

基于空间频域成像的果蔬皮下隐性损伤可视化检测

黄璇, 周童童, 孙志忠, 杨自栋, 孙通, 胡栋*

(浙江农林大学光电工程学院 杭州 311300)

摘要 果蔬皮下隐性损伤症状轻微,特征难以识别,传统的均匀光成像难以实现无损准确检测。本文采用空间频域成像技术,基于深度辨析和信号增强特点,对胡萝卜、红富士苹果、黄瓜、金冠苹果、水果黄瓜、蛇果、芒果、黄桃、玫瑰李、水蜜桃等 10 种果蔬的新鲜皮下隐性损伤(30 min 内)进行检测。通过图像获取、图像解调、白板校正和逆向反演等步骤,得到果蔬组织的光学特性参数。结果表明,健康果蔬和损伤果蔬的光学特性参数存在差异,主要表现在果蔬损伤后约化散射系数值大大减小,因此可实现其皮下隐性损伤的可视化无损检测。本文提出了一种果蔬皮下隐性损伤无损检测的新方法,具有广泛的应用前景。

关键词 空间频域成像; 果蔬; 皮下隐性损伤; 光学特性参数; 无损检测

文章编号 1009-7848(2023)12-0229-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.12.024

人们赖以生存和发展的物质基础是食品。在食品生产过程中保证其质量和安全已成为社会关注热点。随着食品安全检测技术的发展,能够实现快速、无损检测的先进技术展现出巨大优势^[1]。果蔬作为人们日常生活的必需品,能提供丰富的维生素、矿物质、碳水化合物等营养成分,然而在采摘、装卸、运输、贮藏和销售等过程中容易发生挤压、碰撞及冲击等作用,造成表面擦伤或损伤,从而降低果蔬质量;同时,损伤果在储存过程中易发酵、腐烂或发霉感染,进而影响其它果实,给果蔬市场造成巨大的经济损失。因此,在果蔬损伤恶化扩散之前,采用无损检测技术对其进行剔除,意义重大^[2]。

近年来,大量的光谱和成像技术应运而生,并被应用于果蔬损伤检测,其中以近红外光谱^[3-5]和高光谱成像技术^[6-9]应用最广。然而,近红外光谱技术存在模型通用性差、不具备空间信息等缺陷^[10]。高光谱成像技术虽然已经达到精确有效无损检测果蔬损伤的目的,但是它是一种多信息融合技术,往往存在数据冗余的现象,信息处理的效率比较低,且仪器较为昂贵,用于在线检测的成本偏高,因而无法得到广泛应用^[11]。此外,果蔬皮下隐性损

伤位于果皮以下,在发生早期时(30 min 以内)特征不明显,肉眼难以识别,依靠上述传统方法对其检测难度较大,容易产生误检误判^[12]。

光在果蔬等浑浊介质中传输是一种复杂的现象,主要以吸收和多次散射的形式发生,通常采用吸收系数(Absorption coefficient, μ_a)和约化散射系数(Reduced scattering coefficient, μ_s')等光学特性参数进行量化和描述。在可见光和近红外光范围内, μ_a 与组织的化学成分含量相关,如可溶性固形物(Soluble Solids Content, SSC), μ_s' 与果蔬的微观物理结构相关^[13]。然而,传统的成像和光谱技术很难将吸收特性与散射特性区分开来,进而限制其预测擦伤、硬度和其它与物理结构相关的参数的能力。光学特性参数测量及其在损伤检测方面的应用是近年来的研究热点^[14],在多种光谱和成像技术中均有体现。例如:时间分辨光谱(Time Resolved Spectroscopy, TRS)^[15]、空间分辨光谱(Spatially Resolved Spectroscopy, SRS)^[16]、积分球(Integrating Sphere, IS)^[17]、激光后向散射成像(Laser Backscattering Image, LBI)^[18]、空间频域成像(Spatial Frequency Domain Imaging, SF-DI)^[19-22]等。其中,SFDI 技术是一种新兴的光学检测技术,因大视场成像、无标记、成像深度和成像分辨率可辨析等特点,而被广泛应用于生物组织的光学特性参数测量,在果蔬皮下隐性损伤检测方面潜力巨大^[23]。

SFDI 是一种间接测量光学特性的技术,它以

收稿日期: 2022-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(32371987,32001414)

