

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

李江波, 饶秀勤*, 应义斌

浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310029

摘要 高光谱成像技术是一种传统图像及光谱的融合技术, 可以同时获取研究对象的空间及光谱信息。由于图像数据能反映农产品的外部特征、表面缺陷及污斑情况, 而光谱数据又可以对物体内部物理结构及化学成分进行分析。因此, 近几年在农产品品质无损检测中引起越来越多的关注, 成为一个研究热点。为了跟踪国内外的最新研究成果, 对高光谱反射及荧光成像技术应用于农产品(水果、蔬菜、肉类、谷物等)的外部品质检测进行了分类综述, 以期高光谱技术在农业方面更广阔的应用提供参考。

关键词 高光谱成像技术; 农产品; 外部品质; 无损检测

中图分类号: S126; TP391.4 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)08-2021-06

引言

农产品品质无损检测是在不破坏被检农产品的情况下, 应用一定的检测技术和分析手段对其内外部品质进行测定, 并按一定的标准对其做出评价的过程。由于农产品在其生产过程中容易受到人为或自然等复杂因素的影响, 产品内部品质和外部品质差异很大。传统的检测技术, 如高效液相色谱法(HPLC)、质谱分析法(MS)及切瓣理论等, 通常是费时、费力, 且对研究对象具有破坏性。因此, 有效可靠的农产品检测系统的开发依然面临巨大挑战。

由于机器视觉技术和光谱技术具有快速、无损、可靠的优点, 目前在农产品无损检测中得到广泛应用^[1-6]。机器视觉技术主要是对被测物体的空间信息进行分析并提取与农产品质量品质相关特征, 然后基于这些特征建立模式识别理论对研究对象实施分级。一般而言, 这种技术用于农产品外观品质检测, 如形状、颜色、大小、表面缺陷等。形状及大小的识别较多的依靠灰度信息, 而颜色及表面缺陷的检测目前广泛使用的RGB成像系统。然而, 某些肉眼难以识别的表面缺陷, 如动物粪污染、轻微损伤等, 通常对除RGB以外的波段更加敏感。与机器视觉技术不同, 光谱技术, 尤其是近红外光谱, 非常适合农产品内部品质的检测, 如糖度、酸度、蛋白质、水分等。但是, 近红外光谱技术只提供对检测对象一个非常小区域的检测, 缺少对象的空间信息, 这一局限性可能造成预测集与测量集信息之间较大差异, 从而影响系统的

稳定性。

高光谱成像技术是一种图像及光谱的融合技术, 可以同时获取研究对象的空间及光谱信息。由于图像数据能反映农产品的外部特征、表面缺陷及污斑情况, 而光谱数据又可以对物体内部物理结构及化学成分进行分析。可以说高光谱成像技术是图像技术与光谱技术的完美结合, 因此, 近几年在农产品品质无损检测中引起越来越多的关注。国内刘木华^[7]、洪天胜^[8]及马本学^[9]等学者对高光谱成像技术在农产品品质无损检测中的应用曾做了一些报道, 但是他们更多对农产品(尤其是苹果)内部品质检测的研究介绍, 而对于外部品质则很少提及。本文作为补充从高光谱反射成像技术及荧光成像技术两方面介绍此技术在农产品(水果、蔬菜、肉类、谷物等)外部品质无损检测中的最新研究进展。

1 高光谱成像系统

一般认为, 光谱分辨率在 $10^{-1}\lambda$ 数量级范围内称为多光谱(Multi-spectral), 光谱分辨率在 $10^{-2}\lambda$ 数量级范围内称为高光谱(Hyper-spectral), 光谱分辨率在 $10^{-3}\lambda$ 数量级范围内称为超光谱(Ultra-spectral)^[7]。高光谱图像是在特定波长范围内由一系列连续的窄波段图像组成的三维图像数据块, 如图1所示^[10]。图中, x 和 y 表示二维平面坐标轴, λ 表示波长信息坐标轴。可以看出, 高光谱图像既具有某个特定波长下的图像信息, 并且针对 xy 平面内某个特定像素又具有不同波长下的光谱信息。因此, 高光谱图像集图像与光谱信息

