

文章编号:1002-2082(2009)04-0639-07

高光谱图像技术在农产品检测中的应用进展

王 雷, 乔晓艳, 董有尔, 张 姝, 尚艳飞

(山西大学 物理电子工程学院, 山西 太原 030006)

摘 要:综述了高光谱图像技术在农产品品质和食用安全性检测方面的研究现状及其在无损检测中的应用进展。在此基础上,提出了利用高光谱图像技术检测农药残留的解决途径,对高光谱图像技术在生物医学信息检测和农药残留检测中的应用前景进行了展望,指出高光谱图像技术是生物组织功能信息分析的一种新方法,是符合我国农产品产销特点的农药残留检测的潜力技术,可保障农产品质量和安全。

关键词:无损检测;高光谱图像;农产品品质;农药残留

中图分类号:TN911.73;TS201.6

文献标志码:A

Application of hyper-spectral image technology in detecting agricultural product

WANG Lei, QIAO Xiao-yan, DONG You-er, ZHANG Shu, SHANG Yan-fei

(College of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Current research status on application of hyper-spectral image technology in the quality of agricultural product and food safety as well as its application in non-destructive detection is reviewed. A method to detect the pesticide residue is provided using hyper-spectral image technology. Its potential application in biomedical information detection and pesticide residue detection is predicted. Hyper-spectral image technology is a new method to biological tissue function information analysis and a potential technology to detect the pesticide residue in agricultural product, which is a serious food safety problem in China.

Key words: non-destructive detection; hyper-spectral image; quality of agricultural product; pesticide residue

引言

我国是一个农业大国,农业的可持续发展关系到国家经济建设和社会稳定的全局。随着农业产业化发展,农产品的生产不可避免地会使用农药、抗生素和激素等辅助性物质,而这些物质的不合理使用会导致农产品中残留残留量的超标,影响消费者食用安全,严重时会造成消费者致病、发育不正常,甚至直接导致中毒死亡等。随着农产品和食品

安全问题的频频爆发,农产品和食品安全备受关注。我国政府在高度重视农业发展的同时,也高度重视农产品和食品的安全问题。农产品质量安全直接关系到人民群众的生命安全和身体健康,一直是备受国内外普遍关注的热点问题。在做好食品安全工作的同时,对潜在的农产品质量安全危险进行预测、分析和评估,做好农产品质量监管工作,也是农产品发展中非常必要的一项辅助技术。近年来,高

收稿日期:2009-03-02; 修回日期:2009-03-23

基金项目:山西省自然科学基金(批准号:2007011041);山西省太原市2008年科学技术发展计划项目(0824073);国家基础科学人才培养基金(批准号:J0730317)

作者简介:王雷(1984—),男,山西运城人,硕士生,研究方向:基于高光谱图像的无损检测。

通信联系人:乔晓艳, E-mail:xyqiao@sxu.edu.cn

光谱图像技术在农产品安全检测的应用中取得良好效果,并在不断深入发展中。

高光谱图像技术是20世纪80年代发展起来的新技术,它集中了光学、电子学、信息处理以及计算机科学技术,把传统的二维成像技术和光谱技术有机地结合在一起而形成的先进技术。具有超多波段、光谱高分辨率和图谱合一的特点。将高光谱图像技术应用到农畜产品、食品的品质与安全性检测中,可以得到产品的内外品质的全面检测信息,其光谱技术可以检测农畜产品的物理结构和化学成分等;图像技术能全面反映农畜产品的外在特征。这种内外品质信息兼备的特征,使得高光谱图像技术在农产品无损检测方面具有较大的应用前景^[1]。现阶段利用高光谱图像技术进行农产品品质的无损检测还处于研究和发展阶段,随着光谱分辨率的不断提高,高光谱图像能够记录的农产品品质信息会越来越丰富,比如快速全面检测农产品中农药残留的问题以及食品中一些对人体有害的添加剂含量的问题,这一系列应用研究必将对农产品质量安全检测具有重要意义,因而对保障食品安全起着积极的推动作用。