第一作者: 黄璇,女,本科生

通信作者: 胡栋 E-mail: 20180047@zafu.edu.cn

非接触、单次测量的方式得到生物组织内部的光学特性变化情况。该技术使用空间调制照明来获取样品在空间频域的光学特性,通过改变调制光的频率来获得关于组织成分和结构的深度分辨信息。该技术兴起于生物医学领域,Cuccia等^[24]、Mazhar等^[25]、Rajinder等^[26]、Nandy等^[27]将其广泛应用于烧伤评估、皮肤组织评估、肿瘤组织检测、脑组织监测等研究。2007年,Anderson等^[28]首次将SFDI技术用于检测金冠苹果的瘀伤情况。此后,该技术在果蔬损伤检测方面的应用逐渐兴起。Hu等^[22]搭建了国内首套SFDI系统,并利用SFDI技术检测苹果光学特性及内部褐变。He等^[29]利用SFDI技术结合相位轮廓测量方法对梨的光学特性参数进行曲面校正,从而进一步提高了检测精度,同时也为SFDI在农产品品质的无损检测奠定基础。此外,Sun等^[30]建立了ANN模型快速反演光学特性参数,大大提高了反演效率,并将其用于苹果皮下损伤检测,增加了SFDI技术在线应用的可能性。

本研究采用二维结构光源即正弦模式的结构光,成像设备为单色相机,允许SFDI技术在大视野内进行光学特性参数测量。通过对算法的改进使光学特性参数获取变得更加高效、准确。课题组前期工作表明,SFDI技术具备检测“金冠”苹果皮下隐性损伤的能力,然而果蔬组织具有复杂性、多样性的特点,果皮颜色、厚度、化学成分及其含量等均会对检测结果造成不同程度的影响。到目前为止,SFDI技术适用于哪些果蔬的皮下隐性损伤检测,并不得而知。基于以上分析,为了能更好地

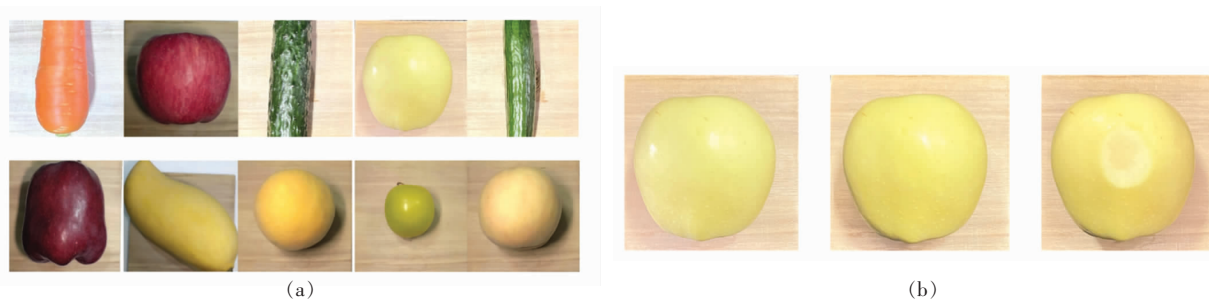
满足当前果蔬品质检测要求,本文采用SFDI技术对10种果蔬(黄桃、水蜜桃、玫瑰李、黄瓜、水果黄瓜、芒果、胡萝卜、金冠苹果、红富士苹果、蛇果)组织的光学特性参数进行快速测量,通过对比正常果和损伤果的吸收系数和约化散射系数的图像差异,实现多种果蔬皮下隐性损伤的可视化无损检测,为该技术的后续推广与落地提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 损伤果蔬样品制备

本试验所使用的果蔬样品均于2021年7月25日从杭州临安宝龙广场永辉超市购买,试验前将果蔬放置在室温环境(温度26℃,湿度51%)静置12h,所有样本在试验前用去离子水清洗干净并将表面擦干。试验选用胡萝卜、红富士苹果、黄瓜、金冠苹果、水果黄瓜、蛇果、芒果、黄桃、玫瑰李、水蜜桃10种果蔬,如图1a所示,并且保证挑选的果蔬没有瑕疵和擦伤并尽量保持水果形状大小相似。果蔬损伤制备装置如图2所示,由铁架台、塑料管、刻度尺、木球、样本托等部分组成。使用时,将一个果蔬样本放置在样本托上,将木球放置在塑料管上方相应刻度处并释放木球,木球自由落体后对果蔬赤道区域进行撞击造成损伤。该隐性损伤存在于果蔬皮下,如图1b所示,肉眼不可见,但损伤特征会在30min至1h内逐步显现。

果蔬损伤制备装置中木球的质量为164.8g,直径为76mm。塑料管上的刻度用于可视化木球的高度。前期试验表明,造成中度损伤的能量约为0.3J,造成重度损伤的能量约为0.6J,通过能量守



注:(a) 10种果蔬样品,从左至右依次为胡萝卜、红富士苹果、黄瓜、金冠苹果、水果黄瓜、蛇果、芒果、黄桃、玫瑰李、水蜜桃;(b) 金冠苹果损伤前(左)、损伤后带皮(中)、损伤后去皮(右)。

图1 果蔬样品 RGB 图片展示

Fig.1 RGB images of fruit and vegetable samples

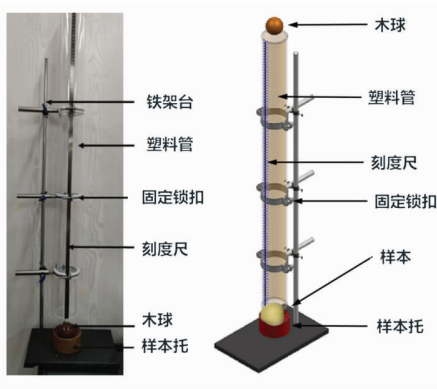


图 2 果蔬损伤制备装置实物图(左)和示意图(右)

