

基于小波能量谱图的生物散斑技术

孙奇, 詹浣湫, 曹兆楼*, 刘威

南京信息工程大学物理与光电工程学院, 江苏 南京 210044

摘要 生物散斑技术能够无损表征微生物活性, 在农产品品质管控领域受到广泛关注, 然而, 传统散斑图像处理方法不易区分不同生物活性区域, 在质量评估和分类过程中会产生误差。针对此问题, 提出一种基于小波能量谱图的新型图像处理分析方法。首先基于正交小波进行图像分解, 然后提取其低频分量建立能量谱图, 最后计算图像的能量强度分布, 定量分析散斑活动。在市面常见的冰糖心苹果上进行的碰撞实验结果表明, 与传统 Fujii 法、加权广义差分法、改进惯性矩法及小波熵法相比, 所提方法不仅能够揭示苹果生物活性随时间的演变规律, 还通过具有更高对比度和稳定性的指标实现对苹果表面正常区域和碰撞区域的区分。由于所提处理方法可有效识别苹果表皮瘀伤, 有望在水果机械损伤评估领域获得广泛应用。

关键词 成像系统; 激光; 散斑成像; 无损检测; 小波; 数字图像处理

中图分类号 S123; TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213297

Laser Biospeckle Technique Based on Wavelet Energy Spectrum Maps

Sun Qi, Zhan Huanqiu, Cao Zhaolou*, Liu Wei

School of Physics and Optoelectronics, Nanjing University of Information Science and Technology,
Nanjing 210044, Jiangsu, China

Abstract Biological speckle technology can non-destructively characterize the microbial activity and has gained significant attention in the field of agricultural product quality control. However, traditional speckle image processing methods do not readily distinguish various bioactive areas, and errors are generated in the quality assessment and classification process. A new image processing and analysis method based on wavelet energy spectrum is proposed to address this issue. First, the image is decomposed based on an orthogonal wavelet. Subsequently, the low-frequency components are extracted to establish an energy spectrum. Finally, the energy intensity distribution of the image is estimated, and the speckle activity is quantitatively analyzed. The results of collision experiments on the usual rock candy core apples in the market show that, compared with the traditional Fujii method, the weighted generalized difference method, the enhanced moment of inertia method, and the wavelet entropy method, the suggested approach can not only show the evolution law of apple biological activity with time; however, it also realize the distinction between the normal area and the collision area on the apple surface through the index with higher contrast and stability. The suggested approach is anticipated to be extensively employed in the field of fruit mechanical damage assessment since it is effective at identifying bruises in apple skin.

Key words imaging systems; laser; speckle imaging; non-destructive detection; wavelet; digital image processing

1 引言

机械损伤是农产品在采后链中难以规避的问题, 一般 30%~40% 的水果和蔬菜在收获、分类、加工、包装、储存、运输和零售期间极易受到擦伤和其他类型机械损伤的影响, 导致巨大的浪费和经济损失。因此, 在瘀伤形成早期及时发现问题并处理具有可观的经济效

益。然而, 由于摩擦、碰撞程度不同, 瘀伤早期一般不可见, 影响后续分类筛选。

激光生物散斑技术采用高相干性光照射待测生物样品, 样品表面的反射光和经由内表层的散射光在空间中传播产生光程差, 进而相互干涉叠加形成随机分布且明暗相间的不均匀光斑, 具有非侵入性、快速无损的特点, 在种植农业、生物医学、工业制造、食品安全领

收稿日期: 2021-12-21; 修回日期: 2022-01-10; 录用日期: 2022-01-24; 网络首发日期: 2022-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(61605081)

通信作者: *phoenixczl@nuist.edu.cn

域等有广泛的应用,如种子活性评估^[1-2]、材料表面粗糙度分析^[3]、脑血流氧合成像^[4-5]、涂料干燥过程监测^[6]、生物组织黏弹性测量^[7]、离面变形和缺陷检测^[8]等。在农产品品质检测方面,又以常见水果如苹果、梨、橙子的表面损伤检测为主^[9]。例如:Pajuelo等^[10]分析苹果受碰撞部位产生的瘀伤,计算其惯性矩(IM)和自相关系数,采用加权广义差分法(WGD)等定性方法建立瘀伤特征图像;Rahmanian等^[11]利用Fujii法和相关统计特征量显示脐橙在低温和冷冻状态下的组织生物活性;Vega等^[12]收集苹果和梨的时间序列散斑图像(THSP),通过计算其互相关系数,定量测量两种果实生物散斑在时间和空间上的不同活动情况。以上研究表明,激光散斑技术在苹果等常见水果的质量检测方面具有良好的可行性,然而,传统方法处理后的生物活性图像对比度较低,噪声影响严重,不易区分不同程度的损伤区域。

因此,为了提高不同程度损伤区域散斑图像的分度,分析各个区域的散斑活动水平及其演变规律,本文以市面常见的冰糖心苹果为样品,提出一种基于小

波能量谱图的新型处理分析方法,通过小波分解在图像低频分量重构能量谱图,分析其能量强度分布,并研究苹果局部受碰撞后的散斑响应特性。

2 实验过程

2.1 激光散斑图像采集系统

本研究搭建的生物散斑图像采集装置如图1所示。装置包括波长为650 nm、功率为5 mW的半导体激光器(KYD650N5-TS1236)、分辨率为2560 pixel×1920 pixel的CMOS黑白工业相机(Mightex SME-B050-U),帧率为3 frame/s,并配置普通可调倍率工业显微镜镜头,其放大倍率为0.7~4.5,本实验所用倍率为1.2。激光光源照射方向与工业相机视轴呈30°角。工业相机固定安装在一套有效行程为150 mm的电动模组上,可通过计算机控制调整镜头与实验样品的距离。实验时将样品放置在载物台上,首先使用自然光照明调整样品放置位置和相机镜头距离,确保样品待测表面位于镜头景深范围内,然后覆盖遮光布,使用激光照射拍摄散斑图像。

