

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.031

基于高光谱成像技术的柑橘缺陷无损检测*

章海亮^{1,2} 高俊峰¹ 何勇¹

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 华东交通大学机电工程学院, 南昌 330013)

摘要: 应用高光谱成像技术无损检测柑橘的缺陷。选取蒂腐、黑斑、褐腐、结痂缺陷果和正常果各 30 个, 提取并分析了 5 类果皮感兴趣区域光谱曲线并结合主成分分析法确定 2 个最佳波长 (615 nm 和 680 nm), 然后基于特征波长作主成分分析, 选取第 2 主成分作为分类识别图像, 提出采用特征波长主成分分析法与波段比算法相结合的方法, 识别率达到 94%。试验结果表明, 高光谱成像技术可以有效地对带有蒂腐、黑斑、褐腐、结痂缺陷的柑橘进行分类识别。

关键词: 柑橘 缺陷检测 高光谱成像 主成分分析

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0177-05

Nondestructive Detection of Citrus Defection Using Hyper-spectra Imaging Technology

Zhang Hailiang^{1,2} Gao Junfeng¹ He Yong¹

(1. School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. School of Mechatronics Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: A hyperspectral imaging system was developed for detecting various common defects on citrus. Citrus with end rot, insect dot damage, rot damage, thrip scars and normal citrus were chosen. Hyperspectral images of citrus samples and principal component analysis (PCA) were used to confirm two best wavelengths (615 nm and 680 nm). PC2 of PCA was selected to classify the images. Finally, the detection algorithm combined PCA and band ratio was developed and achieved an accuracy of 94%. The results showed the feasibility of the proposed method.

Key words: Citrus Defect detection Hyperspectral imaging Principal component analysis

引言

水果品质分级是水果销售或加工中的重要环节之一, 适当的品质分级不但可以延长水果的贮藏期限和运输距离, 而且可以提高其经济价值和销售价格。高光谱成像技术可以对生物对象中的内外部信息进行可视化表达, 拥有光谱技术和图像处理技术的双重优势, 是一种精确至每一个像素点纳米级信息采集, 获取数据量大, 能够多指标同时测定, 可自动实现数据分析, 检测过程无损、无污染、样品无需

预处理的绿色分析技术^[1~4]。目前, 高光谱成像技术在微观和农产品检测方面的应用研究仍处于探索阶段, 但其具有的检测灵敏度高、抗干扰能力强、无损, 以及能在恶劣环境下进行远距离在线、连续监测等优点, 使其成为当今食品和农产品检测领域的研究热点^[5~10]。

许多学者对高光谱成像技术进行了研究^[11~18]。这些研究表明高光谱图像技术在农产品外部特性和内部品质的检测中具有巨大的潜力, 但是国内应用高光谱图像技术无损检测柑橘蒂腐、黑斑、褐腐、结

收稿日期: 2012-09-18 修回日期: 2012-12-04

* 国家自然科学基金资助项目(61071220)、浙江省科技计划资助项目(2011C22070)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目、江西省科技支撑计划资助项目(2010BNB01200, 20123BDH80014)和华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室资助项目

作者简介: 章海亮, 博士生, 华东交通大学副教授, 主要从事高光谱成像技术及其应用研究, E-mail: hailiang.zhang@163.com

通讯作者: 何勇, 教授, 博士生导师, 主要从事高光谱成像技术及其应用研究, E-mail: yhc@zju.edu.cn

痢和正常果样本提取的研究还鲜有报道。本文基于高光谱成像系统,提取并分析蒂腐、黑斑、褐腐、结痢和正常果样本果皮感兴趣区域(Region of interest, ROI)光谱曲线并结合主成分分析法确定特征波长,并基于特征波长进行二次主成分分析,实现蒂腐、黑斑、褐腐、结痢和正常果样本提取的分类识别。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用柑橘购于南昌某批发市场,南丰蜜橘早熟品种,共25 kg,在20℃左右的室温环境放置7 d,从中选取蒂腐、黑斑、褐腐、结痢和正常果各30个。蒂腐、黑斑、褐腐、结痢和正常果样本如图1所示。