Fig.2 Picture (left) and schematic diagram (right)

of the device for generating bruising in fruits and vegetables

恒定律得到木球对果蔬作用的能量和木球所处高度的关系为:

$$W = mgh = 1.03096 h \quad (1)$$

式中: W ——木球对果蔬作用的能量值, J ;
 m ——木球的质量, kg ; h ——木球所处高度, m ;
 g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2 。

1.2 空间频域成像系统

本研究采用课题组开发的多光谱 SFDI 系统进行图像采集。系统中, Dolan D50-HB 光源(峰值功率 150 W), 美国 Dolan-Jenner 公司; $15/8\text{mm}$ 口径照明光纤, 日本 MORITEX 公司; DLi6500 1080p 光学投影, 美国 TI 公司; 以上部件组成照明单元, 此单元用于照亮被测果蔬样品。THZ210 三轴手动位移平台, 浙江润佳气动科技有限公司, 组成样品输送单元, 用于放置待测样品。MER-131-210M NIR 工业相机, 北京大恒图像视觉有限公司; 相机和多波长滤波片组合成成像单元, 此单元用于采集被测果蔬图像。相机和投影仪引擎端都设置有线性偏振片来减少成像样品的镜面反射。在波长优选方面, 前期试验结果表明 730 nm 处具有最佳成像性能^[31]。因此, 本研究在 730 nm 处进行图像采集和数据处理及分析。

试验中, 每个果蔬样品都被放置在 SPL-R-0910 三轴可调节的光学位移平台(杭州谱镭光电技术有限公司)上, 制备的损伤区域朝上。SFDI 系统采集它们在 8 个频率($0, 0.01, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 \text{ mm}^{-1}$) 和 3 个相位($0, 2\pi/3, 4\pi/3$) 下的图像, 每个样本一共采集 24 张图像。其中, 0

mm^{-1} 频率下的光照模式就等于调制光中的均匀照明。如图 3 所示, 光导纤维将光源中的白光导入到光学投影中, 由光学投影将结构光透过偏振片投射到样本台上的样本表面, 计算机通过电缆控制相机采集样本表面的反射图案。同时, 计算机通过 USB 串口线与一个单片机相连用于给单片机发送指令, 单片机接收指令后通过触发一个高电平信号来触发光学投影投射一系列的频率、相位不同的结构光, 实现光学投影和相机采集图像的同步。因为反射图案的光线在进入相机之前还经过了偏振片和滤光片, 所以相机采集到的是没有反光的图像。

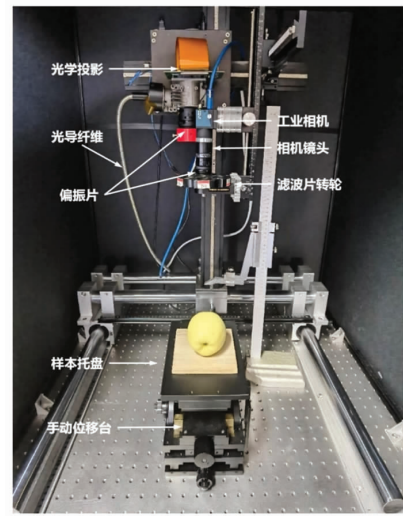


图 3 空间频域成像系统实物图

Fig.3 The picture of spatial-frequency domain imaging system

1.3 光学特性参数测量

对于已采集的图像, 后续处理可以分为以下步骤: 利用解调算法得到样本的漫反射图像, 随后利用课题组搭建的人工神经网络 (Artificial Neural Network, ANN) 模型从解调图像中精确获得目标果蔬的光学特性参数值。具体步骤及基础原理公式将在下文展示。

假设样品表面入射结构照明的光强函数为:

$$S = \frac{S_0}{2} [1 + M_0 \cos(2\pi f_x x + \alpha)] \quad (2)$$

式中: S_0, M_0, f_x, x 和 α 分别为光源的照明强度、空间调制深度、空间频率、空间坐标和空间相

位。样本的光照强度 $I(x, f_x)$ 可以分解为直流分量 $I_{DC}(x)$ 和交流分量 $I_{AC}(x, f_x)$, 它们之间的关系可以表示为:

$$I(x, f_x) = I_{DC}(x) + I_{AC}(x, f_x) \quad (3)$$

在不同的空间频率 f_x 下, 直流分量 $I_{DC}(x)$ 都是一个常数, 而交流分量 $I_{AC}(x, f_x)$ 是一个关于空间位置 x 和空间频率 f_x 的函数, 可以表示为:

$$I_{AC}(x, f_x) = M_{AC}(x, f_x) \cdot \cos(2\pi f_x x + \alpha) \quad (4)$$

式中: M_{AC} ——反射光子密度的振幅包络线, 与待测组织的光学特性有关, 一般采用三相解调方法, 利用 3 个相位 ($0, 2/3, 4/3$) 和具有特定空间频率 f_x 的正弦模式结构光来照亮样本, 测得三幅反射图像的光照强度 $I_1(x_i, f_x), I_2(x_i, f_x), I_3(x_i, f_x)$, 则 MAC 可以表示为:

$$M_{AC}(x, f_x) = \frac{\sqrt{2}}{3} \left\{ \begin{array}{l} [I_{AC1}(x, f_x) - I_{AC2}(x, f_x)]^2 \\ [I_{AC2}(x, f_x) - I_{AC3}(x, f_x)]^2 \\ [I_{AC3}(x, f_x) - I_{AC1}(x, f_x)]^2 \end{array} \right\}^{1/2} \quad (5)$$

M_{AC} 与光源强度 I_0 、调制传递函数 MTF_{system} 、漫反射函数 R_d 存在以下关系:

$$M_{AC} = I_0 \cdot MTF_{system}(x, f_x) \cdot R_d(x, f_x) \quad (6)$$

在试验中, 通常使用一块已知光学特性参数 (μ_a 和 μ_s') 参考样本, 用来校正待测样本的漫反射值:

$$R_d(x, f_x) = \frac{M_{AC}(x, f_x)}{M_{AC,ref}(x, f_x)} \cdot R_{d,ref}(x, f_x) \quad (7)$$

通过课题组前期已构建的 ANN 模型^[30]从样本的漫反射值中提取得到光学特性参数 μ_a 和 μ_s' 。ANN 模型是一种基于反向传播的神经网络, 利用 Monte Carlo 仿真所得数据对网络进行训练从而得到可以映射漫反射和光学特性参数的神经网络模型。

建立的 ANN 反演模型, 具体包括一个输入层、6 个隐含层以及一个输出层。将漫反射数据集输入 ANN 反演模型进行训练, 输出获得预测光学特性参数。为了避免两个光学特性参数之间相互影响, 将吸收系数与约化散射系数进行独立计算, 同时计算输出层输出的预测吸收系数与对应的实际吸收系数的误差, 以及输出层输出的预测约化散射系数与对应的实际约化散射系数的误差

$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$, 其中, n 为所反演的光学特性参数的数量, y_i 为输出层的输出对应的实际光学特性参数, \hat{y}_i 为输出层的输出。

2 结果与分析

2.1 果蔬损伤前后的光学特性分布图对比

图 4 展示了通过 ANN 模型计算得到的两种不同状态苹果 (左侧: 损伤前, 右侧: 损伤后) 的光学特性参数图, 其中图 4a 为 μ_a 图, 图 4b 为 μ_s' 图。从图中可以看出, 无论是损伤前还是损伤后 μ_a 值并没有发生明显变化, 而 μ_s' 值则可以看出来明显差异, 损伤部位的 μ_s' 值低于无损伤部位。损伤部位的 μ_s' 值在 $0.8 \sim 1.2 \text{ mm}^{-1}$ 之间, 而无损伤部位苹果的 μ_s' 值在 $1.2 \sim 2.0 \text{ mm}^{-1}$ 之间。以上结果说明 μ_a 值不适用于检测果蔬早期皮下隐性损伤, 而 μ_s' 值可以实现损伤的可视化检测。这是因为当果蔬擦伤时, 组织发生软化, 细胞壁解聚, 增加了明胶层的溶解度并导致细胞质壁分离, 此时在 μ_s' 数值上体现的变化就是急剧下降^[16,32]。同时这也是选择 μ_s' 值作为后续多种果蔬损伤检测的依据所在。

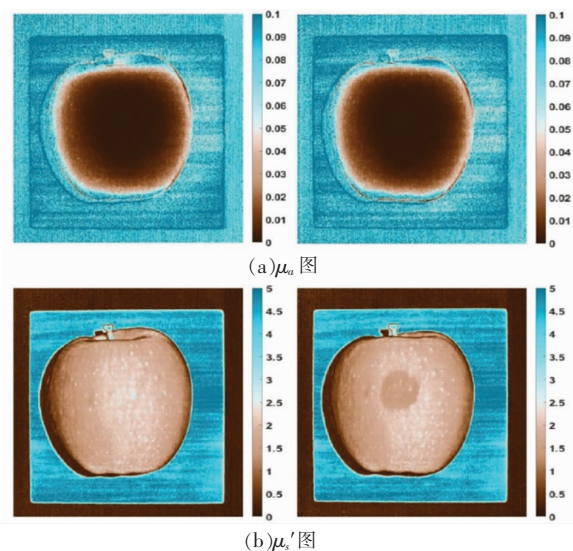


图 4 红富士苹果损伤前 (左) 和损伤后 (右) 的光学特性参数图

Fig.4 Optical property mappings of the Fuji apples before (left) and after bruising (right)