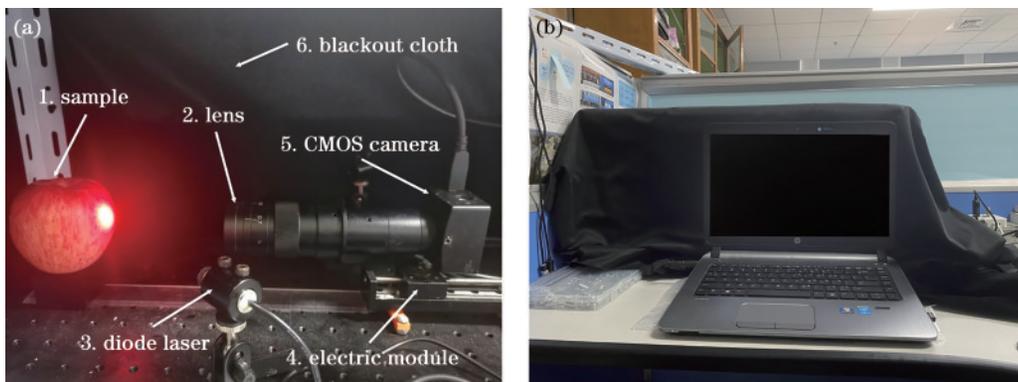


图1 激光散斑图像采集装置。(a)实验平台内部装置;(b)实验平台外观

Fig. 1 Laser speckle image acquisition device. (a) Internal device of experimental platform; (b) appearance of experimental platform

2.2 实验材料和准备

本实验以完好无损的冰糖心苹果作为实验材料,材料购于南京果蔬市场,如图2所示。标记一处

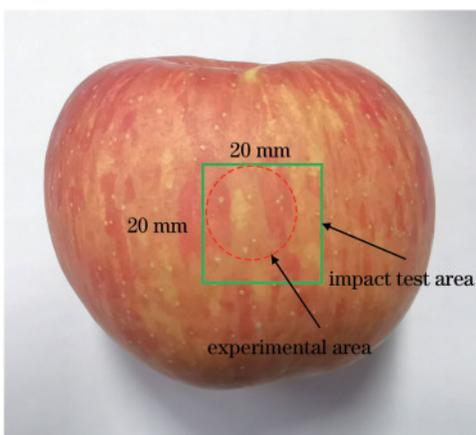


图2 实验区域标注

Fig. 2 Annotated map of experimental area

20 mm×20 mm的正常区域为实验区域,其中虚线框为冲击测试区域,实线框为实验观察区域。为模拟实际的水果运输过程,实验使用一个直径为15 mm、质量约为125 g、中心平滑边缘锐利的金属柱在实验区上方20 cm处自由下落撞击样品,造成损伤。实验时调节激光器光斑大小至完全覆盖损伤区域,分3次采集样品在完好状态下、受冲击损伤后1 h及受冲击损伤后1 d标记区域的散斑图像各100幅,以记录该区域动态散斑变化。由于散斑变化较为缓慢,设置相机曝光时间为20 ms,图像采集时间为30 s。

3 测量原理

对原始动态散斑图像分别使用传统方法WGD法、Fujii法、改进IM法、基于THSP的小波熵法及所提基于小波能量谱图的方法进行处理分析,并通过指标验证比较不同方法的优劣,如图3所示。不同方法的

处理分析均基于MATLAB平台编程实现。

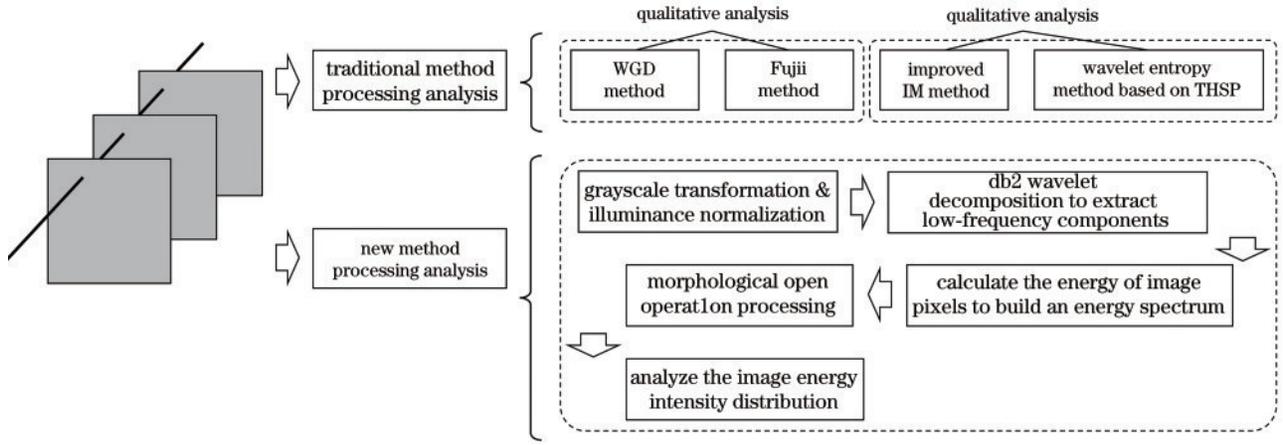


图3 图像处理与分析流程图

Fig. 3 Image processing and analysis flowchart

3.1 传统散斑图像处理方法

传统散斑图像处理方法一般基于时间序列散斑图像实现,提取每一幅散斑灰度图像中固定的某行(列),按照时间顺序排列并重新拼合成一幅新的散斑图像,记为 I_0 。图像的行数表示散斑图像的总数,即采样的时间尺度,图像的列表示提取自某一幅图像的代表行(列),即散斑的空间行为。因此,时间序列散斑图像同时显示了生物散斑活动强度随时间及空间的发展和演变。

