

高光谱图像技术在水果无损检测中的研究进展

吴龙国¹, 何建国¹, 贺晓光¹, 刘贵珊¹, 王伟², 王松磊¹,
苏伟东³, 罗阳¹, 思振华¹

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学物理电气信息学院, 宁夏 银川 750021;
3. 宁夏红枣工程技术研究中心, 宁夏 灵武 750400)

摘要:为保证水果质量,满足企业与消费者的需求,势必要对水果进行品质检测和分级处理。高光谱图像作为一种新型的无损检测技术,融合了图像学和光谱学的优点,可以快速、无损地获取水果的空间和光谱图像信息,从而全方位的反映水果内外部品质信息。因此,该技术在水果品质无损检测领域具有巨大的发展前景。该文主要介绍了高光谱图像系统的基本原理、图像的采集和分析方法、国内外水果无损检测的应用以及未来的发展前景。

关键词:高光谱图像技术;无损检测;水果品质;发展

中图分类号:S123 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.09.06

Research progress of hyperspectral imaging technology in non-destructive detection of fruit

WU Long-guo¹, HE Jian-guo¹, HE Xiao-guang¹, LIU Gui-shan¹, WANG Wei², WANG Song-lei¹,
SU Wei-dong³, LUO Yang¹, SI Zhen-hua¹

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;
2. School of Physics and Electronics Information Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021;
3. Ningxia Jujube Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to guarantee the fruit quality and meet consumer and enterprise's requirements, the quality detection and classification processing of fruit are necessary. Hyperspectral imaging is a non-destructive detection technology with integration of spectroscopy and imaging techniques, which can acquire both spectral and spatial information of fruits rapidly, then it can reflect an overall information of external and internal fruit quality. Therefore, it will have great potential in the non-destructive detecting field of fruit quality. The basic principles, image acquisition and analysis methods of hyperspectral imaging, its applications in domestic and overseas, and the future development are presented.

Key words: hyperspectral imaging; non-destructive detection; fruit quality; development

1 引言

随着科学技术和经济的迅速发展、人民生活水平的不断提高,国内水果市场竞争日益加剧,消费者与企业对水果品质的要求也越来越严格,从以往仅关注水果的外部品质,逐步转向水果的内部品质。正因如此,水果品质无损检测技术一直是农业工程领域的重要研究课题^[1]。目前,对水果的外部品质

检测有可见光图像检测、红外图像检测等多种较为成熟的技术,但是这些基于普通 CCD 成像的检测技

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 31060233);国家科技支撑计划(No. 2012BAF07B06);2011年度宁夏回族自治区科技攻关计划项目资助。

作者简介:吴龙国(1988-),男,在读硕士研究生,主要从事农产品无损检测方面的研究。E-mail:1046156215@qq.com

收稿日期:2013-02-06

术仅能够检测水果的部分表面特征,而无法实现水果内部品质(如水分、糖酸度、硬度、隐性损伤、腐烂、变质、虫害等)的检测^[2]。传统的水果检测方法高效液相色谱(HPLC)、质谱(MS)等既耗时又易损坏样品。近红外光谱虽然可以对水果进行无损检测,但它只能检测水果局部的小区域,因此,开发一种快速、准确、可靠、无损的检测技术已经成为水果领域的重要研究课题。高光谱图像技术克服了这一难题,作为新一代的光电检测技术,它融合了光学、图像学、机器视觉、近红外光谱检测等技术,将传统的二维成像技术和光谱技术有机结合,具有超多波段、高分辨率和图像光谱合一等优点,因而,在水果品质检测领域得到了较快发展。该技术最早主要应用于军事和卫星遥感方面,现广泛应用于天文学^[3]、农业科学^[4]、药学^[5]、医学^[6]等领域。本文主要介绍了国内外学者利用高光谱成像技术对水果品质进行无损检测的研究进展并探讨了其未来的发展前景。

