

基于高光谱成像分析的冬枣微观损伤识别*

魏新华¹ 吴 姝¹ 范晓冬¹ 黄嘉宝²

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013;

2. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100)

摘要: 为减少微观损伤引起的储藏腐烂损失, 延长冬枣的储藏期, 提高冬枣的储藏效益, 以山东沾化冬枣为研究对象, 利用高光谱成像系统采集轻微损伤发生不到 1 h 的冬枣损伤部位的高光谱图像, 得到波长在 871 ~ 1 766 nm 范围内的 256 幅高光谱分量图像。结合无信息变量消除法及相关系数法进行特征波长筛选, 剔除不敏感波段, 选取了 944、1 035、1 187、1 376 nm 4 个特征波长。对以上 4 个特征波长对应的分量图像进行主成分分析, 选择第 1 主成分图像作为待分割图像, 对其进行灰度变换等图像预处理, 并运用自适应阈值分割法对其进行图像分割, 实现了轻微损伤区域的有效识别。对 100 个轻微损伤冬枣样本的识别试验结果表明, 所提方法的正确识别率为 98%。

关键词: 冬枣 损伤检测 高光谱成像 无信息变量消除 相关系数

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0242-05

Identification of Slight Bruises on Winter Jujube Based on Hyperspectral Imaging Technology

Wei Xinhua¹ Wu Shu¹ Fan Xiaodong¹ Huang Jiabao²

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Ji'nan 250100, China)

Abstract: In order to reduce storage losses, extend the storage period and improve the storage efficiency of winter jujubes, taking the winter jujubes in Zhanhua City as research object, a hyperspectral imaging system was built for detecting bruises happened less than 1 h on ‘Zhanhua’ winter jujubes. The 256 hyperspectral images data within 871 ~ 1 766 nm wavelengths were obtained by the hyperspectral imaging system. The effective wavelengths were selected by using uninformative variables elimination (UVE) method and correlation coefficient method. Eventually, four characteristic wavelengths, 944, 1 035, 1 187 and 1 376 nm were selected. Four images were mapped to four characteristic wavelengths, the principal component analysis (PCA) was used based on the four images, and the first component of the image was selected to future process and segment. Many pretreatment methods were used for the first component of the image, such as gray level transformation and so on, and the method of adaptive threshold was applied to segment. Finally, the slightly damaged area could be obtained. Thus, the slight bruises on winter jujubes were recognized. Independent validation set of 100 bruised winter jujubes was used to evaluate the performance of the developed algorithm. Results showed that 98% of the bruised winter jujubes were recognized correctly.

Key words: Winter jujubes Bruise detection Hyperspectral imaging Uninformative variables elimination Correlation coefficient

收稿日期: 2014-07-09 修回日期: 2014-08-22

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20113227120014)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办(2014)37号)和江苏大学高级专业人才科研启动基金资助项目(10JDG026)

作者简介: 魏新华, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业装备智能控制技术和精确变量高效施药技术研究, E-mail: wei_xh@126.com

引言

冬枣皮薄质脆,在采摘和运输过程中极易造成机械损伤,且其中的瘀伤、裂纹等微观损伤在人工或机器视觉分选时不易被发现,但入库储藏后会很快溃烂,严重影响冬枣的储藏期和储藏效益。

高光谱成像分析技术,可在一系列波长上获取被测对象大量的窄带光谱图像^[1-5],同时融合光谱信息和图像信息,可对被测物的外观特性、内部成分组成和微观结构进行综合的定性和定量分析^[6-7]。

文献[8-11]的方法验证了高光谱成像分析法在水果损伤检测方面的可行性,但对所有高光谱分量图像进行 PCA 变换,虽然降维速度较快,但由于过多波长参与变换,易导致大量噪声引入而降低 PCA 效果,影响识别精度^[12]。本文拟采用无信息变量消除和相关系数法进行高光谱图像降维和特征波长提取,并实现冬枣初期轻微损伤的识别。

1 材料与方法

1.1 试验样本

试验样本选用从市场上购买的没有明显表面缺陷的山东沾化冬枣,并对其逐个进行人工微观检查筛选,确认无缺陷的作为冬枣样本。将筛选出的无缺陷冬枣样本人为地与有一定粗糙度的硬质表面进行摩擦,以模拟擦伤效果,作为微观损伤样本。