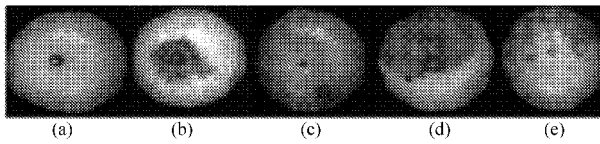


图1 柑橘正常果和缺陷果 RGB 图像

Fig. 1 RGB image of defected citrus

(a) 正常 (b) 蒂腐 (c) 黑斑 (d) 褐腐 (e) 结痢

1.2 高光谱成像系统

本试验的图像数据由如图2所示的基于光谱仪的高光谱成像系统获取。整个系统包括:芬兰 Specimen 公司的 ImSpector V10E 型高光谱成像仪,用于获取400~1 030 nm 波段内的高光谱图像,光谱的分辨率2.8 nm,狭缝宽度30 μm,有效狭缝长度14.2 mm,空间分辨率的点半径小于9 μm;一套150 W 的 SCHOTT DCR III 型光纤卤素灯可提供可见近红外波段;一组带有672个有效像素的线阵 CCD 相机(Hamamatsu);一组输送装置和计算机(HP, InterCoreTM2 4400 @ 2.00 GHz, RAM 2.00 GB)。高光谱仪光谱波段范围共有512个波长。整套系统置于一个表面涂有黑漆的密闭柜中,以避免图像采集时环境光的干扰。所采集到的图像块既包含有特定像素下的光谱信息也具有特定波段下的图像信息,如图3所示。

1.3 高光谱数据采集

每次采集12个柑橘样本,样品放置于输送装置平台上,4排,每排3个柑橘。在高光谱图像数据采集前,预先根据光源的照度设定好高光谱摄像头曝光时间以保证图像清晰,并调整好输送装置的速度以避免图像失真。经过多次调整及参数优化,最终确定曝光时间为0.08 s,输送平台运行速度为3 mm/s,物距40.5 cm。数据采集时,线阵探测器在光学焦平面的垂直方向作横向扫面,从而获取扫描空间中每个像素在整个光谱区域的光谱信息,与此

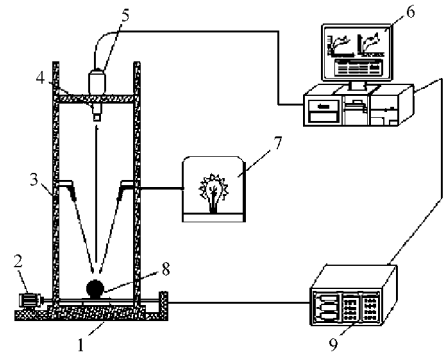


图2 高光谱成像系统检测原理图

Fig. 2 Schematic diagram of hyperspectral imaging system

1. 运行平台 2. 电动机 3. 光箱 4. 光谱仪 5. CCD 相机
6. 计算机 7. 光源 8. 柑橘样品 9. 平台控制装置

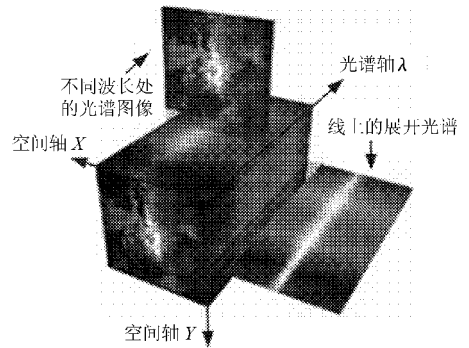


图3 高光谱图像数据块

Fig. 3 Data cube of hyperspectral image

同时样本在输送装置的作用下作垂直于摄像机的纵向移动,最终完成4排柑橘样本图像的采集。

1.4 光谱校正

由于各波段下光源强度分布不均匀,以及摄像头中暗电流噪声的存在和水果表面形状各异,导致光强分布较弱的波段下图像噪声较大,因此必须对图像进行校正,以消除部分噪声影响。在与样本图像采集相同的系统参数下,首先扫描反射率为100%标准白色校正板得到全白的标定图像 W ;然后盖上镜头采集到全黑的标定图像 B ;最后计算出校正后的图像 R ,公式为

$$R = (I - B) / (W - B) \quad (1)$$

式中 I ——原始高光谱图像

本研究中所有高光谱图像数据的采集均基于 Spectral Image - V10E 软件平台,后续数据处理基于 ENVI 4.6 (Research System Inc., Boulder, Colo., USA),分析软件为 Unscrambler 10.1 (CAMO AS, Trondheim, Norway)、Matlab 2010 及 Origin 8.5 (OriginLab, USA) 软件平台。

