

基于高光谱成像技术的苹果内外品质同时检测*

单佳佳 彭彦昆 王 伟 李永玉 吴建虎 张雷蕾

(中国农业大学工学院,北京 100083)

【摘要】 结合高光谱图像处理和光谱分析方法,通过一次图像扫描同时对苹果的表面摔伤和糖分含量进行检测。苹果第一主成分图像与 794 nm 的图像相减后进行去噪和阈值分割处理,摔伤检测的准确率为 92.6%。对感兴趣区域的反射光谱曲线进行多元散射校正、一阶导数和 SG 平滑处理后利用偏最小二乘回归方法建立糖分含量的预测模型,校正集相关系数 R_c 为 0.93,SEC 为 0.47°Brix,验证集相关系数 R_v 为 0.92,SEV 为 0.67°Brix。结果表明:利用高光谱成像技术可以实现苹果内部品质和外部品质的同时检测。

关键词: 苹果 糖分含量 摔伤 高光谱 无损检测

中图分类号: S123 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)03-0140-05

Simultaneous Detection of External and Internal Quality Parameters of Apples Using Hyperspectral Technology

Shan Jiajia Peng Yankun Wang Wei Li Yongyu Wu Jianhu Zhang Leilei

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

The hyperspectral imaging technology was used to detect the bruises and solid soluble content (SSC) of apples simultaneously. The image at 794 nm from the first principle component was subtracted, the series of de-noising and threshold processing were performed and the bruises on apples were predicted with the accuracy of 92.6%. In the hyperspectral imaging, region of interest (ROI) was determined and spectrum reference curve was calculated. The original reflectance spectrum curve was processed by multiplicative scatter correction (MSC), a first derivative and Savitzky – Golay (SG) smoothing, and PLSR model was developed to predict SSC with R_c of 0.93, SEC of 0.47°Brix, and R_v of 0.92, SEV of 0.67°Brix. The research showed that it was feasible to detect the SSC and bruises on apples simultaneously with hyperspectral imaging technology.

Key words Apples, Solid soluble content, Bruises, Hyperspectral, Nondestructive detection

引言

高光谱成像技术是传统成像技术和光谱技术有机结合形成的一项新技术,应用于农产品检测中,它包含了农产品的图像信息和光谱信息^[1~4]。图像信息可以检测农产品外部可见的品质(如伤疤、污染物等),光谱信息可以检测农产品的内部品质(糖分、硬度等)。因此,高光谱成像技术在实现农产品

综合品质的检测方面具有很大的发展潜力。

利用高光谱技术对水果内部品质的检测,国内外已有较多的研究^[5~7],研究方法主要是从感兴趣区域选取反射光谱来建立水果品质的模型。水果外部品质检测主要是基于计算机视觉技术对形状、大小、颜色等检测^[8~13]。赵杰文^[14]等利用高光谱图像检测苹果的轻微摔伤,通过合适的图像处理方法提取苹果的轻微摔伤,结果表明,高光谱成像技术对

收稿日期: 2010-05-06 修回日期: 2010-07-26

* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD11A12-11)和国家农业智能装备工程技术研究中心开放课题资助项目

作者简介: 单佳佳,硕士生,主要从事农产品无损检测研究,E-mail: jia.jia.1986@163.com

通讯作者: 彭彦昆,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备和农产品品质安全检测研究,E-mail: ypeng@cau.edu.cn

苹果轻微摔伤的检测率达到 88.57% ,但是这些研究仅限于对水果外部或内部品质的研究,对内外品质同时检测的研究还未见报道。

本文利用高光谱成像技术的空间性和光谱性,结合图像处理和光谱分析的数学解析方法,采用基准图像和光谱建模等手段对苹果表面摔伤和糖分含量进行同时检测。

1 实验材料与仪器

1.1 实验材料

从市场选购大小、形状基本一致,无机械摔伤的烟台红富士苹果 108 个。购回的苹果用密封袋包装,置于 3℃ 环境中储存。实验前将苹果从储藏环境中取出,在实验室放置 12 h 使其达到室温后对苹果进行人工摔伤。人工模拟摔伤过程如下:将苹果放置在 1 m 高的平台处,使其自由滚落至地面,每个苹果仅摔伤一处。108 个苹果样本,摔伤 30 个,完好苹果 78 个。摔伤后的苹果在室温放置 3 h 左右至摔伤部位发生褐变后,开始采集其高光谱图像。