1 基于高光谱图像的无损检测系统

基于高光谱图像的无损检测系统主要包括硬件平台(高光谱图像的获取)和软件数据处理(高光谱图像数据分析)两部分。

硬件平台主要由光源、分光部件、CCD、图像采集系统和计算机所组成。根据分光部件的不同,其硬件平台又有2种不同的组建方式,即基于滤光片的高光谱图像获取系统和基于成像光谱仪的高光谱图像获取系统。基于滤光片的高光谱图像获取系统是通过连续采集一系列波长条件下的二维图像,再对应于不同波长得到三维检测信息。这种方法所采用的成像装置主要由 CCD 和可用于波长选择的部件组成,如图1所示。

基于成像光谱仪的高光谱图像获取系统是采用“推扫式”成像方法获取高光谱图像。探测器在光学焦面的垂直方向横向排列完成横向扫描,可以获取目标在对应条状空间中每个像素在各个波长下的图像信息;同时在系统传送带前进过程中,探测器完成纵向扫描,综合纵横扫描信息可得到检测目标的三维高光谱图像信息。这种成像装置由包含分光系统和成像系统的成像光谱仪组成,通过光纤与光源的耦合,激发光源发出的光功率最大限度地通

过光纤传输,最终照射在待测物上,从而提高发射光的产生效率,如图2所示。

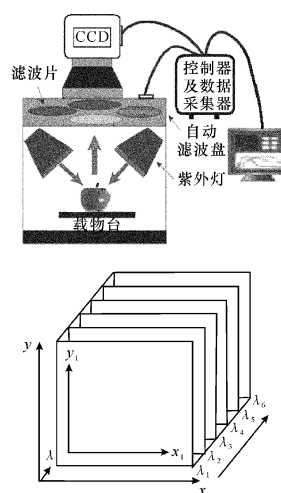


图1 基于滤光片的高光谱图像获取系统及三维图像块示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the hyper-spectral image acquisition system based on filter and 3-D image block

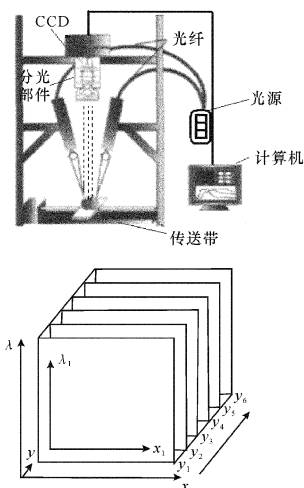


图2 基于成像光谱仪的高光谱图像获取系统及三维图像块示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the hyper-spectral image acquisition system based on imaging spectrometer and 3-D image block

高光谱图像数据分析是高光谱图像检测系统中重要的组成部分,软件数据处理方法是依据高光

谱图像特点提出的。高光谱图像技术虽然在信息上有独特的优越性,但是由于高光谱图像数据具有波段数多、光谱分辨率高和数据量大等特点,给数据分析和处理带来不便。因此,选择合理的图像数据处理方法对高光谱图像无损检测系统非常重要。目前高光谱图像数据处理方法主要有2类:基于光谱空间的检测方法与基于特征空间的检测方法。基于光谱空间的检测方法在高光谱图像检测中是比较常用的方法,其需要预先知道检测对象品质的实测光谱参数,通过对实测光谱与参考光谱之间的匹配或实测光谱与光谱数据库中标准光谱间的比较,计算两者之间的相似性或差异性,用来检测目标物质的品质。基于特征空间检测方法的基本思想是从特征空间的分布规律出发,通过提取同一检测对象图像上不同品质指标呈现的不同分布特性,进而实现目标对象的品质检测和识别^[2]。此方法首先需要分析检测对象不同品质指标表现出来的特征及其与背景特征间的分布差异,然后通过相应的特征提取方法突出图像中的检测目标的特征,最后通过图像分割算法提取检测目标的品质指标。总体来说,目前高光谱图像处理方法主要包括:主成分分析、小波变换、独立成分分析等^[3-6]。此外,近年来又发展起来一种支持向量机的方法,它适用于小样本检测,也成为了高光谱图像检测技术的一个重要研究方向^[7-9]。

