

基于相关系数的生物散斑活性表征研究

翟春婕, 王新猛, 薛晓明, 唐寅, 李浩

Characterization of biospeckle activity based on correlation coefficient

引用本文:

翟春婕, 王新猛, 薛晓明, 唐寅, 李浩. 基于相关系数的生物散斑活性表征研究[J]. *激光技术*, 2024, 48(5): 739–745.

ZHAI Chunjie, WANG Xinmeng, XUE Xiaoming, et al. Characterization of biospeckle activity based on correlation coefficient[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 48(5): 739–745.

您可能感兴趣的其他文章

1. 基于激光散斑数字图像相关法的热应变测量

引用本文: 王俊松, 张吴记, 潘志伟, 等. 基于激光散斑数字图像相关法的热应变测量[J]. *激光技术*, 2023, 47(2): 171–177.

2. 关于检测抛物面反射镜质量的技术研究

引用本文: 张恒, 付旭东, 陈培锋, 等. 关于检测抛物面反射镜质量的技术研究[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 740–744.

3. 基于像散的光学元件厚度非接触测量研究

引用本文: 李潇潇, 张志恒, 张效宇, 等. 基于像散的光学元件厚度非接触测量研究[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 741–746.

4. 线激光散斑检测弹幕武器炮口振动测量方法

引用本文: 徐达, 何凯平, 熊伟, 等. 线激光散斑检测弹幕武器炮口振动测量方法[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 876–880.

5. 基于散斑图像的远程振动频率提取方法研究

引用本文: 石焕, 朱弘, 肖容, 等. 基于散斑图像的远程振动频率提取方法研究[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 801–805.

文章编号: 1001-3806(2024)05-0739-07

基于相关系数的生物散斑活性表征研究

翟春婕^{1,2*}, 王新猛¹, 薛晓明^{2,3}, 唐寅³, 李浩¹

(1. 南京警察学院 信息技术学院, 南京 210023, 中国; 2. 野生动植物物证技术国家林业和草原局重点实验室, 南京 210023, 中国; 3. 南京警察学院 刑事科学技术学院, 南京 210023, 中国)

摘要: 为了解决传统生物散斑测量结果易受实验参数影响的问题, 采用模拟动态光散射及荧光相关光谱技术, 用相关系数表征生物散斑活性, 搭建了实验装置, 并对中药糖浆、酸奶、老酸奶、西红柿、苹果等产品进行了实验测试。结果表明, 基于相关系数构造的特征时间指标主要由样品中颗粒运动的速率决定, 物理意义明确, 几乎不受相机曝光时间、散斑区域等实验参数的影响, 平均测量偏差小于5%, 易在实际应用中使用。由于农业及医药领域中生物样品的多种特性均与颗粒运动速度有关, 该方法可为食品、药品行业提供一种新的无损检测工具。

关键词: 测量与计量; 生物散斑活性; 相关系数; 特征时间

中图分类号: O436.2; TN249 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.05.019

Characterization of biospeckle activity based on correlation coefficient

ZHAI Chunjie^{1,2*}, WANG Xinmeng¹, XUE Xiaoming^{2,3}, TANG Yin³, LI Hao¹

(1. Department of Information Technology, Nanjing Police University, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Wildlife Evidence Technology of State Forest and Grassland Administration, Nanjing 210023, China; 3. Department of Criminal Science and Technology, Nanjing Police University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The measurement of traditional laser biospeckle is significantly affected by experimental parameters. To address this problem, dynamic light scattering and fluorescence correlation spectroscopy were used to characterize the biospeckle activity. An experimental setup was built and tested with traditional Chinese medicine syrup, yogurt, old yogurt, tomatoes, and apples. The results show that the constructed metric based on the correlation coefficient with a clear physical meaning is mainly determined by the speed of particle movement in the sample, which has an average error less than 5%. As the metric is almost independent of the exposure time of camera and region of interest, it is beneficial for the biospeckle technology to be used in practical applications. Since various characteristics of biological samples in the agricultural and pharmaceutical fields are related to the speed of particle movement, this method is expected to provide a new non-destructive testing tool for food and pharmaceutical industries.