收稿日期: 2010-09-29, 修订日期: 2010-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(30825027)资助

作者简介: 李江波, 1982年生, 浙江大学生物系统工程与食品科学学院博士研究生 e-mail: lijiangbo_1982@tom.com

* 通讯联系人 e-mail: xqrao@zju.edu.cn

于一身。在每个波长下, xy 平面内每个像素的灰度值与其在该波长下的光谱值之间一一对应, 在某个特定波长下, 感兴趣区域(ROI)与正常区域之间的光谱值会存在很大差异, 因此, 在此波长下的图像中, 它们之间的灰度也存在一定的差异。

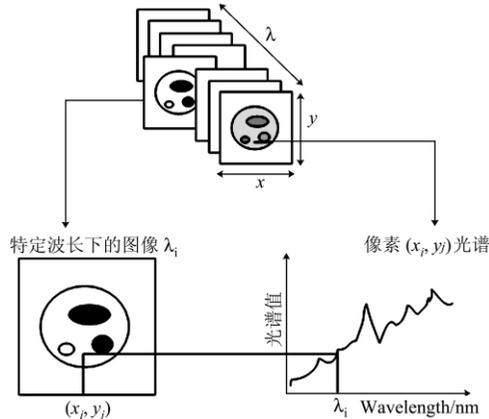


Fig 1 Schematic diagram of hyperspectral imaging data cube (adapted from Gowen, 2007)

一个典型的基于光谱仪的高光谱成像系统主要包括成像光谱仪, 光源, 线阵或面阵摄像机, 输送装置和计算机等部件组成, 图 2 为系统主要结构图。成像光谱仪中有一个棱镜-光栅-棱镜(PGP)单元, 它是一个全息式透射光栅。在图像采集的过程中, 此单元能够阻止环境光的干扰并且将入射光分散成不同的波长, 随后分散后的光信号投射到 CCD 探测器, 图 3 是 PGP 单元原理图。

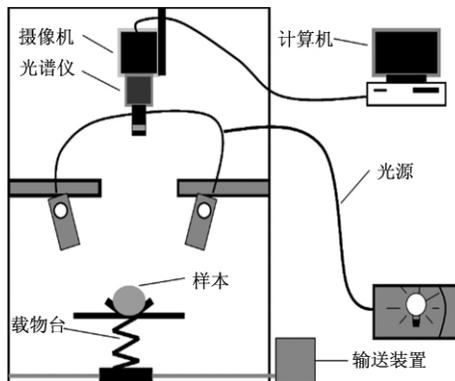


Fig 2 Schematic of hyperspectral imaging system

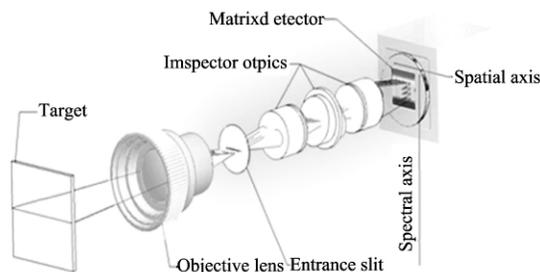


Fig 3 Schematic of PGP principle
(www.specim.fi/products/inspector.html)

2 国外研究进展

2.1 高光谱反射光成像技术

反射成像是基于高光谱成像系统最常见的高光谱图像获取技术, 获取的图像光谱范围通常在可见近红外波段(400~1 000 nm)或者近红外波段(1 000~1 700 nm)。这种技术常被用来对水果、蔬菜、肉类、谷物等外部品质的检测。

2.1.1 水果

水果在采摘或运输过程中, 因外力的作用使其表皮受到机械损伤, 它已被认为是一种主要的水果表面缺陷。尽管当前较为先进的分级机器可以对水果表面缺陷进行分级, 但是损伤, 尤其是轻微损伤一直是一个挑战。

Lu^[11]利用近红外高光谱成像技术检测 Red delicious 和 Golden delicious 两种苹果表面损伤。测量波长范围为 900~1 700 nm。他发现波段在 1 000~1 340 nm 的光谱最有利于这两类苹果损伤的检测。研究表明, 高光谱成像系统能够检测苹果表面新旧两类型损伤, 检测准确率随着苹果损伤后存放的天数不同而有变化, 对 Red delicious 而言其识别精度范围为 62%~88%, 对 Golden delicious 而言其识别精度范围为 59%~94%。

