

生物散斑技术及其在食品领域中的应用

阿丽雅, 朱嘉敏, 高媛, 秦立刚, 陈倩*

(东北农业大学食品学院 哈尔滨 150030)

摘要 生物散斑技术是一种高效、经济的无损检测技术,可通过测量光干涉的变化来描述被测物品的生物活性区域。通过散斑活性反映被测物品表面及内部组织状态,可实时定性或定量地提供被测物品相关信息。本文介绍了生物散斑技术的基本原理及散斑图像分析方法,综述生物散斑技术在食品领域中的应用情况,并对该技术今后的应用进行展望。

关键词 无损检测技术;生物散斑激光;原理;散斑图像分析方法;应用

文章编号 1009-7848(2022)06-0414-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.06.042

近年来,食品领域相关检测技术不断发展,其中无损检测技术因检测时不会对被测物品造成损伤,且具有高效、经济等特点而得以广泛应用^[1]。目前常用的光学无损检测技术包括近红外光谱技术、振动光谱技术、高光谱成像技术、拉曼光谱技术等^[2]。从应用现状来看,上述技术均存在一定的局限性,例如近红外光谱技术因仪器零件不精密、缺少一致性设计而难以建立稳定模型^[3];振动光谱技术灵敏度较低,需要较多的校准装置才可准确检测食品质量^[4];高光谱成像技术对检测环境要求较高、仪器不便携,难以用于现场快速检测,且所得数据冗余,不能及时获取有效信息^[5];拉曼光谱技术在光谱预处理和建立数学模型等方面仍需结合化学计量学才能达到检测效果^[6]。

生物散斑技术作为一种新兴的无损检测技术,因其设备简单,能够实时处理并定性或定量地反映被测物品的生物或物理信息,故在食品领域有广泛应用。本文介绍生物散斑技术的原理及散斑图像分析方法,综述该技术在食品领域中的应用及未来面临的挑战,为生物散斑技术的进一步开发及应用提供参考。

1 生物散斑技术概述

生物散斑技术检测过程高效、经济,成像装置简单^[7],与其它光学技术相比,生物散斑技术的主要优势在于能通过测量光照射被测物品后所发生的变化来描述被测物品的生物活性区域,提供多光谱技术难以观察获得的信息^[8]。在激光波长、观察距离、统计方法等参数相同的条件下,生物散斑图像的强度、对比度和斑点颗粒大小(亮斑大小)取决于被测物品表面及内部的状态^[9]。因此,生物散斑图像可以看作是被测物品组织表面及内部的指纹图谱^[10]。

1.1 基本原理

生物散斑技术是一种由激光照射到被测物品,从而发生折射与反射来反映被测物品各种信息的光学无损检测技术^[11]。当激光照射到生物组织时,它会随机发生向各个方向的散射、吸收或透射等现象,如图 1 所示。这些现象取决于入射光的波长和被测物品的材料特性^[12],据此形成高对比度的颗粒状图像,称为生物散斑图像^[13]。根据散斑图像将生物散斑技术分为两类^[14]:一是,只获取一幅图像,经图像分析得出结果的称为静态生物散斑,如图 2a 所示;二是,以拍摄视频的形式获取图像序列并对其进行定性或定量分析的称为动态生物散斑,如图 2b 所示。常规图像处理方式都可采用静态生物散斑进行分析,而动态散斑的视觉外观类似于沸腾液体的表面,其复杂的现象可通过量化散斑图像随时间变化的方法来表征生物变化。生物散斑图像的变化被定义为生物散斑活性,其与被测物品表面及内部组织状态密切相关^[15]。

收稿日期: 2021-06-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31972139);黑龙江省自然科学基金优秀青年基金项目(YQ2020C012);黑龙江省博士后科研启动基金项目(LBH-Q20007)