2 高光谱图像技术的简介

2.1 高光谱系统

高光谱图像是在一定的波长范围内将二维的平面图像按照光谱分辨率连续地组成一幅三维的空间图像数据块(如图1所示)。图中, x 和 y 轴表示二维平面的坐标轴, λ 表示波长坐标轴。高光谱图像可以同时获取特定波长下的图像信息与 $x-y$ 平面内特定像素下各个波长的光谱信息。在每个波长下, $x-y$ 平面内各个像素点的灰度值与其在该波长下的光谱曲线上的光谱值一一对应;在特定波长下,感兴趣区域(ROIs)与正常区域之间的光谱值会存在较大差异^[7]。因此,该波长下的图像之间的灰度也必然存在着一定的差异,进而可以对被测物进行判别分析,实现被测物在线的分级。高光谱图像系统主要由光源、CCD相机、单色仪(滤波器和成像光谱仪)、计算机及数据处理软件(Matlab、Envi等软件)等五部分组成。光源常采用4个35W的卤钨灯线光源,波长范围可以在可见光(380~780nm)、近红外(780~2560nm)以及波长大于2560nm的区域。CCD相机由CCD传感器、CMOS传感器、焦平面阵列检测器等组成,用于采集图像。根据使用的单色仪不同可采用基于滤波器或滤波片和基于成像光谱仪两种方法采集高光谱图像。图2所示我实验室购置的基于成像光谱仪的高光谱图像系统。

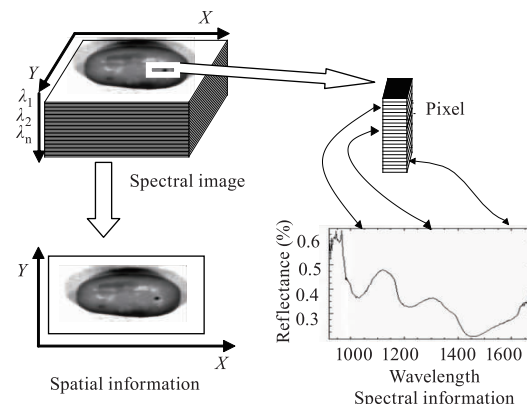
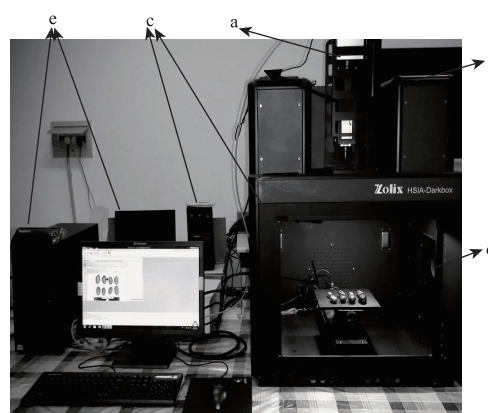


图1 高光谱图像数据块

Fig. 1 hyperspectral imaging datacube



- (a) a CCD camera;
- (b) a spectrograph with a standard C-mount zoom lens;
- (c) an illumination unit;
- (d) a sample transportation plate;
- (e) a PC supported with the image acquisition software

图2 高光谱图像系统

Fig. 2 hyperspectral imaging system

2.2 高光谱图像数据的采集与分析

2.2.1 图像采集参数的确定

基于成像光谱仪的高光谱图像系统对水果进行图像采集,因不同水果表皮的粗糙程度、颜色、光泽有所差异,导致图像采集系统中的焦距、透光量、载物台移动的速度、曝光时间等参数都会影响水果样本图像的采集。因此,根据不同水果的特性,确定合适的图像采集参数显得尤为重要。

2.2.2 图像的校正

由于在不同的波段下光源强度分布不均匀、水果的形状各异以及箱体中暗电流的存在,导致在光源强度弱的波段下的图像含有较大的噪音,对数据处理带来了冗余的信息。因此,需要对所获得的高光谱图像进行黑白标定^[8]。首先进行白板校正得到全白的标定图像 W ,然后盖上相机镜头盖进行图像采集得到全黑的标定图像 D ,然后按照下式^[9]对

