

基于高光谱技术苹果硬度快速无损检测方法 的建立

彭彦昆*, 李永玉, 赵娟, 单佳佳

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: **目的** 利用高光谱技术建立苹果内部品质无损检测的方法。**方法** 将高光谱图像的光谱信息和空间信息结合, 采用洛伦兹函数对苹果高光谱的空间散射曲线进行拟合, 提取拟合曲线的相关参数, 利用拟合参数对苹果硬度进行建模分析。**结果** 拟合曲线与原散射曲线的相关系数 R 达到 0.99 以上。分析比较多种统计建模方法对不同拟合参数的建模效果, 结果表明: 在 524~1016 nm 波段范围内, 利用偏最小二乘法(partial least squares, PLS)对拟合曲线的峰值建立硬度的预测模型, 校正集预测值与标准值的相关系数 $R_c=0.89$, 校正集标准误差 $SEC=0.71 \times 10^5$ Pa, 验证集预测值与标准值的相关系数 $R_v=0.88$, 验证集标准误差 $SEV=0.88 \times 10^5$ Pa。**结论** 利用高光谱散射成像技术, 采用偏最小二乘的方法对拟合峰值建模, 可以实现苹果硬度的快速无损检测。

关键词: 苹果; 高光谱图像; 硬度; 洛伦兹函数; 偏最小二乘法

Establishment of rapid and non-destructive detection method of apple firmness using hyperspectral images

PENG Yan-Kun*, LI Yong-Yu, ZHAO Juan, SHAN Jia-Jia

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Objective To establish a new method for apple firmness assessment by using the hyperspectral imaging technology. **Methods** Based on the spectral information and spatial information of hyperspectral images, Lorentzian distribution function was proposed to fit spectral scattering profiles at individual wavelengths, and fitting parameters was used for modeling analysis of the firmness of the apple. **Results** The average correlation coefficient R between fitting curve and scattering profile was greater than 0.99. Comparison of various image analysis and modeling methods with different fitting parameters of prediction results, partial least squares (PLS) model with fitting parameter had a good prediction of apple firmness at the wavelength of 400~1100 nm with $R_c=0.89$, $SEC=0.71 \times 10^5$ Pa, and $R_v=0.88$, $SEV=0.88 \times 10^5$ Pa, respectively. **Conclusion** Hyperspectral scattering imaging method is useful for rapid and non-destructive measurement of apple firmness.

KEY WORDS: apple; hyperspectral imaging; firmness; Lorentzian function; partial least squares

1 引言

我国苹果产量虽高, 但由于水果品质检测技术落后, 分级技术差, 导致苹果的出口率很低^[1]。传统

的水果内部品质检测方法主要都是破坏性的, 并且仅仅适用于少数苹果的抽样检测。近红外应用于水果内部品质无损检测的技术在国内外已比较成熟^[2-4]。已有研究表明, 对于果实坚实度的近红外光谱无损

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201003008)、引进国际先进农科学业技术(948)项目(2012-Z17)

*通讯作者: 彭彦昆, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 农畜产品品质安全无损检测关键技术与装备。E-mail: ypeng@cau.edu.cn

检测,其检测精度值需进一步探讨^[5]。水果的硬度是指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^[6-8],苹果的硬度与其组织结构、细胞大小等空间结构有关。高光谱技术包含样本的光谱信息和空间信息,图像由光谱维和空间维组成,利用高光谱可以获得苹果品质的空间信息^[9-11]。由于苹果的硬度与内部组织结构有关,利用高光谱获得的空间散射曲线建立苹果的硬度模型是可行的。

本研究对苹果的空间散射曲线用洛伦兹函数拟合,求取拟合的洛伦兹参数,利用拟合参数建立硬度的预测模型,评价模型的稳定性。

2 材料与方法

2.1 实验材料

实验材料为从北京当地超市购买的烟台红富士苹果,数量为36个。在购买时从视觉上选择形状、大小相差不大、表面无明显疤痕的苹果。购买回来后放在3℃环境下的密封塑料袋中储藏。每隔3d做一次实验,每次测12个,共做3次实验。实验前一天晚上,将苹果取出,在实验室室温下放置12h,使其达到室温后再做实验。

2.2 高光谱系统及图像采集

实验用的高光谱成像系统主要由高性能CCD数字照相机(德国Sencicam QE公司)、高光谱摄制仪(ImSpector V10E,芬兰Spectral Imaging公司)400~1100 nm、卤钨灯源(美国Oriel Instruments公司)、带有反馈控制器的光源供给系统和计算机组成。照射点光源为直径5 mm的光束。为了防止外部光线干扰,整个系统安置在一个密闭的光屏蔽舱内。高光谱系统示意图如图1所示。