作者简介: 阿丽雅(2000—),女,本科生

通信作者: 陈倩 E-mail: chenqianego7@126.com

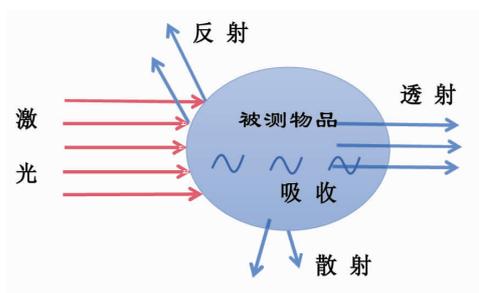


图 1 激光与被测物品间的相互作用

Fig.1 The interaction between the laser and the object

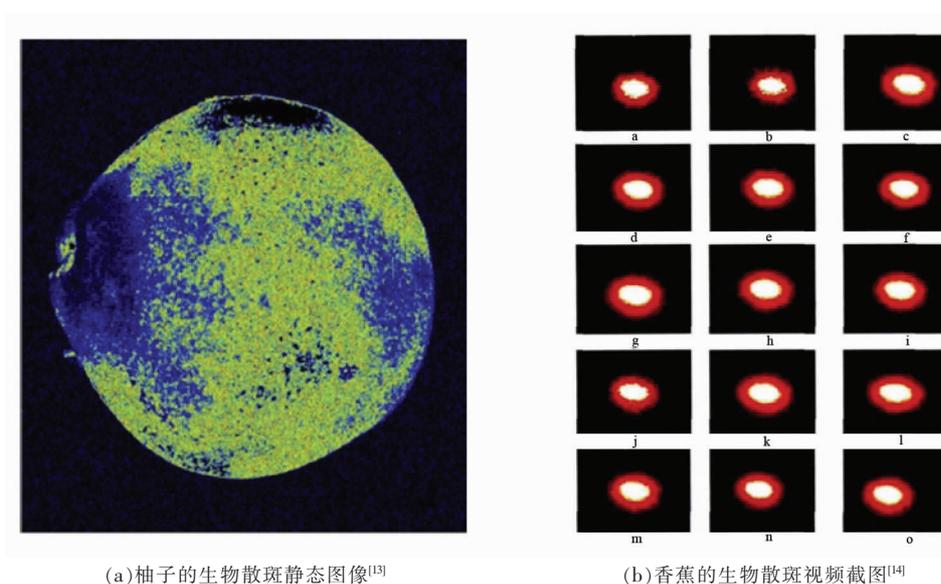
(a) 柚子的生物散斑静态图像^[13](b) 香蕉的生物散斑视频截图^[14]

图 2 生物散斑图像

Fig.2 Images of biological speckles

1.2 技术装置

生物散斑技术的装置结构相对简单,主要包括激光发射器、相机及计算机(图像处理系统)。如图 3 所示,根据激光发射装置与相机的位置,可分为反射型和透射型两种^[6];反射型装置中激光发射器与相机在同侧,相机接收由物体反射的光线。另外,根据检测情况可加入镜子、扩束镜等装置以获取较佳的图像效果^[17]。反射型装置多用于固态或半固态样品的检测,如苹果^[18]、种子^[19]等;而透射型装置中相机置于样品后侧,可以接受激光穿透样品的光线,因此待测样品的厚度越小透射成像效果会越好^[20]。透射型装置应用相对较少,主要用于非固态样品的检测,如鉴定液体培养基中微生物的种类^[21]、监测种子根部生长情况^[22]等。检测前需对激光波长、样品与相机的距离、角度及相机光

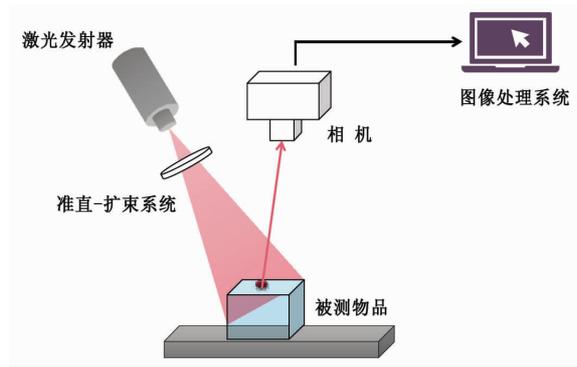
圈等进行设置,一般静态散斑图像会受光入射角度的直接影响,而动态散斑图像则与该角度无关^[23]。

1.3 生物散斑图像分析方法

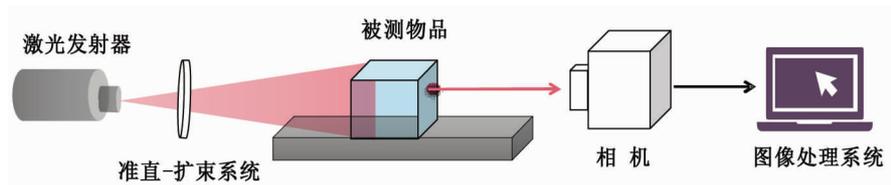
分析生物散斑图像的方法分为定性分析和定量分析,其中定性分析方法包括 Fujii 法、时间差分法(TD)、激光散斑空间对比分析法(LASCA)、激光散斑时间对比分析法(LASTCA)等;定量分析方法包括惯性矩阵法(IM)、绝对值差分法(AVD)、广义差分法(GD)等。