Xing 等^[12]应用可见近红外高光谱图像检测 Jonagold 苹果表面损伤。测量的波长范围为 400~1 000 nm, 通过主成分分析获得了六个特征波段, 分别为 571, 608, 671, 709, 798 和 867 nm。然后利用六个波段做特征波段主成分分析。最后基于第一得分图像开发了损伤及果梗/萼的识别算法。识别结果表明, 正常果的识别率为 84.6%, 损伤发生 1 天后的苹果检测率为 77.5% 并且 98.3% 的果梗/萼被正确识别。

上述几位学者所做的研究均为针对发生在 24 h 后的损伤利用高光成像技术对其进行检测。为了观察不超过 12 h 的苹果表面损伤检测效果, ElMasry 等^[13]开发了一套光谱范围在 400~1 000 nm 的高光谱成像系统。McIntosh 苹果为研究对象, 偏最小二乘法和逐步判别分析理论被用来高光谱数据降维和有效波段提取。三个有效波段(750, 820 和 960 nm)被用来构建多光谱成像系统。研究结果表明仅发生 1 h 后的损伤苹果即可被检测。

水果在种植和收获的过程中很容易受到带有致病菌的动物排泄物的污染, 其中病原大肠杆菌 O157:H7 是主要污染之一^[14]。通常, 动物排泄物污染区域与正常水果表面区域对照不显著, 因此, 这种污染主要还是通过人工检测。近几年, 一些研究学者发现高光谱反射光成像技术对被排泄物污染果的识别有较大潜力。

Mehl 等^[14]利用高空间分辨率(0.5~1 nm)高光谱成像系统检测苹果表面粪污染。四类苹果 Red delicious, Golden delicious, Gala 和 Fuji 作为研究对象, 测量的波长范围为 430~900 nm。比较了不均匀二次差分理论、均匀二次差分理论和主成分分析发现基于一个叶绿素吸收波段(685 nm)和两个近红外波段(722 和 869 nm)的不均匀二次差分理论可以较好的识别被粪污染的区域。最重要的是这种理论不会因苹果表面颜色不同而被影响。

Liu 等^[15]应用高光谱成像系统获取带有三种不同浓度的两类苹果图像,通过分析感兴趣区域(ROI)光谱特征发现波段范围在 675~950 nm 正常果面与污斑区域的光谱反射值差异最大。二次差分、主成分分析和波段比 3 种算法被用来识别污斑区域,结果表明双波段比($Q_{725/811}$)算法识别效果最佳。

高光谱反射成像技术除了用在检测水果损伤、粪污染这类较难识别的缺陷外,还用于水果冻伤(Chilling injury)、真菌感染(Fungal infections)及缺陷分类识别研究。

水果冻伤是一种常见损伤,但是早期冻伤识别是非常困难的,ElMasry 等^[16]利用高光谱成像技术识别早期冻伤的 Red delicious 苹果。基于 ANN(artificial neural network)模型,5 个特征波段(717, 751, 875, 960 和 980 nm)被选择和分类水果。研究结果表明冻伤果的平均识别精度达到 98.4%。

Gómez-Sanchis 等^[17]利用可见近红外高光谱成像系统检测柑橘类水果早期青霉菌感染区域。通过主成分分析进行高光谱数据降维,分类识别树(CART)被用来对感染区域进行识别,准确率达到 80%。目前利用机器视觉检测柑橘类水果腐烂缺陷通常采用的是紫外光诱导荧光的方法。考虑到紫外线对人体有害,并且早期腐烂利用可见光难以被察觉,Gómez-Sanchis 团队^[18]在 2008 年再次尝试利用高光成像技术检测柑橘类水果腐烂区域。以橘子为研究对象,比较 CA(correlation analysis),MI(mutual information),SW(stepwise multivariate regression)和 GALDA(genetic algorithms)四种特征选择理论,通过分类识别树(CART)和线性判别分析(LDA)理论对腐烂区域识别,结果表明基于 GALDA 和 CART 理论获得了最好的识别效果,识别精度超过 91%。