2 结果与分析

2.1 光谱提取与分析

由于柑橘图像上每个像素点都存在不同波长下

的光谱信息,为了使每类样本感兴趣区域(ROI)更具有代表性,每个ROI由80个左右像素组成。图4给出蒂腐、黑斑、褐腐、结痂和正常果各1个柑橘的ROI在450~1000nm平均光谱曲线(低于450nm和高于1000nm时,ROI光谱曲线存在较大噪声,可能与CCD在此波段低的量子效率和不同的检测对象有关)。观察光谱区域发现:几乎所有样本表面在近红外波段区域反射值大于在可见光波段区域反射值;蒂腐、黑斑、褐腐和正常果在整个光谱区域几乎呈单调递增趋势;与蒂腐、黑斑和褐腐缺陷果ROI光谱曲线相比,正常果和结痂果样本在675nm波段处表现出光谱吸收特征,蒂腐、黑斑和褐腐缺陷果并没有明显的光谱特征。

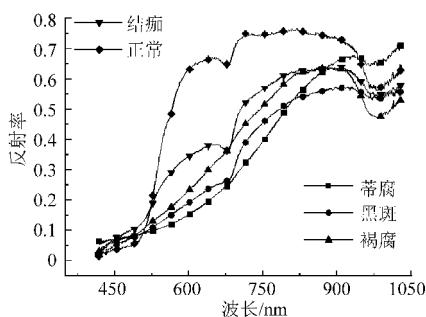


图4 柑橘表面感兴趣区域反射光谱曲线

Fig. 4 Reflectance spectral curves of ROI on citrus surface

2.2 主成分分析

为了避免背景噪声对结果的影响,可用掩模法^[18]去除背景。考虑到多光谱成像系统较少的波段更有利在线的应用,掩模图像的建立是基于800nm的单波段图像。图5以蒂腐果背景分割为例简单阐述背景分割方法。图5a是背景分割前的图像,图5b是利用单阈值作用于800nm的单波段图像而获得的二值图像,随后将图5a与图5b进行像素点乘运算后得掩模后的图5c,计算公式为

$$C = OM_{ask} \quad (2)$$

式中 C ——掩模后的图像

O ——原始图像 M_{ask} ——二值模板

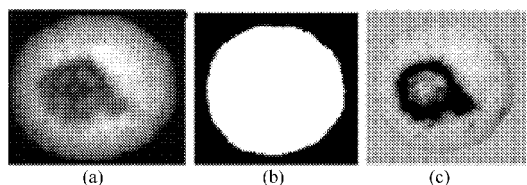


图5 蒂腐果背景分割

Fig. 5 Background segmentation of citrus with end rot

(a) 原始图像 (b) 掩模图像 (c) 去背景后的灰度图像

主成分分析(PCA)用多波段数据的一个线性变换,变化数据到一个新的坐标系统,以使数据的差异达到最大。这一技术对于增强信息含量、隔离噪声

及减少数据维数非常有效。图6表示在600~780nm光谱区所有波段经过主成分分析后得到的蒂腐、黑斑、褐腐、结痂和正常果样本的前3个主成分图像。选600~780nm光谱区是因为在这段区域内蒂腐、黑斑、褐腐、结痂和正常果样本光谱差异最大。可以看出PC1图像基本保留了原始图像绝大部分信息。比较前3个PC图像,由于PC1包含了原始数据的最多信息,而这些信息中绝大部分是正常果皮信息,不利于蒂腐、黑斑、褐腐、结痂和正常果样本提取,相比而言,PC2更适合样本的分割,本文取PC2特征向量进行分析,以便进一步提取到能用于在线分级的最优特征波段。