1.3.1 Fujii 法 Fujii 法是通过计算相邻时间的图像间各点灰度值强度差的加权和,反映不同点强度差的变化^[24],计算公式如下:

$$D_{(n)} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{|I_{t(i)} - I_{t+1(i)}|}{|I_{t(i)} - I_{t+1(i)}|} \quad (1)$$



(a)反射型生物散斑技术装置



(b)透射型生物散斑技术装置

图3 生物散斑技术装置

Fig.3 Biological speckle technology devices

式中: $D(n)$ ——强度差的和; I ——某一帧的灰度值,如 $I_{t(i)}$ 为 t 时刻 i_1 点的灰度值; n ——生物散斑图像总帧数; t ——不同的帧数,取值范围为 $1\sim n$ 。

1.3.2 时间差分法(TD) TD法可按照时间顺序记录生物散斑图像,通过计算连续时间内图像的绝对差值得到处理图^[25],计算公式如下:

$$T_{D(x,y)} = \sum_{t=1}^{n-1} |I_t(x,y) - I_{t+1}(x,y)| \quad (2)$$

式中: $I_{t(x,y)}$ —— t 时刻 (x,y) 位置的像素值; n ——总帧数; t ——不同帧数,取值范围为 $1\sim(n-1)$ 。

1.3.3 激光散斑空间对比分析法(LASCA) 多图像分析会降低图像的分辨率,而LASCA法可进行单图像分析并快速地绘制出生物散斑图像,因此其主要优点是所需数据量较少,仅由一幅图像即可获得处理图;其缺点是一旦相机的曝光时间设置不当则很难得到效果较好的处理图,且处理图清晰度不高^[26]。

1.3.4 激光散斑时间对比分析法(LASTCA) LASTCA法是分析生物散斑图像中的所有像素点

在一段时间内的变化从而获得对比图像,且所得图像分辨率是LASCA的5倍^[27]。

1.3.5 惯性矩阵法(IM) IM法是对一幅时间序列生物散斑图像形成共生矩阵,计算公式如下:

$$C_{om} = [N_{I_1, I_2}] \quad (3)$$

式中: N —— I_1 值后面接着出现 I_2 值的次数; I_1, I_2 ——像素点的灰度值。时间序列生物散斑图像反映的是生物散斑中的局部信息,如某一行/列的散斑随时间的变化,在此基础上形成的共生矩阵则通过将 N 值赋给其中第 I_1 行、第 I_2 列元素的计算来表征生物活性^[29]。

1.3.6 绝对差分法(AVD) AVD法通常可替代IM法,基于差异总和作为主要信息,再结合IM法能够放大时间的历史变化^[28],计算公式如下:

$$A_{VD} = \sum_{I_1, I_2} (C_{om}[I_1, I_2] \times |I_1 - I_2|) \quad (4)$$

式中: I_1, I_2 ——像素点的灰度值; $COM[I_1, I_2]$ ——对应的共生矩阵。

1.3.7 广义差分法(GD) GD法是对图像中所有像素点进行统计处理,不同帧数下各点灰度值变化越大,则强度差越大,计算强度差的和就能得到

各点之间强度变化的差异^[18],计算公式如下:

$$D_G = \sum_{i_1=0}^{n-1} \sum_{i_2=i_1+1}^{n-1} |x_{i_1} - x_{i_2}| \quad (5)$$

式中: D_G ——强度差的和; i_1, i_2 ——图中像素点的顺序编号; x_{i_1}, x_{i_2} —— i_1, i_2 像素点的坐标,取值范围为 $0 \sim (n-1)$; n ——生物散斑图像的总帧数。