Key words: measurement and metrology; biospeckle activity; correlation coefficient; characteristic time

0 引言

激光具有高相干性, 照射不均匀介质时受到反射及散射等因素的影响形成明暗相间的散斑图像, 且图像随着介质变化发生相应变化。根据此现象, 研究人员开发了生物散斑技术, 通过连续拍摄动植物样品表面的散斑图像, 计算生物散斑活性指标表征连续散斑图像的变化, 进而反映样品内部介质变化的动态特性,

具有高灵敏度、实时、非侵入测量的优点, 有效补充了比色法^[1-2]、红外光谱^[3-5]、激光质谱法^[6]等传统光电测量方法的不足, 在农业和医学领域受到了广泛关注。农业方面, 生物散斑技术已成功应用于判断西红柿、苹果等果蔬瘀伤^[7]、果蔬成熟生化过程^[8-10]、生鲜肉类品质^[11-13]、种子活力^[14]和果蔬真菌菌落污染程度等场景。在医学方面, 已有研究表明通过生物散斑图像可以监测血液流速^[15]、检测精子发育能力^[16]以及表征眼底血管与神经的活动^[17]。由此可见生物散斑技术具有广阔的应用前景。

由于散斑图像具有随机分布特性, 难以准确预测, 因此一般需要利用统计学原理定量表征散斑变化, 获得被测物相关信息。针对生物散斑技术的特点, 目前已提出了多种图像处理算法, 其中广泛使用的基础算法包括散斑对比分析法、Fujii 分析法、加权广义差分

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金资助项目 (LGZD202103); 国家自然科学基金资助项目 (52106162); 江苏省高校“青蓝工程”中青年学术带头人项目 (苏教师函[2022]29号); 教育部国家级一流本科专业建设项目 (教高厅函[2019]46号); 江苏省高校“青蓝工程”优秀教学团队项目

* 通信作者: zhaichunjie1988@163.com

收稿日期: 2023-09-11; 修回日期: 2023-11-08

法、惯性矩法、时间空间对比度法等^[18-21], 主要根据连续两帧图像中单像素的强度变化情况或窗口内统计平均值的变化情况设定指标表征生物的活性。由于生物散斑技术本质上为测量样品中散射颗粒的变化或运动速度, 而实际样品内部运动组成复杂, 上述指标将内部运动作为黑箱处理, 通过经验或实验数据设定阈值, 难以充分利用散斑图像信息反映内部运动的组成, 且测量结果极易受到实验参数的影响, 普适性较差。动态光散射及荧光相关光谱技术^[22-23]是纳米科学领域测量溶液中颗粒运动速率的重要手段, 能通过测量散射光或荧光时域信号的相关系数有效表征多种分布颗粒群的运动特性。为了提高信号质量, 两者均需使用高倍物镜聚焦约束照明区域, 受到多重散射影响, 均难以直接应用于生物样品的测量。上述工作启发本文作者根据相关系数随时间的变化处理生物散斑图像, 对散射颗粒的运动进行更准确的表征, 为测量生物散斑活性提供新的技术工具及实验基础。

1 实验测量

1.1 实验装置及材料

本文中搭建的实验装置与传统生物散斑测量装置类似, 如图1所示。光束由激光二极管(Osram, PLT5 520)发出, 波长为520 nm, 功率为50 mW, 经过准直后出射。准直光约以45°角倾斜照明样品, 并被样品中颗粒散射, 散射光进入可调倍率工业显微镜头后成像, 实验中使用倍率为0.75×, 并由工业相机(Mightex, SME-C050-U)成像, 像素尺寸为2.4 μm × 2.4 μm, 曝光时间及增益可手动调节, 图像像素数目为2560 pixel × 1920 pixel。相机及镜头安装在平移台上, 可上下移动调节成像系统位置。

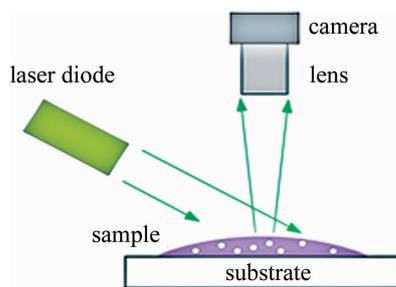


图1 生物散斑实验装置示意图

Fig.1 Experimental setup of laser biospeckle measurement

实验测量了市场购买的中药糖浆(京都念慈庵蜜炼川贝枇杷膏)、老酸奶(君乐宝低温原味)、酸奶(安慕希原味)、西红柿、苹果等样品的散斑图像, 典型散斑图像如图2a所示。由于散斑图像的形成具有随机性, 直接观察图像判断散斑工作量较大, 使用图像处理