1.2 高光谱图像采集系统

高光谱图像采集系统如图 1 所示,主要由 IMSPEV TOR V10E 型图像光谱仪 (Specim, 芬兰)、直流可调节光源 (Illumination, 美国)、MTS120 型位移台 (北京)、计算机和步进电动机等部件组成,可在 871 ~ 1 766 nm 光谱范围内每间隔 3.5 nm 成像,共得到 256 幅光谱分量图像。该系统自带 Spectral - Cube V2.75 控制软件,高光谱图像类型为 Raw (12 位)。



图 1 高光谱图像采集系统

Fig. 1 Hyperspectral imaging acquisition system

1. 高光谱摄像头 2. 卤素灯光源 3. 位移台 4. 计算机 5. 步进电动机

1.3 高光谱图像采集

通过 Spectral - Cube V2.75 软件控制高光谱成像图像采集系统进行图像采集。试验采用白色背景,为消除环境光线的干扰,高光谱图像采集在暗箱内进行。物距设为 16 cm,相机曝光时间设为 20 ms,平台移动速度设为 4 mm/s。首先,利用反射率为 99% 的标准白色校正板进行标定,然后拧上镜头盖进行黑板标定。然后采集轻微损伤发生在 1 h 之内的冬枣损伤部位的高光谱图像。采集过程中,可根据采集的图像质量进行重新标定。采集的 256 幅高光谱图像的大小为 672 像素 × 430 像素。

2 特征波长选择

由 Spectral - Cube V2.75 软件完成图像采集后,运用 ENVI 4.5、Matlab 7.0 和 Excel 2007 软件进行数据处理和分析。

2.1 高光谱图像数据处理

在 20 个不同冬枣样本的高光谱图像的无损伤表面和损伤表面上各随机选取一个 ROI (感兴趣区域),分别计算各幅光谱分量图像上各个 ROI 的平均灰度,得到 40 条光谱曲线,如图 2 和图 3 所示。通过软件 ENVI 4.5 导出光谱数据至 Matlab 7.0,对获得的 871 ~ 1 766 nm 波长范围内的 256 × 40 个光谱数据进行后续分析。

2.2 特征波长选择

高光谱图像波段数众多、数据量庞大,对象识别与分类比较困难^[13],且易出现维数灾难现象,影响分类精度^[13]。因此,在进行对象识别之前,必须首先通过对高光谱图像进行特征波长选择进行数据降维。无信息变量消除法和相关系数法是特征波长选择的有效方法。

2.2.1 无信息变量消除

无信息变量消除法 (UVE)^[14-15]以 PLS 回归系数作为波长重要性的衡量指标,可消除不提供信息的变量。该方法在进行波长选择时,集噪声和光谱信息于一体,能有效消除非目标因素的影响。

采用 UVE 方法,通过 Matlab 7.0 软件对获取的 256 个光谱分量图像的波长进行变量筛选,其产生的随机变量数设置为 256 个,选取最佳主因子数为 6 个,结果如图 4 所示,图中纵坐标 t 为阈值。此时得到的 RMSECV 最小为 0.233 8,变量筛选效果最好。图 4 中,蓝色竖直线的左侧为 256 个波长变量的稳定性分布曲线,右侧为 256 个随机变量的稳定性分布曲线。两条水平虚线表示变量选择的阈值上下限,在虚线外侧的数值对应的变量被保留,从而得到 30 个特征波长,其对应编号分别为 18、26、29、

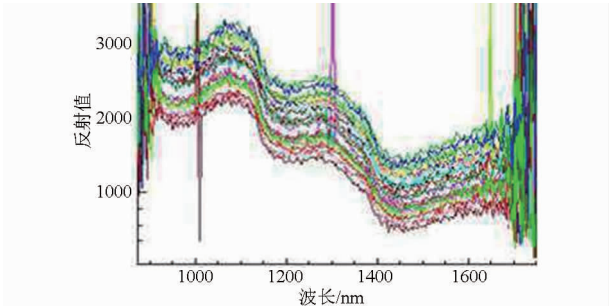


图 2 冬枣损伤表面光谱曲线
Fig. 2 Spectral curves in surface within damage on winter jujubes

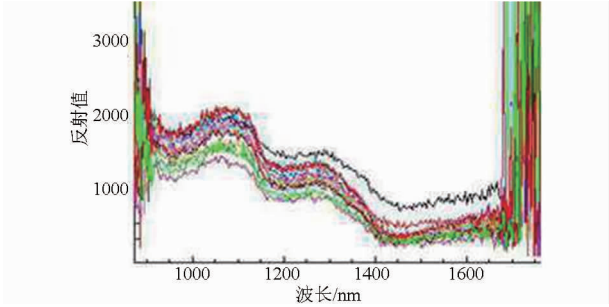


图 3 冬枣无损伤表面光谱曲线
Fig. 3 Spectral curves in surface without damage on winter jujubes

