

高光谱成像在水果内部品质无损检测中的研究进展

马本学^{1,2}, 应义斌^{1*}, 饶秀勤¹, 桂江生¹

1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310029

2. 石河子大学机械电气工程学院, 新疆 石河子 832003

摘 要 随着高光谱成像技术的日趋成熟与高光谱成像硬件、软件成本的不断下降, 以及高光谱图像数据处理算法的不断改进, 应用高光谱成像技术对水果品质进行无损检测成为当前研究热点之一。为了能跟踪国内外的最新研究成果, 对高光谱成像在水果内部品质(成熟度、坚实度、可溶性固形物、水分)检测研究进行综述, 以期对我国相关研究人员的研究工作提供参考。

关键词 高光谱成像; 水果; 内部品质; 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(2009)06-1611-05

引 言

我国是世界水果生产大国, 根据《中国统计年鉴》2006年我国水果总产量已经达到17 239.9万吨(包括瓜果类), 水果产量世界第一, 但我国不是水果生产强国, 水果出口量只占总产量的2%左右, 远远低于9%~10%的世界平均水平^[1]。造成水果出口难的主要原因之一就是未能严格按照出口标准对水果品质进行分级。

随着科学技术的发展和人民生活水平的不断提高, 以及我国加入世界贸易组织, 国际水果市场竞争日益加剧, 消费者对水果品质的要求越来越高。消费者在挑选水果时从以往仅仅关心水果的外部品质, 逐步转向更加注重水果的内部品质。

国内外许多学者利用水果的电学特性、声学特性、光学特性、声波振动特性、太赫兹、核磁共振、X射线、电子鼻、机器视觉等技术对水果品质进行无损检测^[2-6]。水果品质无损检测是在不破坏被检测水果的情况下, 应用一定的检测技术和分析方法对其外部品质和内部品质加以测定, 并按一定的标准对其做出评价的过程。水果内部品质(成熟度、坚实度、可溶性固形物、水分等)用传统的检测方法进行测量费时、费力, 且内部组织成分的测定需依靠破坏性检测方法, 受人工影响较大, 这严重影响了对水果进行快速、无损、准确的评价。因此研究快速、无损、准确的水果品质检测技术, 对推动水果行业的健康、持续发展, 提高水果交易价格, 增加果农收入, 具有十分重要的现实意义。

利用高光谱成像技术对水果品质进行无损检测已成为近年来的一个研究热点, 国内外许多学者利用高光谱成像技术开展了对梨、苹果、甜瓜、番茄、草莓、芒果品质进行无损检测的研究工作, 并取得较好的研究成果^[7-11]。

高光谱成像是新一代光电检测技术, 兴起于20世纪80年代, 目前仍在迅猛发展中。高光谱成像是相对多光谱成像而言, 通过高光谱成像方法获得的高光谱图像与通过多光谱成像获取的多光谱图像相比具有更丰富的图像和光谱信息。如果根据传感器的光谱分辨率对光谱成像技术进行分类, 光谱成像技术一般可分成3类。

(1) 多光谱成像——光谱分辨率在 $\Delta\lambda/\lambda=0.1$ 数量级, 这样的传感器在可见光和近红外区域一般只有几个波段。

(2) 高光谱成像——光谱分辨率在 $\Delta\lambda/\lambda=0.01$ 数量级, 这样的传感器在可见光和近红外区域有几十到数百个波段, 光谱分辨率可达nm级。

(3) 超光谱成像——光谱分辨率在 $\Delta\lambda/\lambda=0.001$ 数量级, 这样的传感器在可见光和近红外区域可达数千个波段。

众所周知, 光谱分析是自然科学中一种重要的研究手段, 光谱技术能检测到被测物体的物理结构、化学成分等指标。光谱评价是基于点测量, 而图像测量是基于空间特性变化, 两者各有其优缺点。因此, 可以说光谱成像技术是光谱分析技术和图像分析技术发展的必然结果, 是二者完美结合的产物。光谱成像技术不仅具有光谱分辨能力, 还具有图像分辨能力, 利用光谱成像技术不仅可以对待检测物体进行定性和定量分析, 而且还能进对其进行定位分析^[12, 13]。