算法表征散斑活性必不可少。图2b为去背景的散斑图像。

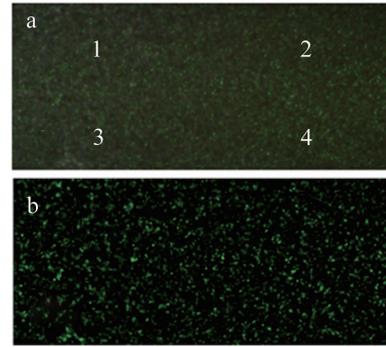


图2 a—典型散斑图像 d—去背景散斑图像

Fig.2 a—typical biospeckle image d—biospeckle image after removing background

1.2 生物散斑活性指标

动态光散射及荧光相关光谱技术中使用雪崩二极管或光电倍增管等点探测器测量微观聚焦照明区域内散射光及荧光的时域信号, 信号的时间相关性定义为相关系数^[22-23]。由于照明区域内颗粒数目有限, 颗粒进入及离开照明区域时会引起散射光及荧光强度的变化, 变化持续的时间与颗粒运动速率密切相关, 因此相关系数反映了颗粒运动的速率。荧光相关光谱技术测量的典型单分散颗粒群相关系数曲线如图3所示。可见相关系数随着时间间隔增大迅速降低, 且下降速度与颗粒运动速率有关。

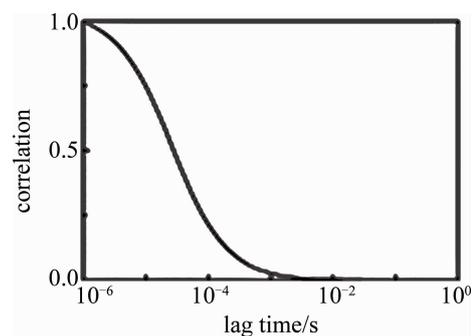


图3 典型荧光相关光谱相关系数曲线^[23]

Fig.3 Correlation coefficient of fluorescence correlation spectroscopy^[23]

由于生物散斑技术中照明区域较大, 现有以聚焦区域内强度涨落为基础的相关系数定义^[23]已不再适用, 因此本文中对相关系数 $C_0(\Delta t)$ 进行了改进, 如下式所示:

$$C_0(\Delta t) = \frac{\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w I(i, j, n) I(i, j, n + \Delta n)}{\sqrt{\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w I^2(i, j, n)} \sqrt{\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w I^2(i, j, n + \Delta n)}} \quad (1)$$

式中: $I(i, j, n)$ 为第 n 帧图像 i 行 j 列的像素值; Δt 为两幅图像的时间间隔; Δn 为两幅图像的帧数间隔; h 及 w 分别为感兴趣区域的行数及列数。式(1)为不同时刻图像之间的空间相关性,改进后的相关系数引入了散斑图像的统计信息,能够准确全面反映感兴趣区域内散斑图像的变化情况。当第 n 帧及第 $n + \Delta n$ 帧散斑图像完全相同时, $C_0(\Delta t)$ 取得最大值 1,随着时间间隔增加,散斑位置及强度逐渐变化, $C_0(\Delta t)$ 值减小,观察曲线,近似可用下式描述:

$$C_0(\Delta t) = 1 - c_0 + c_0 \exp(-\Delta t/\tau_0) \quad (2)$$

式中: c_0 是自定义常数,与散斑图像背景强度有关; τ_0 为相关系数衰减时间; Δt 足够大时, $C_0(\Delta t)$ 逼近稳定值 $1 - c_0$; τ_0 与颗粒速率密切相关,颗粒运动速率越快,其对应值越小。通过测量样品 τ_0 即可表征颗粒群分布或运动速率是否发生变化,进而判断样品是否发生变化。

受到杂散光影响,散斑图像一般具有较强背景,导致相关系数衰减不够明显。为便于观察,增大曲线对比度,本文作者在式(1)基础上进行了改进,突出了高频细节的影响,改进后的相关系数为:

$$C_1(\Delta t) =$$

$$\frac{\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w I_1(i, j, n) I_1(i, j, n + \Delta n)}{\sqrt{\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w I_1^2(i, j, n)} \sqrt{\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w I_1^2(i, j, n + \Delta n)}} \quad (3)$$

$$I_1(i, j, n) = I(i, j, n) - I_0(i, j, n) \quad (4)$$

式中: $I_0(i, j, n)$ 为使用像素点 (i, j) 邻域窗口(宽为 w_0 , 高为 h_0) 内像素值均值滤波的结果,近似为图像背景,因此 $I_1(i, j, n)$ 可认为是保留了散斑图像中高频部分。如图 2b 所示,当散斑变化时,改进后的相关系数 $C_1(\Delta t)$ 变化更大,能够更准确反映颗粒的移动。