为了从其他类果皮缺陷中识别出溃疡病斑,Qin 等^[19,20]基于高光谱成像技术,分别利用光谱信息散度(SID)分类理论和主成分分析(PCA)法对带有溃疡斑的葡萄柚进行分类识别,两种方法识别精度均超过 90%。然而,对于 SID 理论,需要建立参考光谱,然后图像像素与参考光谱进行匹配,但是匹配费时,而后一种理论则利用了 99 个波段参与主成分分析,两种方法均不利于溃疡果的在线检测。

2.1.2 蔬菜

因为损伤区域与正常区域对比度低,采用传统机器视觉技术识别一些蔬菜(如黄瓜和番茄)表面的损伤是非常困难的。然而高光谱成像技术在识别这类缺陷表现出了较大的潜力。

Liu 等^[21]利用高光谱成像系统检测冻伤的黄瓜,双波段比算法($Q_{811/756}$)和光谱范围在 733~848 nm 的窄波段主成分分析理论被用来检测这种损伤,结果表明两种理论的检测精度均超过 90%。

Ariana 等^[22]应用高光谱成像技术检测黄瓜采摘时受到机械应力而产生的损伤,光谱区域 950~1350 nm 被发现最有利于这种损伤的检测。在损伤发生 0, 1, 2, 3 和 6 d 后分别对损伤进行识别,基于第 1 主成分图像识别率依次为 92%, 86%, 81%, 75% 和 71%, 基于 1226 nm 单波段图像识别率依次为 97%, 88%, 88%, 90% 和 80%。

Xing 等^[23]利用光谱范围在 400~1000 nm 的高光谱图像检测番茄表面损伤。通过相关性分析、偏最小二乘法(PLSDA)和遗传算法(GA)进行最优波段的选择。研究结果表明,光谱区域 640~750 nm 最适合红番茄损伤的检测,波段 675 nm 最有利于区分梗及番茄正常果皮区域,735~930 nm 光谱区域最适合区分梗和表面缺陷。

2.1.3 肉类

在禽肉加工时,处理设备上可能沾有粪斑、摄取的食物或其他生物残留物,这些物质粘连在禽肉上通常人眼较难察觉。从 1998 年开始,美国农业部仪器与传感实验室(ILS)进行高光谱图像检测禽肉品质的研究^[24]。Park^[25,26]等研究了排泄物及摄取食物对禽肉的污染问题。利用主成分分析法得到四个特征波长。研究结果表明,双波段比图像(I_{565}/I_{517})经直方图拉伸方法处理后,能有效地区分出污染物,预测准确率达 97.3%(线性直方图拉伸处理)和 100%(非线性直方图拉伸处理)。Xu 等^[27]利用高光谱图像检测禽肉皮瘤,主成分分析(PCA)、核判别分析(KDA)和离散小波变换(DWT)3 种方法提取高光谱图像独立特征集,线性分类器对这些特征进行分类,分类结果表明高光谱反射图像可以较好的识别禽肉皮瘤。Cho 等^[28]也利用高光谱技术检测禽肉表面的粪斑及摄取物。这些物质被分为湿状态和干状态两种,研究发现双波段比(R_{895}/R_{469})图像非常有利于禽肉表面湿残留物的检测,且检测精度达到 94.0%,波长为 527 nm 的单波段图像最有利于禽肉表面干残留物的检测,检测精度为 99.7%。

牛肉或牛排嫩度是衡量其品质的重要指标。Naganathan 等^[29,30]应用带有散射可见近红外光源的高光谱成像系统对牛肉的硬度预测进行了研究。测量波长范围为 400~1000 nm。主成分分析和共生矩阵(co-occurrence matrix)理论用于高光谱图像纹理特征提取,基于提取的纹理特征开发相应的判别模型,然后对三种不同硬度的牛肉进行硬度预测,结果表明精度可以达到 96.4%。他们也尝试采用偏最小二乘法(PLSR)预测牛肉硬度,但结果仅为 77.0%。