图像采集时,将苹果放在高光谱摄制仪正下方的支架上,调整苹果表面最高点的位置与物镜的距离,确保图像的清晰度,提高信噪比。图像采集用CCD相机专用的软件Camera control Kit V2.19。仪器经过调整,参数设置如下:物镜选用25 mm,曝光时间为100 ms,扫描线长度为50 mm。苹果最高点距物镜的距离为170 mm,为避免饱和,扫描线距光源光束中心的距离为2 mm。为了提高图像的信噪比,原始图像经过2X2 binning处理。在图像采集过程中,调整苹果的位置,尽量避免光照射到苹果的伤疤和大

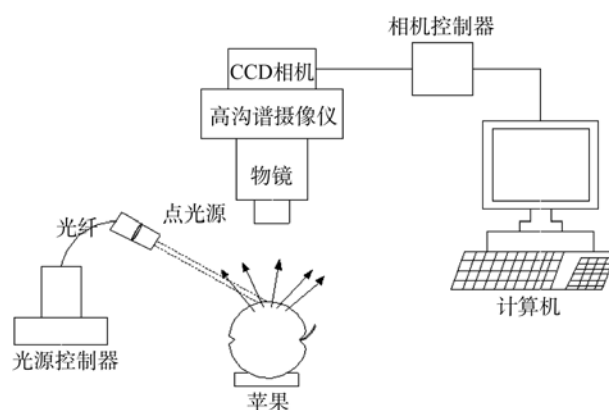


图1 高光谱系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hyperspectral imaging system

的斑点处。每个苹果采集赤道等距离4点处的光谱图像,4点光谱的平均光谱作为苹果的原始光谱。

2.3 硬度参照值的测定

图像采集后,进行苹果硬度值的测定。苹果硬度值的测量按照国家标准GB 10651-89的规定进行。硬度的测定系统由果实硬度计(GY-1,北京中西远大科技公司)和改装后的剪切仪(CLM-3B,东北农业大学)组成。剪切仪能够保证硬度计的探头以5 mm/s的速度缓慢的压入果肉内部。实验时在苹果光谱采集的四个位置削去薄薄的一层皮,使露出的果肉面积略大于硬度计探头的面积,将硬度计探头垂直的对准苹果的待测部位,启动剪切仪,直到硬度计的探头规定部分完全压入果肉为止,从硬度计的表盘上直接读数,即最大剪切力。取四点的平均值即为苹果的硬度值(10^5 Pa)。

2.4 图像的处理方法

苹果的高光谱线图如图2所示,x轴是空间轴,本研究扫描线的长度为0~50 mm,垂直x轴的直线表示特定空间位置下不同波长的光强。y轴是光谱轴,实验用光谱摄制仪采集的光谱范围为400~1100 nm,垂直y轴的直线表示特定的波长在不同空间位置的光强。

图像的处理在Matlab 7.0软件(美国MathWorks公司)平台上进行。由于原始的图像含有噪声,首先采用均值滤波的方法对原始图像进行预处理。对高光谱图像的空间散射曲线用3个参数的洛伦兹曲线进行拟合^[12]。洛伦兹函数的原型如公式(1):