1.2 实验仪器

使用文献[15]中的高光谱成像系统,该系统主要由 CCD 相机 (Sensicam qe, USA)、成像光谱仪 (Inspector V10E, Finland)、物镜、光源、电控平移台 (AH - STA02,北京安和光电公司)及其运动控制器 (AH - SC3,北京安和光电公司)等组成。成像光谱仪波长范围为 400 ~ 1 100 nm,光谱分辨率为 2.8 nm,镜头焦距为 12 mm。光源为钨卤灯 (Philips,100 W),分别位于苹果图像采集的上方,呈对称分布。

2 实验方法

2.1 图像采集与处理

采集样本的高光谱图像时,系统的设置如下: CCD 相机的曝光时间为 100 ms,苹果最高点到物镜距离为 134 mm,电动机控制速度为 21 mm/min,扫描线实际长度为 98.6 mm。采集苹果图像前,盖上镜头,采集暗图像,再以全反射材料白板为背景采集白图像。采集完黑白图像后,将苹果放在纯黑的平板上进行扫描。每个苹果扫描沿赤道四等分面的高光谱图像,若是摔伤的苹果,采集摔伤面(摔伤部位位于采集面中间)和其余 3 个面的高光谱图像。每幅图像需进行黑白校正,校正计算公式为

$$R = \frac{R_s - R_d}{R_w - R_d}$$

式中 R_s ——样本原始的漫反射光谱图像
 R_w ——白板的漫反射图像

R_d ——暗图像

R ——校正后的漫反射光谱图像

高光谱系统采集得到的是线扫描图像,图像的横坐标代表 0 ~ 100 mm 范围的空间距离,纵坐标代表 400 ~ 1 100 nm 的光谱范围。相机从初始位置开始从左向右扫描样品,每扫描一行得到一幅图像。在 VC++ 软件平台上编写文件格式转换程序,输入单个样品所有的线扫描图像,转换合成整个苹果的高光谱立体数据。

在 ENVI 4.3 软件平台上打开合成的高光谱立体数据,可显示 400 ~ 1 100 nm 各个波长下的图像。同一苹果不同扫描面在 608 nm 波长下的高光谱图像如图 1 所示。图 1a 是苹果摔伤面的高光谱图像,图 1b 是苹果完好面的高光谱图像。

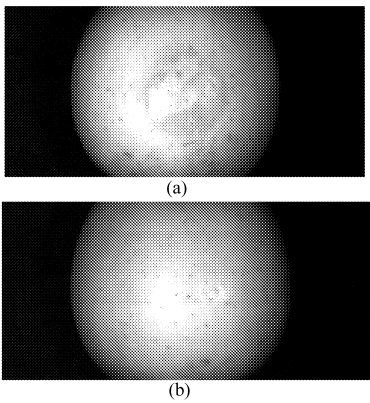


图 1 608 nm 处的高光谱图像

Fig. 1 Hyperspectral image at wavelength of 608 nm
(a) 摔伤面 (b) 完好面

2.2 摔伤部位

对苹果四个扫描面分别进行摔伤检测。根据主成分的思想,第一主成分尽可能多地反映了原来变量的信息。原始反射光谱曲线两端的信噪比低,在 ENVI 4.3 软件中选择波段 480 ~ 1 016 nm 的苹果图像进行主成分分析,获得摔伤苹果第一主成分图像,该图像包含了最能体现苹果表面的信息。