2 高光谱图像技术在农产品品质检测中的应用现状

高光谱图像技术在遥感测量方面有着成熟的应用背景,主要用于对地球资源的调查和地球环境监测,特别是在地表物质识别和分类、城市动态检测、水资源调查、水域污染检测、战场环境探测与军事目标侦察等领域取得了一系列研究成果^[10-13]。高光谱图像检测技术在微观和生物学检测方面的应用研究目前仍处于探索阶段。但其所具有的诸多特点如检测灵敏度高、取样量少、快速无损、操作简便,尤其可在恶劣环境下进行远距离在线、连续监测等优点,使得它成为当今食品和农产品检测领域的应用研究热点。

高光谱图像技术能检测农畜产品综合品质,包括内在品质、外在品质和食用安全性,是多信息融合检测农畜产品综合品质的首选技术。一方面,可利用近红外区域图像来检测农畜产品内部的糖酸

度、内部缺陷、维生素等内部品质;另一方面,还可利用可见光区域图像来确定农畜产品的外在品质,如缺陷、损伤和外部污染等。此外,还可利用紫外光区域图像检测农畜产品的食用安全性。近年来,高光谱图像技术在农产品品质检测中的应用研究已获得初步进展,如美国农业部仪器与传感实验室自1998年起开始高光谱图像在农畜产品品质与食用安全性检测中的研究^[14-15],KIM等人^[16]将高光谱反射和荧光图像系统应用在食品质量和安全检测中;喻晓强、刘木华等人^[17]采用632 nm的连续波激光作为激发光,应用激光诱导荧光高光谱成像技术对南丰蜜桔和脐橙的糖度值进行了无损测量;CHENG等人^[18]应用高光谱图像检测黄瓜损伤情况;LU等人^[19]利用高光谱图像技术检测桃子的坚实度。

2.1 对农畜产品内部品质检测

利用光谱图像进行农畜产品内部品质检测目前尚处于研究阶段。洪添胜、乔军等人^[20]利用高光谱图像系统对雪花梨中糖和水质进行无损检测的研究,通过建立人工神经网络模型对雪花梨的含糖量、含水率及鲜重进行预测。实验结果表明,雪花梨含糖量预测值和实际值间相关系数R为0.996,误差平均值为0.5;含水率预测值和实际值间相关系数R为0.94,相对误差平均值为0.62%;鲜重预测值和实际值间相关系数R为0.93。该实验证明了利用高光谱图像技术预测雪花梨的内外部品质参数是可行的。而在今后的研究中,需要增加试验样本的数量以及样本的广泛性,以进一步完善预测模型,从而促进该技术在水果无损检测与分级中的应用和推广。

ELMASRY G等人^[21]应用高光谱图像研究了草莓内部含水率、总可溶性固体以及酸度。数据处理采用偏最小二乘法(PLS),最佳光谱波段通过PLS模型中的系数进行选择。利用全光谱波段图像多元线性回归预测模型对湿度、总可溶性固体及酸度进行预测的相关系数分别为:0.90, 0.80, 0.87;利用最佳光谱波段多元线性回归预测模型对湿度、总可溶性固体及酸度进行预测的相关系数分别为:0.87, 0.80, 0.92。

COGDILL等人^[22]利用液晶可调滤波器组成的高光谱图像系统,采用偏最小二乘法、主成分分析法研究了玉米含水率和含油率,且预测结果都达到很高的精度。

综上所述,高光谱图像技术能对研究对象的内

部品质进行可视化分析。基于此设想,利用光谱技术监测诸如牛奶中三聚氰胺应该极有可能实现。因此,高光谱图像检测技术用于农畜产品内部品质检测会有广阔的应用前景。

2.2 对农畜产品外部品质检测

将高光谱图像技术应用于农畜产品外部品质检测也取得了一系列研究进展,国内外已有一些相关的应用性成果和初步的实验结果。目前对果蔬外部品质检测的应用研究主要包括:水果的分级,果蔬表面受外界污染、缺损、伤病及残留农药等。