2.2 基于果蔬 μ_s' 分布图的损伤检测

图 5 展示了 10 种果蔬损伤前后的 μ_s' 值的二

维分布图。从试验所得数据与图像可以看出,金冠苹果、红富士苹果、蛇果、黄桃、水蜜桃可以分辨出样本是否存在皮下隐性损伤;而黄瓜、水果黄瓜、芒果、玫瑰李和胡萝卜损伤前后的 μ_s' 值并无明显差别。图 5a、5c、5e、5g、5i 中,受损部位的 μ_s' 值与未受损时的数值并没有太大区分,无法分辨样本

有无受到损伤;而图 5b、5d、5f、5h、5j 中,果蔬损伤部位的 μ_s' 值有较为明显的差异,损伤后的 μ_s' 值均小于无损伤状态时该部位的 μ_s' 值。例如图 5g 所示,芒果在损伤前后损伤部位的 μ_s' 值并无太大明显差别,大致为 $1.5\sim 3.0\text{ mm}^{-1}$ 左右。这可能是由于表皮组织层太厚造成的,表皮太厚使得检测不明

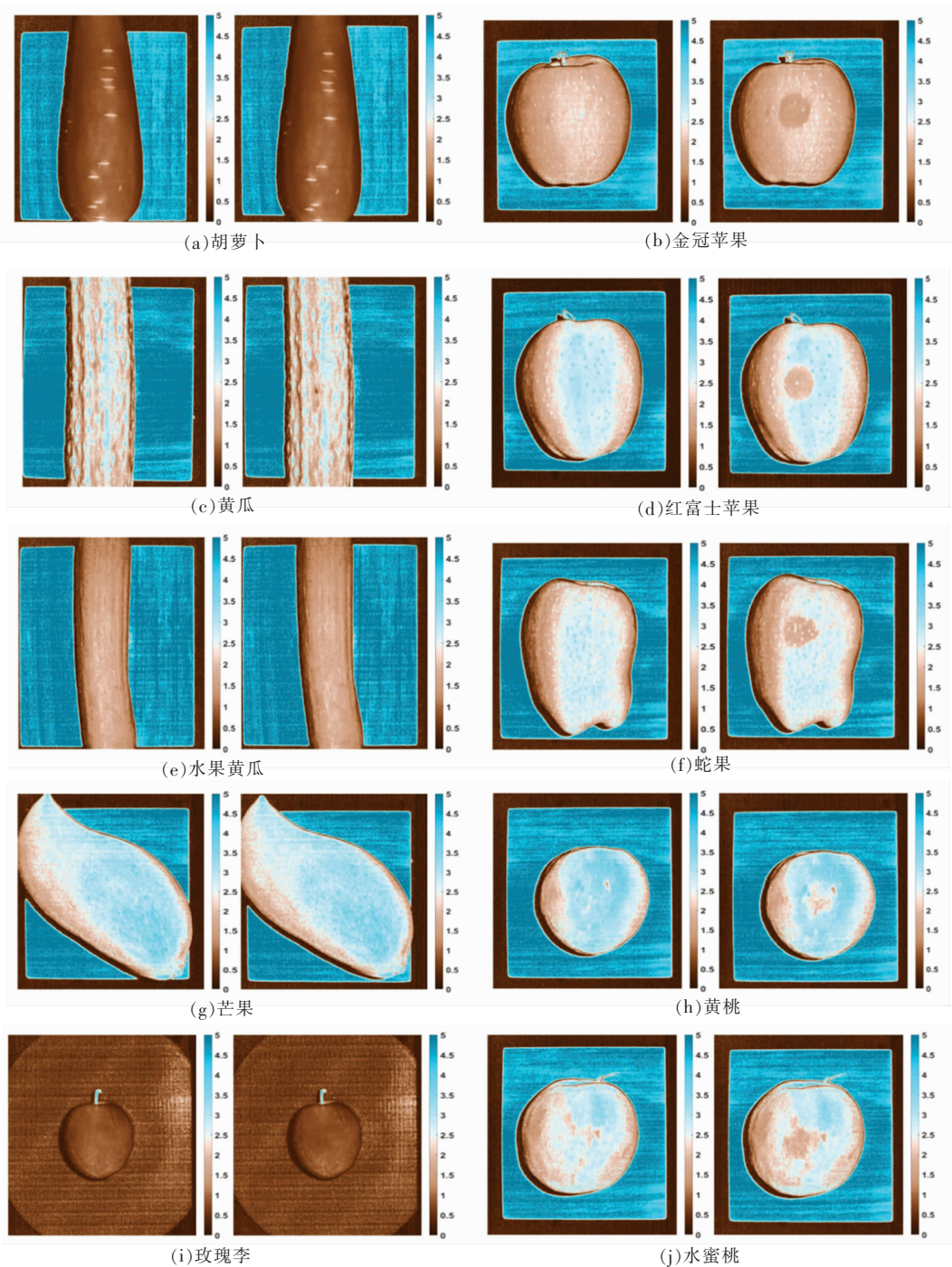


图 5 10 种果蔬损伤前后 μ_s' 二维分布图

Fig.5 Two-dimensional distribution maps of μ_s' of the ten kinds of fruits and vegetables before and after bruising