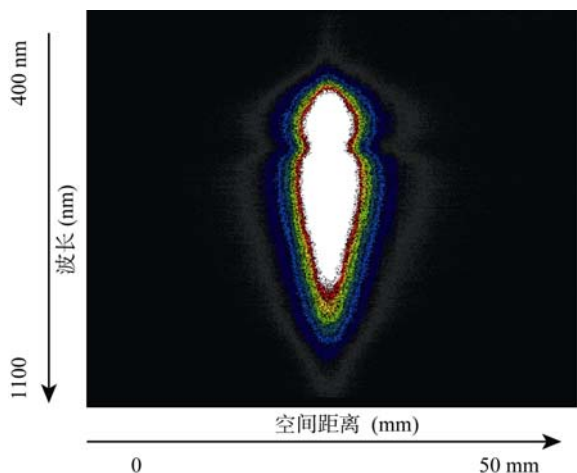


图 2 高光谱原始散射图像
Fig. 2 Raw hyperspectral scattering image

$$y = a + \frac{b}{1 + \left(\frac{x}{c}\right)^2} \quad (1)$$

式中: a ——光强的渐近值, b ——散射曲线的峰值, c ——散射曲线半波带宽, x ——空间距离。

图 3 表示各个波段的空间散射曲线与拟合曲线的相关系数。

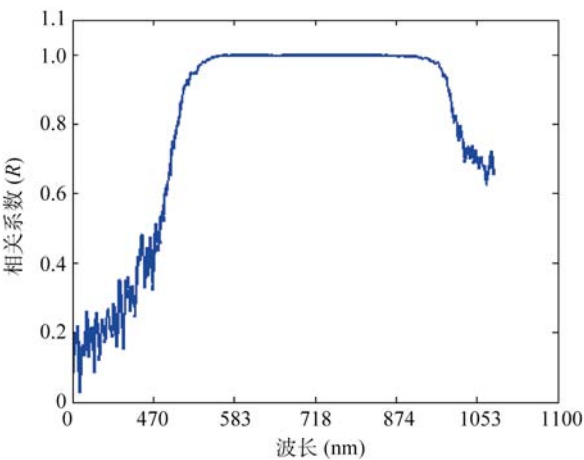


图 3 各波长拟合曲线与散射曲线的相关系数
Fig. 3 Correlation coefficients between fitting curve and scattering profile at individual wavelength

由于光源本身的特性, 在波长范围的两端信号弱, 噪声大, 信噪比低, 拟合相关系数比较低。从图 3 可以看出: 在 524~1016 nm 范围内, 拟合的相关系数 R 达到 0.99 以上。根据拟合相关系数选择 524~1016 nm 范围的波段建模。

2.5 预测模型的建立

将 36 个样本按照 3: 1 的比例分成校正集和验证

集。校正集样本 27 个, 验证集样本 9 个。采用偏最小二乘^[13]和逐步多元线性回归^[14]的方法对不同的拟合参数建立硬度的预测模型。算法的实现过程在 Matlab 软件平台上实现。

以校正集的相关系数 R_c 和校正标准差 SEC, 以及验证集的相关系数 R_v 和验证标准差 SEV 作为模型的评价标准。所建模型的 R_c , R_v 越大, SEC, SEV 越小, 模型的效果越好。

3 结果与讨论

3.1 苹果硬度值的测量结果

模型质量的好坏很大程度取决于样品校正集与验证集检验参数的覆盖范围, 从表 1 中我们可以看出校正集和验证集基本上是以平均值为中心呈正态分布, 而且验证集的硬度范围包含在校正集内, 所以可以准确地评价模型的质量。

表 1 苹果硬度标准值的统计数据(单位: 10^5 Pa)
Table 1 The statistics data of apple firmness (10^5 Pa)

样品数	硬度范围	平均值	方差
校正集 27	6.06~13.70	9.42	2.53
验证集 9	6.67~10.99	8.60	2.54

3.2 偏最小二乘法建模结果

在 524~1016 nm 波段范围内, 采用偏最小二乘的方法, 分别利用拟合参数 a , b , c 建模, 建模结果 R_c , R_v , SEC, SEV 如表 2 所示。

表 2 偏最小二乘法的建模结果
Table 2 The modeling results of PLS

参数	主成分数	R_c	SEC(10^5 Pa)	R_v	SEV(10^5 Pa)
a	5	0.84	0.86	0.56	1.63
b	7	0.89	0.71	0.88	0.88
c	6	0.63	1.24	0.40	2.00

从表 2 中可以看出, 利用拟合参数 b 建模, R_c 和 R_v 都比较高, SEC 和 SEV 比较低, 模型的效果好。利用偏最小二乘法, 主成分数为 7, 对拟合参数 b 建立苹果硬度的预测模型, 图 4(a)表示苹果校正集硬度的相关系数 $R_c=0.89$, $SEC=0.71 \times 10^5$ Pa, 图 4(b)表示苹果验证集硬度的相关系数, $R_v=0.88$, $SEV=0.88 \times 10^5$ Pa。