2.2.1 苹果形状

受苹果形状的影响,光在苹果表面的漫反射强度也呈球形分布,光的反射强度从中间向边缘逐渐减弱,也就是说在图像中部摔伤部位的像素灰度值可能比边缘高,因此,仅用单阈值方法很难将摔伤部位提取出来。设想存在某一波段下的图像,在这个波段上,摔伤部位与正常部位的反射特性差异很小。该图像上的反射光谱可以认为完全按照完好苹果的曲面分布,把该图像作为苹果的基准图像。使用主成分图像与基准图像相减的办法来消除苹果表面部分反光和苹果曲度的影响。对于表面完好的苹果,第一主成分图像与基准图像像素灰度值的差值在整

个苹果表面均匀分布。但是若苹果表面有摔伤,则两幅图像像素灰度值差值在摔伤处相对比较大。因此将两幅图像相减,再通过单阈值分割法就可以将摔伤部位提取出来。

2.2.2 基准图像

在苹果的摔伤部位和未摔伤部位分别选取 6×6 感兴趣区域(range of interest, 简称 ROI), 求其反射光谱曲线。为了减小苹果表面曲度的影响,选择摔伤部位和非摔伤部位的感兴趣区域时,尽量在每个苹果摔伤部位边界领域内小范围选取,如图 2 (“□”为 ROI 区域)所示。计算所有样品摔伤部位和未摔伤部位反射光谱曲线的平均曲线,之后将得到的两条曲线相减,差值越小的波段其高光谱图像中摔伤部位和非摔伤部位的区别越不明显。结合相减后的差值和 ENVI 中的观察选取基准图像。

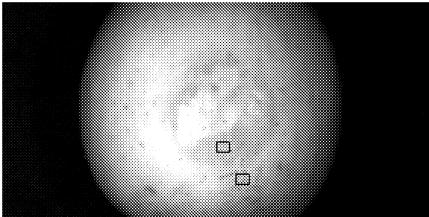


图 2 苹果的高光谱图像
Fig.2 Hyperspectral image of apple

苹果表面果斑点的颜色与发生褐变的颜色接近,二值化分割后的图像含有斑点噪音,因斑点面积小,且是离散分布的,可以采用滤波的方法进行消除。通过对比,选用 3×3 均值滤波处理,最后通过阈值分割的方法将摔伤部位提取出来。

2.3 糖分模型

采用从感兴趣区域提取反射光谱的方法建立糖分的预测模型。由于苹果中间区域的漫反射强度大,信噪比高。每幅图像从相对中间较亮部位选取 50×50 的区域作为感兴趣区域,如图 3 (“□”为 ROI 区域)所示。鉴于所选感兴趣区域面积较小,因此可忽略该区域内苹果曲度的影响。为了保证数据的一致性,对于摔伤苹果,把除摔伤面以外其他 3 个面的感兴趣区域进行平均,完好的苹果任意取 3 个面的感兴趣区域平均,获取其平均反射光谱曲线。

使用多元散射校正 (multiplicative scattering correction, 简称 MSC)、一阶导数(first derivative) 和 SG (Savitzky - Golay) 平滑等方法对反射光谱曲线进行预处理,然后使用偏最小二乘回归(partial least squares regression, 简称 PLSR)的方法建立苹果糖分的预测模型。

2.4 糖分参照值

用糖度折射计测量苹果对应光谱采集面上感兴

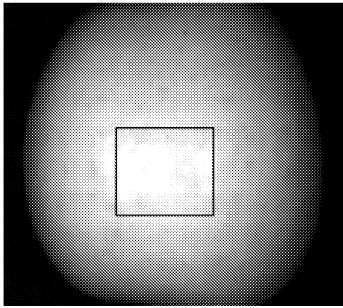


图 3 感兴趣区域的选取
Fig.3 Range of interest

趣区域的糖度值,将 1 个苹果样品 3 个位置的糖度值平均后得到该苹果糖度的参照值。

3 结果与讨论

3.1 外部品质检测

由于光源两端的信号弱,摔伤部位和非摔伤部位差值最小的波长其图像比较模糊,发暗,故结合摔伤部位与非摔伤部位的差值和 ENVI 中对各波长下图像的观察,选择 794 nm 波长的图像作为基准图像。