美国农业部仪器与传感技术实验室开发了一套高光谱成像系统,该系统的光谱范围为 430 nm ~ 930 nm,光谱分辨率为 10 nm,空间分辨率为 1 mm。可以测量待测物的高光谱反射和荧光图像^[18]。LU R^[23]设计了一套波长范围 900 nm ~ 1 700 nm 的近红外高光谱成像系统对苹果的损伤进行研究。他采用主成分分析和最小噪声分离变换算法检测了苹果的新旧损伤。实验表明:检测准确率随苹果损伤后存放天数不同而有变化。MEHL P M 等人^[24]利用高光谱图像技术对不同种类及颜色苹果的损伤、腐烂、疤痕和土壤污染进行了检测。利用不均匀二次差分算法对完好无损的苹果以及含有缺陷和污染物的苹果进行研究,获得不同目标的特征谱段及其相应的滤波器,能清楚地区分各类苹果中的缺陷、污染区域、病变及腐烂,且不会把果梗误判为缺陷。实验表明,区分苹果正常和污染区的正确率范围在 76%~95%之间。由于此技术仅需 3 个波长并与苹果种类无关,很容易应用到实际生产中,对现代农业将会产生深远影响。

POLDER^[25]等人结合高光谱图像技术和独立分量分析算法研究了西红柿成熟度的分类问题,利用快速独立分量分析算法找到了 2 个独立分量,这 2 个独立分量分别与西红柿中的番茄红素、叶绿素的实际吸收光谱相似。西红柿越成熟,其高光谱图像中像素的灰度第 1 独立分量的值越大,而第 2 独立分量的值在一定光谱范围内则由大逐渐减小。

陈全胜、赵杰文等人^[26]利用高光谱图像技术检测茶叶质量,基本解决了茶叶内外品质检测难以同时兼顾的问题。他们设计的高光谱图像系统是基于成像光谱仪的图像采集技术,通过主成分分析从大量数据中优选出 3 个波长段的特征图像;从每个特征图像中分别提取平均灰度级、标准方差、平滑度、三阶矩、一致性和熵等 6 个基于统计矩的纹理特征参量,每个样本共有 18 个特征变量;再通过主

成分分析对这 18 个特征变量进行压缩,提取 8 个主成分因子,建立基于反向传播神经网络的茶叶等级判别模型。模型训练时的总体识别率为 97%,预测时总体识别率为 94%。结果表明了高光谱图像技术可以用于茶叶质量等级水平的评判。

3 高光谱图像技术应用进展

20 世纪 70 年代后,生物科学的新进展如雨后春笋,层出不穷。从总体上看,当代生物科学主要朝着微观和宏观两个方面发展:在微观方面,生物学已经从细胞水平进入到分子水平去探索生命的本质;在宏观方面,生态学的发展正在为解决全球性的资源和环境等问题发挥着重要作用。其中基于高光谱图像技术进行环境探测和资源调查已处于深入研究和初步应用阶段;而其在微观方面的研究尚处于试验和探索阶段。

3.1 高光谱图像技术在生物医学上的应用

医学影像技术是生物医学工程的重要领域,它不仅可提供完美的静态组织结构影像,还可用于生物组织功能信息的研究。目前用于生物组织功能活动的成像技术包括:磁共振功能成像、光电子成像、正电子发射成像、单光子成像等。由于高光谱技术在遥感方面的不断进步,从而推动了显微高光谱成像技术发展,相信在不久的将来高光谱成像技术会在生物医学上得以广泛应用。

显微高光谱成像技术是将显微镜技术与遥感中的高光谱成像技术相结合,以实现生物样本的显微成像。该技术不仅可以提供被检测样本的显微图像信息,同时可提供样本的反射率和透射率等光谱信息,使对某些样本实现定性定量分析成为可能。