高光谱成像系统的主要工作部件是成像光谱仪, 它是一

收稿日期: 2008-03-08, 修订日期: 2008-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(60665002)和教育部“新世纪优秀人才支持计划”基金项目(NCET-04-0524)资助

作者简介: 马本学, 1970年生, 浙江大学生物系统工程与食品科学学院博士研究生 *通讯联系人 e-mail: ybying@zju.edu.cn

种新型传感器, 20 世纪 80 年代初正式开始研制, 研制这类仪器的目的是为获取大量窄波段连续光谱图像数据, 使每个像元具有几乎连续的光谱数据^[14, 15]。它是一系列光波波长的光学图像, 通常包含数十到数百个波段, 光谱分辨率一般为 $1 \sim 10 \text{ nm}$ 。由于高光谱成像所获得的高光谱图像能对图像中的每个像素提供一条几乎连续的光谱曲线, 其在待测物上获得空间信息的同时又能获得比多光谱更为丰富光谱数据信息, 这些数据信息可用来生成复杂模型, 来进行判别、分类、识别图像中的材料。

通过高光谱成像获取待测物的高光谱图像包含了待测物的丰富的空间、光谱和辐射三重信息。这些信息不仅表现了地物空间分布的影像特征, 同时也可能以其中某一像元或像元组为目标获取它们的辐射强度以及光谱特征。影像、辐射与光谱是高光谱图像中的 3 个重要特征, 这 3 个特征的有机结合就是高光谱图像。图 1 直观地表示了上述三种信息要素之间的关系^[16]。

高光谱图像数据为数据立方体(块)。通常图像像素的横坐标和纵坐标分别用 x 和 y 来表示, 光谱的波长信息以 λ (z 即轴) 表示。图 2 是一幅水果的高光谱图像数据立方体示意图。该数据立方体由沿着光谱轴的以一定光谱分辨率间隔的连续二维图像组成。

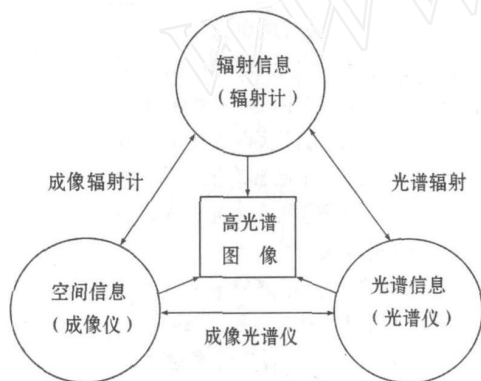


Fig. 1 Relationship between hyperspectral image and various optical measurement systems(adapted from Elachi, 1987)

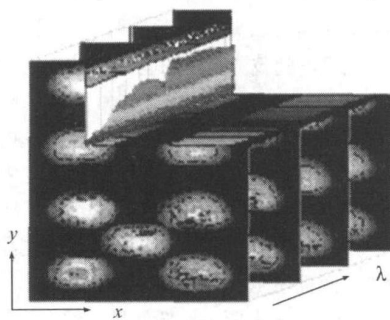


Fig. 2 Hyperspectral image cube(Kim, 2000)

一个典型的农产品高光谱成像系统的硬件系统主要由光源、CCD 摄像机、成像光谱仪、镜头、图像采集卡、计算机及控制装置等组成。高光谱成像系统示意图(图 3)。

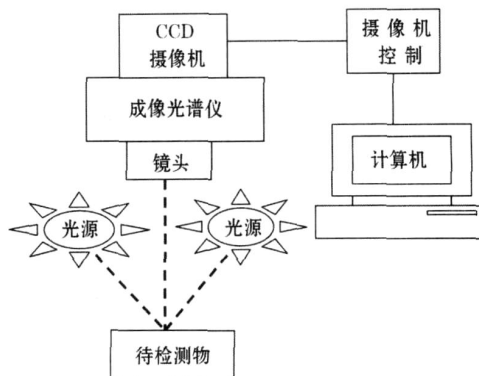


Fig 3 Schematic of hyperspectral imaging system

近年来随着高光谱成像设备硬件、软件价格的不断下降和各种高光谱图像数据处理算法的不断改进, 其在农业上应用将越来越变得有吸引力, 并引起了国内外许多进行水果品质无损检测研究者的极大兴趣。下面分别就国内外一些学者对高光谱成像在水果的内部品质(成熟度、坚实度、糖度、水分)检测方面的应用做一概述。