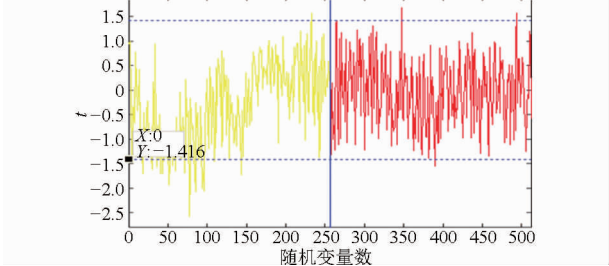


图 4 UVE 选择变量
Fig. 4 Variable selection using UVE

30、36、38、41、43、51、52、56、59、60、67、71、77、78、83、84、85、89、90、94、95、96、106、109、128、143、233。

2.2.2 冗余变量剔除

经过 UVE 算法消除了无信息变量的影响,但剩余波段之间还可能存在冗余信息,因此需要计算剩余波段之间的相关系数,以进一步剔除冗余变量。

为了描述高光谱图像各波段光谱分量图像之间的相关性,需要计算波段间的相关系数。定义任意 2 个波段矢量 i 和 j 之间的相关系数 R_{ij} 为

$$R_{ij} = \frac{E((x_i - m_i)(x_j - m_j))}{\sqrt{E((x_i - m_i)^2)E((x_j - m_j)^2)}} \quad (1)$$

式中 m_i 和 m_j 分别是波段 i 和 j 的均值, x_i 和 x_j 分别表示波段 i 和 j 上像素点的灰度矢量, $0 \leq R_{ij} \leq 1$, R_{ij} 越大说明相关性越强^[16]。

对 UVE 筛选出的 30 个波长,计算其相关系数,若两波长间的相关系数在 0.99 以上,则剔除其中之

一,最终 18(944 nm)、41(1 035 nm)、84(1 187 nm)和 143(1 376 nm) 4 个波长保留下来,其相关系数如表 1 所示,就以其作为冬枣微观损伤的特征波长。

表 1 4 个特征波长的相关系数
Tab.1 Correlation coefficients of four characteristic wavelengths

波段相关系数	18	41	84	143
18	1	0.989 59	0.989 693	0.830 027
41		1	0.976 085	0.800 336
84			1	0.863 844
143				1

3 微观损伤区域识别

3.1 高光谱图像信息融合

筛选出的 4 个特征波长对应的光谱分量图像如图 5 所示。

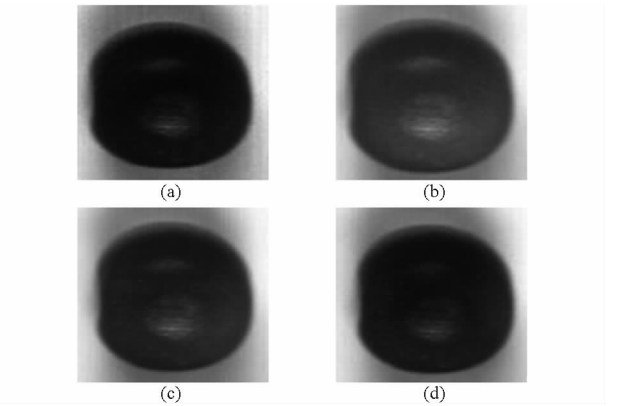


图 5 4 个特征波长图像
Fig. 5 Images of four characteristic wavelengths
(a) 波长 18(944 nm) (b) 波长 41(1 035 nm)
(c) 波长 84(1 187 nm) (d) 波长 143(1 376 nm)