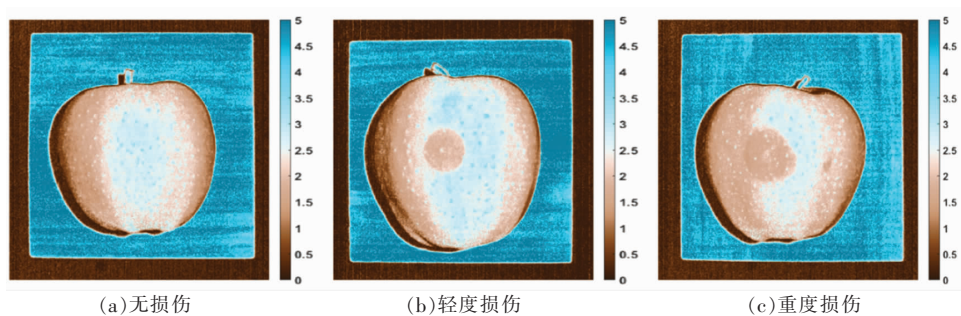


图6 不同损伤程度的金冠苹果 μ_s' 二维分布图

Fig.6 Two-dimensional distribution maps of μ_s' of golden delicious apple with different levels of bruising

显的原因有两种:一是由于表皮太厚,光无法穿透表皮组织,从而对表皮下组织光学特性参数的获取产生一定的阻碍和影响;二是厚果皮对内部组织产生一定的保护作用,使得即使受到碰撞,也由于表皮的保护而改变较小,所以 μ_s' 的变化不明显。而对于如图5d所示的金冠苹果,损伤部位的 μ_s' 值大约在 $1.5\sim 2.2\text{ mm}^{-1}$ 之间,而无损伤部位的 μ_s' 值在 $2.2\sim 3.3\text{ mm}^{-1}$ 之间,损伤和无损伤部位的 μ_s' 值具有明显差异。除了表皮厚度的原因外,波长是另一个潜在的影响因素,试验中采用的 730 nm 不一定完全适用于所有果蔬样品的皮下隐性损伤检测。除此之外,果蔬的表皮颜色对皮下隐性损伤识别与检测的结果也会产生较大影响:果蔬对光的吸收具有选择性,对光的反射、散射、折射、透射的程度也不同,果蔬表皮颜色较暗或者较多咖色胎记均会导致采集到的图片强度较低,给皮下损伤检测带来更大难度。

图6展示了金冠苹果在未损伤、轻度损伤、重度损伤3种状态下 μ_s' 值的二维分布图。轻度损伤由 0.3 J 的小球自由落体造成,重度损伤由 0.6 J 的力造成。不同程度损伤的损伤果在多方面有所区别,例如可以比较 μ_s' 的数值大小,选定感兴趣区域(50×50 像素点),并对此范围内的 μ_s' 值进行统计,统计情况如图7所示,每个直方图中的线条表示该感兴趣区域 μ_s' 值的均值。感兴趣区域内无损伤果的 μ_s' 均值为 2.93 mm^{-1} ,轻度损伤果均值为 1.92 mm^{-1} ,重度损伤果均值为 1.84 mm^{-1} ,据此可以对不同损伤果进行分选。除此之外,损伤面积也可以作为筛选的评定标准之一。如前文所述通过多方面的差异对比,足以将苹果进行三分类甚至四分类的分级,为损伤后的苹果处理(丢弃、捐赠抑