1 国外研究进展

1.1 高光谱成像在水果成熟度检测方面的应用

水果成熟度是水果分级与保鲜的重要评价指标之一。水果成熟度通常可以通过其颜色来进行区分, 但决定水果成熟度的实质是其内部的糖度、酸度、果肉坚实度等内部品质指标。因此对水果成熟度用传统的方法进行检测很难有一个统一、准确的指标来进行划分。但水果成熟度判断正确与否直接关系到果实的产量和品质, 如过早采摘产量低、品质差, 而过晚则不利于贮藏。

许多学者利用其光学特性、介电特性、声学特性、机械特性、挥发特性等对水果成熟度检测进行了研究^[17-19]。由于利用高光谱成像技术不仅能获得待测物的图像信息, 还能获得反映其内部品质的光谱信息, 据此国外一些学者应用高光谱成像技术对水果成熟度判别进行了一些探索研究工作。

Polder 等^[20]利用高光谱成像技术在 $396 \sim 736 \text{ nm}$ (成像光谱仪的光谱分辨率为 1.3 nm) 范围内对西红柿的成熟度进行判别分析。通过对 5 个不同生长阶段的西红柿(不同成熟度)光谱图像进行试验研究, 利用线性判别分析对图像进行预处理, 研究结果表明使用光谱图像比用 RGB 图像更适合对不同生长阶段的西红柿进行判别, 判别误差从 51% 降低到 19%, 且高光谱成像与传统 RGB 成像相比受外部光照条件和西红柿几何形状的影响更不显著。

Polder 等^[21]结合高光谱成像技术和独立分量分析算法研究了番茄成熟度的分类问题, 预测了对西红柿成熟度起决定作用的组成成分。由于独立分量分析算法是非常有效的盲源信号分离方法, 很适用于番茄成熟度的无监督分类。

Noh 等^[22]开发了一个综合应用高光谱反射和激光诱导荧光成像系统, 用来对 Golden Delicious 苹果成熟度进行评价。成熟度参数用果肉、果皮色、坚实度、可溶性固形物、淀

粉和酸度等多个指标进行评定。单独采用反射预测模型比单独采用荧光反射预测模型预测成熟度时的单个成熟度参数相关系数要高。研究表明,采用综合法预测成熟度比仅应用高光谱反射成像和荧光成像预测效果好,对大多数参数预测效果改善显著。

Nagata^[23]设计了一个在可见光范围(400~720 nm)的高光谱成像系统,并利用其对 Akihime 草莓的成熟度指标(坚实度和可溶性固形物)进行了预测,用5个波长(510, 650, 644, 628和598 nm)对坚实度的 SEP(standard error of prediction corrected for bias)为0.364 N,然而要获得更可靠的 SSC(soluble solid content)预测模型还需要对个体成熟度水平进一步研究分析。

1.2 高光谱成像在水果坚实度检测方面的应用

水果坚实度(Firmness)是指果肉抗压力的强弱,可以作为判断水果成熟状态和品质的一个重要指标。水果生长和存储过程中,细胞间的结合力变小,反映细胞间结合力变化的物理指标是坚实度。传统的坚实度检测方法是 M-T 戳穿试验方法(Magness-Taylor puncture test)。该方法是用一定直径的钢制压头,按一定的压缩速度对水果进行压缩试验,同时测量压缩力,所得压缩力的最大值称为坚实度。M-T 戳穿试验简单易行,因此是常用的水果坚实度检测方法。但是 M-T 戳穿试验方法对待测样本是损伤性的,不可能逐个检验,对大样本的检测试验也不现实。为了给消费者提供高质量的水果,水果的种植、贮藏和销售者都需要一种方便、可靠、无损伤的坚实度检验技术,来取代目前的 M-T 试验,以便对水果快速、无损检测。高光谱成像是一种融合光谱技术和图像技术的无损检测技术,能够对水果的坚实度进行快速、无损和准确检测。

Lu 等^[24]应用高光谱成像技术通过光的散射对桃的坚实度预测进行了研究,研究对象为 Red Haven 和 Coral Star 桃,测量波长范围为 500~1 000 nm。研究结果表明在 677 nm 对 Red Haven 和 Coral Star 桃进行坚实度预测最为有效。

