doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.033

苹果糖度高光谱图像可视化预测的光强度校正方法*

郭志明^{1,2} 赵春江^{1,3} 黄文倩^{1,3} 彭彦昆² 李江波^{1,3} 王庆艳^{1,3}
(1.北京农业智能装备技术研究中心,北京 100097; 2.中国农业大学工学院,北京 100083;
3.国家农业智能装备工程技术研究中心,北京 100097)

摘要:针对类球形水果表面曲率变化引起高光谱图像光响应强度差异较大,难以有效预测各部位的品质信息的问题,以富士苹果为研究对象,对高光谱图像进行黑白标定后,以糖度测试部位为感兴趣区域提取平均光谱并建立糖度的定量预测模型,校正集相关系数 R₆为0.9305,校正均方根误差 RMSEC 为0.4331;高光谱图像经构建掩模消除 样本背景噪声后,提出了高光谱图像光强度校正方法,比较校正前后的高光谱图像能量分布图可以发现光强度得 到有效补偿,对校正后的高光谱图像标记空间信息并提取对应光谱,用已建立的苹果糖度模型计算各像素点对应 的糖度值,绘制苹果糖度的伪彩色分布图。研究结果表明,高光谱图像经强度校正可以快速无损的预测苹果的糖 度及其分布。

关键词:苹果 糖度 高光谱图像 光强度校正 可视化 无损检测 中图分类号:0433.4; S123 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2015)07-0227-06

Intensity Correction of Visualized Prediction for Sugar Content in Apple Using Hyperspectral Imaging

Guo Zhiming^{1,2} Zhao Chunjiang^{1,3} Huang Wenqian^{1,3} Peng Yankun² Li Jiangbo^{1,3} Wang Qingyan^{1,3}

(1. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Hyperspectral imaging which integrating both spectroscopic and imaging techniques with higher spatial and spectral resolution, has been developed to study the physical characteristics, chemical constituents and distributions of different quality attributes. It's difficult to further analyze because of the adverse effects produced by the curvature of spherical objects in the process of hyperspectral images acquirement. Its suitability was illustrated in a specific case of apple fruits. This study proposes a method for correcting the light intensity of radiation non-uniform on the apple fruits. Firstly, the original hyperspectral images were corrected into the reflectance hyperspectral images based on black and white reference images, resulting in reducing the influence of illumination and the dark current of the camera. Then, the mean spectra extracted from roundness region of interest (ROI) in centre area of hyperspectral image were used to develop calibration models by using partial least squares (PLS) regression. The correlation coefficient and root mean square errors of calibration were found to be 0.930 5 and 0.433 1, respectively. After applying the proposed correction, the spectra of the pixels in hyperspectral image were performed to calculate the sugar content of corresponding pixels. Finally, the visualization of sugar content distribution in apple was achieved by using pseudo-color mapping. The results demonstrated that the correction method was proved to be effective for eliminating the adverse effects produced by the

*"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2014BAD21B01)和北京市自然科学基金资助项目(6144024)

收稿日期: 2014-09-18 修回日期: 2014-11-20

作者简介:郭志明,工程师,中国农业大学博士生,主要从事高光谱图像技术的农产品质量安全检测研究,E-mail: zhmguo@126.com 通讯作者:黄文倩,副研究员,博士,主要从事农产品智能化检测技术与装备研究,E-mail: huangwq@ nercita.org.cn

curvature of the fruit on the intensity of the radiation. The hyperspectral imaging has a great potential to be a nondestructive and rapid tool for the quantitative measurement of sugar content distribution for apple. **Key words:** Apple Sugar content Hyperspectral image Intensity correction Visualization

Nondestructive determination

引言

中国苹果产量居世界首位,但不是苹果贸易强 国,进口价格远高于出口价格,其主要原因是我国苹 果采后检测分级技术落后,在国际市场上缺乏竞争 力,无法满足国外的高端需求。因此,亟需开发快速 无损智能高效的采后检测分级技术,推动水果采后 处理向优质化、标准化和产业化方向健康发展,以营 养和功能引导苹果消费。