猪肉的品质通常根据其颜色及纹理特征进行评价。Qiao 等^[31]基于高光谱成像技术评价猪肉质量。测量波长范围为 430~980 nm。通过主成分分析和逐步回归理论选择特征波段。人工神经网络用来对不同质量等级的猪肉分级,结果表明基于主成分分析获得的特征波段比基于回归理论获得的波段对猪肉品质的识别更有效,识别精度最高为 88.75%。

2.1.4 谷物

近三年高光谱图像技术用于谷物检测的研究也引起一些研究人员的兴趣。Singh 等^[32]利用近红外高光谱成像系统对小麦进行检测。基于主成分分析的 MVI(multivariate image analysis)方法用于高光谱数据降维,并提取 3 个有效波段(1101.7, 1132.2 和 1305.1 nm)。统计判别分类器被用于分类三种小麦,分类结果表明正常小麦与受损小麦(发芽粒和被虫叮咬粒)正确识别率最高分别是 98.3% 和 100%。

Xing 等^[33]利用波段范围在 400~1000 nm 的高光谱图像识别正常麦粒和萌芽的或已发芽的麦粒。观察光谱发现当波段大于 720 nm 时,萌芽的或已发芽的小麦平均光谱反射率较正常小麦的反射值更大,基于此双波段比(780 和 728

nm) 图像被用来区分正常小麦和萌芽小麦。随后, 通过主成分分析获得 4 个特征波段(475, 525, 670 和 875 nm), 接着基于四个波段进行特征波段主成分分析, 最后利用第 3 主成分图像及形态学特征能够较好的区分正常小麦和已发芽的小麦。研究结果表明正常小麦、萌芽小麦和已发芽小麦的识别率分别为 100%, 94% 和 98%。

联合收获机收获谷物后, 谷物中混有杂质(谷壳和稻草)



Fig. 4 Three types of the crop samples: barley (a); wheat (b) and corn (c)

2.2 高光谱荧光成像技术

许多天然物质在合适波长的激发光诱导下会发射荧光, 通过对这些荧光光谱分析, 从而可以达到对农产品质量检测的目的。

2.2.1 水果及禽肉表面粪污染的检测

植物中富含叶绿素 a, 因此他们在紫外光的照射下会发出荧光。由于动物通常以绿色植物为食, 它们的排泄物(如牛粪、鹿粪等)当被紫外线照射时也会发出与叶绿素 a 类似的荧光。Kim 等^[35]开发了一套多光谱荧光成像系统尝试检测苹果表面粪污染。中心波长为 365 nm 的紫外光源作为激发光, 四类苹果 Red delicious, Golden delicious, Gala 和 Fuji 作为研究对象, 测量的波长范围为 425~752 nm。通过主成分分析发现 4 个特征波段(450, 530, 685 和 735 nm)是最有潜力为粪污染区域的识别。在前期研究的基础上 Kim 等^[36]报道他们已经开发出一套在线扫描可见近红外高光谱成像系统可以同时检测苹果表面粪污斑及缺陷, 此系统可以同时获得高光谱反射及荧光图像, 长波紫外线(UVA)光源作为荧光激发光源。研究结果表明当系统分级速度在 3 个·s⁻¹ 苹果的情况下, 双波段比(R_{660}/R_{530})荧光图像能够识别带有粪污斑的苹果, 识别率达到 100%。基于近红外双波段比图像(R_{800}/R_{750})缺陷果的识别率达到 99.5%。

Kim 等^[37]利用高光谱荧光图像检测鸡胴体皮瘤, 首先通过投票理论(voting method)对每个像素分类为背景或者是感兴趣区域(ROD), 然后基于一个光谱分类器识别皮瘤的位置, 检测结果表明皮瘤正确检出率、假阳性率和误检率分别为 76%, 28% 和 24%。Kong 等^[38]也利用高光谱荧光图像检测禽鸡胴体皮瘤, 检测波段为 425~711 nm, 通过离散小波变化和主成分分析别对原始图像进行空间和光谱降维, 基于两个被提取的光谱特征, 模糊理论用于皮瘤的检测, 获得 82% 的检测精度。

2.2.2 其他类农产品的检测

Jiang 等^[39]利用紫外(UVA)诱导荧光高光谱成像技术对黑胡桃壳和肉进行检测, 测量波长范围为 425~775 nm。基于高斯核(Gaussian-kernel)的支持向量机(SVM)用来分类胡桃壳和肉, 6 257 个样本用于本次试验, 获得了 90.3% 的