2 实验及图像处理参数影响

基于上述实验装置及处理算法,本文中开展了实验研究,实验地点为南京,测试了改进后相关系数的性能。实验中设置相机帧频为每秒 18 帧,连续采集 8 s,在硬盘中保存图像便于后续处理。实验前使用白光照明,根据预览图像调整镜头与样品的相对位置,使得样品表面处成像较为清晰。由于散斑测量的结果一般较易受到实验及图像参数的影响,本文作者分别对相机曝光时间、散斑区域尺寸及均值滤波窗口尺寸进行了测试,确保不同参数下测量结果具有良好的一致性,方便实际应用。由于散斑方法主要表征颗粒的运动,而几种样品中中药糖浆的质地最为均匀,因此本文中首先使用中药糖浆进行了测试。实验时吸取约 2 mL 糖

浆放置于透明载波片上暴露在空气中。由于糖浆较为粘稠,长时间放置后仍保持液体状态边缘处有较大曲率,可能导致镜面反射,实验中需移动样品位置,避免边缘处位于成像视场内。

2.1 特征时间

曝光时间对图像的绝对强度影响较大,过曝光及欠曝光均可能导致散斑活性指标计算发生较大偏差。不失一般性,本文中分别将相机曝光时间 T 设置为 10 ms 及 50 ms,观察图像没有明显的过曝光及欠曝光情况。基于式(1)及式(3)计算了未消除背景及消除背景后不同时间间隔时相关系数的曲线,结果如图 4 所示。根据相关系数定义可知, $\Delta t = 0$ 时相关系数始终为 1,无需处理,其天然具有最大值归一化的效果,其下降速度与散斑图像变化速度有关。图 4a 中当曝光时间变化时曲线稳态值显著不同,表明未消除背景时相关系数的最小值没有归一化的效果,这主要是因为曝光时间较大时,图像背景强度明显偏大,即使颗粒移动导致散斑光点发生移动,相关系数值仍然较大。尽管可使用式(2)拟合曲线确定 c_0 及 τ_0 等参数,但实际拟合时由于式(2)使用的指数衰减模型与实际测量数据存在一定偏差,拟合误差可能较大。对于指数下降曲线,可定义曲线值下降到一定值对应的时间为特征时间表征下降速度,但由于相关系数值始终缓慢降低,最小值难以确定,因此该方法难以应用。与图 4a 不同,经过消除背景(均值滤波窗口为矩形窗口,面积 $S = 11 \text{ pixel} \times 11 \text{ pixel}$) 后,图 4b 中相关系数曲线的最大值和最小值均表现出归一化的特性,即最大值 1 对