高光谱成像技术集成了光学、光电子学、信息处 理和计算机领域的先进技术,将图像处理和光谱分 析融为一体,实现物体空间信息、光谱信息和光强度 信息的同步获取,能同时对待测对象的外观特性和 内部成分进行检测。基于成像光谱仪获得的高光谱 图像具有纳米级的光谱分辨率,覆盖光谱范围从紫 外到长波红外(200~14 000 nm),以数百个波长对 物体连续成像。作为一种新兴光学无损检测技术在 食品农产品品质安全检测方面被广泛关注和应 用^[1-4]。在水果品质检测方面,国内外学者已开展 大量研究^[5],涉及苹果外部品质检测^[6-10]和内部品 质检测^[11-17]两个方面。但已有研究大多采用单独 提取光谱信息或图像信息,未发挥高光谱成像技术 的图谱合一的优势。

高光谱图像具有高空间分辨率和光谱分辨率的 优势,可实现品质特征分布的快速无损检测。Sun 等先后利用高光谱成像技术获得了牛肉^[18]、羊 肉^[19]、猪肉^[20]、鸡肉^[21]和鲑鱼^[22]等肉品切片的内 部品质和物理参数的空间分布。Zhang 等^[23]利用高 光谱图像技术绘制了油菜叶片主要营养元素氮磷钾 的空间分布情况。邹小波等^[24]选取高光谱图像特 征波长下的植被指数建立黄瓜叶片的叶绿素含量分 布,相关系数在0.8以上。上述品质特征分布的研 究对象均基于同一平面上,通过黑白标定实现空间 分布的光强度校正。而苹果等水果为类球形水果, 获得的高光谱图像空间分布上光强度分布不均,中 间强边缘弱,光强度的差异使其难以预测水果品质 的分布。在苹果成熟期和采摘期及采后,探明苹果 果实的糖度分布、果实部位差异及个体间空间差异 引起糖度的变化规律具有重要科学意义,目前还没 有快速无损的检测手段,成为果树关键生理期品质 监测和采后糖度分布及变化研究的瓶颈。基于此, 本文提出一种高光谱图像光强度校正方法,实现苹 果糖度及分布的有效预测。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选取富士苹果为研究对象,样本采摘自北 京市昌平区和山东省泰安市的苹果试验示范基地。 选择果形正、大小均匀、无缺陷或污染物的苹果共 173个,果径75~80mm,按GB/T10651—2008均属 优等品。将样本编号后置于4℃冰柜中贮藏,试验 前,将苹果从冰柜取出置于实验室12h,以使苹果样 本整体温度与环境温度一致,同时避免苹果表面有 水分影响高光谱图像的采集,试验过程实验室温度 20℃,相对湿度55%,保持温湿度基本不变。苹果 糖度的测试参照 GB/T 10651—2008。糖度测试部 位选择高光谱图像采集时苹果赤道位的最上部,采 用 Arias 500 型阿贝折光仪(Reichert Inc., USA),自 动温度补偿为20℃,以自利度(°Brix)表示。

1.2 高光谱图像采集系统

高光谱图像数据通过基于光谱仪的高光谱图像 采集系统获得,如图1所示。该系统主要由成像光 谱仪(ImSpector V10E, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) 和 EMCCD 相 机 (Luca-R, Andor Technology, Belfast, UK),一台配置 Y 型光纤线光 源的 150 W 卤钨灯光源(3900-ER, Illumination Technologies, Inc., USA)和精密位移平台组成。系



1.线光源 2.步进电动机 3.移动载样台 4.计算机 5.电动机控制器 6.电源控制器 7.图像采集卡 8.电子倍增式 CCD 相机 9.成像光谱仪 10.变焦透镜

统有效光谱范围 400 ~1 100 nm, 入射狭缝宽度 30 μm,光谱分辨率 2.8 nm。面阵 EMCCD 相机分辨率 为1004 像素×1000 像素,半导体制冷(-20℃)。

1.3 高光谱图像获取与标定

苹果样本置于移动平台的水果托盘上,使果梗 和花萼处于同一水平面上,采用推扫式数据采集,调 整相机的曝光时间、平台移动速度、光源强度和样本 与镜头距离等参数间的匹配,保证采集的高光谱图 像数据的质量。在苹果样本高光谱图像数据采集过 程中,参数设置为曝光时间 55 ms,平台移动速度 0.70 mm/s,镜头到样本距离 400 mm,在系统进入稳 定状态开始采集。