的数量是影响谷物质量的重要指标。Wallays 等^[34]利用高光谱成像系统研究了大麦、小麦和玉米等三种谷物中杂质的检测。谷物及杂质对照如图 4 所示。测量波长为 400~950 nm。通过遗传算法选取 5 个特征光谱区域(465~475, 522~532, 676~705, 849~858 和 906~945 nm), 随后基于 5 个特征光谱区域开发小麦杂质在线多光谱检测系统。

类精度。为了进一步评估 SVM 分类器的分类性能, SVM, PCA 和 FDA(fisher's discriminant analysis)三种分类理论作了比较, 结果表明基于高斯核的 SVM 分类效果最佳。Zhu 等^[40]也采用与 Jiang^[39]相同的荧光高光谱成像系统检测胡桃壳和肉, ICA-kNN(independent component analysis 和 nearest neighbor)理论用来对识别胡桃壳和肉。首先, 基于 ICA 理论进行特征波段提取, 然后 kNN 分类器基于被提取的特征波段对样本进行识别。6 257 个样本用于本次试验, 研究结果表明基于 10 个最优波段可以获得 90.6% 的检测精度。

黄曲霉毒素是黄曲霉(aspergillus flavus)和曲霉蛋白酶(aspergillus proteinase)的一种有毒二次代谢物。黄曲霉毒素感染的玉米如果被动物或者人食用是非常有害的。最近, 这种毒素的检测通常采用 TCL(thin-layer chromatography)和 HPLC(high performance liquid chromatography)方法, 这两种方法均是破坏性的。因此, 快速、无损的检测方法对玉米加工业是非常重要的。Yao 等^[41]尝试利用荧光高光谱成像技术分类被黄曲霉毒素感染的玉米颗粒。长波紫外线(UVA)作为激发光源。两种分类理论 maximum likelihood 和 binary encoding 被用来分类被感染的玉米粒和未被感染的玉米粒, 结果表明分类精度分别为 87% 和 88%。

3 国内研究进展

国外研究结果表明高光谱成像技术在农产品无损检测中有很大的应用潜力。与国外相比, 国内把高光谱图像技术引入到农产品外部品质检测研究最近几年才开始, 目前仅引起少数研究学者的关注。

薛龙等^[42]以脐橙为研究对象, 初步探讨了应用高光谱图像技术检测水果表面农药残留的方法。检测光谱范围为 625~725 nm, 应用主成分分析方法获得特征波长图像, 基于第 3 主成分图像对脐橙表面的农药残留进行检测。检测结果表明高光谱技术对检测较高浓度农药残留非常明显。

陈全胜等^[43]设计一套基于光谱仪的高光谱图像系统检测茶叶质量。通过主成分分析, 优选出三个波段的特征图像, 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、一致性和熵等六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,提取八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。模型总体识别率为 94%。

蔡健荣等^[44]利用高光谱图像技术检测柑橘果锈。首先根据 Sheffield 指数确定最佳波段(625 和 717 nm),经比值变换后得到第一幅比值图像。然后选取特征波长 625 nm 的邻近波段 621 nm,与其比值变换后得到第二幅比值图像,提取轮廓,构建掩膜以消除第一幅比值图像的背景噪声,最后进行阈值分割和数字形态学运算,完成果锈区域的特征检测。试验结果表明基于波段比算法的高光谱图像技术可有效检测柑橘果锈,检测率达到 92%。

李江波等^[45]提出特征波段主成分分析法及波段比算法结合高光谱成像系统检测脐橙表面溃疡。首先,提取并分析 11 类果皮感兴趣区域(ROI)光谱曲线并结合主成分分析法确定五个最佳波段(630, 685, 720, 810 和 875 nm)。然后基于特征波段做主成分分析,选取第五主成分作为分类识别图像,识别率达到 80%。

4 结论与展望

高光谱成像技术应用于农产品品质无损检测研究是 20 世纪 90 年代末在国外才发展起来的,而我国近几年才关注这种技术,然而,研究结果已经表明该技术在农产品品质无损检测中具有巨大潜力。