2 生物散斑技术在食品领域中的应用

2.1 水果品质评价

利用相关图像分析方法分析随时间变化形成的生物散斑图像即可对水果进行无损质量评价^[30-31]。Vega 等^[32]采用生物散斑技术在 1 min 内对 30 个具有损伤的苹果和梨的样本进行检测,并分析了生物散斑图像的变化。结果表明,苹果和梨损伤前生物散斑活性较高,损伤后散斑活性即刻降低;Yan 等^[33]采用生物散斑技术对苹果的受损部位进行检测,采用了 Fujii、GD、LSTCA 3 种方法对散斑图像进行分析。结果表明,3 种分析方法获得的散斑强度均随受损时间的延长而减小,说明受损部位的生物散斑活性随受损时间的推移而降低。Blotta 等^[34]用钢球撞击苹果模拟苹果所受的机械损伤,根据生物散斑技术所获得的散斑图像可知,苹果样品损伤部位呈高强度灰色,而未受损伤的部位呈中强度灰色,灰色强度越高说明该部位生物散斑活性越高。Ansari 等^[35]也采用生物散斑技术测定并计算了苹果贮藏过程中果实新鲜度和生物散斑活性的相关系数,结果表明苹果样品的新鲜度与生物散斑活性有较强的相关性,其相关系数为 0.98。因此,生物散斑技术能够用于水果品质的评价。另外,Szymanska 等^[36]利用生物散斑技术对收获前的苹果进行监测,并且测定了苹果的硬度、酸度、淀粉和可溶性固形物含量。结果表明,随着苹果不断成熟,其中的可溶固形物增加,淀粉和硬度略有下降,生物散斑活性增加。苹果的生物散斑活性与可溶性固形物含量、淀粉含量和硬度的相关系数分别为 0.91, -0.80, -0.89, 该结果表明生物散斑活性与可溶性固形物含量、淀粉含量和硬度存在较强的相关性。该方法有潜力用于收获前期对苹果品质的无损评价,并且可用于对苹果采收日期的预测。刘家玮等^[37]利用生物散斑技术研究了无损鲜枣和损伤枣的图像散斑活性随时间变化

的规律,结果表明,枣的生物散斑活性不仅随贮藏时间发生较大变化,而且无损鲜枣和损伤枣的变化趋势存在显著差异。因此该法可用于枣的品质分级,并有望用来对其它类果蔬进行品质分级。

变粉是水果后熟过程中品质劣变的现象之一,通常表现为咀嚼时口感柔软、口干、粒状或粉状^[38]。Arefi 等^[39]利用生物散斑技术对苹果的粉状度进行检测,他们将 540 个苹果样品在 $(0 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(85 \pm 5)\%$ 条件下贮藏,然后分别于第 0, 30, 60, 120, 150 天在 680 nm 和 780 nm 的波长处对样品进行生物散斑图像的采集,并且对苹果硬度和多汁性进行测定。结果表明在 680 nm 波长所获得的生物散斑活性更高,并且新鲜苹果的生物散斑活性高于粉状或半粉状苹果的生物散斑活性。贮藏 5 个月后的苹果,其酸味和硬度也显著降低,据此建立了生物散斑技术在水果粉状度检测的方法。

2.2 肉类成熟过程中品质评价

生物散斑技术可作为肉类成熟过程中品质评价的有效工具,特别是在嫩度和色泽方面具有很大的潜力。Maksymenko 等^[40]采用生物散斑技术对屠宰后猪肉及鸡肉的肌肉组织结构变化进行了评估,研究了在 $-4 \sim 4^\circ\text{C}$ 贮藏条件下猪肉(贮藏 144 h)和鸡肉(贮藏 48 h)生物散斑活性以及肌肉组织的降解情况。结果表明,生物散斑活性的降低与肌纤维断裂、核变形、核染色质减少及线粒体受损有关,生物散斑活性系数可作为肌肉组织结构变化的定量指标。Amaral 等^[41]采用生物散斑技术对月龄为 21 d 的牛胸长肌样品进行检测并测定其剪切力和颜色,结果表明剪切力与生物散斑激光具有相关性,其相关系数为 0.6146。此外,牛肉样品在空气中暴露 30 min 后测得生物散斑图像与其中高铁肌红蛋白含量变化的相关系数为 -0.9119,说明生物散斑技术具有评价肉色品质的潜力。由于不同解剖学部位的肌肉质构特性差异较大,因此不能用同一个生物散斑活性模型对所有肉质进行分析。针对此问题,重庆利等^[42]分别采用斜率/截距法(S/B)和 Kennard-Stone(K-S)样本添加法来改进已建立的一种预测模型,并将所得模型应用于牛里脊肉和牛腱子肉的质构分析。结果表明,基于 K-S 样本添加法改进的模型能够提高生物散

斑技术对肌肉质构特性的分析精度。该团队的研究同时说明可采用不同方法来强化生物散斑技术的分析结果,例如金曼等^[43]在使用生物散斑技术的同时结合了三维成像来分析牛肉的硬度、咀嚼性等质构特性,其预测相关系数分别可达到 0.9444 和 0.9288,增强了生物散斑技术的预测效果。