高光谱图像采集过程中,因光源在各波段下强 度分布的差异性和相机暗电流噪声的影响,会夹杂 部分噪声信息。这些噪声信息会影响高光谱图像的 质量,进而影响高光谱图像定性或定量分析模型的 精度和稳定性。因此有必要对高光谱图像进行校 正,以消除噪声的影响。研究采用黑白标定方法,公 式为

$$R = \frac{S - D}{W - D} \times 16\ 384 \tag{1}$$

式中 D---全黑参考高光谱图像

W——全白参考高光谱图像

S——苹果样本原始高光谱图像

R——校正后的高光谱图像

高光谱图像采集系统所用相机为 14 位精度,最后乘以 16 384 使每个校正后的像素点保留原来的相对强度。

1.4 数据处理软件

高光谱图像数据采集通过 HyperSpectral Image (Isuzu Optics Corp., Taiwan)软件完成。高光谱图 像感兴趣区域的提取通过 ENVI 4.6(ITT Visual Information Solutions, USA)实现。苹果糖度模型的 建立和光强度校正运算在 Matlab 7.9环境下编程实 现。



2.1 高光谱图像最佳感兴趣区域的决定

所有苹果样本随机挑选 115 个作为校正集建立 模型,其余 58 个作为预测集用于模型验证。苹果糖 度的检测结果见表 1,列出了糖度实测值的变化范 围、平均值和标准差等统计量。

表1 苹果样本校正集和预测集糖度检测统计结果

Tab.1 Statistics of sugar content for

calibration and prediction sets

样本集	样本数	范围/°Brix	均值/°Brix	标准偏差/°Brix
校正集	115	11.56~16.46	13.732	1.186
预测集	58	11.62 ~16.28	13.784	1.195

高光谱图像感兴趣区域(Region of interest, ROI)形状大小的选择直接影响着检测的精度和稳 定性。前期研究发现,对类球形水果圆形 ROI 建立 的苹果糖度模型精度和预测能力较好^[25]。以苹果 果梗花萼连接线与赤道面上方的交叉点为中心提取 直径 150 个像素点的圆形 ROI,校正集样本的圆形 ROI 区域的平均光谱如图 2a 所示。在可见光区域, 光谱从 500~650 nm 强度快速升高,在 674 nm 处有 一吸收峰为苹果色素的吸收。在短波近红外区,从 700~935 nm 波段光强度较高但起伏不大,980 nm 处吸收峰可能是水分和糖水化合物的叠加产生的。 为消除基线漂移、强化谱带特征,采用平滑一阶微分 预处理光谱。由于光谱末端噪声较大,且糖度信息 主要表征在短波近红外区,研究选取 640~1 050 nm 的光谱区间用于建立苹果的定量分析模型。建模方 法选用稳健的偏最小二乘法,在模型建立过程中,以 校正均方根误差(Root mean square error of calibration, RMSEC)最小来确定主成分数,同时考 虑 RMSEC 与预测均方根误差 (Root mean squared error of prediction, RMSEP) 大小相当, 避免模型过



图 2 苹果高光谱图像圆形感兴趣区域平均光谱及糖度模型

Fig. 2 Average reflectance spectra from roundness ROI in hyperspectral image and sugar content model scatter plot

⁽a) 高光谱图像圆形感兴趣区域平均光谱 (b) 苹果糖度模型散点图

拟合。最优模型的主成分数为6,模型校正集相关 系数 *R*。为0.9305, RMSEC为0.4331, 预测集相关 系数 *R*,为0.9232, RMSEP为0.4568, 相对分析误 差 RPD为2.60, 表明定标效果良好。图2b为该模 型校正集样本和预测集样本的预测值与实测值之间的 散点图, 可以看出预测值与实测值有很好的相关性。