图 4a 是苹果 480 ~ 1 016 nm 波段内第一主成分图像,图 4b 是 794 nm 波长下的图像,摔伤部位从图中基本看不出来。

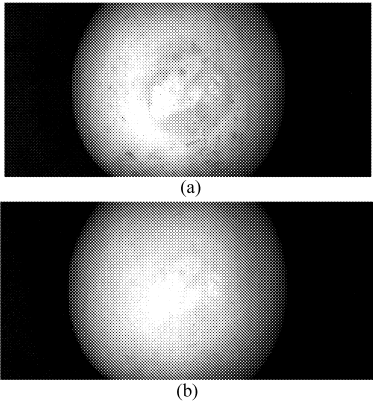


图 4 苹果的高光谱图像
Fig.4 Hyperspectral image of apple
(a) 第一主成分图像 (b) 794 nm 处的高光谱图像

两幅图像相减后,对图像进行 3×3 均值滤波处理,然后通过单阈值的方法提取摔伤部位,提取结果如图 5 所示。

由于苹果大小、表面特性等各种因素不一致的影响,不同苹果 794 nm 波长处的图像和第一主成分图像的像素灰度值不同,从而导致不同苹果两幅图像像素灰度值差值也不同,因此,不同样本使用固定不变的阈值分割是不合理的。通过对相减后的图像分析,表面完好的苹果表面像素值分布均匀,所有的像素灰度值差值都在某一小范围内波动,但是摔伤

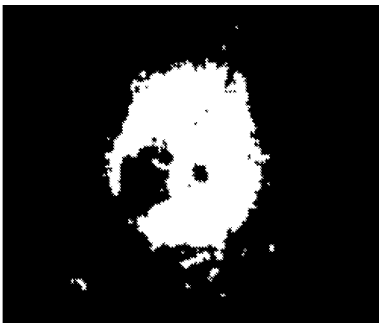


图 5 图像处理结果
Fig.5 Image after processing

处的像素灰度差值有大的变化。所以计算相减后以图像苹果表面像素灰度值的平均值作为基准设置阈值比较合理。

在 VC 软件平台上,对上述处理完的图像进行标记处理^[16]计算摔伤面积。在线生产时,可以通过 VC 软件控制,发出信号,控制相应的筛选机构,将不合格的苹果剔除。对 108 个苹果进行检测,结果如表 1 所示。

表 1 苹果的检测结果
Tab.1 Classification of apples

类别	数量/个	检测结果/个		准确率/ %
		正确检测	误检	
完好样本	78	70	8	89.7
摔伤样本	30	30	0	100
所有样本	108	100	8	92.6

从表 1 中可以看出,完好苹果 78 个,检测出 70 个,检测率为 89.7%;摔伤苹果 30 个,检测出 30 个,检测率为 100%,所有样本总的检测率为 92.6%。