(1)高光谱成像技术融合了图像技术及光谱技术,与图像技术相比高光谱成像技术具有对某些肉眼难以识别的农产品外部特征(如损伤、粪污染和真菌早期感染等)更加敏感的波段图像,而这些特征通过 RGB 或者普通的黑白相机很难识别。与光谱技术相比高光谱技术能够提供对农产品多点或者整个表面(内部)的光谱信息,因此,无论对外部或者内部品质无损检测,高光谱技术都有较大应用潜力。

(2)在我国,目前高光谱技术多用于水果品质的研究,而对其他农产品(蔬菜、肉类及谷物等)的研究较少,且研究多用反射及透射手段,而高光谱荧光技术还未见报道。因此,在其他类农产品品质检测及荧光成像技术方面有广阔的应用前景。

(3)由于高光谱图像较大的数据量及高光谱系统昂贵的价格,无论从那一方面目前此种系统也不可能应用于农产品在线检测。通常采用的方法是利用高光谱技术识别 2~3 个特征波段,然后基于这些特征波段构建价格比较便宜的多光谱成像系统,从而达到农产品品质在线、快速、无损检测的目的。

(4)高光谱成像技术可以同时获取研究对象的空间及光谱信息,但目前无论国内还是国外大多数研究团队主要是应用高光谱反射成像技术或者荧光技术或者透射技术 3 种独立的技术对农产品外部或者内部品质进行检测,很少文献报道联合其两种或者三种技术同时对农产品进行分级,然而高光谱技术最大的优势是内外部品质的同时检测。因此,如何有效地利用高光谱技术同时对农产品内外品质进行综合评价的研究可能是一个研究方向。

References

- [1] Abbott J A. Postharvest Biology and Technology, 1999, 15: 207.
- [2] Chen Y R, Chao K, Kim M S. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 36: 173.
- [3] Brosnan T, Sun D W. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 36: 193.
- [4] MA Ben-xue, RAO Xiu-qin, YING Yi-bin, et al(马本学, 饶秀勤, 应义斌, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2009, 29(12): 3288.
- [5] Liu Y D, Ying Y B. Journal of Postharvest Biology and Technology, 2005, 37: 65.
- [6] Ying Y, Liu Y. Journal of Food Engineering, 2008, 84: 206.
- [7] LIU Mu-hua, ZHAO Jie-wen, ZHENG Jian-hong, et al(刘木华, 赵杰文, 证建鸿, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2005, 36(9): 139.
- [8] HONG Tian-sheng, LI Zhen, WU Chun-yin, et al(洪天胜, 李震, 吴春胤, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2007, 23(11): 280.
- [9] MA Ben-xue, YING Yi-bin, RAO Xiu-qin, et al(马本学, 应义斌, 饶秀勤, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2009, 29(6): 1611.
- [10] Gowen A A, O'Donnell C P, Cullen P J, et al. Trends in Food Science & Technology, 2007, 18: 590.
- [11] Lu R. Transactions of the ASAE, 2003, 46(2): 523.
- [12] Xing J, De Baerdemaeker J. Postharvest Biology and Technology, 2005, 37: 152.
- [13] ElMasry G, Wang N, Vigneault C, et al. LWT, 2008, 41: 337.
- [14] Mehl P M, Chen Y R, Kim M S, et al. Journal of Food Engineering, 2004, 61: 67.
- [15] Liu Y L, Chen Y R, Kim M S, et al. Journal of Food Engineering, 2007, 81: 412.
- [16] ElMasry G, Wang N, Vigneault C. Postharvest Biology and Technology, 2009, 52: 1.
- [17] Gómez-Sanchis J, Moltó E, Gomez-Chova L, et al. In 2004 CIGR International Conference, Beijing, China, 11-14 October 2004.
- [18] Gómez-Sanchis J, Gómez-Chova L, Aleixos N, et al. Journal of Food Engineering, 2008, 89(1): 80.
- [19] Qin J W, Burks T F, Ritenour M A, et al. Journal of Food Engineering, 2009, 93: 183.