IM法^[13]根据时间序列散斑图像构建相应的共生矩阵(C_{OM})^[14]:

$$C_{OM} = [N_{i,j}], \quad (1)$$

式中: i, j 表示 I_0 中的灰度值; $N_{i,j}$ 表示在灰度值 i 后面紧邻出现灰度值 j 的次数,将 $N_{i,j}$ 的值作为图像第 i 行第 j 列的灰度值,最终图像即为 I_0 对应的共生矩阵。共生矩阵一般为8位灰度图像,因此其行、列数一般均为256。当区域活性较高时,散斑变化较为激烈,像素灰度随时间变化较大,导致 C_{OM} 中非零元素偏离主对角线的程度较高,可见偏离程度与区域活性正相关。因此,可通过测算偏离程度定量表征活性,偏离程度越大,区域活性越高。

由于传统IM法易受图像异常值影响,结果的准确性和稳定性较差,蔡健荣等^[15]对其进行改进,以 C_{OM} 中每个元素灰度值在所有元素灰度值总和中的权重作为 C_{OM} 中 $N_{i,j}$ 的发生概率:

$$M_{i,j} = \frac{N_{i,j}}{\sum_{ij} N_{i,j}}, \quad (2)$$

式中: $\sum N_{i,j}$ 表示 C_{OM} 矩阵灰度值的总和。进一步基于式(2)可计算 C_{OM} 中非零元素偏离主对角线的程度,记为 M_1 :

$$M_1 = \sum_{ij} \frac{M_{i,j}(i-j)^2}{2}. \quad (3)$$

当区域活性较低,散斑活动变化较缓慢时, M_1 近

似为零;随着活性增强, M_1 逐步增大。但改进IM法仍需要额外构建共生矩阵,计算效率低,难以实现实时检测。相比之下,传统WGD法和Fujii法运算过程简单,通过对图像进行像素级运算得到散斑在一段时间内的活动变化量,具有更高的计算效率。

Fujii法^[16]计算时间相邻的两幅图像之间灰度强度差的加权和:

$$F(x, y) = \sum_{k=1}^N \frac{|I_k(x, y) - I_{k+1}(x, y)|}{I_k(x, y) + I_{k+1}(x, y)}, \quad (4)$$

式中: N 表示图像序列总图像数; k 代表图像序列当前图像编号,其取值范围为 $1 \sim N$; $I_k(x, y)$ 是图像序列第 k 幅图像像素点 (x, y) 的像素强度值。

WGD法^[17]是广义差分法的一种替代方法,额外引入一个衡量时间信息的权重:

$$D_{wg}(x, y) = \sum_{k=0}^N \sum_{l=k+1}^{k+w} |I_k(x, y) - I_l(x, y)| p_w, \quad (5)$$

式中: w 为控制差分的图像数量,该值的设定依赖于时间尺度的和散斑活动的剧烈程度; p_w 为给定的权重,即对 w 尺度内和尺度外的图像差分并赋以不同的量度。

传统WGD法和Fujii法的计算流程虽然简单,但是仅仅显示实验期间散斑的完整活动,未能反映活动的演变情况。此外,WGD法对样本不同活性区域的区分不够明显,且处理相对耗时。而Fujii法式(4)分母产生的非线性效应使得原始图像中呈现高活性的区域被高度弱化,低活性的区域则相反,这可能导致原来高活性区域的局部细节丢失,低活性区域无关噪声被放大。

3.2 基于小波变换的新型处理方法

传统散斑处理算法难以兼顾计算效率及活性判断效果,且不具备空间分辨能力,在实际应用时功能有限。由于动态散斑有其独特的时频特征,因此可以通过时频变换方法处理^[18],小波分析作为一种能够同时获得图像空域及频域信息的技术,与散斑处理要求一

致,已有研究利用小波熵进行非平稳散斑信号分析,来反映散斑活动的演化特征和空间行为^[19-20]。以此为基,本研究进一步构建小波能量谱图将像素能量与散斑活动相联系,设计新型活性判断指标,提高抗噪声能力,以更好满足实际检测需求。

在利用小波变换处理之前,首先对原始散斑图像进行简单的预处理。将每幅图像像素乘以其与图像序列对应位置像素强度均值的比重,以归一化因光照强度不稳定导致的像素强度差异。由于激光照射面呈中心会聚、边缘发散的不均匀特征,原始散斑图像的灰度分布比较复杂,采用直方图规定化的方法重新确定图像的灰度分布概率^[21]:

$$z = H(r), \quad (6)$$

式中: r 表示原图像的灰度; z 表示符合规定直方图的灰度; H 代表二者之间的变换关系。本研究对原始图像中激光照射边缘灰度赋予较低的概率密度,对照射中心灰度赋予较高的概率密度,以更加直观地获取图像的主要形态结构和灰度信息。

预处理后,利用小波变换分析图像总结散斑的特征信息。由于db小波具有良好的正则性,能在图像的重构中获得良好的平滑效果,减小量化或舍入误差的视觉影响。因此,对预处理后图像利用db2正交小波进行分解。分解过程使用离散小波变换算法,实现被分析信号与小波序列的递归卷积:

$$W_f(a, b) = f \times \psi_{a, b}, \quad (7)$$

式中: f 表示图像信号; $\psi_{a, b}$ 表示小波函数。

已有研究构建 THSP 进行式(7)的小波变换,计算不同列的小波熵值用以表征生物活性变化:

$$E_n = - \sum_{n_c=1}^{N_c} p_c(n_c) \times \ln[p_c(n_c)], \quad (8)$$

式中: N_c 表示小波变换后 THSP 的列数; $p_c(n_c)$ 表示第 n_c 列归一化的能量均值;熵值 E_n 与生物活性呈正相关,即高熵对应高活性,低熵对应低活性。