原始图像进行标定:

$$R = \frac{R_o - D}{W - D} \times 100$$

式中, R_o 是样本原始的漫反射光谱图像; W 是白板的漫反射图像; D 是暗图像; R 是校正后的漫反射光谱图像。

2.2.3 预处理

预处理^[10-11]是为了去除光谱或图像信息中的非品质信息的影响(如表面不均匀引起的散射影响)从而为数据处理奠定坚实的基础。光谱曲线预处理的方法有平滑校正、标准化、光谱滤波等。图像的预处理一般是对水果的感兴趣区域采用掩模、阈值分割、腐蚀、膨胀等方法从图像块中去除大量的背景信息,从而保留有用的信息。经预处理后,可以在不损失水果品质重要信息的前提下,反映出其他波段的信息并有效地降低干扰因素对后期的数据处理结果的影响。

2.2.4 数据分析

基于高光谱数据的分析,大致可以从两方面进行研究:①图像处理;②光谱分析。前者主要是对图像进行优化,大大的减少冗余信息对实验结果带来的影响,最终还是要进行后者的过程。下面就主要介绍一下光谱分析:经过预处理的高光谱图像数据,由于其具有多波段、高分辨率和数据量大等特点,不同波段下的像素之间、图像间仍存在着大量的冗余信息,因此必须进行进一步的消除误差——降维,减少过多的冗余信息对结果的影响。目前,国内外学者常采用降维的方法:主成分分析法(PCA)、偏小二乘法(PLS)、独立变量分析法(ICA)、遗传算法(GA)等;采用线性判别分析(LDA)、Fishers 判别分析(FDA)、多元线性回归(MLR)、人工神经网络(ANN)等方法建模,常选择 2/3 水果样本作为校正集与被测水果的理化指标建立对应关系,1/3 水果样本作为验证集,对试验所建立的模型进行验证。

3 高光谱图像技术的研究进展

目前,国内外在水果品质检测方面进行的应用性研究主要包括水果外部品质(缺陷、损伤、表面污染、虫害等)以及与口感有关的内部品质(水分、酸度、含糖量、可溶性固形物、成熟度和硬度)等,研究的水果大多集中在水果、葡萄、梨、猕猴桃、草莓等小型水果。

3.1 水果表面缺陷检测

鉴于消费者在购买水果时更多地关注于水果的

外观形状是否美观、是否完整、有无缺陷等因素,国内外学者利用高光谱图像技术对水果表面的缺陷进行了大量的研究,获得了大量的研究成果,对水果的品质和销售价格起到了指导作用。

Nicola 等^[12]利用近红外高光谱反射成像技术(900 ~ 1700 nm)对苹果表面的凹陷进行了检测,采用偏最小二乘法(PLS)建立校正模型,阈值分割处理图像,该方法能够检测到肉眼无法识别的凹陷,但在光强度比较弱的边界位置会出现错误的检测。

国内,李甦等^[13]提出表征水果类别与缺陷程度的空间模型,准确地划分水果的类别与表面缺陷程度。蔡健荣等^[14]提出了波段比算法对柑橘的高光谱图像(408 ~ 1117 nm)进行了果锈检测,检测率高达 92%。李江波等^[15]采用高光谱成像技术(400 ~ 1000 nm)对 10 类脐橙果皮缺陷果及正常果进行鉴别研究。采用两次主成分分析法,识别率达 80%,而采用特征波段主成分分析法与波段比算法相结合的方法使得溃疡识别率提高到 95.4%。

3.2 水果表面损伤检测

水果的表面损伤(轻微的碰压伤、隐性损伤等)对水果储存的影响极大,通过对水果表面损伤的研究,从而确定合适的储存条件,减少水果的腐败变质,提高水果的货架期。

赵杰文等^[16]利用高光谱图像技术(408 ~ 1117 nm)检测苹果的轻微损伤,采用主成分分析法提取出 547 nm 波长下的特征图像,不均匀二次差分消除苹果图像亮度分布不均匀的影响,正确率达 88.57%。薛龙等^[17]利用高光谱图像技术(400 ~ 1000 nm)检测梨表面碰压伤,采用主成分分析法(PCA)获得 572、696、45 nm 图像,检出率为 97%。Lü Qiang 等^[18]利用高光谱图像技术(408 ~ 1117 nm)检测猕猴桃的隐形损伤。采用主成分分析法提取出 PC1 - PC4 的主成分图像,平行六边形分类法对 PC1 - PC4 图像进行损伤部位鉴别,正确率达 85.5%。