2.2 高光谱图像光强度校正

苹果为类球形水果,苹果上不同位置与光源及 相机间角度的变化引起高光谱图像各像素点强度的 较大差异,表现为中间亮边缘暗^[26]。图 3a 为某苹 果样本同一平面上选择的像素点,图 3b 为对应像素 点的光谱曲线,中心部位的点 1、2 和 3 的光强度相 差不大,越向边缘强度越低。图 4a 所示为苹果样本 原始高光谱图像的能量分布图,以各空间像素点上 所有波长下响应强度的和作为该点的总能量,以伪 彩色图表示,可以直观看出球面的曲率对各部位光 强度的影响。在光谱建模过程,因无法有效预测品 质信息,这种强度变化很大的光谱常判断为异常值 被剔除。在水果表面亮度变换研究方面,主要是基 于 RGB 图像开发亮度补偿算法提高缺陷或果梗花 萼的识别^[27-29],对高光谱图像的亮度校正未见报 道。



图 3 苹果样本高光谱曲线校正前后对比图

Fig. 3 Spectral profile comparison before and after correction extracting from hyperspectral image
(a) 苹果样本高光谱图像显示点选取 (b) 校正前苹果样本示意点的高光谱曲线图 (c) 校正后苹果样本示意点的高光谱曲线图

研究所用高光谱成像系统,配置面阵 EMCCD 探测器,采用微弱光信号增强探测技术,具有超高的 灵敏度和一致性。同为苹果组织的像素点经光强度 校正后应有相当的光谱响应。在高光谱图像光强度 校正过程,为有效分割苹果与背景区域,首先消除背 景噪声。比较发现,反射光谱中 820 nm 为苹果样本 光强度峰值,而背景区域整个波段范围光强度都不 高。执行过程中,首先以高光谱图像中 820 nm 波长 的图像构建掩模图像,然后优化设定分割阈值为光 强度 2 200,再利用掩模去除高光谱图像中的样本背 景^[30]。苹果样本的糖度测试部位也是高光谱图像 ROI 选择建模的区域,即以直径 150 个像素点的圆 形 ROI。研究以该圆形感兴趣区域外圆环上各像素 点的平均光谱作为变换的参考光谱 *I*_m,计算公式为

$$I_m(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} I(\lambda, i)$$
 (2)

式中 *I_m*(λ) → λ 波长条件下的苹果圆形感兴趣 区域内平均光强度

苹果样本上圆环外各像素点的变换公式为

$$I_{c}(\lambda, x, y) = \frac{I(\lambda, x, y)}{\max(I(\lambda, x, y))} \max_{\lambda} (I_{m}(\lambda)) \quad (3)$$

光强度校正先进行归一化处理,使数据处于相同的范围内,*I*_e(λ, x, y)为该点校正后的光谱。苹 果样本高光谱曲线校正前后对比如图 3 所示,校正 后各像素点的光强度与中心区的光谱变化趋势一 致,光强度在同一水平上。图 4 所示为校正前后的 高光谱图像能量分布图,可以看出,苹果各部位的能 量较一致,且与背景有明显的区分,使苹果的高光谱 图像光强度得到有效补偿。

2.3 苹果糖度分布预测

高光谱图像中感兴趣区域光强度较高且强度一 致,其他部分光强度低,用已建立的糖度预测模型无法 预测其他各区域的糖度。高光谱图像经校正后,提取 苹果样本上每一像素点对应的光谱信息,用已建立的 苹果糖度分析模型可有效预测各像素点的糖度。以像 素点空间位置及对应糖度绘制了伪彩色图像,如图 5 所示,得到颜色鲜明、可视化的伪彩色糖度分布图像。 分布图上苹果的背景为深蓝色,糖度显示为零;颜色越 红表示糖度越高。苹果本身是一个复杂的生物体,具 有丰富的组成成分,成分不论是径向还是轴向均呈不 均匀状态分布。图 5 可以看出,苹果从果梗到花萼方 向糖度逐渐增大,分布情况与文献[31,32]一致,也说 明研究采用的高光谱图像光强度校正方法是可行的。 图中右上角和左下角 2 个区域糖度预测值偏低,这 2