基于 THSP 的小波熵分析方法相比传统定量分析方法如 IM 法在一定程度上提高了计算效率,但难以避免噪声和异常值的影响。由于散斑活动在空间域的特征变化较为缓慢,因此小波分解后的低频分量是表征散斑信息的主要部分,各高频分量则聚集较多噪声,大部分点的数值均接近 0 可以忽略。由此,所提方法仅提取小波分解后的第 1 层低频分量,建立其能量谱图。能量的表达式为

$$E_b = \sum_{n_b=1}^{N_b} I_n^2(n_b), \quad (9)$$

式中: N_b 表示图像序列总图像数; $I_n(n_b)$ 是第 n_b 幅图像像素的归一化强度值。

形态学开运算^[22]有助于消除散斑图像的细小噪声和异常值,且合适大小的结构元能够强化不同活性区域的图像像素区分度。综合考虑图像颗粒特征和活性

判定效果,本研究对重建的能量谱图利用长度为 10 的线性结构元(S_E)进行先腐蚀(\ominus)后膨胀(\oplus)操作,将开运算处理后的能量谱图用于定量分析。

$$f_{op} = (f_p \ominus S_E) \oplus S_E, \quad (10)$$

式中: f_p 表示由所提方法重建的能量谱图; f_{op} 表示 f_p 经开运算处理后的图像能量谱图。

进一步地,本研究构造能量强度分布(EID)这一指标,用以定量评估图像散斑活动水平。具体做法如下:首先利用式(9)建立未经所提方法处理的原始散斑能量图像;然后截取所提方法处理前和处理后能量图像的不同考察区域组成相应的时间序列能量图像,计算处理后图像与处理前图像的像素能量强度积分作为 EID 结果值:

$$E_{ID} = \frac{1}{1 - \ln \left[\frac{\iint (f_{op})}{\iint (f_0)} \right]}, \quad (11)$$

式中: f_0 为利用式(9)求得的原始散斑能量图像; E_{ID} 代表所提方法处理前后图像局部区域的累积灰度强度变化,与散斑活动呈正相关。

4 结果与分析

使用图 2 所示样品进行图像采集,采集的原始散斑灰度图像如图 4(a)~(c)所示。在冲击后 1 h 的苹果实物图中白色箭头所指位置显示了冲击部位产生的轻微瘀伤,然而目视难以辨认苹果损伤部位和正常部位。散斑图像相比目视观察改善了可视化效果,但图像冲击中心和冲击边缘区域的可视化差异很小,且冲击中心和正常区域基本无异。

由传统的 WGD 法和 Fujii 法处理的结果图像如图 5(a)~(c)所示。从图 5 可以看出,WGD 法对样品不同活性区域的区分不明显。Fujii 法的非线性效应使得原始图像中较亮区域低可视化,丢失了重要的图像细节,而较暗区域中无关噪声的放大将严重影响散斑活动分析。

采用所提基于小波能量谱图的新型方法进行散斑图像处理后获得了高可视化和区分度的散斑能量图像。图 6 展示了受冲击前、受冲击后 1 h、受冲击后 1 d 等 3 个时间段的能量图谱。从图 6 可以看出,冲击中心在最开始散斑能量最低,受冲击后能量明显升高,而冲击边缘在受冲击后其散斑能量显著降低,正常区域的散斑能量基本遵循下降的趋势。

根据传统方法和新型方法的处理结果,计算冲击后 1 h 图像高活性区域和低活性区域的均值及它们之间的对比度(A_c):

$$A_c = \frac{|I_h - I_l|}{I_h + I_l}, \quad (12)$$

式中: I_h 表示图像高活动区域均值; I_l 表示图像低活动

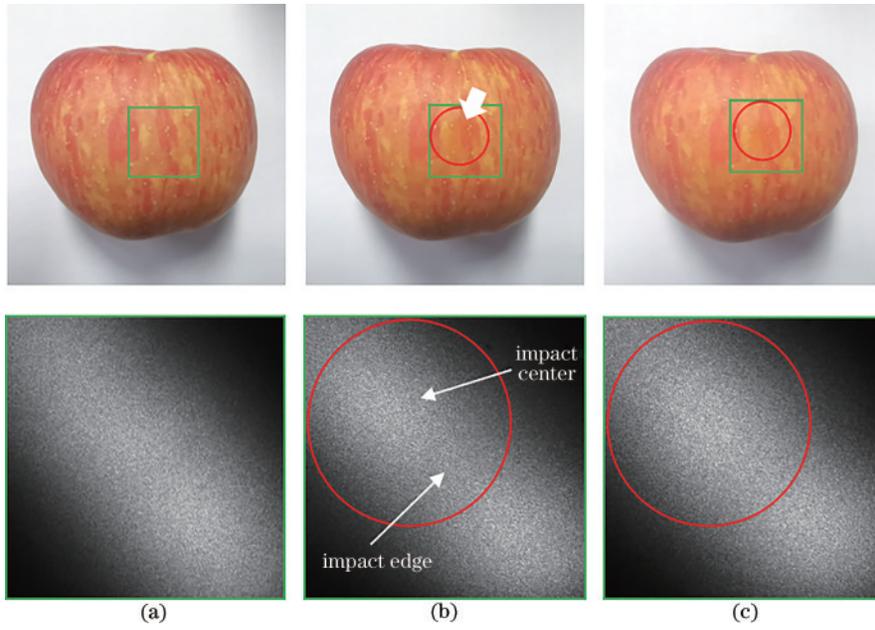


图 4 原始激光散斑图像。(a)冲击前;(b)冲击后 1 h;(c)冲击后 1 d
Fig. 4 Original laser speckle images. (a) Before impact; (b) 1 h after impact; (c) 1 d after impact

