桃样品在江西省奉新县某猕猴桃果园里随机挑选100个,其中校正集60个,预测集40个。将样本编号后储存在5~12℃的环境中。荧光高光谱图像采集前,将样本在室温(22℃)下放置24h以使猕猴桃温度达到室温平衡。

1.2 高光谱图像采集系统

图1是试验使用的高光谱图像采集系统示意图,由高光谱摄像头(InSpector V10E,芬兰)、405nm激光器和载物移动平台(301系列电控平移台,江西连胜实验设备有限公司)等部件组成。高光谱摄像头光谱范围为400~1000nm,光谱分辨率为2.8nm。

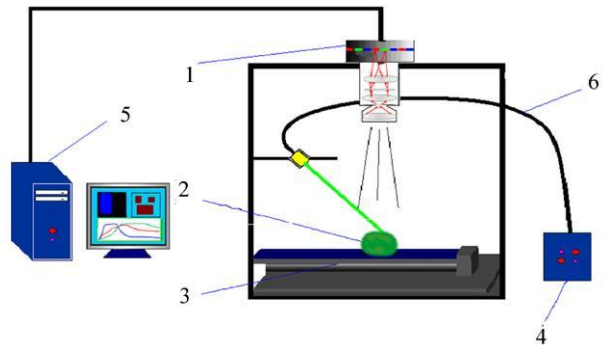
1.3 激光诱导荧光检测原理及荧光高光谱图像采集

激光诱导荧光检测原理是当激光照射到待测物表面时,待测物被激发出荧光,待测物产生的荧光波长与物质内部组织结构有关,且荧光强度与物质内部成分含量多少成正比,因此,可利用荧光波峰位置和荧光强度对待测物进行定性和定量分析。

本试验采用405nm低噪声绿光激光器,当激光照射在猕猴桃表面时,产生直径为1.5mm的圆形光束透过水果内部,部分单色光会被猕猴桃内部成分吸收并释放荧光。这些荧光分散在猕猴桃表面激光照射点的周围,由线扫描成像光谱仪收集诱导出的荧光散射图像。当光通过成像光谱仪时,分散成不同的波长,色散后的光信号投射到CCD摄像头。高光谱图像采集前,调整好摄像头的曝光时间、帧频、微调台高度及输送速度,以确保图像清晰,避免图像尺寸和空间分辨率失真。图像采集由SpectralCube(Spectral Imaging Ltd, Finland)软件平台控制,得到的每幅原始图像为600×1024×1024(宽600长10241024波段),波长范围206.49~1282.11nm,波长间隔为1.02nm。

1.4 猕猴桃糖度测量

猕猴桃糖度由WZ-103型手持糖度计(中友光学仪器有限公司,福建省泉州光学仪器厂)测定糖



1. 图像光谱仪和摄像头; 2 猕猴桃; 3 载物移动台; 4 激光器; 5 电脑; 6 光纤。

1. Imaging spectrograph and camera 2 Kiwifruit 3 Locomotor luggage carrier 4 Laser light 5 Computer 6 Fiber

图 1 高光谱图像采集系统

Fig 1 Hyperspectral imaging system

度计测量范围为 0~ 32 °Brix, 分辨率为 0.2 °Brix, 具有温度自动补偿功能。在每个猕猴桃对应的光束入射点处切 2 小块, 测量每块的糖度值, 取平均值作为该样本的糖度值 (表 1)。

表 1 猕猴桃糖度统计值

Tab 1 Statistics of kiwifruit sugar content

°Brix

样本 Sample	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean	标准差 Std
猕猴桃 Kiwifruit (n = 100)	20.6	13.46	17.43	1.98

所有数据分析由 ENVI 4.3 (Research system, Inc., USA)、Matlab (Mathworks matlab 7.0 Inc., USA) 和 DPS 软件完成。

2 结果与讨论

2.1 原始图像预处理

在 ENVI 软件中把猕猴桃图像减去对应的黑板图像, 消除成像系统及环境等因素产生的噪声。因采集到的原始图像过大, 为便于后续处理, 需从处理后的图像中提取感兴趣区域。对分割处理后的荧光图像对比分析发现, 各个猕猴桃样本被诱导出的荧光强度不同, 较集中的荧光区域分布如图 2 中的长方形区域所示, 区域宽度在激光光源入射轴两边大约 10 个像素, 区域长度 (180~ 500 像素) 大约为水果的长度。本研究在激光照射点周围取 30 × 150 个像素的感兴趣区域 (ROIs), 得到 30 × 150 × 1024 的高光谱图像, 然后计算感兴趣区域从 400 ~ 1 000 nm 内每个波长下的光谱散射量的平均值, 得到各个波段下图像的亮度均值。图 3 为 ENVI 统计出的亮度均值光谱线。