2.3 水果蔬菜成熟度检测

果实成熟过程中的细胞质流动、细胞器运动、细胞生长和分裂以及生化反应等过程都会对生物散斑活性产生影响^[44],因此生物散斑技术可应用于水果蔬菜成熟度的检测。例如 Romero 等^[45]探讨了生物散斑技术在测定不同品系番茄成熟度的有效性,通过分析随时间变化的生物散斑图像、散射光的强度以及散斑图像的平均灰度确定各品系番茄成熟度的差异。此外,基于生物散斑活性与水果硬度、淀粉含量、总可溶性固形物含量间的高度相关性,并结合其它成熟度指标可以建立水果蔬菜成熟度的无损检测方法,确定其最佳的采收期^[46]。Nassif 等^[47]通过建立散斑图像反映绿梨内部葡萄糖水平,结果表明葡萄糖浓度越高图像中斑点越小。Rabelo 等^[48]通过对柑橘果实的散斑图像分析,并对其进行量化,然后研究其与总可溶性固形物、总酸度、穿透力和贮藏期等参数的相关性。结果表明,在成熟过程中,这些数值均呈下降趋势,证明量化后数值可以作为果实品质和成熟度的指标。吴海伦^[49]基于生物散斑技术建立对中熟品种和晚熟品种苹果采摘后和贮藏期间硬度、可溶性固形物等品质指标的预测模型,确定 650 nm 波长、20 mW 功率的半导体激光光源所得散斑效果最好。同时,借助生物散斑技术建立的模型,研制出一种苹果无损检测分级仪器,这对采后苹果分级、保证苹果质量以及提高苹果经济效益等方面都有着重要意义。此外,生物散斑技术可检测水果的整体情况,对确定贮藏条件和货架期也具有一定的指导作用^[50]。

2.4 微生物检测

生物散斑技术还可应用于微生物的检测。Pieczywek 等^[51]分别用生物散斑、高光谱成像和叶绿素荧光 3 种方法对苹果在贮藏过程中假单胞菌污染情况进行检测,可视化的生物散斑活动空间

揭示了苹果中假单胞菌的变化情况,且比超光谱成像更加精细,比叶绿体荧光法更早地检测出微生物的污染。采用惯性矩阵频率值分析能够加强生物散斑技术在微生物检测的应用,Rabelo 等^[52]结合了惯性矩阵和时空散斑信号的频率值对黄孢杆菌、稻瘟菌及刺孢杆菌污染的大豆种子的生物散斑图像进行分析,通过频率分析能够使生物散斑技术所提供的大豆种子微生物污染的相关信息更加完整。此外,Viana 等^[53]在监测苹果醋发酵过程时也采用了该技术,不仅很好的检测出相关微生物的数量,而且减少了混合接种发酵过程中检测微生物时原有的繁琐步骤。可见,生物散斑技术在微生物检测环节中可节约能源和减少投资。

3 结语

生物散斑技术作为一种新型无损检测技术以其快速、实时、低成本等优势被广泛应用于农业、医学等领域,特别是在水果品质评价、肉类成熟过程中品质评价、水果蔬菜的成熟度检测以及微生物检测等食品领域的应用也日益增多。生物散斑活性与生物组织密切相关,利用该技术进行定性或定量的无损检测,快速确定农产品的采收期,对食品进行品质分级,实现生产和贮藏全程实时控制等,这些对保证食品的质量及安全具有重要意义。

目前生物散斑技术还存在一定的局限性:1)生物散斑激光光源选择不当会导致系统光路冗余,测量结果误差较大,若能减少系统光路则有利于系统可移植性的提高^[54]。常见的激光发射器有氩氦激光器,该设备具有工作性质稳定、使用寿命较长的特点,但传输性能较差;另有二极管激光器,该设备具有多种波长,且体积小、可节约成本,但其输出功率小,线性差、单色性不太好。因此,激光发射器是获得优质生物散斑图像及分析结果的关键,选择适当的激光发射器是提高生物散斑技术在不同产品中适用性的根本。2)此外,生物散斑图像会因试验所选相关参数的不同而产生较大差异,因此在使用生物散斑技术过程中相关参数需要进行优化^[55],加强该项技术的稳健性及动态性能有利于提高其检测准确度。3)虽然生物散斑技术适用性相对较强,但缺乏标准仍是限制其应用

的主要因素。目前为止还没有一种通用的检测方法或独立稳定、便于携带的设备能应用到食品领域中的各项检测。4)被测物品自身特性会影响生物散斑激光的穿透力从而限制其检测深度,这就导致一些果实核心的生物散斑图像难以绘制。图像分析技术的改进和数据处理能力的提升均有利于最大限度地避免相关干扰,因此需要从硬件和软件进行双向优化以突破生物散斑技术的局限性,从而进一步推动生物散斑技术在食品领域以及其它更多潜在领域中的应用。