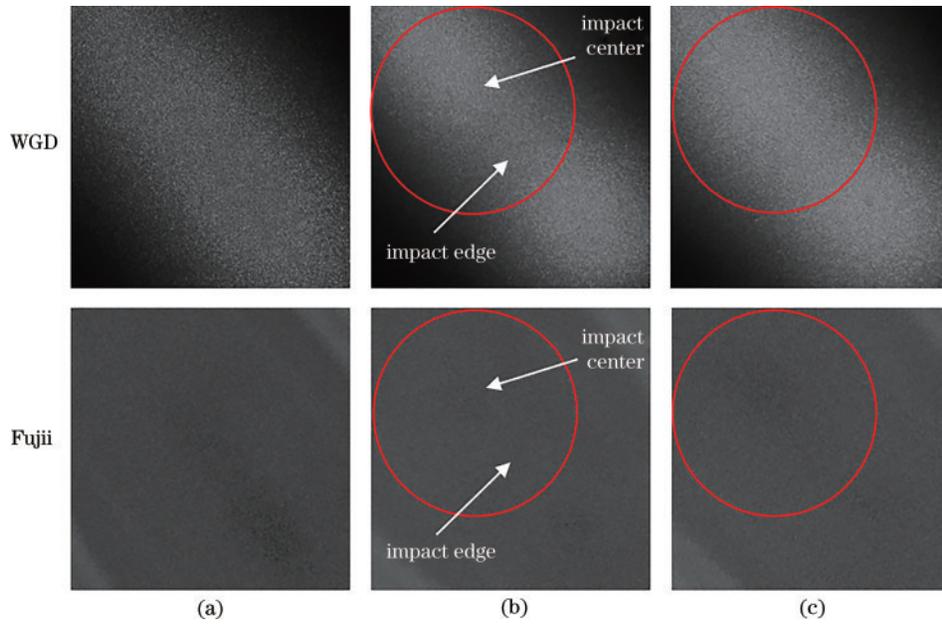


图 5 WGD法和Fujii法处理后的散斑图像。(a)冲击前;(b)冲击后 1 h;(c)冲击后 1 d
Fig. 5 Speckle images processed by WGD method and Fujii method. (a) Before impact; (b) 1 h after impact; (c) 1 d after impact

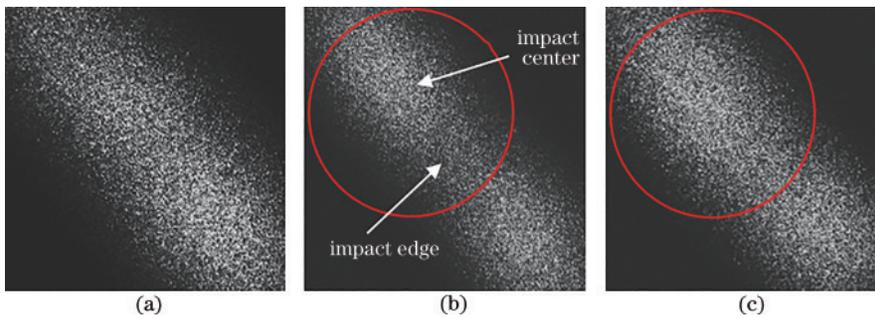


图 6 基于小波能量谱图的新型方法处理后的图像。(a)冲击前;(b)冲击后 1 h;(c)冲击后 1 d
Fig. 6 Speckle images processed by new method based on wavelet energy spectrum. (a) Before impact; (b) 1 h after impact; (c) 1 d after impact

区域均值。不同方法处理后的图像散斑活动差异对比如表 1 所示。表 1 结果表明, WGD 法和 Fujii 法的结果图像与所提方法的能量谱图相比, 后者在高、低活动区域的对比度为 0.35, 高于传统 WGD 法近 6 倍、Fujii 法 35 倍。由此可见, 所提新型方法重建的散斑能量谱图在苹果不同程度损伤区域的灰度差异显著, 更加有利于实际自动化分检程序。

表 1 不同方法处理后的图像散斑活动差异对比

Table 1 Comparison of difference in speckle activity of images processed by different methods

Parameter	Result images of different methods			
	Original image	Fujii image	WGD image	Energy spectrum
I_h	158.71	72.82	106.97	87.88
I_l	141.38	74.38	95.56	42.36
AC	0.06	0.01	0.06	0.35

进一步地, 由于传统 WGD 法和 Fujii 法的缺点在于处理后的结果图像仅仅表征生物散斑在一段时间内总活动变化量, 难以反映其活动的演变规律。因此, 利用改进 IM 指数、基于 THSP 的小波熵指数及所提 EID 进行定量分析, 以帮助散斑检测系统实现自动化评估。为了更加直观地将 EID 指数与改进 IM 指数和小波熵指数进行对比, 分别记录不同程度损伤区域散斑活动的 EID 值、小波熵值和 IM 值随时间的变化趋势, 如图

7~9 所示。

由图 7 可以看出, 苹果不同活性区域散斑能量变化总是存在差异。第 1 次实验开始时, 受冲击前, 冲击中心区域的 EID 最低, 用于对照的正常区域表现为最高的 EID。第 2 次实验时, 冲击发生, 冲击中心区域的 EID 显著升高, 而冲击边缘区域和正常区域的 EID 显著降低, 表明短时间内中心区域的活性升高, 边缘区域的活性降低。这是由于冲击短时间内加剧了中心区域活性粒子的布朗运动, 而冲击边缘区域由于损伤较重导致表皮下组织细胞破裂, 游离水散失。正常区域活性下降明显可能是一定程度上受冲击边缘影响所致。在第 3 次实验过程中, 冲击损伤边缘 EID 大幅回升, 活性基本回归到冲击前水平, 但冲击损伤中心活性仍略有上升, 可能是冲击影响在 1 d 后还未消散。原有正常区域的 EID 略有上升, 但始终低于冲击前的水平, 符合果实成熟过程的一般规律。

从图 8 可以看出, 不同程度损伤区域的小波熵随时间变化的总体趋势与图 7 类似, 显示出对生物活性更高的响应灵敏度, 但其数据波动较大, 容易将噪声和异常值误判为散斑活动。同时其剧烈的数据响应对判定结果也造成一定误解, 如冲击后 1 h 冲击边缘和正常区域活性都表现为急剧跌落, 难以归纳二者之间的差异原因。相比之下, 图 9 改进 IM 法的数值变化趋势基本一致, 难以区分样品的不同程度损伤区域。