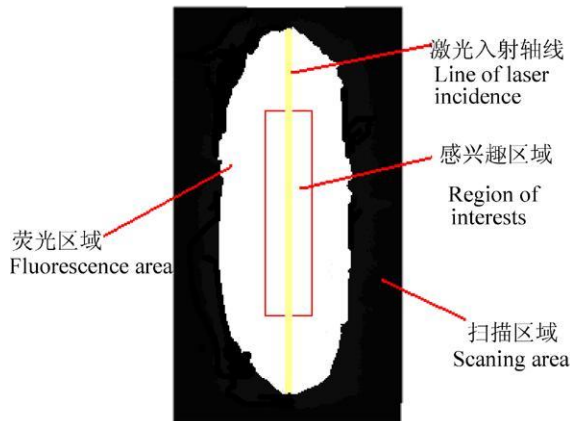


图 2 猕猴桃的高光谱荧光图像

Fig 2 Hyperspectral fluorescence image of a kiwifruit

2.2 噪声处理

对比多个黑板图像, 发现各个黑板图像其亮度均值基本相同, 并有明显峰值, 大致判定其为噪声^[13], 需去除。本文采用常威威^[14]提出的基于匹配思想的自适应消噪方法, 此方法与匹配思想相结合, 将二维图像条带噪声简化为一维。整个算法过程如下: (1) 获取条带噪声图像的列均值曲线; (2) 采用小波变换对此曲线去噪, 得到去噪后的列均值曲线, 将其作为匹配调整的参考值; (3) 按下面公式将原始含有条带噪声图像的各列均值匹配到新的列均值上, 得到去噪后的图像。

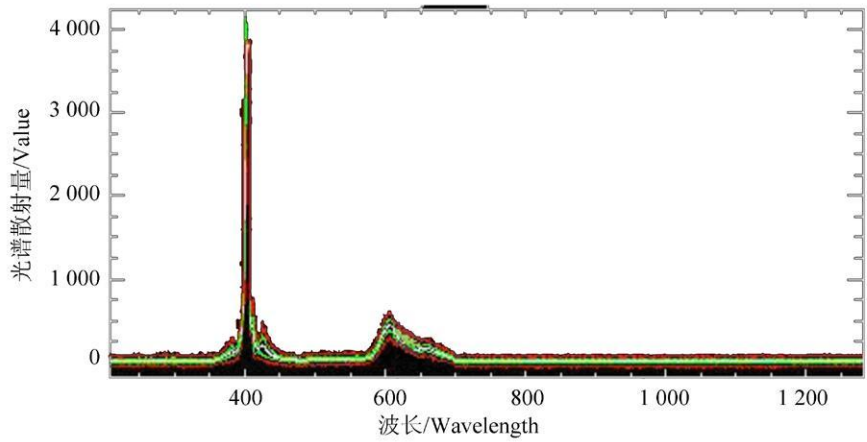


图 3 用 ENVI 统计的亮度均值光谱曲线

Fig 3 The mean spectra of the brightness in kiwifruit hyperspectral imaging

removed background using ENVI

$$I'_{ij} = \mu + \frac{\sigma}{\sigma_j} (I_{ij} - \mu_j), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: I_{ij} , I'_{ij} 分别为调整前后图像第 i 行、 j 列像素值; μ 为对原始条带图像列均值曲线进行消噪处理后的第 j 列新的均值 (参考值); σ 为标准差; μ_j , σ_j 分别为原始条带图像第 j 列的均值和标准差。消噪后新的行均值曲线保留了原始曲线的绝大多数信息, 因此把新的均值曲线看成是由条带均值中恢复出的真实均值分布曲线, 即经过行均值匹配后, 既消除了条带噪声的干扰, 又较好地保持了原始图像的反射特性, 不会产生矩匹配似的失真。通过上述方法, 将 ROIs (30 × 150 pixels) 图像减去黑板, 即可得出经过图像去噪后每个波段下的亮度均值。