Lu^[25]又利用高光谱散射图像对苹果的坚实度无损检测进行了研究,研究对象为 Red Delicious 和 Gold Delicious,测量波长范围同样为 500~1 000 nm,采用主成分分析和神经网络结合方法对两种苹果的坚实度和可溶性固形物进行预测,研究结果表明对 Golden Delicious 苹果坚实度预测相关系数为 0.76,预测样本中的标准误差为 6.2 N,而对 Red Delicious 苹果坚实度预测相关系数为 0.55,预测样本中的标准误差为 6.1 N。

Nagata 等^[26]应用近红外高光谱成像技术对草莓的坚实度测定进行了研究,测量波长范围为 650~1 000 nm,光谱间隔为 5 nm,采用多元逐步线性回归进行分析。最后提取 3 个波长(685, 985 和 865 nm)对 50%到全熟一组样本的坚实度进行预测,相关系数为 0.786,SEP 为 0.350 N。

1.3 高光谱成像在水果可溶性固形物检测方面的应用

可溶性固形物(SSC)是评价水果品质分级的重要指标之一,传统的检测方法是采用破坏方法检测,检测速度慢且是有损检测。对水果的可溶性固形物进行快速、无损、准确检测是科研工作者的研究目标。近几年来,随着高光谱成像设

备硬件和光谱技术的图像处理技术不断完善,一些学者利用高光谱成像技术对水果的可溶性固形物预测进行了积极的探索研究。

Nagata 等^[26]应用近红外高光谱成像技术对草莓的可溶性固形物进行了预测,测量波长范围为 650~1 000 nm,最后提取 5 个特征波长(915, 765, 870, 695 和 860 nm)建立预测模型,所得可溶性固形物的相关系数为 0.87。

Lu^[25]利用高光谱散射成像对两种苹果的 SSC 无损检测进行了研究,测量光谱范围为 500~1 000 nm,采用主成分分析和神经网络结合方法对两种苹果的坚实度和可溶性固形物进行预测,对 Golden Delicious 苹果 SSC 预测相关系数为 0.79,预测样本中的标准误差为 0.72,而对 Red Delicious 苹果坚实度预测相关系数为 0.64,预测样本中的标准误差为 0.81。

Elmasry 等^[27]应用近红外高光谱成像技术对草莓的总可溶性固形物(Total soluble solids)进行了预测,测量波长范围在可见光和近红外区域(400~1 000 nm),采用偏最小二乘法对光谱数据进行分析,在整个光谱范围(400~1 000 nm)预测总可溶性固形物的相关系数为 0.80。

1.4 高光谱成像在水果水分检测方面的应用

水果的水分含量是确定水果贮藏条件的重要因素之一,同时还是评价其成熟度的重要指标之一。

Sivakumar^[28]应用高光谱成像技术对芒果的水分含量进行了检测研究,测量光谱范围为 400~1 000 nm。结果表明使用人工神经网络预测芒果的水分的相关系数为 0.81,同时建议预测芒果水分含量的最优波长选取 831, 923 和 950 nm。

Qiao 等^[29]利用高光谱成像系统对土豆的光谱反射率与土豆的含水率关系进行了预测研究。通过多元线性回归发现敏感的水分吸收波段为 934~997 nm 之间。通过人工神经网络来建立了土豆水分含量的预测模型,研究结果表明,人工神经网络能对训练集样本的决定系数 0.93,对测试集的相关系数为 0.78,两个测试集的根均方差误差都小于 0.014。

Baljinder^[30]也利用高光谱成像技术马铃薯的水分含量进行了预测研究,使用偏最小二乘法在 400~1 750 nm 范围内对光谱进行分析并建立预测马铃薯样本校正模型,通过分析研究发现可以分别选 700~900, 1 000~1 100, 1 250~1 600 nm 和 850~900, 1 100~1 200, 1 400~1 500 nm 波长范围对有皮和无皮土豆样本进行水分预测。

2 国内研究进展

与国外研究相比,国内利用高光谱成像对水果内部品质进行检测是最近两三年才开始进行的。

Liu 等^[31]利用高光谱激光诱导荧光成像对桔子的可溶性固形物进行了研究。在 700~1 000 nm 范围内获得南丰桔子高光谱图像数据。对训练样本的可溶性固形物的相关系数为 0.999,对验证样本的可溶性固形物的相关系数为 0.998。研究结果表明高光谱激光激发荧光成像对桔子可溶性固形物进行预测是一个很好方法。