3.3 与水果口感有关的内部品质信息的检测

水果的口感是水果品质的内在核心,它是消费者对水果品质判断的一个综合指标,包括水分、硬度、酸度、含糖量、可溶性固形物等,而消费者对于水果的品质往往是通过口感进行判别的。因此,国内外的学者对于水果的内部指标检测做了大量的研究,这也为今后水果的品质鉴定以及在线分级奠定了理论基础。

国外, Gamal ElMasry 等^[19]利用高光谱图像技术(400 ~ 1000 nm)对草莓内部水分、可溶性固形物以及酸度(以 pH 值表示)进行了研究。采用偏最小二乘法(PLS)对全波段的数据进行处理,通过 PLS 模型中的 β 系数选择最佳光谱波段。研究结果表明,利用全波段建立的 PLS 预测模型和最佳波段建立的多元线性回归预测模型分别对草莓的水分、可溶性固形物、酸度进行了预测,相关系数 R 分别为 0.90、0.80、0.87 和 0.87、0.80、0.92,准确率分别为 90%、80%、87% 和 87%、80%、92%。Jianguo He 等^[20]采用高光谱成像技术(900 ~ 1700nm)对灵武长枣的可溶性固形物进行了预测研究,采用主成分分析法(PCA)优选出 1034、1109、1231、1291 和 1461 nm 特征波长下的图像,采用人工神经网络(ANN)建立了长枣可溶性固形物的预测模型。结果表明,使用人工神经网络预测长枣可溶性固形物的相关系数为 0.9027,预测集的均方根误差为 1.9845° Brix。Rajkumar P 等^[21]利用可见-近红外高光谱反射成像技术(400 ~ 1000 nm)对香蕉的水分、硬度、可溶性固形物含量进行检测,采用偏最小二乘法对图像的光谱数据进行分析,采用多元线性回归对香蕉的水分、硬度和可溶性固形物含量建立预测模型,相关系数 R 分别为 0.87、0.91、0.85。Shuang Wang 等^[22]利用高光谱散射图像技术(400 ~ 1000 nm)对“金冠”苹果的硬度建立模型,采用无信息变量消除(UVE)和监督仿射传播(SAP)的算法提取最优波长,运用偏最小二乘法对特征波长下的图像进行建模。结果表明,运用 UVE-PLS 与 SAP-PLS 与 BP(神经网络模型)的融合模型比单独用 UVE-PLS 或 SAP-PLS 法好,可以有效减少特征波长的提取数目,并且具有较好的预测值 R_p 为 0.828,预测集的均方根误差(RMSEP)为 5.53N。Antonietta Baiano 等^[23]利用高光谱图像技术(400 ~ 1000 nm)对 7 个品种的鲜食葡萄的理化和感官指标建立预测模型。采用偏最小二乘回归法(PLSR)建立光谱信息和理化指标、感官指标之间的相关性模型。结果表明,白色和红色/黑色葡萄中滴定酸度的相关系数分别为 0.95、0.82,相对应的可溶性固形物的相关系数分别为 0.94、0.95, pH 的相关系数分别为 0.80、0.90,从而说明,高光谱图像的光谱曲线与葡萄的理化指标之间有一定的联系,而无法与葡萄的感官指标建立联系。P. Rajkumar 等^[24]利用高光谱成像技术(400 ~ 1000 nm)对 20、25、30℃ 温度下不同成熟阶段的香蕉中的可溶性固

形物、水分和坚实度建立预测模型。采用主成分分析法选取特征波长 440、525、633、672、709、760、925、984 nm,再通过多元线性回归法对特征波长下的光谱信息建立预测模型。结果表明,香蕉中的可溶性固形物、水分和坚实度测定值的相关系数 R 分别为 0.85、0.87、0.91。其中可溶性固形物、坚实度在成熟阶段下随着温度变化成复杂变化,而水分随着温度变化呈线性变化。Gabriel A 等^[25]利用高光谱图像技术(500 ~ 1000 nm)检测蓝莓(果梗和花萼朝向)的硬度和可溶性固形物的含量。采用偏最小二乘法对全波段下的高光谱图像数据建立硬度、可溶性固形物预测模型,通过交叉验证法对预测模型进行验证。结果表明,硬度预测值 $R = 0.87$,可溶性固形物预测值 $R = 0.79$ 。

