

文章编号:2095-6002(2013)02-0067-05

引用格式:孙梅,付妍,徐冉冉,等. 基于高光谱成像技术的水果品质无损检测. 食品科学技术学报,2013,31(2):67-71.

SUN Mei, FU Yan, XU Ran-ran, et al. Nondestructive Inspect of Fruit Quality with Hyperspectral Imaging Technology. Journal of Food Science and Technology, 2013,31(2):67-71.

基于高光谱成像技术的水果品质无损检测

孙梅¹, 付妍¹, 徐冉冉², 赵勇¹, 陈兴海²

(1. 北京工商大学计算机与信息工程学院, 北京 100048; 2. 北京卓立汉光仪器有限公司, 北京 101102)

摘要: 高光谱图像技术结合光谱技术与计算机图像技术两者的优点, 可获得大量包含连续波长光谱信息的图像块, 其图像信息可检测水果的外部品质, 光谱信息则可用于水果内部品质的检测, 达到根据水果内、外部综合品质进行分类的目的. 综述了国内外将该技术应用于水果品质检测方面的研究进展, 提出了利用高光谱图像技术检测苹果轻微损伤的方法, 利用 500~900 nm 的高光谱图像数据, 通过主成分分析提取 547 nm 波长下的特征图像.

关键词: 高光谱成像技术; 水果品质; 无损检测

中图分类号: TS207; TP391.4

文献标志码: A

我国是世界水果生产大国, 根据《中国统计年鉴》统计 2006 年我国水果总产量已经达到 17 239.9 万 t (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. 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, 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.

因为机器视觉技术和光谱技术具有快速、无损、可靠的优点, 目前在水果无损检测中得到广泛应用. 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地依靠灰度信息, 而颜色及表面缺陷的检测目前

广泛使用的是 RGB 成像系统. 但是, 这些基于普通 CCD 成像的检测技术仅能够检测水果的部分表面特征, 无法实现对水果内部品质 (如水分、糖酸度、机械损伤、碰伤、腐烂、变质、虫害等) 的检测. 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.

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. 近几年来, 高光谱图像技术在农产品品质无损检测中的应用是一个重要的发展趋势. 由于高光谱成像技术是一种图像及光谱融合技术, 可以同时获得农产品的光谱信息及图像信息. 由于图像信息能反映农产品的外部特征、表面缺陷及污染情况, 而光谱信息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

收稿日期: 2012-05-30

基金项目: 北京市大学生科学研究与创业行动计划建设项目 (PXM2012-014213-000067).

作者简介: 孙梅, 女, 副教授, 博士, 主要从事光子晶体及光谱分析与测试方面的研究.

谱技术的完美结合。

1 高光谱成像系统

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。

高光谱图像技术已经被应用于从精微研究到遥感的许多科学领域^[1-11]。高光谱一般认为,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)^[12]。高光谱图像是一系列光波波长处的光学图像。光谱范围可以在紫外(200~400 nm)、可见光(400~760 nm)、近红外(760~2 560 nm)以及波长大于2 560 nm的区域。它比多光谱图像具有更高的光谱分辨率,通常精度可达到2~3 nm。高光谱图像数据是三维的,称为图像块,如图1。其中:二维是图像像素的坐标信息(以 X 和 Y 表示);第三维是波长信息(以 K 表示)。一个分辨率为 $X \times Y$ 像素的图像检测器阵列在 n 个波长处获得的样品图像块是 $X \times Y \times n$ 的三维阵列。