2.3 荧光高光谱有效波段选择及预测模型建立

选择有效波段建立模型能去除与待分析组分的无关信息及冗余信息对模型性能的影响, 本研究选取 440~726 nm 光谱段, 共 280 个波长作为建模波段。为消除相邻波段间的线性相关性, 在此区域内每隔 26 nm, 等间隔提取 12 个特征波长, 用多元线性回归 (MLR) 建立荧光高光谱糖度预测模型, 以模型的相关系数和预测均方根误差作为评判标准。由 12 个特征波长建立的 MLR 模型校正集相关系数 $R_c = 0.932$, 预测均方根误差 ($RMSEC$) 为 0.4764°Brix , 预测集相关系数 $R_p = 0.8227$, 预测均方根误差 ($RMSEP$) 为 0.5645°Brix 。图 4 是预测集的糖度实测值与预测值的散点图。

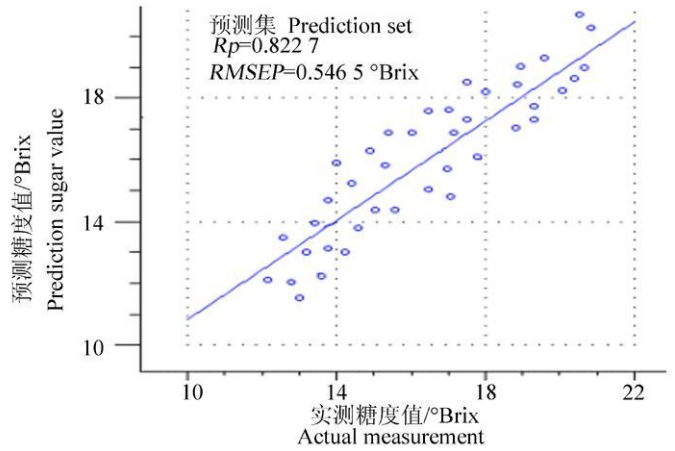


图 4 预测集中糖度实测值与预测值散点图

Fig 4 Prediction VS reference values of sugar in predicting set

3 结 论

本文提出将高光谱成像技术和激光诱导荧光技术相结合, 探讨利用荧光诱导高光谱成像技术无损检测猕猴桃糖度的可行性。将激光照射到猕猴桃, 部分单色光被猕猴桃内部成分吸收释放出荧光, 形成的荧光散射图像由线扫描成像光谱仪收集。对原始高光谱图像去噪后, 提取感兴趣区域, 选取感兴趣区域内在 400~1000 nm 的特征变量, 用多元线性回归方法建立猕猴桃糖度的预测模型。结果表明, 当提取 12 个特征变量时, 所建立的 MLR 模型校正集相关系数 $R_c = 0.932$, 预测均方根误差 ($RMSEC$) 为 0.4764°Brix , 预测集相关系数 $R_p = 0.8227$, 预测均方根误差 ($RMSEP$) 为 0.5645°Brix 。在今后研究中, 应继续寻找其他的线性或非线性方法建立模型, 在模型建立过程中探索一些新的去噪方法和特征提取算法, 以提高预测模型的预测能力, 促进高光谱技术在水果品质无损检测中的应用。

参考文献:

[1] Schaar P N, Frser D G. Comparison of reflectance, interactance and transmission modes of visible-near infrared spectroscopy for measuring internal properties of kiwifruit (*Actinidia chinensis*) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2000, 20: 175-184.
 [2] M cgbne V A, Jordan R B, Seelye R, et al. Comparing density and NIR methods for measurement of kiwifruit dry matter and soluble solids content [J]. Postharvest Biology and Technology, 2002, 26: 191-198.
 [3] M cgbne V A, Clark C J, Jordan R B. Comparing density and VNIR methods for predicting quality parameters of yellow-fleshed kiwifruit (*Actinidia chinensis*) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 46: 1-9.
 [4] 刘木华, 赵杰文, 郑建鸿. 农畜产品品质无损检测中高光谱图像技术的应用进展 [J]. 农业机械学报, 2005, 36(9): 139-143.
 [5] 洪添胜, 乔军, Ning Wang 等. 基于高光谱图像技术的雪花梨品质无损检测 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 151-155.
 [6] Lu R, Chen Y R. Hyperspectral imaging for safety inspection of food and agricultural products [J]. SPE Proc, 1998, 35