在国内,薛龙等^[26]采用可见/近红外光谱结合遗传-偏最小二乘法(GA-PLS)对柑桔类水果中的可溶性固形物(SSC)建立快速无损检测模型。洪添胜等^[27]利用高光谱图像技术(400 ~ 1000 nm)对雪花梨品质(含糖量、水分、鲜重)进行无损检测的研究,通过人工神经网络对雪花梨的含糖量、水分及鲜重建立预测模型。实验结果表明,雪花梨含糖量与水分的预测值与实际值的相关系数 R 分别为 0.996、0.94,鲜重预测值和实际值间相关系数 R 为 0.93。郭恩有等^[28]利用高光谱图像技术(400 ~ 1000 nm)检测脐橙的含糖量,通过人工神经网络建立了脐橙糖度的预测模型,相关系数 R 为 0.831。单佳佳等^[29]利用高光谱图像技术(400 ~ 1100 nm)对苹果的表面摔伤和含糖量进行研究。对于苹果表面摔伤,采用波段差的方法对图像进行处理,摔伤检测的准确率为 92.6%。对于苹果的含糖量的测定,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 为 0.93,验证集相关系数 R 为 0.92,结果表明,利用该技术可以实现对苹果的内外品质的同时检测。万相梅等^[30]利用高光谱散射图像技术(400 ~ 1000 nm)对苹果硬度和汁液含量建立预测模型。采用最小二乘-支持向量机法(LS-SVM)建立苹果的硬度和汁液含量模型。结果表明,LS-SVM 压缩硬度预测模型的相关系数为 $R_p = 0.795$,预测均方差为 $RMSEP = 10.4K N/m$;汁液含量的相关系数为 $R_p = 0.568$ 。郭俊先等^[31]采用高光谱成像技术(400 ~ 1000 nm)对新疆的冰糖心红富士苹果进行糖度预测和分级。基于多元线性回归方法建立苹果糖度的预测模型,相关系数为

0.911。采用判别分析(DA)对苹果进行分级处理,准确率达89.5%。

3.4 在其他方面检测中的应用

近些年,国内外的学者利用高光谱技术对水果的检测逐步延伸到了对表面污染物、农残、虫害的研究,这对水果安全有着极其重要的意义。

Liu等^[32]利用高光谱图像技术采用波段比方法对苹果表面污染物进行了检测。J. Wang等^[33]利用高光谱图像技术(400~720 nm)对红枣外部虫害进行无损检测,采用逐步判别分析法对果梗附近无损伤、花萼附近无损伤、正常的表皮、花萼端附近虫害、表皮虫害的红枣的图像进行分类,正常枣与虫害枣的判别准确率分别为98%、94%。结果表明,利用该技术无损检测红枣外部虫害是可行的。

薛龙等^[34]利用高光谱图像技术(425~725 nm)对脐橙水果表面的不同浓度的农药残留进行了检测。采集脐橙在625~725 nm范围的高光谱图像,应用主成分分析方法(PCA)获得特征波长的图像,应用第三主成分图像(PC3)并经过图像处理对脐橙表面的农药残留进行检测。结果表明,利用该技术能有效地检测出高浓度的农残,而对于低浓度的农残效果不太明显。

4 结论与展望

近些年,国内外许多学者利用高光谱成像技术,结合化学计量学和图像处理的算法对水果的内外品质进行无损检测,取得了显著的成果。今后该技术可从以下几个方面进行深入研究:

(1)现阶段大多数的研究只是在可见光范围(400~1000 nm)内,利用高光谱图像技术对表皮比较薄的水果(苹果、香蕉、葡萄、猕猴桃等)进行无损检测,今后可采用该技术在近红外(900~1700 nm)波段对果皮比较厚的水果(西瓜、橙子、柚子、椰子等)进行无损检测。