- [20] Qin J W, Burks T F, Kim M S, et al. Proceeding of SPIE, 2010, 6983: 1.
- [21] Liu Y, Chen Y R, Wang C Y, et al. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(1): 101.
- [22] Ariana D, Lu R, Guyer D E. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 53(1): 60.
- [23] Xing J, Ngadi M, Baerdemaeker J D, et al. ASABE Annual International Meeting Paper July 9-12, Oregon, No: 063018, 2006.
- [24] Lu R, Chen Y R. Proceeding of SPIE, 1998, 3554: 121.
- [25] Park B, Lawrence K C, Windham W R, et al. Transactions of ASAE, 2002, 45(6): 207.
- [26] Park B, Lawrence K C, Windham W R, et al. Proceeding of SPIE, 2002, 4816: 308.
- [27] Xu C Z, Kim I, Kim M S. ICIAR 2007, LNCS 4633: 1289.
- [28] Cho B K, Chen Y R, Kim M S. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 57: 77.
- [29] Naganathan G K, Grimes L M, Subbian J, et al. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 64(2): 225.
- [30] Naganathan G K, Grimes L M, Subbian J, et al. Sens. & Instrumen. Food Qual. , 2008, 2: 178.
- [31] Qiao J, Ngadi, M O, Wang N, et al. International Journal of Food Engineering, 2007, 3(1): 1.
- [32] Singh C B, Jayas D S, Paliwal J, et al. Cereal Chemistry, 2009, 86(3): 256.
- [33] Xing J, Symons S, Shahina M, et al. Biosystems Engineering, 2010, 106(2): 188.
- [34] Wallays C, Missotten B, Baerdemaeker J De, et al. Biosystems Engineering, 2009, 104: 1.
- [35] Kim M S, Chen Y R, Mehl P M. Transactions of the ASAE, 2001, 44(3): 721.
- [36] Kim M S, Chen Y R, Cho B K. Sens. & Instrumen. Food Qual, 2007, 1: 151.
- [37] Kim I, Kim M S, Chen Y R, et al. Transactions of the ASAE, 2004, 47(5): 1785.
- [38] Kong S G, Chen Y R, Kim I, et al. Applied Optics, 2004, 43(4): 824.
- [39] Jiang L, Zhu B, Rao X Q, et al. Journal of Food Engineering, 2007, 81: 108.
- [40] Zhu B, Jiang Lu, Jin F H. Sens. & Instrumen. Food Qual. , 2007, 1: 123.
- [41] Yao H, Hruska Z, Kincaid R, et al. Proceeding of SPIE, 2010, 7676: 1.
- [42] XUE Long, LI Jing, LIU Mu-hua(薛 龙, 黎 静, 刘木华). Acta Optica Sinica(光学学报), 2008, 28(12): 2277.
- [43] CHEN Quan-sheng, ZHAO Jie-wen, CAI Jian-rong, et al(陈全胜, 赵杰文, 蔡健荣, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2008, 28(4): 669.
- [44] CAI Jian-rong, WANG Jian-hei, CHEN Quan-sheng, et al(蔡健荣, 王建黑, 陈全胜). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2009, 25(1): 127.
- [45] LI Jiang-bo, RAO Xiu-qin, YING Yi-bin, et al(李江波, 饶秀勤, 应义斌, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2010, 26(8): 222.

Advance on Application of Hyperspectral Imaging to Nondestructive Detection of Agricultural Products External Quality

LI Jiang-bo, RAO Xiu-qin*, YING Yi-bin

College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

Abstract Hyperspectral imaging is an emerging technique that integrates conventional imaging and spectroscopy to obtain both spatial and spectral information from a studied object simultaneously. The images data can reflect the external features, surface defects and contamination. The spectra data can analyze physical structure and chemical composition in studied object. Therefore, hyperspectral imaging technology causes more and more attention, and has become a hot research topic recently. In order to track the latest research developments at home and abroad, application of hyperspectral reflectance and fluorescence imaging techniques to nondestructive detection of agricultural products external quality was reviewed, which would provide reference for application of hyperspectral imaging to agriculture.

Keywords Hyperspectral imaging; Agricultural product; External quality; Nondestructive detection

(Received Sep. 29, 2010; accepted Dec. 10, 2010)

* Corresponding author