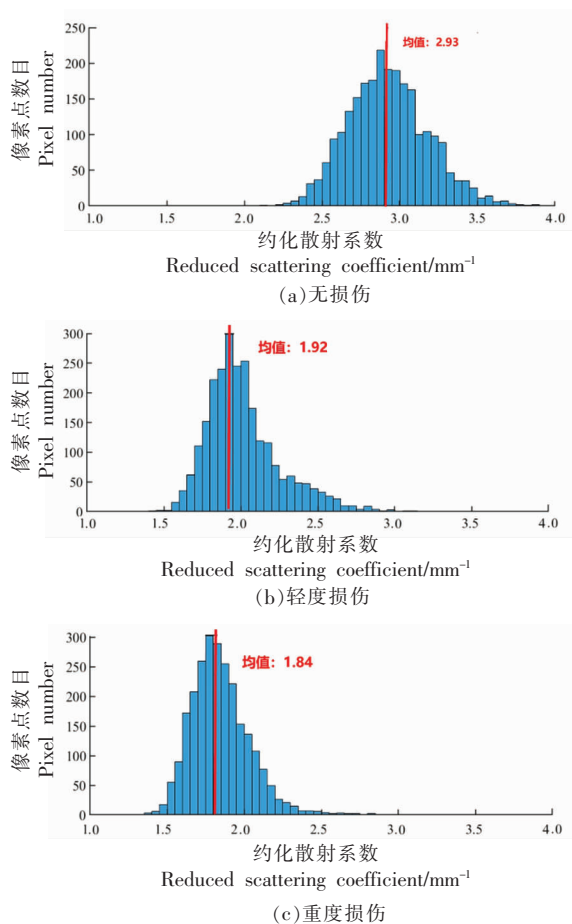


图7 不同损伤程度的金冠苹果 μ_s' 数值像素点数量图

Fig.7 Pixel number diagram of μ_s' of golden delicious apple with different levels of bruising

或低价售卖)提供更多的选择,创造更大的使用价值和经济效益。

3 结论

当果蔬受到机械损伤后,样本组织的化学成

分含量与物理结构均会发生变化,导致其光学特性随之改变,这是皮下隐性损伤检测的基础;而 SFDI 技术具有宽视场、无标记、成像深度和成像分辨率可辨析的特点,在果蔬皮下隐性损伤的检测方面潜力巨大。但是由于各种果蔬组织的物理化学特性不同,所以 SFDI 技术对不同果蔬的皮下隐性损伤检测效果各异。本研究对 10 种不同果蔬的试验结果表明,苹果、桃子等薄皮果蔬可以通过此技术实现皮下隐性损伤检测,而黄瓜、芒果、胡萝卜等果蔬由于果皮厚度、波长选择等原因导致其不适用。后续研究可以通过图像处理等算法增强果蔬皮下隐性损伤特征,拓展 SFDI 技术的适用性,实现更多果蔬的皮下隐性损伤无损检测。

参 考 文 献

- [1] 宋敏,严娅,韩璠烜,等. 食品安全快速检测现状分析与建议[J]. 现代食品, 2022, 28(1): 128-130. SONG M, YAN Y, HAN J X, et al. Current situation analysis and suggestion of food safety rapid detection[J]. Modern Food, 2022, 28(1): 128-130.
- [2] LU R F. Detection of bruises on apples using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Transactions of the ASABE, 2003, 46(2): 523-530.
- [3] 薛建新,张淑娟,赵聪慧,等. 基于梨枣轻微损伤的可见/近红外光谱判别研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(5): 212-215. XUE J X, ZHANG S J, ZHAO C H, et al. Discrimination of pear jujubes based on visible/near-infrared spectroscopy[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(5): 212-215.
- [4] ZHANG S, WU X H, ZHANG S H, et al. An effective method to inspect and classify the bruising degree of apples based on the optical properties[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 127: 44-52.
- [5] LUO X, TAKAHASHI T, KYO K, et al. Wavelength selection in vis/NIR spectra for detection of bruises on apples by ROC analysis[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(3): 457-466.
- [6] JI Y M, SUN L J, LI Y S, et al. Detection of bruised potatoes using hyperspectral imaging technique based on discrete wavelet transform[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 103: 103053.
- [7] LEE W-H, KIM M S, LEE H, et al. Hyperspectral near-infrared imaging for the detection of physical damages of pear[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 130: 1-7.
- [8] FERRARI C, FOCA G, CALVINI R, et al. Fast exploration and classification of large hyperspectral image datasets for early bruise detection on apples[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2015, 146: 108-119.
- [9] 刘晶晶,刘付龙,史铁,等. 高光谱图像技术检测苹果外部损伤[J]. 中国食品学报, 2018, 18(1): 278-284. LIU J J, LIU F L, SHI T, et al. Detection of external damage of apple by hyperspectral image technique[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(1): 278-284.
- [10] CORTÉS V, BLASCO J, ALEIXOS N, et al. Monitoring strategies for quality control of agricultural products using visible and near-infrared spectroscopy: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 85: 138-148.
- [11] LU Y, SAEYS W, KIM M, et al. Hyperspectral imaging technology for quality and safety evaluation of horticultural products: A review and celebration of the past 20-year progress[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 170: 111318.
- [12] MARTINSEN P, OLIVER R, SEELYE R, et al. Quantifying the diffuse reflectance change caused by fresh bruises on apples[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(2): 565-572.
- [13] NICOLA B M, VERLINDEN B E, DESMET M, et al. Time-resolved and continuous wave NIR reflectance spectroscopy to predict soluble solids content and firmness of pear[J]. Postharvest Biology & Technology, 2008, 47(1): 68-74.
- [14] 孙晓林,周童童,孙志忠,等. 光学特性在果蔬品质无损检测中的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(4): 209-218. SUN X L, ZHOU T T, SUN Z Z, et al. Research progress into optical property-based nondestructive fruit and vegetable quality assessment[J]. Food Research and Development, 2022, 43(4): 209-218.
- [15] VANOLI M, RIZZOLO A, GRASSI M, et al. Studies on classification models to discriminate 'Braeburn' apples affected by internal browning using the optical properties measured by time-resolved re-