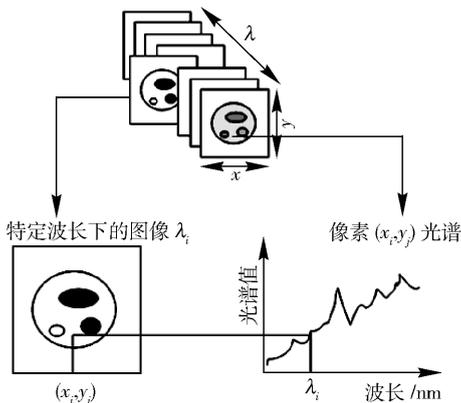


图1 高光谱图像块

Fig.1 Hyperspectral image block

高光谱图像是由一系列特定波长下的光学图像组成的三维数据块,特定波长的光可通滤波片和光谱仪两种方式获得。因此,根据获取的方式不同,特定波长光可以分为基于滤波片的高光谱图像系统和基于光谱仪的高光谱图像系统。基于光谱仪的高光谱图像系统采集得到的数据精度高,可以用于寻

找检测目标所需要的特定波长。但其数据量超大,数据处理时间长,仅适合于实验室研究阶段;反之,基于滤波片的高光谱图像系统采集得到的数据量小,数据分析所需要的时间短,适合在线检测,但是数据过于简单,很难寻找到检测目标所需要的特征波长。一般情况下,在实验室阶段利用基于光谱仪的高光谱图像系统寻找检测目标所需要的最优波长,再根据最优波长设计基于滤波片的高光谱图像系统,以实现在线检测。

高光谱图像检测技术的硬件组成主要包括光源、CCD摄像头、装备有图像采集卡的计算机和单色仪。光谱范围可以在200~400 nm,400~1 000 nm,900~1 700 nm,1 000~2 500 nm。V10E-PS高光谱成像仪系统实物和基于图像光谱仪的高光谱图像检测系统如图2。它主要由面阵CCD摄像头和图像光谱仪组成。工作时,图像光谱仪将检测对象反射或透射过来的光分成单色光源后进入CCD摄像头。该系统采用“推扫型”成像方法得到高光谱图像:面阵CCD探测器在光学焦面的垂直方向上做横向排列完成横向扫描(X 方向),获取的是对象在条状空间中每个像素在各波长下的图像信息;同时,在检测系统输送带前进的过程中,排列的探测器扫出一条带状轨迹从而完成纵向扫描(Y 方向)。

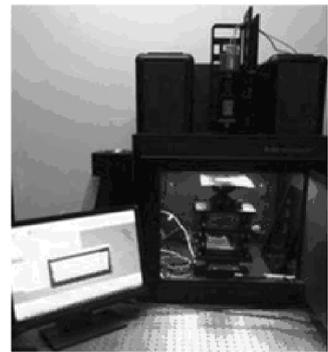


图2 V10E-PS 高光谱成像仪系统

Fig.2 V10E-PS hyperspectral imager system

2 结果与分析

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,损伤处表皮未破损,伤面有轻微凹陷,色稍变暗,肉眼难于觉察。受水果色泽的影响,传统的计算机视觉技术不能对轻微损伤加以检测,但是轻微损伤是水果在线检测的主要指标之一。随着时间的延长,轻微损伤部位逐渐褐变,最终导致

整个果实腐烂并影响其他果实。因此,水果轻微损伤的快速有效检测是目前研究的难点和热点之一。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、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。

Lu^[13]利用近红外高光谱成像技术检测 Red delicious 和 Golden delicious 两种苹果的表面损伤,测量波长为 900 ~ 1 900 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种类型损伤,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 而言其识别精度为 62% ~ 88%,对 Golden delicious 而言其识别精度为 59% ~ 94%。

Xing 等^[14-15]应用可见近红外高光谱图像检测 Jonagold 苹果表面损伤。测量的波长为 400 ~ 1 000 nm,通过主成分分析获得了 6 个特征波段,分别为 571, 608, 671, 709, 798 和 867 nm。然后利用 6 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 d 后的苹果检测率为 77.5%,并且 98.3% 的果梗/萼被正确识别。

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。

赵杰文等^[16]利用高光谱图像技术进行了检测水果轻微损伤的方法研究。试验以苹果为研究对象,利用 500 ~ 900 nm 的高光谱图像数据,通过主成分分析提取 547 nm 波长下的特征图像;设计不均匀二次差分,消除了苹果图像亮度分布不均匀的影响;再通过合适的数字图像处理方法提取苹果的轻微损伤。试验结果表明,高光谱图像技术对苹果轻微损伤的检测正确率达到 88.57%。