(2)高光谱技术与其他技术的结合,如高光谱技术与热成像技术结合,把遥感技术真正应用到水果检测中去。这样,可以更好的检测水果内外品质进而实现水果的在线分级。这种不同技术联合使用的方法将是水果无损检测未来的发展趋势。

(3)目前,利用高光谱图像技术对往往只能获取水果的正面图像,而背面图像信息却无从获取,而且水果无损检测仅适用于同种水果,对于不同水果的检测条件的控制还没有制定出一套完善的通用方

法,今后开发一种通用的水果检测方法是未来的研究方向。

参考文献:

- [1] Ma Xueben, Ying Yibin, Rao Xiuqin, et al. Research of hyperspectral imaging in non-destructive measurement of fruit internal qualities[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(6): 1611-1615. (in Chinese)
马学本, 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.
- [2] Hong Tiansheng, Li Zhen, Wu Chunyin, et al. Review of hyperspectral image technology for non-destructive inspection of fruit quality[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 280-285. (in Chinese)
洪添胜, 李震, 吴春胤, 等. 高光谱图像技术在水果品质无损检测中的应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 280-285.
- [3] Hege E, O'Connell D, Johnson W, et al. Hyperspectral imaging for astronomy and space surveillance[J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 51(59): 380-391.
- [4] Monteiro S, Minekawa Y, Kosugi Y, et al. Prediction of sweetness and amino acid content in soybean crops from hyperspectral imagery[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 62: 2-12.
- [5] Lyon R C, Lester D S, Lewis E N, et al. Near-infrared spectral imaging for quality assurance of pharmaceutical products: analysis of tablets to assess powder blend homogeneity[J]. AAPS Pharm Sci Tech, 2002, 3: 17.
- [6] Ferris D, Lawhead R, Dickman E, et al. Multimodal hyperspectral imaging for the noninvasive diagnosis of cervical neoplasia[J]. Journal of Lower Genital Tract Disease, 2001, 5: 65-72.
- [7] Li Jiangbo, Rao Xiuqin, Ying Yibin. Advance on application of hyperspectral imaging to non-destructive detection of agricultural products external quality[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(8): 2021-2026. (in Chinese)
李江波, 饶秀勤, 应义斌. 农产品外部品质无损检测中高光谱成像技术的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(8): 2021-2026.
- [8] Polder G, Gerie WAM, Van Der Heijden. Calibration and characterization of imaging spectrographs[J]. Near-Infrared Spectroscopy, 2003, 11: 193-210.
- [9] Gamal ElMasry, Ning Wang, Clément Vigneault. Detecting chilling injury in red delicious apple using hyperspectral imaging and neural networks[J]. Postharvest Biology and