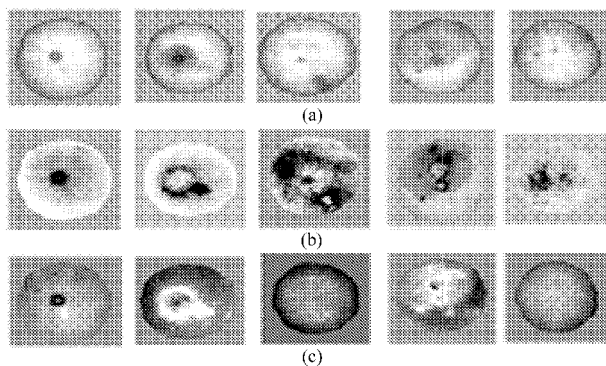


图6 主成分分析得到的前3个主成分图像

Fig. 6 The first 3 PCs in PCA

(a) PC1 (b) PC2 (c) PC3

由于每个PC图像都是由原始数据中各个波段下的图像经过线性组合而成的,则通过选取线性组合中的权重系数可以对最佳特征图像进行选择。图7是根据PC2图像的特征向量绘制的图像光谱曲线权重系数图。曲线中每一处局部极大或极小值都代表了一个显著的波段,而这些波段所代表的图像对PC2的贡献率较大。由图7可知,615nm和680nm是PC2的特征波长。

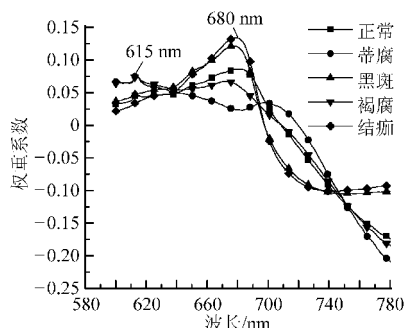


图7 PC2图像光谱曲线权重系数

Fig. 7 Weight coefficient in PC2 image

2.3 特征波长主成分分析

由于大量波段参与第1次主成分分析,因此,第1次主成分分析法并不适合蒂腐、黑斑、褐腐、结痂和正常果样本在线检测。如何基于少量特征波长开

发出有效的蒂腐、黑斑、褐腐、结痂和正常果样本提取检测算法是高光谱成像系统在线实施的关键。为了能够在线检测蒂腐、黑斑、褐腐、结痂和正常果样本,本文基于2个可见特征波长(615 nm和680 nm)作第2次主成分分析。图8是主成分分析后获得的2个主成分图像。观察发现利用2个特征波长得出的主成分图像与采用全波段作主成分分析获得的主成分图像并没有太大差异,甚至由于采用较少的波段数进行主成分分析,可以有效减少在整个光谱区域由于图像采集时光线反射不均匀而产生大量噪声的影响,如PC2。与全波段主成分分析相比,图8中PC2更有利于蒂腐、黑斑、褐腐、结痂和正常果样本提取。

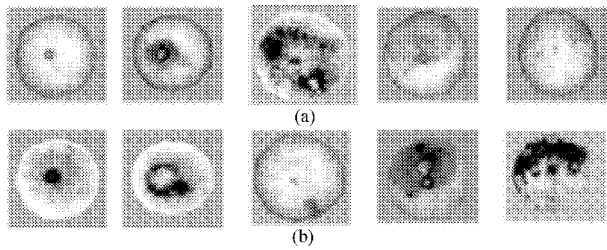


图8 基于特征波长的主成分图像

Fig. 8 Principal component images based on feature bands

(a) PC1 (b) PC2

2.4 波段比算法

从图8的PC2图像可以看出,果梗或果萼部分容易误检测为缺陷果。波段比算法不但可以有效地降低柑橘表面不平整带来光线反射不均匀的影响,还可以增强波段之间的波谱差异,提供一些任何单一波段无法得到的独特信息^[18]。其原理是用两个波段相除从而获得一幅相对波段强度图像,其数学表达式为

$$V_{i,j} = V_{i,j,g} / V_{i,j,h} \quad (3)$$

式中 $V_{i,j,g}$ 、 $V_{i,j,h}$ ——第 g 和 h 波长相同位置像素 (i,j) 的灰度

通过试验发现,采用单波长615 nm和680 nm参与波段比运算效果较好。考虑到篇幅的限制,图9给出了4种缺陷利用波段比算法获得的结果,对比发现:波段比算法有效抑制了结痂果样本,使其缺陷部位呈现较暗的颜色;蒂腐、褐腐和正常果样本果梗处呈现相对较亮的颜色,这就有利于把果梗和缺陷区分开来。