参 考 文 献

- [1] 马昕. 无损检测在食品品质检测中的运用[J]. 现代食品, 2020, 6(14): 130-132.
MA X. Application of non-destructive testing in food quality testing[J]. Modern Food, 2020, 6(14): 130-132.
- [2] 毛晓婷. 光谱分析技术在食品及医药检测上的应用[D]. 杭州: 中国计量学院, 2016.
MAO X T. Application of spectral analysis technology in food and medicine testing[D]. Hangzhou: China Institute of Jiliang, 2016.
- [3] 伍琳琳, 蒋萍萍, 杨洋, 等. 光谱技术检测乳制品品质的研究进展[J]. 中国乳品工业, 2020, 48(7): 37-41.
WU L L, JIANG P P, YANG Y, et al. Current status and recent advances in research and application of spectroscopy technology in dairy products[J]. China Dairy Industry, 2020, 48(7): 37-41.
- [4] 王飞翔, 谢安国, 康怀彬, 等. 食品光谱图像无损检测技术实用化方向研究进展[J]. 农产品加工, 2019, 18(13): 74-78.
WANG F X, XIE A G, KANG H B, et al. Research progress on the practical direction of non-destructive testing technology for food spectral images [J]. Agricultural Products Processing, 2019, 18(13): 74-78.
- [5] 张义志, 王瑞, 张伟峰, 等. 高光谱技术检测农产品成熟度研究进展[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(12): 5-8, 12.
ZHANG Y Z, WANG R, ZHANG W F, et al. Research progress of hyperspectral technology for detection of agricultural products maturity[J]. Hubei Agricultural Science, 2020, 59(12): 5-8, 12.
- [6] 刘晨, 陈复生, 夏义苗, 等. 拉曼光谱技术在食品分析中的应用[J]. 食品工业, 2020, 41(4): 267-271.
LIU C, CHEN F S, XIA Y M, et al. Analysis in food using raman spectroscopy [J]. Food Industry, 2020, 41(4): 267-271.
- [7] BHATTACHARYA I, LITESH B, CHAKRABARTIS, et al. Advances in optical science and engineering[J]. Springer Nature, 2017, 149(194): 389-394.
- [8] SUTTON D B, PUNJA Z K. Investigating biospeckle laser analysis as a diagnostic method to assess sprouting damage in wheat seeds[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 35(141): 238-247.
- [9] DOAA Y, HATEM E G, HAMED K, et al. Estimation of articular cartilage surface roughness using gray-level co-occurrence matrix of laser speckle image[J]. Materials, 2017, 10(7): 714.
- [10] GOCH G, PREKEL H, PATZELT S, et al. Precise alignment of workpieces using speckle patterns as optical fingerprints [J]. CIRP Annals -Manufacturing Technology, 2005, 54(1): 523-526.
- [11] 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): 27-40.
DENG B H, CHEN J H, HU M H, et al. Application and imaging processing algorithms of biospeckle technology in fruit quality detection [J]. Advances in Lasers and Optoelectronics, 2019, 56(9): 27-40.
- [12] ROMANO G, NAGLE M, ARGYROPOULOS D, et al. Laser light backscattering to monitor moisture content, soluble solid content and hardness of apple tissue during drying[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(4): 657-662.
- [13] 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, 30(162): 2-6.
- [14] 胡孟晗, 董庆利, 刘宝林, 等. 生物散斑技术在农产品品质分析中的应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 284-292.
HU M H, DONG Q L, LIU B L, et al. Application of biospeckle on analysis of agricultural prod-