- Technology, 2009, 52: 1 – 8.
- [10] Maider Vidal, José Manuel Amigo. Pre-processing of hyperspectral images essential steps before image analysis [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2012, 117: 138 – 148.
- [11] Howland D T Jones, David M Haaland, Michael B Sinclair, et al. Preprocessing strategies to improve MCR analyses of hyperspectral images [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2012, 117: 149 – 158.
- [12] Nicola B, Ltze E, Peirs A, et al. Non-destructive measurement of bitter pit in apple fruit using NIR hyperspectral imaging [J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 40: 1 – 6.
- [13] Li Su, Tan Yonglong, Yang Meiyang. Study on fruit classification and surface defect detection [J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(15): 3954 – 3957. (in Chinese)
李甦, 谭永龙, 杨美英. 水果分级与表面缺陷检测研究 [J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(15): 3954 – 3957.
- [14] Cai Jianrong, Wang Jianhei, Chen Quansheng, et al. Detection of rust in citrus by hyperspectral imaging technology and band ratio algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 127 – 131. (in Chinese)
蔡健荣, 王建黑, 陈全胜, 等. 波段比算法结合高光谱图像技术检测柑橘果锈 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 127 – 131.
- [15] 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)
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.
- [16] Zhao Jiwen, 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)
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.
- [17] Xue Long, Li Jing, Liu Muhua. Researches of hyperspectral imaging in the detection of surface bruising of pear [J]. Cereals and Oils Processing, 2009, 4: 136 – 138. (in Chinese)
薛龙, 黎静, 刘木华. 利用高光谱图像技术检测梨表面碰压伤的试验研究 [J]. 粮油加工, 2009, 4: 136 – 138.
- [18] Lü Qiang, Tang Mingjie. Detection of hidden bruise on kiwi fruit using hyperspectral imaging and parallelepiped classification [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 11: 1172 – 1179.
- [19] Gamal ElMasry, Ning Wang, Adel ElSayed, et al. Hyperspectral imaging for non-destructive determination of some quality attributes for strawberry [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81: 98 – 107.
- [20] He Jianguo, Luo Yang, Liu Guishan, et al. Prediction of soluble solids content of jujube fruit using hyperspectral reflectance imaging [J]. Advanced Materials Research, 2012, In press.
- [21] Rajkumar P, Wang N, ElMasry G. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108: 194 – 200.
- [22] Wang Shuang, Huang Min, Zhu Qibing. Model fusion for prediction of apple firmness using hyperspectral scattering image [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 80: 1 – 7.
- [23] Antonietta Baiano, Carmela Terracone, Giorgio Peri, et al. Application of hyperspectral imaging for prediction of physico-chemical and Sensory Characteristics of Table Grapes [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 87: 142 – 151.
- [24] P Rajkumar, N Wang, G ElMasry. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108: 194 – 200.
- [25] Gabriel A, Leiva-Valenzuela, Renfu Lu, et al. Prediction of firmness and soluble solids content of blueberries using hyperspectral reflectance imaging [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115: 91 – 98.
- [26] Xue Long, Li Jing, Liu Muhua, et al. Non-destructive detection of soluble solids content on navel orange with vis/NIR based on genetic algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47: 1 – 5. (in Chinese)
薛龙, 黎静, 刘木华, 等. 基于遗传算法的脐橙可溶性固形物的可见/近红外光谱无损检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47: 1 – 5.
- [27] Hong Tiansheng, Qiao Jun, Ning Wang, 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)
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.
- [28] Guo Enyou, Liu Muhua, Zhao Jiwen, et al. Non-destructive 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)
- 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.
- [29] Shan Jiajia, Peng Yankun, Wang Wei, et al. Simultaneous detection of external and internal quality parameters of apples using hyperspectral technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42 (3): 140 - 144. (in Chinese)
- 单佳佳, 彭彦昆, 王伟, 等. 基于高光谱成像技术的苹果内外品质同时检测[J]. 农业机械学报, 2011, 42 (3): 140 - 144.
- [30] Wan Xiangmei, Hang Min, Zhu Qibing. Non-destructive detection for compression hardness and juiciness in apple based on hyperspectral scattering image [J]. Science and technology of food industry, 2012, 33 (6): 71 - 74. (in Chinese)
- 万相梅, 黄敏, 朱启兵. 基于高光谱散射图像的苹果的压缩硬度和汁液含量无损检测[J]. 食品工业科技, 2012, 33 (6): 71 - 74.
- [31] Guo Junxian, Rao Xiuqin, Cheng Guoshou, et al. Prediction of the sugar degree and grading of Xinjiang fuji apple by hyperspectral imaging techniques [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2012, 35 (1): 78 - 86. (in Chinese)
- 郭俊先, 饶秀勤, 程国首, 等. 基于高光谱成像技术的新疆冰糖心红富士苹果分级和糖度预测研究[J]. 新疆农业大学学报, 2012, 35 (1): 78 - 86.
- [32] Liu Y, Chen Y R, Kim M S, et al. Development of simple algorithms for the detection of fecal contaminants on apples from visible/near infrared hyperspectral reflectance imaging [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81: 412 - 418.
- [33] J Wang, K Nakano, S Ohashi. Detection of external insect infestations in jujube fruit using hyperspectral reflectance imaging [J]. Biosystems engineering, 2011, 108: 345 - 351.
- [34] Xue Long, Li Jing, Liu Muhua. Detecting pesticide residue on navel orange surface by using hyperspectral imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28 (12): 2277 - 2280. (in Chinese)
- 薛龙, 黎静, 刘木华. 高光谱图像技术检测水果表面农药残留[J]. 光学学报, 2008, 28 (12): 2277 - 2280.