2.5 分类结果

图10是结合掩模算法、特征波长主成分法、波段比算法以及简单图像处理算法(如膨胀腐蚀、阈值分割等)的流程图,图11是部分缺陷结果图。表1列出了结合特征波长主成分法与波段比算法对蒂腐、黑斑、褐腐、结痂和正常果样本分类识别的结果。

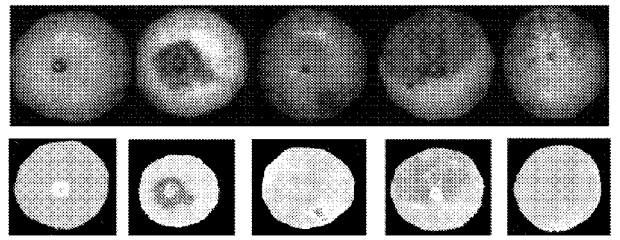


图9 波段比算法结合掩模获得的结果

Fig. 9 Results of combined band ratio and mask algorithm

果。结果表明,结合掩模算法、特征波长主成分法、波段比算法以及简单图像处理算法,能有效识别蒂腐、黑斑、褐腐、结痂和正常果样本,平均识别率为94%。

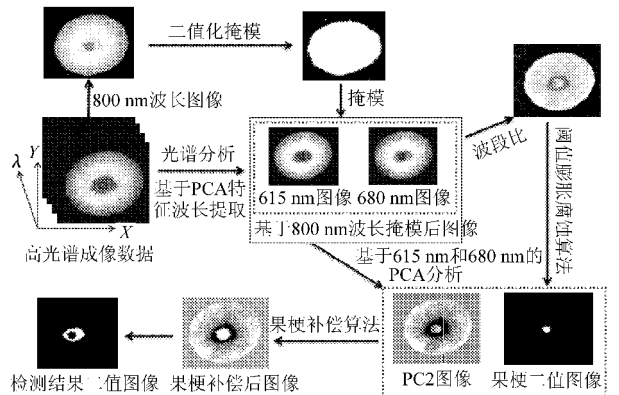


图10 缺陷果识别流程图

Fig. 10 Flow chart of detection of defecting citrus

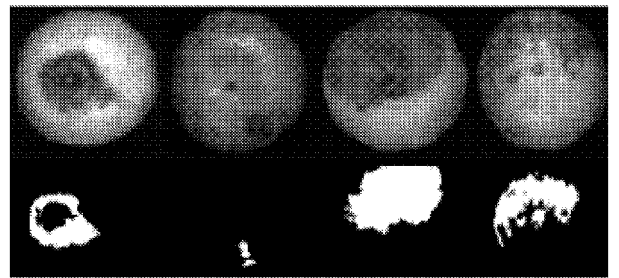


图11 缺陷果识别结果

Fig. 11 Results of defecting citrus

表1 蒂腐、黑斑、褐腐、结痂和正常果样本检测结果

Tab.1 Detection results of defected and normal citrus

类别	果皮类型	数量	识别错误数量	准确率/%
缺陷果	蒂腐	30	0	100
	黑斑	30	3	90
	褐腐	30	0	100
	结痂	30	6	80
正常果	正常	30	0	100

3 结论

(1)本文基于高光谱成像系统利用主成分分析法对蒂腐、黑斑、褐腐、结痂和正常果样本进行分类识别,识别率达到94%。

(2)通过试验得到2个特征波长用于蒂腐、黑斑、褐腐、结痂和正常果样本的分类识别,基于这2个特征波长,进行特征波长主成分分析,克服了通常单次主成分分析中由于存在较多的波段而无法使这种方法应用于在线检测的弊端。