图 5 苹果糖度空间分布图 Fig.5 Visualization and distribution of sugar content in apple

个区域恰是苹果上锈斑区域,与正常区域光谱有明显 差异,这也从侧面说明糖度预测的准确性。在苹果成 熟过程因光照和养分传输的不同引起单个苹果部位的 差异。苹果样本左侧是阴面,右侧是阳面,左边缘比右 边缘糖度低,也符合苹果糖度分布的统计规律。

3 结束语

对获取的苹果高光谱图像经黑白标定后,选取

中心区圆形 ROI 建立了稳健的糖度偏最小二乘模 型,模型校正集相关系数 R 为 0.930 5, RMSEC 为 0.4331, 预测集相关系数 R_p为 0.9232, RMSEP 为 0.4568。利用特征波长820 nm 下的图像构建掩模 图像,用于去除高光谱图像中的背景噪声信号,并提 出了一种高光谱图像的光强度校正方法,校正类球 体表面曲率变化引起的高光谱图像的亮度不均,通 过比较校正前后的光谱信息和苹果样本的伪彩色能 量图发现,校正后的苹果样本表面各部位辐射强度 均匀。提取校正后的高光谱图像各像素点的光谱信 息,利用建立的糖度偏最小二乘模型计算各像素点 对应的糖度,对应像素点的糖度以颜色表示,得到苹 果的糖度分布图,使苹果样本的糖度分布可视化。 结果表明,该方法可以有效校正类球形水果引起的 高光谱图像亮度不均的问题,可以快速无损地预测 苹果的糖度及其分布,对其他类球形农产品具有借 鉴意义。

参考文献

- 1 Dale L M, Thewis A, Boudry C. Hyperspectral imaging applications in agriculture and agro-food product quality and safety control: a review [J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2013, 48(2):142-159.
- 2 Chen Q, Zhang C, Zhao J, et al. Recent advances in emerging imaging techniques for non-destructive detection of food quality and safety[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2014, 52:261 - 274.
- 3 Qin J, Chao K, Kim M S, et al. Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 118(2):157-171.
- 4 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)
- 5 Lorente D, Aleixos N, Gomez-Sanchis J, et al. Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(4):1121-1142.
- 6 Lu R. Detection of bruises on apples using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(2):523-530.
- 7 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.
- 8 Baranowski P, Mazurek W, Pastuszka-Wozniak J. Supervised classification of bruised apples with respect to the time after bruising on the basis of hyperspectral imaging data[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 86:249 - 258.
- 9 田有文,程怡,王小奇,等. 基于高光谱成像的苹果虫害检测特征向量的选取[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12):132-139. Tian Youwen, Cheng Yi, Wang Xiaoqi, et al. Feature vectors determination for pest detection on apples based on hyperspectral

imaging[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(12):132-139. (in Chinese)