洪添胜等^[32]利用高光谱成像对雪花梨品质无损检测的可行性进行了研究。利用人工神经网络建立了雪花梨含糖量和含水率的预测模型。研究表明,雪花梨的含糖量预测值和实际值的相关系数为 0.996,对含糖量测试的相对误差平均值为 4.24%。含水量预测值和实际值的相关系数为 0.94,对含水量测试的相对误差平均值为 0.62%。利用波长为 650 nm 的投影图像面积预测雪花梨质量,相关系数为 0.93。

刘木华等^[33]公开了一种水果高光谱图像采集装置(200520099328 X),该装置可采集水果的可见光及近红外光区的高光谱散射图像,对水果的内部品质(如糖酸度、质地和营养成分)进行检测。

3 结论与展望

应用高光谱成像技术对水果进行品质无损检测是 20 世纪 90 年代末在国外才发展起来的。由于通过高光谱成像能获得待测水果丰富的图像和光谱信息,能同时对水果综合品质进行无损检测,因而该技术在水果品质检测方面有广阔的应用前景。

(1)高光谱成像技术结合了计算机图像与光谱技术两者

的优点。高光谱图像数据能提供待检水果丰富的光谱图像信息,这些数据可用来对图像进行判别、分类、识别、量化分析。由于不同水果光吸收特性有很大不同,高光谱的优势在于能根据检测目标选择最优波长,这增加了高光谱成像技术的潜在应用。

(2)目前大多研究团队多是利用高光谱反射、荧光对水果(苹果、芒果、草莓、桃子、樱桃等)品质(果面缺陷、糖度、水分、坚实度、内部缺陷、表面污染等)进行检测,并取得较好的预测结果,但应用高光谱成像对大型水果(西瓜、甜瓜)的品质检测应用较少,在大型水果品质无损检测方面有广阔的应用前景。

(3)尽管高光谱图像数据包含丰富的图谱信息,但也有相当多的信息是冗余的。高光谱成像系统要处理海量数据,对计算机资源(运算速度、内存、硬盘等)要求很高,目前尚无法直接应用于在线检测。目前应用高光谱成像到在线检测的一个途径是,利用高光谱成像根据检测指标获取待检测对象的最佳有效特征波长(通常是两到三个),然后据此设计出多光谱系统,实现水果品质的实时、快速、无损检测。

(4)随着图像处理技术、光谱分析技术、计算机技术等快速发展和相互融合,高光谱成像技术在水果品质检测必将得到更广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] National Bureau of Statistics of China(中华人民共和国国家统计局). China Statistical Yearbook(中国统计年鉴), 2007.
- [2] Butz P, Hofmann C, Tauscher B, et al. Journal of Food Science, 2005, 70(9): 131.
- [3] ZHANG Li-bin, HU Hai-gen, JI Shi-ming, et al(张立彬, 胡海根, 计时鸣, 等). Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2005, 21(4): 176.
- [4] MO Run-yang(莫润阳). Physics(物理), 2004, 33(11): 848.
- [5] YING Yi-bin, LIU Yan-de(应义斌, 刘燕德). Journal of Zhejiang Agricultural University-Agric. & Life Sci. (浙江大学学报-农业与生命科学版), 2003, 29(2): 125.
- [6] Abbott J A, Lu R, Upchurch B L, et al. Horticultural Reviews, 1997, 20: 1.
- [7] Lu R F, Chen Y R. Proc. SPIE, 1999, 3544: 121.
- [8] Chen Y R, Chao K L, Kim M S. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 36: 173.
- [9] FU Xia-ping, YING Yi-bin, LIU Yan-de, et al(傅霞萍, 应义斌, 刘燕德, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(6): 1038.
- [10] LIU Mu-hua, ZHAO Jie-wen, ZHENG Jian-hong, et al(刘木华, 赵杰文, 郑建鸿, 等). Transaction of the Chinese Society of Agricultural Machinery(农业机械学报), 2005, 36(9): 139.
- [11] FU Xia-ping, YING Yi-bin, LU Hui-shan, et al(傅霞萍, 应义斌, 陆辉山, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(5): 911.
- [12] XIAO Song-shan, FAN Shi-fu, LI Yun, et al(肖松山, 范世福, 李 昀, 等). Modern Instruments(现代仪器), 2003, (5): 5.
- [13] Kim M S, Chen Y R, Mehl P M, et al. Trans. of ASAE, 2001, 44(3): 721.
- [14] Goetz A F H, Vane G, Solomon J E, et al. Science, 1985, 228: 1147.
- [15] Vane G, Green R O, Chrien T G, et al. Remote Sens. Env., 1993, 44: 127.
- [16] Elachi C. Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing, New York: Wiley, 1987.
- [17] YING Yi-bin, XU Hui-rong, XU Zheng-gang(应义斌, 徐惠荣, 徐正冈). Journal of Biomathematics(生物数学学报), 2006, 21(2): 306.
- [18] GUO Wen-chuan(郭文川). Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2007, 23(5): 284.
- [19] GE Tun, XU Ling, XIA Heng(葛 屯, 徐 凌, 夏 恒). Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 1998, 14(2): 231.
- [20] Polder G, Heijden G W, Young I T. Trans. of ASAE, 2002, 45(4): 1155.
- [21] Polder G, Heijden G W, Young I T. Real-Time Imaging, 2003, 9(4): 253.