(3)基于试验中采用的2个特征波长结合波段比算法,有助于在实际生产线开发基于多光谱成像技术的柑橘蒂腐、黑斑、褐腐、结痂和正常果样本识别系统。

参 考 文 献

- 1 Qin J W, Burks T F, Ritenour M A, et al. Detection of citrus canker using hyperspectral reflectance imaging with spectral information divergence[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009,93(2): 183 ~ 191.
- 2 Blasco J, Aleixos N, Gómez-Sanchís J, et al. Recognition and classification of external skin damage in citrus fruits using multispectral data and morphological features[J]. *Biosystems Engineering*, 2009,103(2):137 ~ 145.
- 3 Gómez-Sanchis J, Gómez-Chova L, Aleixos N, et al. Hyperspectral system for early detection of rottenness caused by *Penicillium digitatum* in mandarins[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008,89(1): 80 ~ 86.
- 4 Detar W R, Penner J V, Funk H A. Airborne remote sensing to detect plant water stress in full canopy cotton[J]. *Transactions of the ASAE*, 2006,49(3): 655 ~ 665.
- 5 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 agricultural product[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009,30(4):639 ~ 645. (in Chinese)
- 6 Barregaard T A, Nielsen H, Norgaard L, et al. Crop weed discrimination by line imaging spectroscopy[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2000,75(4): 389 ~ 400.
- 7 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(6):1 611 ~ 1 615.
Ma Benxue, Ying Yibin, Rao Xiuqing, et al. Advance in nondestructive detection of fruit internal quality based on hyperspectral imaging[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009,29(6):1 611 ~ 1 615. (in Chinese)
- 8 Polder G, van der Haijden GW A M, Yang I T. Spectral image analysis for measuring ripeness of tomatoes [J]. *Transactions of the ASAE*, 2002,45(4):1 155 ~ 1 161.
- 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 彭彦昆,张雷蕾.农畜产品品质安全高光谱无损检测技术进展和趋势[J].*农业机械学报*,2013,44(4):137 ~ 145.
Peng Yankun, Zhang Leilei. Advancement and trend of hyperspectral imaging technique for nondestructive detection of agro-product quality and safety[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013,44(4):137 ~ 145. (in Chinese)
- 11 Chen G X, Chen Y R, Tao Y, et al. A novel integrated PCA and FLD method on hyperspectral image feature extraction for cucumber chilling damage inspection[J]. *Transactions of the ASABE*, 2004, 47(4): 1 313 ~ 1 320.
- 12 Lu Renfu, Peng Yankun. Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 93(2): 161 ~ 171.
- 13 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.
Hong Tiansheng, Qiao Jun, Ning Wang, et al. Non-destructive inspection of Chinese pear quality based on hyper spectral imaging technique[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007,23(2):151 ~ 155. (in Chinese)
- 14 Elmasry G, Wang N, Elsayed A, et al. Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 81(1): 98 ~ 107.
- 15 Mehl P M, Chao K, KIM M, et al. Detection of defects on selected apple cultivars using hyperspectral and multispectral image analysis[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2002,18(2):219 ~ 226.
- 16 郭恩有,刘木华,赵杰文,等.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.
Guo Enyou, Liu Muhua, Zhao Jiewen, et al. Nondestructive detection of sugar content on navel orange with hyperspectral imaging [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008,39(5):91 ~ 93. (in Chinese)
- 17 蔡健荣,王建黑,黄星奕,等.高光谱图像技术检测柑橘果锈[J].*光电工程*,2009,36(6):26 ~ 30.
Cai Jianrong, Wang Jianhei, Huang Xingyi, et al. Detection of rust in citrus by hyperspectral imaging technology and bandratio algorithm[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009,36(6):26 ~ 30. (in Chinese)
- 18 李江波,饶秀勤,应义斌,等.基于高光谱成像技术检测脐橙溃疡[J].*农业工程学报*,2010,26(8):222 ~ 228.
Li Jiangbo, Rao Xiuqin, Ying Yibin, et al. Detection of navel oranges canker based on hyperspectral imaging technology [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(8): 222 ~ 228. (in Chinese)