对这 4 个特征波长对应的光谱分量图像进行主成分分析,所得第 1 主成分图像如图 6 所示,其中集中了 4 个光谱分量图像的主要信息。

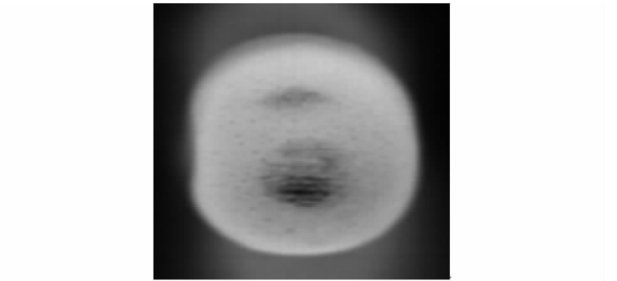


图 6 第 1 主成分图像
Fig. 6 First component of image

3.2 微观损伤区域分割

由图 6 可见,所得第 1 主成分图像中存在大片的高亮区域,图像对比度较低。为此,对第 1 主成分分量图像进行直方图均衡化,以增强对比度;然后通

过拉普拉斯滤波进行图像锐化,突显图像损伤细节;再通过 5×5 的中值滤波进行图像平滑,以保持图像的边缘特性;所得预处理后图像如图 7a 所示。采用自适应阈值分割方法对预处理后图像进行图像分割,结果如图 7b 所示,图中由光斑引起的小的误分割区域,采用删除小面积区域的方法再处理,结果如图 7c 所示。

微观损伤区域被完整分割出来,且不存在误分割区域,从而实现了微观损伤区域的直接识别。

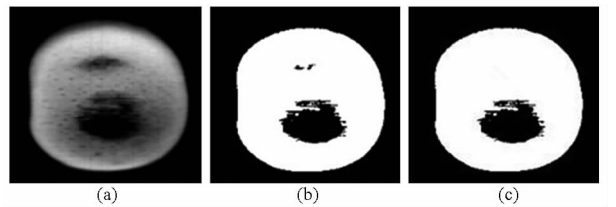


图 7 预处理后图像、二值化图像和损伤分割结果图
Fig. 7 Pretreatment image, binary image and bruises segment image

(a) 预处理后图像 (b) 二值化图像 (c) 损伤分割结果图

4 冬枣微观损伤识别试验

4.1 识别方法

以 944、1 035、1 187 和 1 376 nm 为特征波长,对其对应的光谱分量图像进行主成分分析,并以第 1 主成分图像为待分割图像,进行直方图均衡化、拉普拉斯滤波等图像预处理,采用自适应阈值分割法进行图像分割,并通过删除小面积区域的方法实现误分割区域剔除,即可实现冬枣微观损伤区域的有效分割和识别。

4.2 识别试验

为验证以上识别方法的有效性,对另一个冬枣样本进行微观损伤识别。对于该样本,4 个特征波长对应的光谱分量图像如图 8 所示,得到的第 1 主成分图像如图 9 所示,微观损伤分割结果如图 10 所示,实现了微观损伤的有效识别。

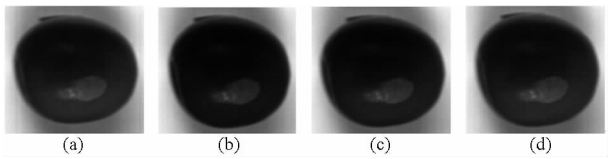


图 8 验证样本的 4 个特征波长图像
Fig. 8 Images of four characteristic wavelengths of verification sample
(a) 944 nm (b) 1 035 nm (c) 1 187 nm (d) 1 376 nm

基于以上识别方法,对 100 个冬枣样本进行微观损伤检测,检测结果正确率为 98%。

发生分割错误的冬枣样本的 4 幅特征波长图像如图 11 所示,图 12 分别为第 1 主成分图像、预处理

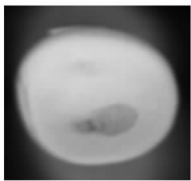


图 9 验证样本的第 1 主成分图像
Fig. 9 First component of image of verification sample



图 10 验证样本的损伤区域二值图像
Fig. 10 Binary image of verification sample

后图像以及损伤的二值化图像,从图像中可以看出,光斑区域被误识别为损伤区域。这是因为高光谱图像采集时,卤素灯光线散射不均匀,在冬枣表面形成了局部镜面反射,在图像中形成了小光斑,当由于角度原因,损伤区域面积较小而光斑区域相对较大时,光斑区域被误识别为损伤区域,从而造成了误识别。

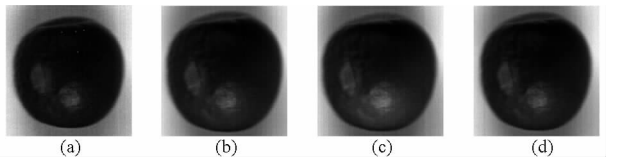


图 11 发生误分割样本的 4 个特征波长图像
Fig. 11 Images of four characteristic wavelengths with wrong segmentation
(a) 944 nm (b) 1 035 nm (c) 1 187 nm (d) 1 376 nm