3.2 糖分含量模型的预测结果

按 3:1 的原则,将上述 108 个苹果随机分成校正集和验证集,校正集含有 81 个样本,用于预测模型的校正,验证集含有 27 个样本,用于模型的验证。

由于原始反射光谱曲线两端的信噪比低,在本次实验中选择 480 ~ 1 016 nm 波段内的光谱建模,图 6 所示为原始反射光谱曲线。

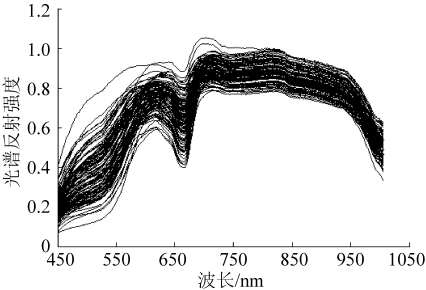


图 6 原始光谱反射曲线
Fig.6 Reflectance curves of original spectrum

对原始反射光谱数据进行不同的预处理,采用 PLSR 方法建模,使用留一交叉验证 (leave-one-out cross-validation) 法确定偏最小二乘回归建模的主成分数。结果如表 2 所示,其中 R_c 为校正组的相关系数,SEC (standard error of calibration) 为校正组的校正标准差, R_v 为验证组的相关系数,SEV (standard error of validation) 为验证组的标准差。

表 2 不同的数据处理方法校正和预测结果
Tab.2 Correlation coefficient of calibration and validation groups with different data processing

数据处理方法	主成分数	R_c	SEC /°Brix	R_v	SEV /°Brix
MSC	15	0.97	0.31	0.90	0.70
MSC + 一阶导数处理	8	0.95	0.37	0.90	0.71
MSC + 一阶导数 + SG 平滑处理	8	0.93	0.47	0.92	0.67

结果表明:原始反射光谱 + MSC + 一阶导数 + SG 平滑处理后的模型相对稳定,建模效果较好。采用 PLSR 的方法,选取 8 个主成分,校正集糖分含量的相关系数为 R_c 为 0.93,SEC 为 0.47°Brix,验证集糖分含量的相关系数 R_v 为 0.92,SEV 为 0.67°Brix。校正集和验证集相关性结果如图 7 所示。

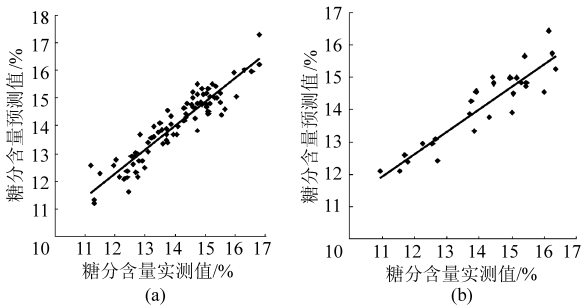


图 7 偏最小二乘法的建模结果
Fig.7 Prediction results with PLSR
(a) 校正集预测结果 (b) 验证集预测结果

4 结束语

利用高光谱技术图像信息与光谱信息相结合,对苹果的表面摔伤和糖分含量同时检测。苹果表面摔伤的检测,采用 480 ~ 1 016 nm 波段内第一主成分图像与 794 nm 波段处图像相减的方法,消除苹果形状引起的光照不均匀的影响,然后通过阈值分割的方法将摔伤部位提取出来。完好苹果 78 个,检测出 70 个,检测率为 89.7%;摔伤苹果 30 个,检测出 30 个,检测率为 100%,全部 108 个苹果总的检测率达到 92.6%。从高光谱图像的感兴趣区域提取 480 ~ 1 016 nm 波段内平均反射光谱曲线对苹果的糖分含

量进行建模预测,对反射光谱进行 MSC + 一阶导数 + SG 平滑处理,采用 PLSR 法建立糖分预测模型,校正集的相关系数 R_c 为 0.93,SEC 为 0.47°Brix ,验证集的相关系数 R_v 为 0.92,SEV 为 0.67°Brix 。在线