李庆利、肖功海等人^[27]利用自行研制的推帚式显微高光谱成像系统对人血细胞进行了分析,从图像和透射率光谱两个方面对正常血液和白白血病血液中的部分血细胞进行对比分析,初步获得了正常与病变细胞在形态和透射率光谱上的差异,辅助医学研究人员从一个新的角度对血液涂片进行分析。李庆利等人^[28]针对中医舌诊现代化中存在的问题,开发研制了一种基于高光谱成像技术的舌像辅助诊断系统。这一系统包括高光谱舌图像采集、图像存储、特征提取和辅助诊断几部分。系统使用高光谱成像技术代替通常使用的数码相机进行舌图像采集,并对高光谱舌图像进行了图像和光谱特征提取,然后使用贝叶斯分类器初步建立起了舌像特征与病症之间的联系。该系统具有较高的准确

度,是否像辅助诊断的一种新途径。高光谱图像技术有望成为生物组织功能信息分析和医学检测的一种新方法。

3.2 高光谱图像技术在农药残留检测上的应用

近年来,随着我国经济的迅猛发展,国民收入和生活水平不断提高,食品安全问题已成为国民关注的焦点。在许多发达国家,蔬菜生产基地相对集中,农药残留的抽样检测早已制度化^[29]。在我国蔬菜生产相对分散,蔬菜要保持新鲜,由采收到销售所经历的时间相对较短,监控部门没有足够时间把市场上的蔬菜作为样本进行分析。因此,加强对农产品残留农药的监测,找到适合我国果蔬产销特点的检测手段和方法,在当今阶段具有迫切需要。

传统的农药残留检测方法包括薄层色谱法、气相色谱法、高效液相色谱法及生物测定法等。但这些方法都存在样品前处理过程繁琐、试剂消耗大、耗时长等缺点,无法实现快速与绿色检测的需要。基于成像光谱技术的高光谱图像检测,具有检测灵敏度高、取样量少、快速无损、操作简便,尤其可在恶劣环境下进行远距离在线、连续检测等优点,成为当今农药残留检测领域的研究热点之一。

胡淑芬、刘木华等人^[30-31]应用自行研制的激光图像采集系统检测苹果和脐橙表面的残留农药,通过获取水果的散射图像,对比研究了水果表面不喷洒农药、喷洒不同农药和喷洒不同浓度农药的水果图像特征变化,预测农药的残留量,实验结果如图3与图4(归一化的像素点为某灰度值对应的像素点个数与总像素点个数之比)所示。

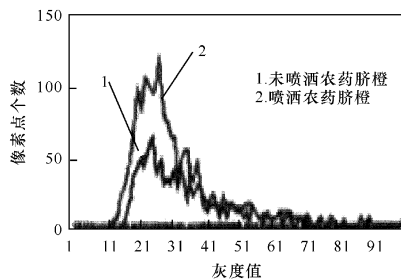


图3 脐橙灰度图像像素点个数对比曲线

Fig. 3 Curve comparison of navel orange gray image pixel point number

该方法可以区分出有无农药残留和残留农药的种类,但对农药残留量的实验规律不明显,要达到对残留农药定量检测还有待于进一步研究。王润涛^[32]采用光谱分析技术,通过图像处理软件对典

型蔬菜残留农药光谱特性进行测量与分析,在一定程度上克服了传统方法的弊端,实现了对蔬菜表面直接非破坏性测试,有一定的实用价值。但该方法仅仅初步试验了农药的光谱统计特性,没有定量的识别研究,实验所选农药也不具有普遍性,限制了实际应用的范围。

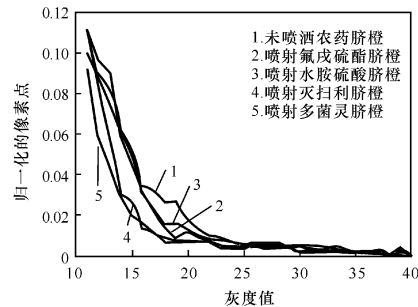


图4 5个脐橙激光图像灰度曲线特征段

Fig. 4 Characteristic gray curve of laser image for five oranges

目前,采用激光图像采集系统进行农药残留检测,还只能达到定性测量,而高光谱图像检测,既包含了图像信息又具有光谱信息。通过图像和光谱双重信息融合对农药残留进行定性和定量测量将是一个很有前景和挑战性的课题。