- ucts quality[J]. *Chinese Journal of Agricultural Engineering*, 2013, 29(24): 284–292.
- [15] CECILIA M, BUDINI N, VINCITORIO F M, et al. Biospeckle activity evolution of strawberries[J]. *SOP Transactions on Applied Physics*, 2014, 1(2): 65–73.
- [16] ZDUNEK A, ADAMIAK A, PIECZYWEK P M, et al. The biospeckle method for the investigation of agricultural crops: A review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 35(52): 276–285.
- [17] ALVES J A, BRAGA R A. Identification of respiration rate and water activity change in fresh-cut carrots using biospeckle laser and frequency approach [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 23(86): 381–386.
- [18] KUMARI S, NIRALA A K. Biospeckle technique for the non-destructive differentiation of bruised and fresh regions of an Indian apple using intensity-based algorithms[J]. *Laser Phys*, 2016, 26(11): 1–6.
- [19] SUTTON D B, PUNJA Z K. Investigating biospeckle laser analysis as a diagnostic method to assess sprouting damage in wheat seeds[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 35(141): 238–247.
- [20] FRACAROLLI J A, ENES A M, FABBRO D, et al. Laser Transmission through vegetative material[J]. *World Academy of Science Engineering & Technology*, 2012, 6(10): 892–894.
- [21] ZHENG B, PLEASS C, IH C. Feature information extraction from dynamic biospeckle[J]. *Applied Optics*, 1994, 15(33): 231–237.
- [22] BRAGA R A, DUPUY L, PASQUAL M, et al. Live biospeckle laser imaging of root tissues[J]. *European Biophysics Journal Ebj*, 2009, 26(38): 679–686.
- [23] SKIC A, SZYMAŃ S C, KRUK M, et al. Determination of the optimum harvest window for apples using the non-destructive biospeckle method[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 661.
- [24] MINZ P D, NIRALA A K. Bio-activity assessment of fruits using generalized difference and parameterized Fujii method[J]. *Optik*, 2014, 125(1): 314–317.
- [25] PREETI D M, NIRALA A K. Intensity based algorithms for biospeckle analysis[J]. *Optik*, 2014, 125(14): 3633–3636.
- [26] 石本义, 毕昆, 陈四海, 等. 激光散斑技术在农产品检测中的应用[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(2): 410–415.
- SHI B Y, BI K, CHEN S H, et al. Application of laser speckle technology on the detection of agricultural products[J]. *China Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(2): 410–415.
- [27] CHENG H, LUO Q, ZENG S, et al. Modified laser speckle imaging method with improved spatial resolution[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2003, 8(3): 559–564.
- [28] ANSARI M Z, RAM?REZ-MIQUET E E, OTERO I, et al. Real time and online dynamic speckle assessment of growing bacteria using the method of motion history image[J]. *J Biomed Opt*, 2016, 21(6): 66006.
- [29] BRAGA R A, NOBRE C M B, COSTA A G, et al. Evaluation of activity through dynamic laser speckle using the absolute value of the differences [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(2): 646–650.
- [30] BONI S, RETHEESH R, RADHAKRISHNAN, et al. Cross-correlation and time history analysis of laser dynamic specklegram imaging for quality evaluation and assessment of certain seasonal fruits and vegetables[J]. *Laser Physics: An International Journal devoted to Theoretical and Experimental Laser Research and Application*, 2017, 27(10): 2–6.
- [31] SAMUEL B, RETHEESH R, NAMPOORI V P N, et al. Nondestructive evaluation of fruits using cross correlation and time history of biospeckle pattern[C]// National seminar and International Exhibition on nondestructive Evaluation, 2016.
- [32] VEGA F, TORRES M C. Automatic detection of bruises in fruit using Biospeckle techniques[C]// Symposium of Signals. IEEE, 2013. DOI: 10.1109/ STSIVA.2013.6644916.
- [33] YAN L, LIUJ X, MENS, et al. The biospeckle method for early damage detection of fruits[J]. *Modern Physics Letters B Condensed Matter Physics Statistical Physics Applied Physics*, 2017(31): 19–21.
- [34] BLOTTA E, BALLARIN V, RABAI H. Decomposition of biospeckle signals through granulometric size distribution[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1201–