- 10 Guo Z, Huang W, Chen L, et al. Geographical classification of apple based on hyperspectral imaging [C] // Sensing for Agriculture and Food Quality and Safety V, Proceedings of SPIE 8721, 2013: 87210J.
- 11 Peirs A, Scheerlinck N, Baerdemaeker J, et al. Starch index determination of apple fruit by means of a hyperspectral near infrared reflectance imaging system[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2003, 11(5):379-389.
- 12 Peng Y, Lu R. 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.
- 13 单佳佳,吴建虎,陈菁菁,等. 基于高光谱成像的苹果多品质参数同时检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(10): 2729-2733.
 - Shan Jiajia, Wu Jianhu, Chen Jingjing, et al. Rapid nondestructive detection of apple quality attributes using hyperspectral scattering images[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(10):2729-2733. (in Chinese)
- 14 Zhao J, Vittayapadung S, Chen Q, et al. Nondestructive measurement of sugar content of apple using hyperspectral imaging technique[J]. Maejo International Journal of Science and Technology, 2009, 3(1):130-142.
- 15 Zhao Jiewen, Chen Quansheng, Saritporn V, et al. Determination of apple firmness using hyperspectral imaging technique and multivariate calibrations[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11):226-231.
- 16 Mendoza F, Lu R, Ariana D, et al. Integrated spectral and image analysis of hyperspectral scattering data for prediction of apple fruit firmness and soluble solids content[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 62(2):149-160.
- 17 Zhu Q, Huang M, Lu R, et al. Analysis of hyperspectral scattering images using a moment method for apple firmness prediction [J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(1):75-83.
- 18 ElMasry G, Sun D W, Allen P. Non-destructive determination of water-holding capacity in fresh beef by using NIR hyperspectral imaging[J]. Food Research International, 2011, 44(9): 2624 - 2633.
- 19 Kamruzzaman M, ElMasry G, Sun D W, et al. Prediction of some quality attributes of lamb meat using near-infrared hyperspectral imaging and multivariate analysis[J]. Analytica Chimica Acta, 2012, 714:57-67.
- 20 Barbin D F, ElMasry G, Sun D W, et al. Non-destructive determination of chemical composition in intact and minced pork using near-infrared hyperspectral imaging [J]. Food Chemistry, 2013, 138(2-3):1162-1171.
- 21 Feng Y Z, ElMasry G, Sun D W, et al. Near-infrared hyperspectral imaging and partial least squares regression for rapid and reagentless determination of Enterobacteriaceae on chicken fillets [J]. Food Chemistry, 2013, 138(2-3):1829-1836.
- 22 Wu D, Sun D W, He Y. Novel non-invasive distribution measurement of texture profile analysis (TPA) in salmon fillet by using visible and near infrared hyperspectral imaging[J]. Food Chemistry, 2014, 145:417-426.
- 23 Zhang X, Liu F, He Y, et al. Detecting macronutrients content and distribution in oilseed rape leaves based on hyperspectral imaging[J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(1):56-65.
- 24 邹小波,张小磊,石吉勇,等.基于高光谱图像的黄瓜叶片叶绿素含量分布检测[J].农业工程学报,2014,30(13):169-175. Zou Xiaobo, Zhang Xiaolei, Shi Jiyong, et al. Detection of chlorophyll content distribution in cucumber leaves based on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(13):169-175. (in Chinese)
- 25 郭志明,黄文倩,彭彦昆,等. 高光谱图像感兴趣区域对苹果糖度模型的影响[J]. 现代食品科技, 2014, 30(8):59-63. Guo Zhiming, Huang Wenqian, Peng Yankun, et al. Impact of region of interest selection for hyperspectral imaging and modeling of sugar content in apple[J]. Modern Food Science & Technology, 2014, 30(8):59-63. (in Chinese)
- 26 Gomez-Sanchis J, Molto E, Camps-Valls G, et al. Automatic correction of the effects of the light source on spherical objects. An application to the analysis of hyperspectral images of citrus fruits[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(2):191-200.
- 27 Li J, Rao X, Wang F, et al. Automatic detection of common surface defects on oranges using combined lighting transform and image ratio methods [J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 82:59-69.
- 28 张保华,黄文倩,李江波,等.基于亮度校正和 AdaBoost 的苹果缺陷与果梗 -花萼在线识别[J].农业机械学报,2014, 45(6):221-226.
- Zhang Baohua, Huang Wenqian, Li Jiangbo, et al. On-line identification of defect on apples using lightness correction and AdaBoost methods [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):221-226. (in Chinese)
- 29 李江波,饶秀勤,应义斌.基于照度-反射模型的脐橙表面缺陷检测[J].农业工程学报,2011,27(7):338-342. Li Jiangbo, Rao Xiuqin, Ying Yibin. Detection of naval surface defects based on illumination reflectance model[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7):338-342. (in Chinese)
- 30 孙俊,金夏明,毛罕平,等. 基于高光谱图像光谱与纹理信息的生菜氮素含量检测[J]. 农业工程学报,2014,30(10):167-173. Sun Jun, Jin Xiaming, Mao Hanping, et al. Detection of nitrogen content in lettuce leaves based on spectroscopy and texture using hyperspectral imaging technology[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 167-173. (in Chinese)
- 31 韩东海,王加华.水果内部品质近红外光谱无损检测研究进展[J].中国激光,2008,35(8):1123-1131. Han Donghai, Wang Jiahua. Review of nondestructive measurement of fruit quality by means of near infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(8):1123-1131. (in Chinese)
- 32 Nicolai B M, Beullens K, Bobelyn E, 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.