拟模型进行了排种过程的模拟试验,通过台架试验验证,基于 ADAMS 的型孔式棉花精量排种器仿真平台可以近似地模拟棉种的排种过程,其虚拟试验的结果与台架试验基本相符,验证了平台的相对正确性,可为进一步优化排种器系统提供技术支持。

参考文献:

- [1]王吉奎,坎杂.夹持自锁式棉花精量穴播器的设计与试验 [J].农业机械学报, 2006(5): 54- 57.
- [2]张宇文,张文超,李冬肖.中心传动强推式精密排种器设计 [J].农业机械学报, 2010(2): 78- 82.
- [3]Yang M ingjin. Experimental research on dynamic coefficients of coated rice seeds [J]. Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America. 2003, 34(1): 18- 20.
- [4]陆林,李耀明.虚拟样机技术及其在农业机械设计中的应用 [J].中国农机化, 2004(4): 59- 61.
- [5]周成,王静学,马增奇.虚拟样机技术及其在农机产品开发中的应用 [J].现代化农业, 2004(11): 30- 32.
- [6]邓劲莲,李尚平,杨家强,等.小型甘蔗联合收获机虚拟样机的仿真 [J].农业机械学报, 2002(33): 54- 56.
- [7]夏俊芳,周勇,张平华.基于虚拟仪器的排种器性能检测技术 [J].农业机械学报, 2009(40): 87- 90.
- [8]夏俊芳,徐昌玉,周勇.基于 ADAMS 的精密播种机补种机构虚拟设计与分析 [J].华中农业大学学报, 2007(3): 419- 422.
- [9]李玉清,刘佳,周桂霞,等.基于 SolidWorks 的气吸式排种器运动仿真设计 [J].农机化研究, 2010(6): 28- 30.
- [10]李增刚. ADAMS 入门详解与实例 [M].北京:国防工业出版社, 2006. 18- 81.
- [11]高广娣,胡斌,温宝琴.基于 ADAMS 的型孔式棉花精量排种器排种性能影响因素分析 [J].山东农业大学学报, 2009, 40(1): 41- 44.
- [12]高建民,周鹏,张兵,等.基于光滑粒子流体力学的土壤高速切削仿真系统开发及试验 [J].农业工程学报, 2007(8): 20- 26.
- [13]王显仁,李耀明,徐立章.水稻脱粒破碎率与脱粒元件速度关系的研究 [J].农业工程学报, 2007(8): 16- 19.
- [14]马爱丽,廖庆喜,等.精密排种器性能指标检测统计软件开发与应用 [J].农业装备技术, 2007(1): 19- 22.
- [15]付宏,董劲男.精密排种器的集成分析设计系统开发研究 [J].计算机集成制造系统, 2005(5): 744- 750.
- [16]国家标准局. GB 69732286 单粒(精密)播种机试验方法 [S].北京:标准出版社, 1986.

(上接第 1300 页)

- [7]Kong S G. Inspection of poultry skin tumor using hyperspectral fluorescence imaging [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5132: 455- 463.
- [8]Mehl P M, Chen Y R, Kim M S. Development of hyperspectral imaging technique for the detection of apple surface defects and contaminations [J]. Journal of Food Engineering. 2004, 61(1): 67- 81.
- [9]Jin Lee K ang, Kang Sukwon, S K in M oon, et al. Hyperspectral imaging for detecting defect on apples [C]. ASAE Annual International Meeting Tampa Florida. 2005: 53- 75.
- [10]郭恩有,刘木华,赵杰文.脐橙糖度的高光谱图像无损检测技术 [J].农业机械学报, 2008, 39(5): 91- 93, 103.
- [11]Zude M, detection of fruit tissue browning using laser- induced fluorescence spectroscopy [C]. Acta Horticulturae 628 XX- VI International Horticultural Congress. Issues and Advances in Postharvest Horticulture, 2010.
- [12]Wulf J S, Geyer M, Nikolai B, et al. Non- destructive assessment of pigments in apple fruit and carrot by laser- induced fluorescence spectroscopy(Lifs) measured at different time- gate positions [J]. Acta Horticulturae, 2010, 682: 1387- 1394.
- [13]周小芳,方炎,张鹏翔.水果表面残留农药的拉曼光谱研究 [J].光散射学报, 2004, 16(1): 11- 14.
- [14]常威威,郭雷,刘坤.OM IS 图像条带噪音消除方法研究 [J].光子学报, 2007, 36(11): 2148- 2152.