- [22] Noh H K, Peng Y K, Lu R F. American Society of Agricultural & Biological Engineers Annual International Meeting, July 9-12, 2006, Portland, Oregon, 2006. 066182.
- [23] Nagata M. American Society of Agricultural Engineers Meeting, August, 1-4, 2004, Ottawa, Canada, 2004. 043033.
- [24] Lu R F, Peng Y K. Biosystems Engineering, 2006, 93(2): 161.
- [25] Lu R F. Sens. & Instrumen. Food Qual., 2007, 1: 131.
- [26] Nagata M, Tallada J G. American Society of Agricultural Engineers Annual International Meeting, July 17-20, 2005, Tampa, Florida, 2005. 053131.
- [27] ElMasry G, Wang N, ElSayed A. Journal of Food, 2007, 81: 98.
- [28] Sivakumar S S, Qiao Jun, Wang Ning. American Society of Agricultural & Biological Engineers Annual International Meeting, July, 9-12, 2006, Portland, Oregon, 2006. 066183.
- [29] Qiao Jun, Wang Ning. American Society of Agricultural Engineers Annual Meeting, July 17-20, 2005, Tampa, Florida, 2005. 053126.
- [30] Baljinder S. Dissertation, American Society of Agricultural Engineers Annual Meeting, August 1-4, 2004, Ottawa, Canada. 046116.
- [31] LIU M H, HU S F, LIN H W, et al. <http://www.paper.edu.cn>, 2007
- [32] HONG Tian-sheng, QIAO Jun, WANG Ning, et al (洪添胜, 乔 军, WANG Ning, 等). Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报), 2007, 23(2): 151.
- [33] LIU Mu-hua, ZHANG Lu-ling, ZHENG Jian-hong, et al (刘木华, 张庐陵, 郑建鸿, 等). Utility Model Patent in China (中国实用新型专利), 2005, 20052009328. X.

Advance in Nondestructive Detection of Fruit Internal Quality Based on Hyperspectral Imaging

MA Ben-xue^{1,2}, YING Yi-bin^{1*}, RAO Xiu-qin¹, GUI Jiang-sheng¹

1. Department of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shehezi University, Shihezi 832003, China

Abstract The present paper reviews the development in the field of hyperspectral imaging technology for nondestructive detection of fruit internal quality in recent years up to the year 2007. With the increasing maturity of hyperspectral imaging technology, decline of cost for its hardware and software, and improvement in hyperspectral image data processing algorithms, hyperspectral imaging technology for fruit quality nondestructive detection has become a hot research topic. In order to track the latest research developments at home and abroad, the fruit internal quality (maturity, firmness, soluble solid content, water content) detection with hyperspectral imaging was reviewed, which would provide reference for Chinese researchers.

Keywords Hyperspectral imaging; Fruit; Internal quality; Nondestructive detection

(Received Mar. 8, 2008; accepted Jun. 12, 2008)

* Corresponding author