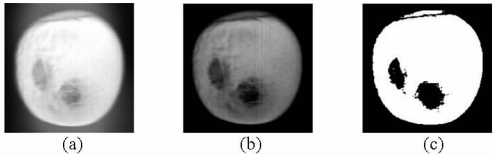


图 12 发生误分割样本的第 1 主成分图像、预处理后图像与二值化图像
Fig. 12 First component image, pretreated image and binary image of wrong segmentation samples
(a) 第 1 主成分图像 (b) 预处理后图像 (c) 二值化图像

5 结论

- (1) 无信息变量消除法和相关系数法相结合,能有效实现高光谱图像的特征波长筛选和数据降维。
- (2) 944、1 035、1 187、1 376 nm 可以作为冬枣微观损伤的特征波长组,其对应光谱分量图像包含了冬枣微观损伤的主要特征。
- (3) 通过对 944、1 035、1 187、1 376 nm 4 个光谱分量图像第 1 主成分图像的处理,可有效识别冬枣微观损伤,识别试验的正确识别率达 98%。

参 考 文 献

1 Leemans V, Destain M F. A real-time grading method of apples based on features extracted from defects [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(1): 83 – 89.

2 Bart M N, Katrien B, Els B, et al. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: a review [J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 46(2): 99 – 118.

3 Liu Yande, Ying Yibin. Use of FT-NIR spectrometry in non-invasive measurements of internal quality of ‘Fuji’ apples [J]. Postharvest Biol. Technol. , 2005, 37(1): 65 – 71.

4 Ying Yibin, Liu Yande. Nondestructive measurement of internal quality in pear using genetic algorithms and FT-NIR spectroscopy [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(2): 206 – 213.

5 Shao Yongni, He Yong, Antihus H Go'mez, et al. Visible/near infrared spectrometric technique for nondestructive assessment of tomato ‘heatwave’ (*Lycopersicum esculentum*) quality characteristics [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(4): 672 – 678.

6 Long R L, Walsh K B. Limitations to the measurement of intact melon total soluble solids using near infrared spectroscopy [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2006, 57(4): 403 – 410.

7 Gowen A A, O'Donnell C P, Cullen P J, et al. Hyperspectral imaging-an emerging process analytical tool for food quality and safety control [J]. Trends in Food Science & Technology, 2007, 18(12): 590 – 598.

8 Xing J, Bravo C, Jancsok P T, et al. Detecting bruises on ‘golden delicious’ apples using hyperspectral imaging with multiple wavebands [J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(1): 27 – 36.

9 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损伤 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 106 – 109.

Zhao Jiewen, Liu Jianhua, Chen Quansheng, et al. Detecting subtle bruises on fruits with hyperspectral imaging [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 106 – 109. (in Chinese)

10 章海亮, 高俊峰, 何勇. 基于高光谱成像技术的柑橘缺陷无损检测 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 177 – 181.

Zhang Hailiang, Gao Junfeng, He Yong. Nondestructive detection of citrus defection using hyper-spectra imaging technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 177 – 181. (in Chinese)

11 Baranowski P, Mazurek W, Wozniak J, et al. Detection of early bruises in apples using hyperspectral data and thermal imaging [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 110(3): 345 – 355.

12 赵春晖, 陈万海, 杨雷. 高光谱遥感图像最优波段选择方法的研究进展与分析 [J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2007, 24(5): 592 – 602.

Zhao Chunhui, Chen Wanhai, Yang Lei, et al. Research advances and analysis hyperspectral remote sensing image band selection [J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2007, 24(5): 592 – 602. (in Chinese)

13 王立国, 魏芳洁. 结合遗传算法和蚁群算法的高光谱图像波段选择 [J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(2): 235 – 242.

Wang Liguang, Wei Fangjie. Band selection for hyperspectral imagery baesd on combination of genetic algorithm and ant colony algorithm [J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(2): 235 – 242. (in Chinese)

14 Centner V, Massart D L, de Noord O E, et al. Elimination of uninformative variables for multivariate calibration [J]. Analytical Chemistry, 1996, 68(21): 3851 – 3858.

15 Cai Wensheng, Li Yankun, Shao Xueguang. A variable selection method based on uninformative variable elimination for multivariate calibration of near-infrared spectra [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2008, 90(2): 188 – 194.

16 成宝芝, 郭宗光. 高光谱图像波段间相关特性研究 [J]. 大庆师范学院学报, 2013, 33(6): 35 – 37.

Cheng Baozhi, Guo Zongguang. The research on the hyperspectral image inter-band correlation [J]. Journal of Daqing Normal University, 2013, 33(6): 35 – 37. (in Chinese)