薛龙等^[17-18]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^[19]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 3

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 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。模型总体识别率为 94%。

蔡健荣等^[20]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^[21]提出特征波段主成分分析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 5 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%。

我们利用北京卓立汉光仪器有限公司的 Hyper-sis 系列高光谱成像检测系统,初步研究了苹果在可见光及近红外波段的压伤和风伤。研究中首先确定与检测水果品质的最有效特征波长,然后通过设计具有若干个波长的光谱图像系统,从而应用到实际生产检测中。这样就可以大大地提高检测效率,真正达到在线、快速、无损检测肉类品质的目的。

图 3 是利用数码相机拍摄的苹果彩色图像(其中有缺陷的部分已用笔圈出),虽然可通过数码相机或人眼看到虫伤的痕迹,但挤压损伤处不是很明显。且在灰度图像中,这样的伤痕是看不到的。只有在某些特定波长下,轻微损伤区域与正常区域之间的光谱值会存在很大差异。

高光谱图像在 360 ~ 981 nm 波长的 519 个波段范围内获得,利用主成分分析法可得到有效的特征波长。例如,用高光谱图像系统分别采集到的有压伤和风伤的苹果的高光谱图像如图 4。通过主成分分析后,分别在第 4 主成分波段和第 3 主成分波段图像中,可清晰地辨别出苹果压伤、风伤及果梗的位置。

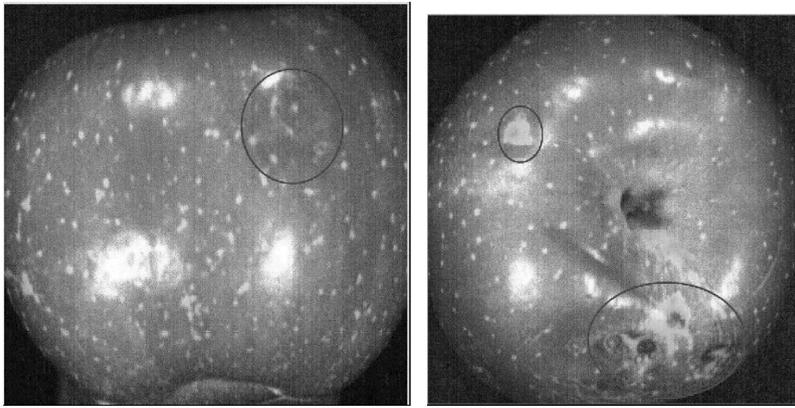
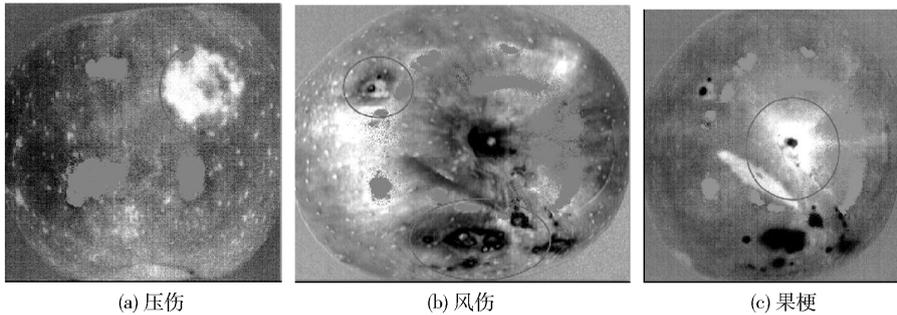


图3 样品的实物图

Fig. 3 Sample physical map



(a) 压伤

(b) 风伤

(c) 果梗

图4 带有各类缺陷(圆形或椭圆标记)和果梗苹果主成分图像

Fig. 4 With various kinds of defects (circular or elliptical marker) and fruit apple principal component image