4 结论

高光谱图像技术是图像和光谱两种技术结合的产物,可以实现对农产品的内外部品质及食品成分的检测,是多种信息融合检测果蔬综合品质的首选方法,也是符合我国农产品产销特点的农药残留检测的潜力技术,同时也是生物医学检测的一种有效方法。随着该技术的成熟和应用范围的扩大,必将在更多领域发挥重要的作用。

参考文献:

- [1] 刘木华,赵杰文,郑建鸿,等. 农畜产品品质无损检测中高光谱图像技术的应用进展[J]. 农业机械学报, 2005, 36(9): 139-142.
- LIU Mu-hua, ZHAO Jie-wen, ZHENG Jian-hong, et al. Review of hyperspectra-imaging in quality and safety inspections of agricultural and poultry products[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(9): 139-142. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 皱小波,赵杰文. 农产品无损检测技术与数据分析方

- 法[M].北京:中国轻工业出版社,2008.
- ZOU Xiao-bo, ZHAO Jie-wen. Nondestructive detection technique of agricultural products and data analysis method[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [3] 吕东亚,黄普明,孙献璞. 高光谱图像的数据特征及压缩技术[J]. 空间电子技术, 2005(01):15-22.
- Lǚ Dong-ya, HUANG Pu-ming, SUN Xian-pu. Data feature and compression of hyperspectral images [J]. Space Electronic Technology, 2005(01):15-22. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 杨诸胜,郭雷,罗欣,等. 一种基于主成分分析的高光谱图像波段选择算法[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(12):72-74.
- YANG Zhu-sheng, GUO Lei, LUO Xin, et al. A PCA based band selection algorithm of hyperspectral image[J]. Microelectronics, 2006, 23(12):72-74. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 张培强. 基于小波变换的高光谱图像压缩算法初步研究[D]. 北京:北京工业大学, 2004.
- ZHANG Pei-qiang. Research on hyperspectral image compression algorithm based on wavelet transform [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [6] 冯燕,何明一,宋江红,等. 基于独立成分分析的高光谱图像数据降维及压缩[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(12):2871-2875.
- FENG Yan, HE Ming-yi, SONG Jiang-hong, et al. ICA-based dimensionality reduction and compression of hyperspectral images[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(12):2871-2875. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 何灵敏. 支持向量机集成及在遥感分类中的应用[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- HE Ling-min. Support vector machines ensemble and its application in remote sensing classification [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [8] 梅建新. 基于支持向量机的高分辨率遥感影像的目标检测研究[D]. 武汉:武汉大学, 2004.
- MEI Jian-xin. Study on object detection for high resolution remote sensing images based on support vector machines [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese)
- [9] 谭琨,杜培军. 基于支持向量机的高光谱遥感图像分类[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(2):123-128.
- TAN Kun, DU Pei-jun. Hyperspectral remote sensing image classification on based on support vector machine [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(2):123-128. (in Chinese with an English abstract)
- [10] 杨国鹏. 基于核方法的高光谱影像分类与特征提取[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2007.
- YANG Guo-peng. Hyperspectral image classification and feature extraction based on kernel methods [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2007. (in Chinese)
- [11] 胡兴堂. 高光谱水质遥感监测系统关键技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2006.
- HU Xing-tang. Research on the key technologies of hyperspectral remote sensing environment monitoring system and its applications to water resources[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [12] 孙曼利. 基于高分辨率图像的机场区域检测和毁伤识别研究[D]. 南京:南京理工大学, 2007.
- SUN Man-li. A study on detecting in airport and damage recognition based on high resolution image [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [13] 张良培,张立福. 高光谱遥感[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2005.
- ZHANG Liang-pei, ZHANG Li-fu. Hyperspectral remote sensing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005. (in Chinese)
- [14] LU R, CHEN Y R. Hyperspectral imaging for safety inspection of foods and agricultural products [J]. SPIE Proceedings Series, 1999, 3544: 121-133.
- [15] CHEN Y R, CHAO K, KIM M S. Machine vision technology for agricultural applications [J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2002, 36(2):173-191.
- [16] KIM M S, CHEN Y R, MEHL P M. Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system food quality and safety[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(3):721-729.
- [17] 喻晓强,刘木华,郭恩有,等. 基于荧光高光谱图像的柑桔糖度无损检测[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(36):11807-11808.
- YU Xiao-qiang, LIU Mu-hua, GUO En-you, et al. Hyperspectral laser-induced fluorescence imaging for nondestructive assessing soluble solids content of orange[J]. Journal of Anhui Agri, 2007, 35(36):