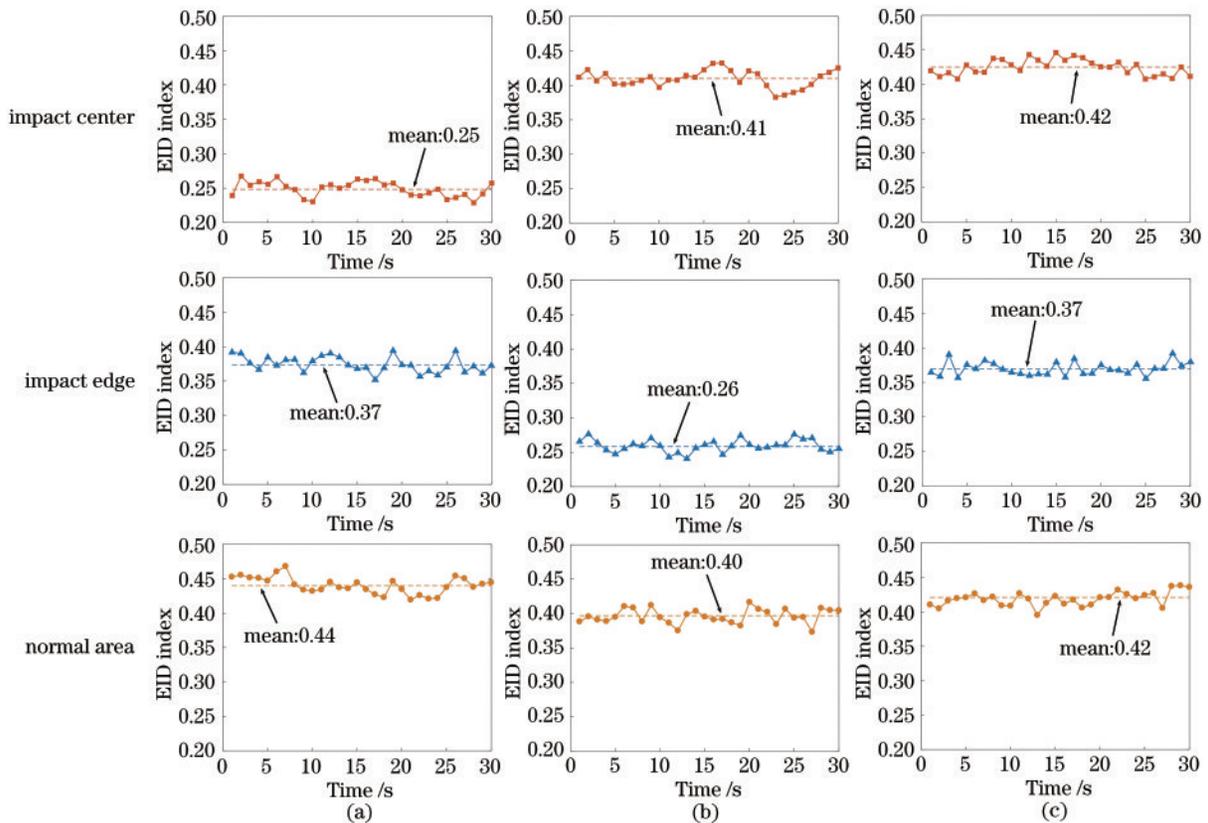


图 7 不同程度损伤区域的 EID 水平。(a) 冲击前; (b) 冲击后 1 h; (c) 冲击后 1 d

Fig. 7 EID levelization in damaged area of different degrees. (a) Before impact; (b) 1 h after impact; (c) 1 d after impact

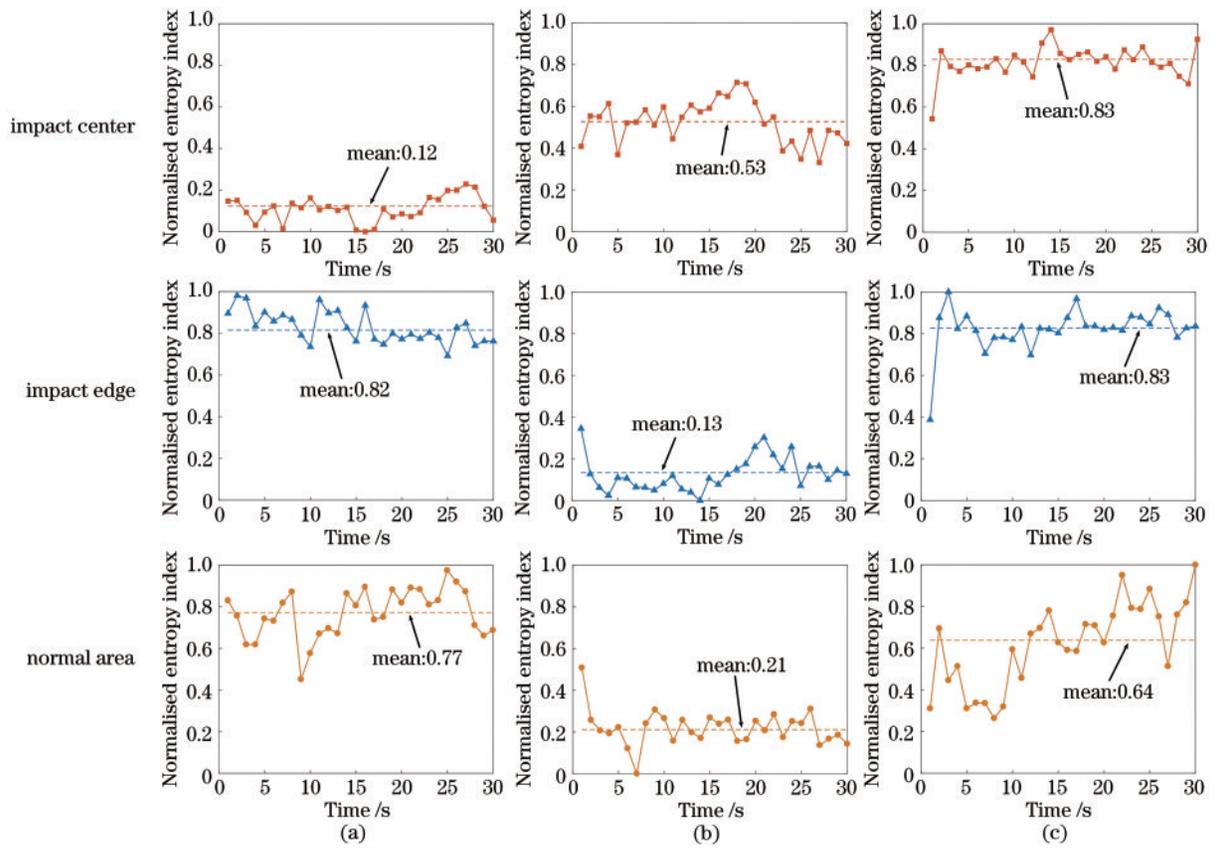


图 8 不同程度损伤区域的小波熵水平。(a)冲击前;(b)冲击后 1 h;(c)冲击后 1 d

Fig. 8 Wavelet entropy levelization in damaged area of different degrees. (a) Before impact; (b) 1 h after impact; (c) 1 d after impact