3 结论

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,并且由于通过高光谱成像能获取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过程中必将得到更广泛的应用。

水果品质的无损检测技术尤其是高光谱图像检测技术在我国还处于实验研究阶段,并没有真正地投入到实际生产当中。所以,加速水果品质无损检测设备的市场应用,实现水果的在线、快速、无损检测对我国水果产业的现代化发展具有非常重要的实际意义。

我们利用高光谱技术初步研究了苹果在可见光及近红外波段的压伤和风伤,进一步的研究还在进行中。

参考文献:

[1] Judith A A. Quality measurement of fruits and vegetables

[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 1999, 15(3): 207-225.

[2] Chen Y R, Chao K, Kim M S. Machine vision technology for agricultural applications[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 36(2-3): 173-191.

[3] Brosnan T, Sun D W. Inspection and grading of agricultural and food products by computer vision systems[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 36(2-3): 193-213.

[4] 马本学, 饶秀勤, 应义斌, 等. 基于近红外漫反射光谱的香梨类别定性分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(12): 3288-3290.

[5] 刘燕德, 陈兴苗, 欧阳爱国. 可见/近红外光谱法无损检测赣南脐橙可溶性固形物[J]. *光学学报*, 2008, 28(3): 478-481.

[6] 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.

[7] Liu Y, Ying Y. Use of FT-NIR spectrometry in non-invasive measurements of internal quality of "Fuji" apples [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 37: 65-71.

- [8] 付兴虎,付广伟,毕卫红. 近红外光谱技术在水果品质无损检测中应用的研究与现状[J]. 红外, 2006, 27(2):33-37.
- [9] 洪添胜,乔军,Wang Ning,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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 刘木华,赵杰文,郑建鸿. 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):139-143.
- [13] Lu R. Detection of bruises on apples using near-infraredhyperspectral imaging [J]. Transactions of ASAE, 2003,46(2):523-530.
- [14] Xing Juan, Baerdemaeker J S D. Bruise detection on “Jonagold” apples using hyperspectral imaging [J]. Post Harvest Biology and Technology, 2005, 37: 152-162.
- [15] Juan X, Cedric B, Pal T J, et al. Detectingbruises on ‘golden delicious’ apples using hyperspectralimaging with multiple wavebands [J]. Biosystems Engineering, 2005,90(1):27-36.
- [16] 赵杰文,刘剑华,陈全胜. 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] 薛龙,黎静,刘木华. 基于高光谱图像技术的水果表面农药残留检测试验研究[J]. 光学学报, 2008, 28(12):2277-2280.
- [18] 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(12):109-113.
- [19] 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.
- [20] 蔡健荣,王建黑,黄星奕,等. 高光谱图像技术检测柑橘果锈[J]. 光电工程, 2009, 36(6):26-30.
- [21] 李江波,饶秀勤,应义斌. 农产品外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.

Nondestructive Inspect of Fruit Quality with Hyperspectral Imaging Technology

SUN Mei¹, FU Yan¹, XU Ran-ran², ZHAO Yong¹, CHEN Xing-hai²

(1. School of Computer Science and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Zolix Instruments Co. Ltd., Beijing 101102, China)

Abstract: Image cubes containing continuous spectral waveband information, in which the image information could be used for external attribute inspection while the spectral information could be applied to the internal attribute inspection, could be obtained by implementing hyperspectral image technology which combines the advantages of computer vision and spectroscopy. As a result, fruit classification based on both internal and external quality attributes could be achieved. Applications of hyperspectral images to the inspection of bruises, feces or earth contamination, maturity, firmness, SSC (Soluble Solid Content) and other parameters of fruits were reviewed. The hyperspectral imaging technology was proposed to detect the subtle bruises on apples in this paper. The apples' hyperspectral images between 500 nm and 900 nm wavelength were analyzed via the principal components analysis, and the feature images under 547 nm wavelength were selected to detect the bruises on apples.

Key words: hyperspectral imaging; fruit quality; nondestructive detection