- 11807-11808. (in Chinese with an English abstract)
- [18] CHENG 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 ASAE, 2004, 47(4): 1313-1320.
- [19] LU R F, PENG Y K. Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness [J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(2): 161-171.
- [20] 洪添胜, 乔军. 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 Tian-sheng, QIAO Jun. Non-destructive inspection of Chinese pear quality based on hyperspectral imaging technique [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 151-155. (in Chinese with an English abstract)
- [21] 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.
- [22] COGDILL R P, HURBURGH C R, RIPPKE G R. Single-kernel maize analysis by near-infrared hyperspectral imaging [J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(1): 311-320.
- [23] LU R. Detection of bruises on apples using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Transactions of ASAE, 2003, 46(2): 523-530.
- [24] 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, 2001, 4206: 201-213.
- [25] POLDER G, HEIJDEN G W, YOUNG I T. Tomato sorting using independent component analysis on spectral images [J]. Real-Time Imaging, 2003, 9: 253-259.
- [26] 陈全胜, 赵杰文, 蔡健荣, 等. 利用高光谱图像技术评判茶叶的质量等级[J]. 光学学报, 2008, 28(4): 669-674.
CHEN Quan-sheng, ZHAO Jie-wen, CAI Jian-rong, et al. Estimation of tea quality level using hyperspectral imaging technology [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(4): 669-674. (in Chinese with an English abstract)
- [27] 李庆利, 肖功海, 薛永祺, 等. 基于显微高光谱成像的人血细胞研究[J]. 光电工程, 2008, 35(5): 98-101.
LI Qing-li, XIAO Gong-hai, XUE Yong-qi, et al. Microscopic hyperspectral image study of human blood cells [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(5): 98-101. (in Chinese with an English abstract)
- [28] 李庆利, 薛永祺, 刘治. 基于高光谱成像技术的中医舌象辅助诊断系统[J]. 生物医学工程学杂志, 2008, 25(2): 368-371.
LI Qing-li, XUE Yong-qi, LIU Zhi. A novel system for tongue inspection based on hyperspectral imaging system [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2008, 25(2): 368-371. (in Chinese with an English abstract)
- [29] 罗冰, 张雅维. 农产品如何跨越绿色壁垒[J]. 价格月刊, 2003(4): 5-6.
LUO Bing, ZHANG Ya-wei. How to leap over green barrier in agricultural products [J]. Prices Monthly, 2003(4): 5-6. (in Chinese with an English abstract)
- [30] 胡淑芬, 刘木华, 林怀蔚. 基于激光图像的水果表面农药残留检测试验研究[J]. 江西农业大学学报, 2006, 28(6): 872-876.
HU Shu-fen, LIU Mu-hua, LIN Huai-wei. A study on detecting pesticide residuals on fruit surface by using laser imaging [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2006, 28(6): 872-876. (in Chinese with an English abstract)
- [31] 胡淑芬, 药林桃, 刘木华. 脐橙表面农药残留的计算机视觉检测方法研究[J]. 江西农业大学学报, 2007, 29(6): 1031-1034.
HU Shu-fen, YAO Lin-tao, LIU Mu-hua. The pesticide leftover detection of navel orange using computer vision [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2007, 29(6): 1031-1034. (in Chinese with an English abstract)
- [32] 王润涛. 典型蔬菜残留农药荧光光谱特性测量与分析技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
WANG Rui-tao. Research on fluorescence spectral characteristic measure and analysis technique of typical pesticide residue on vegetables [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)