检测时先对苹果的外部品质进行检测,如有摔伤则剔除。若苹果表面没有摔伤,则进一步对苹果的分含量进行检测,该研究表明利用高光谱技术可以实现苹果内外综合品质的检测。

参 考 文 献

- 田有文,王晓娟. 基于高光谱图像技术的农产品品质无损检测[J]. 农机化研究,2009(10):220~222.
Tian Youwen, Wang Xiaojuan. Nondestructive inspections of agricultural products based on hyperspectral image [J]. Agricultural Mechanization Research, 2009(10): 220~222. (in Chinese)
- 王雷,乔晓艳,董有尔,等. 高光谱图像技术在农产品检测中的应用进展[J]. 应用光学,2009,30(4):639~645.
Wang Lei, Qiao Xiaoyan, Dong Youer, et al. Application of hyper-spectral image technology in detecting agriculture product [J]. Applied Optics, 2009, 30(4): 639~645. (in Chinese)
- 马本学,应义斌,饶秀勤,等. 高光谱成像在水果内部品质无损检测中的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2009,29(6):1611~1615.
Ma Benxue, Ying Yibin, Rao Xiuqin, et al. Advance in nondestructive detection of fruit internal quality based on hyperspectral imaging [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(6): 1611~1615. (in Chinese)
- 滕安国,高峰,夏新成,等. 高光谱技术在农业中的应用研究进展[J]. 江苏农业科学,2009(3):8~10.
- 洪添胜,乔军,Wang Ning,等. 基于高光谱图像技术的雪梨梨品质无损检测[J]. 农业工程学报,2007,23(2):151~155.
Hong Tiansheng, Qiao Jun, Wang Ning, et al. Non-destructive inspection of Chinese pear quality based on hyperspectral imaging technique[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 151~155. (in Chinese)
- Peng Yankun, Lu Renfu. Analysis of spatially resolved hyperspectral scattering images for assessing apple fruit firmness and soluble solids content [J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 48(1): 52~62.
- Lu Renfu, Peng Yankun. Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness [J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(2): 161~171.
- 郑修练,俞祖. 基于计算机视觉的柑橘无损检测技术[J]. 轻工机械,2008,26(1):83~85.
Zheng Xiulian, Yu Zu. Orange non-destructive selection technology based on the computer vision [J]. Light Industry Machinery, 2008, 26(1): 83~85. (in Chinese)
- 庞江伟,应义斌. 机器视觉在水果缺陷检测中的研究现状[J]. 农机化研究,2006(9):47~49.
Pang Jangwei, Ying Yibin. Application of machine vision for detection of defects on fruit [J]. Agricultural Mechanization Research, 2006(9): 47~49. (in Chinese)
- 王磊. 基于 MATLAB 的数字图像处理[J]. 苏州市职业大学学报,2009,20(2):53~56.
Wang Lei. Digital image processing based on MATLAB [J]. Journal of Suzhou Vocational University, 2009, 20(2): 53~56. (in Chinese)
- 应义斌,饶秀勤,马俊福. 柑橘成熟度机器视觉无损检测方法研究[J]. 农业工程学报,2004,20(2):144~147.
Ying Yibin, Rao Xiuqin, Ma Junfu. Thodology for nondestructive inspection of citrus maturity with machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 144~147. (in Chinese)
- 冯斌,汪懋华. 计算机视觉技术识别水果缺陷的一种新方法[J]. 中国农业大学学报,2002,7(4):73~76.
Feng Bin, Wang Maohua. Study on identifying measurment about default of fruit in computer vision [J]. Journal of China Agriculture University, 2002, 7(4): 73~76. (in Chinese)
- Juan Xing, Cédric Bravo, Pál T Jancsó, et al. Detecting bruises on 'Golden Delicious' apples using hyperspectral imaging with multiple wavebands [J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(1): 27~36.
- 赵杰文,刘剑华,陈全胜,等. 利用高光谱图像技术检测水果轻微摔伤[J]. 农业机械学报,2008,39(1):106~109.
Zhao Jiewen, Liu Jianhua, Chen Quansheng, et al. Detection subtle bruises on fruits with hyperspectral imaging [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 106~109. (in Chinese)
- Peng Yankun, Wu Jianhu. Hyperspectral scattering profiles for prediction of beef tenderness[C]//2008 ASABE Annual International Meeting, Paper 080004, 2008.
- 陈兵旗,孙明. 实用数字图像处理与分析[M]. 北京:中国农业大学出版社,2008.