- flectance spectroscopy [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 91: 112–121.
- [16] SUN Y, HUANG Y P, PAN L Q, et al. Evaluation of the changes in optical properties of peaches with different maturity levels during bruising[J]. *Foods*, 2021, 10(2): 338.
- [17] ZHANG M Y, LI C Y, YANG F Z. Optical properties of blueberry flesh and skin and Monte Carlo multi-layered simulation of light interaction with fruit tissues[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 150: 28–41.
- [18] YANG Z, LI M, EAST A R, et al. Application of absorption and scattering properties obtained through image pre-classification method using a laser backscattering imaging system to detect kiwifruit chilling injury[J]. *Foods*, 2021, 10(7): 1446.
- [19] SUN Z Z, HU D, XIE L J, et al. Detection of early stage bruise in apples using optical property mapping[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 194: 106725.
- [20] HE X M, FU X P, LI T W, et al. Spatial frequency domain imaging for detecting bruises of pears[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2018, 12(2): 1266–1273.
- [21] LU Y Z, LI R, LU R F. Structured-illumination reflectance imaging (SIRI) for enhanced detection of fresh bruises in apples[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 117: 89–93.
- [22] HU D, FU X P, HE X M, et al. Noncontact and wide-field characterization of the absorption and scattering properties of apple fruit using spatial-frequency domain imaging[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 37920.
- [23] 王忠, 胡栋, 孙志忠, 等. 空间频域成像在农产品品质检测中的应用现状与展望[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(15): 275–288.
- WANG Z, HU D, SUN Z Z, et al. Application status and perspective of spatial-frequency domain imaging in quality evaluation of agricultural products [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(15): 275–288.
- [24] CUCCIA D J, BEVILACQUA F, DURKIN A J, et al. Modulated imaging: quantitative analysis and tomography of turbid media in the spatial-frequency domain[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(11): 1354–1356.
- [25] AMAAN, MAZHAR, SEYED, et al. Spatial frequency domain imaging of port wine stain biochemical composition in response to laser therapy: A pilot study[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2012, 44(8): 611–621.
- [26] SINGH-MOON R P, ROBLER D M, BIGIO I J, et al. Spatial mapping of drug delivery to brain tissue using hyperspectral spatial frequency-domain imaging[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(9): 096003.
- [27] NANDY S, MOSTAFA A, KUMAVOR P D, et al. Characterizing optical properties and spatial heterogeneity of human ovarian tissue using spatial frequency domain imaging [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2016, 21(10): 101402.
- [28] ANDERSON E R, CUCCIA D J, DURKIN A J. Detection of bruises on golden delicious apples using spatial-frequency-domain imaging[J]. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2007, 6430: 643010.
- [29] HE X M, HU D, FU X P, et al. Spatial frequency domain imaging for determining absorption and scattering properties of bruised pears based on profile corrected diffused reflectance[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 179: 111570.
- [30] SUN Z Z, XIE L J, HU D, et al. An artificial neural network model for accurate and efficient optical property mapping from spatial-frequency domain images[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 188: 106340.
- [31] LU Y Z, LU R F. Structured-illumination reflectance imaging for the detection of defects in fruit: Analysis of resolution, contrast and depth-resolving features [J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 180: 1–15.
- [32] CEN H Y, LU R F, MENDOZA F A, et al. Assessing multiple quality attributes of peaches using optical absorption and scattering properties[J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(2): 647–657.

Visual Detection of Subsurface Bruising in Fruits and Vegetables Based on Spatial–Frequency Domain Imaging

Huang Xuan, Zhou Tongtong, Sun Zhizhong, Yang Zidong, Sun Tong, Hu Dong*

(College of Optical, Mechanical and Electrical Engineering, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300)

Abstract It is challenging to identify the features of subsurface fresh bruises of fruits and vegetables by traditional uniform imaging techniques due to the mild symptoms. Owing to the capability of depth-varying and signal-enhanced characterization, spatial-frequency domain imaging was used to detect the fresh bruising (within 30 minutes) of 10 kinds of fruits and vegetables (carrot, Fuji apple, cucumber, golden delicious apple, fruit cucumber, delicious apple, mango, yellow peach, rose plum, and honey peach). Through the procedures of image acquisition, image demodulation, whiteboard correction and inverse estimation, optical properties of the fruits and vegetables were obtained. The results indicated that there were great differences of optical properties between non-bruised and bruised samples, with decreased values of reduced scattering coefficients for the bruised ones, which visually realized the non-destructive detection of early bruising. The novel method proposed in this paper is promising for non-destructive detection of early bruising of fruits and vegetables.

Keywords spatial-frequency domain imaging; fruits and vegetables; subsurface bruising; optical properties; nondestructive detection