- 1203.
- [35] ANSARI M Z, MINZ P D, NIRALA A K. Fruit quality evaluation using biospeckle techniques[J]. *Infona*, 2012, 24(3): 873–876.
- [36] SZYMANSKA – CHARGOT M, ADAMIAK A, ZDUNEK A. Pre-harvest monitoring of apple fruits development with the use of biospeckle method[J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 40(145): 23–28.
- [37] 刘家玮, 梁飞宇, 王益健, 等. 基于生物散斑的青枣活性变化规律[J]. *海南师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 30(2): 150–153.
- LIU J W, LIANG F Y, WANG Y J, et al. Evaluation of bioactivity changes of jujube based on biospeckle[J]. *Journal of Hainan Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 30(2): 150–153.
- [38] LI Q Q, XU R R, FANG Q, et al. Analyses of microstructure and cell wall polysaccharides of flesh tissues provide insights into cultivar difference in mealy patterns developed in apple fruit[J]. *Food Chemistry*, 2020, 45(321): 2–6.
- [39] AREFI A, AHMADI M P, HASSANPOUR A, et al. Non-destructive identification of mealy apples using biospeckle imaging[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2015, 25(112): 266–276.
- [40] MAKSYMENKO O P, MURAVSKY LEONI I, BEREZYUK M I. Application of biospeckles for assessment of structural and cellular changes in muscle tissue[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2015, 20(9): 95006.
- [41] AMARAL I C, JR R A B, RAMOS E M, et al. Application of biospeckle laser technique for determining biological phenomena related to beef aging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 119(1): 135–139.
- [42] 董庆利, 金曼, 胡孟晗, 等. 基于生物散斑技术的两部位牛肉质构特性预测模型改进[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 209–215.
- DONG Q L, JIN M, HU M H, et al. Improvement of modeling texture characteristics of different parts of beef based on biospeckle technique[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 209–215.
- [43] 金曼, 董庆利, 刘宝林. 基于三维生物散斑技术的牛肉质构特性预测[J]. *食品科学*, 2017, 38(3): 26–31.
- JIN M, DONG Q L, LIU B L. Prediction of beef texture based on three-dimensional biospeckle[J]. *Food Science*, 2017, 38(3): 26–31.
- [44] ZDUNEK A, HERPPICH W B. Relation of biospeckle activity with chlorophyll content in apples[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2012, 64(1): 58–63.
- [45] ROMERO G G, MARTINEZ C C, ALANÍS EE, et al. Bio-speckle activity applied to the assessment of tomato fruit ripening[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 103(1): 116–119.
- [46] ANNA S, SZYMAŃSKA-CHARGOT M, BEATA K, et al. Determination of the optimum harvest window for apples using the non-destructive biospeckle method[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 661.
- [47] NASSIF R, PELLEN F, MAGNÉ C, et al. Scattering through fruits during ripening: laser speckle technique correlated to biochemical and fluorescence measurements[J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23887–23897.
- [48] RABELO G F, ROBERTO A. BRAGA J, et al. Laser speckle techniques in quality evaluation of Orange fruits[J]. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2005, 9(4): 2–7.
- [49] 吴海伦. 基于生物散斑技术的苹果内部品质检测分级及仪器开发[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- WU H L. Studies on detection and grading of apple's internal quality based on biological speckle technique and instrument development[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [50] ADAMIAK A, ZDUNEK A, KURENDA A, et al. Application of the biospeckle method for monitoring bull's eye rot development and quality changes of apples subjected to various storage methods—preliminary studies[J]. *Sensors*, 2012, 12(3): 3215–3227.
- [51] PIECZYWEK P M, CYBULSKA J, SZYMAŃSKA-CHARGOT M, et al. Early detection of fungal infection of stored apple fruit with optical sensors—Comparison of biospeckle, hyperspectral imaging and chlorophyll fluorescence[J]. *Food Control*, 2018, 29(85): 327–338.
- [52] RABELO G F, ENES A M, JUNIOR R A B, et al. Frequency response of biospeckle laser images of bean seeds contaminated by fungi[J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 110(3): 297–301.
- [53] VIANA R O, KARINA T MG, BRAGA R A, et al.

- Fermentation process for production of apple-based kefir vinegar: microbiological, chemical and sensory analysis[J]. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2017, 48(3): 592–601.
- [54] 王康, 张欢, 李赳韬, 等. 一种联合光声与激光散斑的多模态成像系统研究[J]. *生命科学仪器*, 2020, 18(3): 53–58.
- WANG K, ZHANG H, LI W T, et al. Development of multi-modality photoacoustic and laser speckle contrast imaging system[J]. *Life Science Instruments*, 2020, 18(3): 53–58.
- [55] CHATTERJEE A, SINGH P, BHATIA V, et al. An efficient automated biospeckle indexing strategy using morphological and geo-statistical descriptors[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 41(134): 2–6.

Biological Speckle Technology and Its Application in Foods: A Review

A Liya, Zhu Jiamin, Gao Yuan, Qin Ligang, Chen Qian*

(*College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030*)

Abstract Biological speckle technology is an efficient and economical non-destructive testing technology that can describe the biologically active area of the tested item by measuring the change of light interference. The speckle activity reflects the state of the surface and internal tissue of the tested item, and can provide real-time qualitative or quantitative information about the tested item. This article introduces the basic principles of biological speckle technology and speckle image analysis methods, reviews the application progress of biological speckle technology in the food field, and prospects the application of the technology in the future.

Keywords non-destructive testing technology; biological speckle laser; principle; speckle image analysis method; application