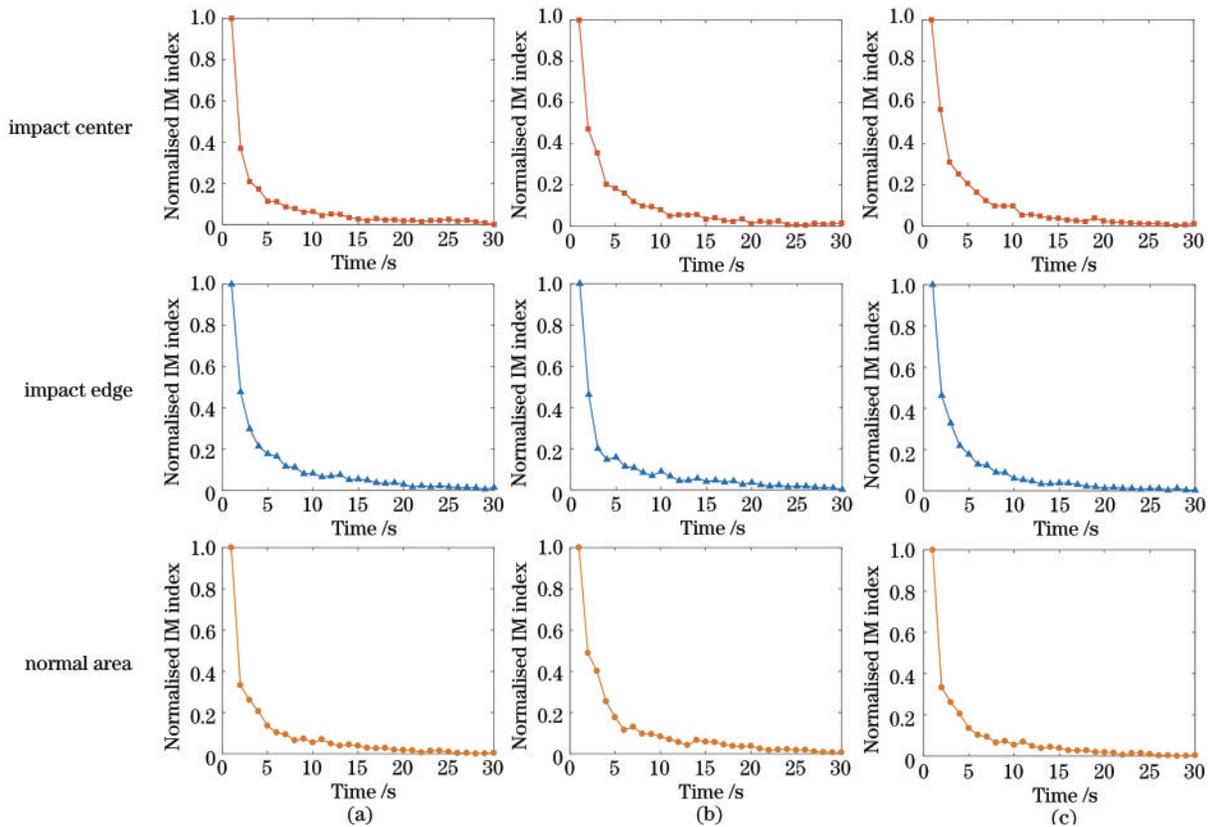


图 9 不同程度损伤区域的 IM 水平。(a)冲击前;(b)冲击后 1 h;(c)冲击后 1 d

Fig. 9 IM levelization in damaged area of different degrees. (a) Before impact; (b) 1 h after impact; (c) 1 d after impact

此外,利用变异系数(CV)和一阶差商(DQ)这 2 个特征值比较 EID 指标、改进 IM 指标、小波熵指标处理结果的稳定性:

$$C_v = \frac{R_s}{R_m}, \quad (13)$$

$$D_Q = \frac{d_v}{d_s}, \quad (14)$$

式中: R_m 表示指标数据的均值; R_s 表示指标数据的标准差; d_s 表示指标数据相邻元素位置的差分; d_v 表示指标数据相邻元素值的差分。 C_v 值和 D_Q 值越大,表明数据抖动越剧烈,稳定性越差。

表 2 列出了冲击中心区域在冲击前、冲击后 1 h、冲击后 1 d 的统计结果,EID 指数在不同程度损伤区域的变异系数是 0.0187、0.0114、0.0179,差商为 0.0160、0.0064、0.0189,总体上远小于改进 IM 指数和小波熵指数,表明 IM 值和熵值在表征苹果表层散斑活动方面波动较大,而 EID 值则比较平滑,说明利用 EID 分析图像的稳定性更好。因此,所提 EID 指标可更加方便应用在实际的自动化分析场景。

表 2 EID 指数、改进 IM 指数和小波熵指数的统计结果
Table 2 Statistical results of EID index, improved IM index, and wavelet entropy index

Method	Parameters	Time		
		Before impact	1 h after impact	1 d after impact
Improved IM index	CV	0.2484	0.1788	0.1472
	DQ	142.9105	150.3229	187.2534
Wavelet Entropy index	CV	0.4798	0.1848	0.1047
	DQ	0.0890	0.0918	0.0781
EID index	CV	0.0187	0.0114	0.0179
	DQ	0.0160	0.0064	0.0189

5 结 论

选取市面常见的冰糖心苹果为研究对象,探究利用图像处理技术对激光散斑图像进行处理和分析的可行性。结果表明:苹果在受冲击后,其碰撞中心活性显著升高,在大约 1 d 后仍保持较高活性水平;其碰撞边缘活性立即降低,并在大约 1 d 后基本恢复冲击前水平。苹果正常区域的活性变化总体表现为缓慢下降,且由于近邻碰撞边缘区域,其活性本身也受到附加影响。