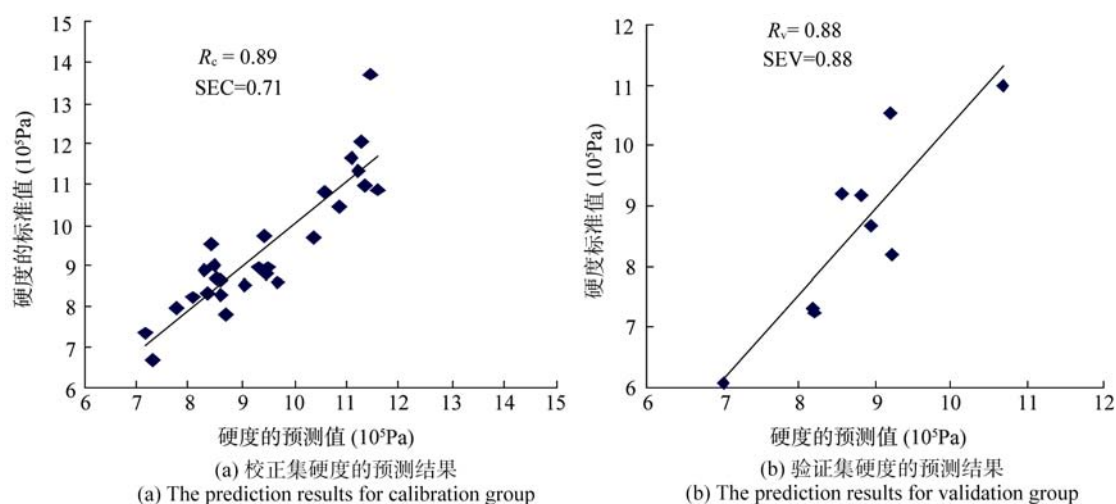


图 4 PLS 校正集和验证集的预测结果

Fig. 4 The prediction results of calibration group and validation group with PLS

3.3 逐步多元线性回归的建模结果

在 524~1016 nm 波段范围内, 采用逐步多元线性回归的方法建立硬度的预测模型。各个模型的最优组合波长数以及 R_c , R_v , SEC, SEV 如表 3 所示。

表 3 逐步多元线性回归法的建模结果

Table 3 The modeling results of SMLR

参数	波数	R_c	SEC(10 ⁵ Pa)	R_v	SEV(10 ⁵ Pa)
a	8	0.92	0.61	0.38	1.73
b	8	0.94	0.53	0.81	2.10
c	8	0.84	0.84	0.56	2.23

通过对两种分析方法的比较可以看出, 两种方法用拟合峰值 b 建模的效果都比较好, 采用逐步多元线性回归的方法虽然 R_c 比偏最小二乘法高, 但是 R_v 相对较低, 模型的稳定性有待提高。偏最小二乘法模型的建模结果比逐步多元线性回归稳定。结果表明, 利用拟合参数 b, 采用偏最小二乘的方法建立的模型进行苹果硬度的快速、无损检测是可行的。

4 结 论

利用高光谱的空间特性, 采用三个参数的洛伦兹函数对苹果的空间散射曲线进行拟合, 在 524~1016 nm 范围的波段内, 采用偏最小二乘法和逐步多元线性回归法, 利用拟合参数建立苹果硬度的预测模型, 结果表明: 采用偏最小二乘法, 利用拟合参数

b 的建模效果最好, R_v 为 0.88, SEV 为 0.88×10^5 Pa, 说明所建模型有很好的预测结果。可见利用高光谱空间散射技术可以实现水果内部品质的快速检测, 为今后水果内部品质的在线检测提供理论依据。

参考文献

[1] 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.

[2] Nourain J, 应义斌, 王剑平, 等. Finite element models of watermelon and their applications [J]. Trans CSAE, 2005, 21(1): 17-22

[3] 史波林, 庆兆坤, 籍保平, 等. 应用 GA-DOSC 算法消除果皮影响近红外漫反射光谱分析苹果硬度的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(3): 665-670.

[4] 傅霞萍, 应义斌, 陆辉山, 等. 应用多种近红外建模方法分析梨的坚实度[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(5): 911-915.

[5] 曾一凡, 刘春生, 孙旭东, 等. 可见/近红外光谱技术无损检测果实坚实度的研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 250.

[6] 马本学, 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.

[7] 李民赞. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[8] 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.

[9] Peng YK, Lu RF. An LCTF-based multispectral imaging system for estimation of apple fruit firmness: Part I. Acquisition and characterization of scattering images [J]. Trans ASAE, 2006, 49(1): 259-267.

- [10] Peng YK, Lu RF. Prediction of apple fruit Firmness and soluble solids content using characteristics of multispectral scattering images [J]. J Food Eng, 2006, 82: 142–152.
- [11] Lu RF, Peng YK. Hyperspectral Scattering for assessing peach fruit firmness [J]. Biosyst Eng, 2006, 93(2): 161–171.
- [12] Peng YK, Lu RF. Modeling multispectral scattering profiles for prediction of apple fruit firmness [J]. Am Soc Agric Eng, 2005, 48(1): 235–242.
- [13] 曹乐平. 数字图像处理技术结合偏最小二乘法定量分析柑橘质量[J]. 食品科学, 2009, 30(14): 200–203.
- [14] Peng YK, Lu RF. Analysis of spatially resolved hyperspectral

scattering images for assessing apple fruit firmness and soluble solids content [J]. Postharv Biol Technol, 2007, 48 (2008): 52–62.

(责任编辑: 张宏梁)

作者简介



彭彦昆, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 农畜产品品质安全无损检测技术与装备。

E-mail: ypeng@cau.edu.cn