所提基于小波能量谱图的新型散斑处理方法既可显著区分苹果不同程度损伤区域,又可反映不同区域生物散斑活动随时间的演变情况。相比传统 WGD 法和 Fujii 法在高、低活性区域的对比度不足 0.1,所提新型处理方法重建的散斑能量谱图的对比度高达 0.35,可视化区分效果良好。而与改进 IM 指标和小波熵指标相比,所提能量强度分布指标可有效表征苹果不同

程度损伤区域的生物活性,数据稳定性好且计算效率高,有利于实际工程应用。对激光生物散斑技术应用于苹果碰撞损伤检测及相关处理方法的改进进行了探索,有望将所提新型图像处理方法和定量指标向水果质量评估领域深入推广。

参 考 文 献

- [1] Inciarte I, Marti-Lopez L, Ramirez-Miquet E, et al. Processing of speckle patterns by two methods for the measurement of seed desiccation in cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) [J]. *Interciencia*, 2012, 37(9): 644-650.
- [2] Rivera F P, Braga R A, Jr, Iannetta P, et al. Sound as a qualitative index of speckle laser to monitor biological systems[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 158: 271-277.
- [3] 郜魏柯, 杜小平, 王阳, 等. 微粗糙表面参数对激光散斑场的影响规律分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1103001.
Gao W K, Du X P, Wang Y, et al. Analysis of influences of micro-rough surface parameters on laser speckle field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1103001.
- [4] Dunn A K, Devor A, Bolay H, et al. Simultaneous imaging of total cerebral hemoglobin concentration, oxygenation, and blood flow during functional activation [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(1): 28-30.
- [5] Yokoi N, Shimatani Y, Kyoso M, et al. Imaging of blood flow and blood concentration change in a frame rate using laser speckle: methods for image analysis[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 64: 352-362.
- [6] Balamurugan R, Rajarajan G. Study of drying process of paint by dynamic speckle with B/D pixel counting technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 98: 62-68.
- [7] 陈肖, 陆锦玲, 李鹏程. 生物组织黏弹性激光散斑检测方法研究进展[J]. *中国激光*, 2018, 45(2): 0207005.
Chen X, Lu J L, Li P C. Viscoelasticity measurement of biological tissues using laser speckle techniques: a review [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(2): 0207005.
- [8] 孙方圆, 吴双乐, 谢昊天, 等. 大视场马赫-曾德尔空间相移双成像系统[J]. *中国激光*, 2021, 48(7): 0704001.
Sun F Y, Wu S L, Xie H T, et al. Mach-Zehnder-based spatial-phase-shift double-imaging system with large field of view[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 0704001.
- [9] 邓博涵, 陈嘉豪, 胡孟晗, 等. 生物散斑技术在水果品质检测中的应用及图像处理算法进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(9): 090003.
Deng B H, Chen J H, Hu M H, et al. Application and imaging processing algorithm of biospeckle technology in fruit quality detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(9): 090003.
- [10] Pajuelo M, Baldwin G, Rabal H, et al. Bio-speckle assessment of bruising in fruits[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, 40(1/2): 13-24.

- [11] Rahmanian A, Mireei S A, Sadri S, et al. Application of biospeckle laser imaging for early detection of chilling and freezing disorders in orange[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 162: 111118.
- [12] Vega F, Torres M C. Automatic detection of bruises in fruit using Biospeckle techniques[C]//Symposium of Signals, Images and Artificial Vision-2013: STSIVA -, September 11-13, 2013, Bogota, Colombia. New York: IEEE Press, 2013.
- [13] Retheesh R, Samuel B, Radhakrishnan P, et al. Use of laser biospeckle for the evaluation of fruit ripening[J]. *Journal of Pure Applied and Industrial Physics*, 2016, 6(5): 65-70.
- [14] Ansari M Z, Nirala A K. Assessment of biospeckle activity of lemon fruit[J]. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2016, 18(2): 190-200.
- [15] 蔡健荣, 刘梦雷, 孙力, 等. 基于改进惯性矩算法的冷鲜猪肉新鲜度激光散斑图像检测[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(7): 268-274.
- Cai J R, Liu M L, Sun L, et al. Laser speckle image detection of chilled pork freshness based on improved moment of inertia algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(7): 268-274.
- [16] Fujii H, Nohira K, Yamamoto Y, et al. Evaluation of blood flow by laser speckle image sensing. Part 1[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(24): 5321-5325.
- [17] Arizaga R A, Cap N L, Rabal H J, et al. Display of local activity using dynamical speckle patterns[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(2): 287-294.
- [18] 王利国, 李亚清, 巩蕾, 等. 基于动态散斑时频特性的合作目标微动参数反演[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0228001.
- Wang L G, Li Y Q, Gong L, et al. Inversion algorithm for micro-motion parameters of a cooperative target based on time-frequency feature of dynamic speckle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0228001.
- [19] Braga R A, Jr, Horgan G W, Enes A M, et al. Biological feature isolation by wavelets in biospeckle laser images[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2007, 58(2): 123-132.
- [20] Passoni I, Dai Pra A, Rabal H, et al. Dynamic speckle processing using wavelets based entropy[J]. *Optics Communications*, 2005, 246(1/2/3): 219-228.
- [21] 王丽杰, 杨羽翼. 利用主成分权重重置实现牛奶成分浓度快速检测中近红外光谱的净化去噪[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1030003.
- Wang L J, Yang Y Y. Purification and noise elimination of near infrared spectrum in rapid detection of milk components concentration by using principal component weight resetting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1030003.
- [22] 拉斐尔·C·冈萨雷斯, 理查德·E·伍兹. 数字图像处理[M]. 3版. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 北京: 电子工业出版社, 2017: 404-411.
- Gonzalez R C, Woods R E. *Digital image processing*[M]. 3rd ed. Ruan Q Q, Ruan Y Z, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017: 404-411.