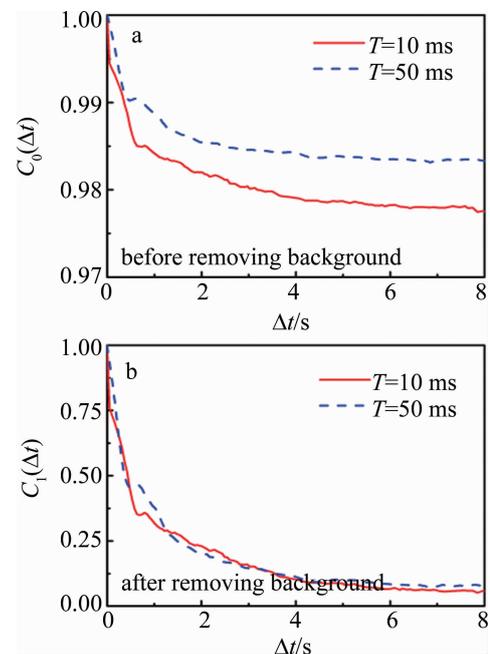


图4 相关系数曲线

Fig. 4 Correlation curves

应于 $\Delta t = 0$, 最小值 0 对应于无穷远时刻, 无需任何特别处理, 因此不失一般性, 可定义当相关系数下降至 0.707 时对应的延迟时间为特征时间, 记为 T_0 。对比不同曝光时间的曲线可见, T_0 均为 0.22 s, 与曝光时间设置几乎无关, 这主要是因为 T_0 远大于相机曝光时间, 在相机曝光过程中, 颗粒位移较小, 不影响测量。与拟合法相比, 使用特征时间的另一优势为具有较高的效率。拟合法需采集整个时间段内的图像, 耗时数秒以上 (本文中为 8 s), 而 T_0 只需采集 0.3 s 内图像。由于散斑测量对振动噪声更为敏感, 长时间测量可能引入较多的噪声干扰, 缩短测量时间将显著提高抗干扰能力。另一方面, 当颗粒种类及速度分布多样时, 曲线下降趋势复杂, 因此观察曲线的下降趋势同样可揭示颗粒运动的信息。

2.2 散斑计算区域

由于 T_0 为整幅图像的统计指标, 若对散斑计算区域具有依赖性, 则难以在实际应用中使用。本文中测试了散斑计算区域对 T_0 的影响, 将图 2a 散斑图像等分为 1~4 共 4 个区域, 分别计算每个区域的相关系数曲线, 结果如图 5 所示。4 个区域的曲线在 Δt 较大时的稳态值存在一定差异, 而在较小处几乎重合。由于 T_0 只需相关系数下降至 0.707 即可, 无需稳态处取值, 因此稳态处差异并不影响特征时间的计算。

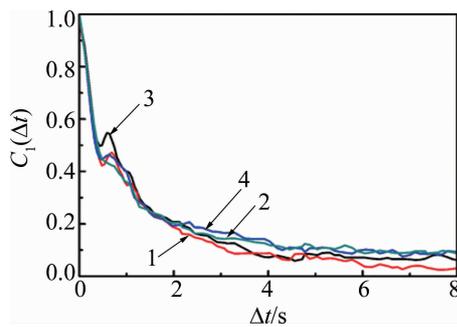


图5 样品不同区域相关系数曲线

Fig. 5 Correlation curves in different regions of sample surface

2.3 滤波窗口尺寸

去除散斑图像背景的核心是均值滤波, 滤波窗口尺寸变化时可能导致曲线的趋势发生变化, 本文中计算了窗口的影响, 结果如图 6 所示。窗口尺寸 $w_0 \times h_0$ 从 5 pixel \times 5 pixel 增加至 101 pixel \times 101 pixel 时相关系数变化趋势几乎不变, 且在特征时间内曲线几乎重合, 长时间后稳态值则稍有区别, 这主要是因为窗口尺寸较大时, 背景难以反映局部变化, 导致减去平滑图像后局部仍存在一定的非零背景。由于 T_0 几乎不受曝光时间、散斑位置等实验参数影响, 可视为样品的一个客观物理量。

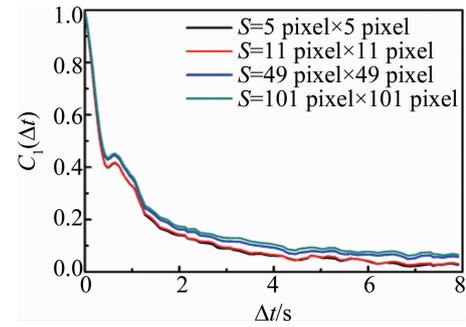


图6 均值滤波窗口尺寸不同时相关系数曲线

Fig. 6 Correlation coefficient curves associated with different window sizes for average filter

2.4 颗粒运动速率

为进一步定性表征特征时间 T_0 及颗粒运动速率之间的关系, 本文将糖浆样品放置于 1 维电动平移台 (派迪威, PP110-50) 上, 使用运动控制卡及闭环步进电机驱动平移台以恒定速率 v 匀速运动, 测量 T_0 随平移台运动速率 v 的变化, 每组速率均重复 5 次, 结果如图 7 所示。当 v 较小时, 样品内颗粒的平均速率与 v 一致, 但由于颗粒自身布朗运动的影响不可忽略, T_0 与图 4b 中数值相差不大。随着 v 增加, 颗粒定向运动的影响逐渐超越布朗运动, T_0 逐渐减小, 且与 v 近似成反比, 表明 T_0 与 v 之间存在一定的对应关系。

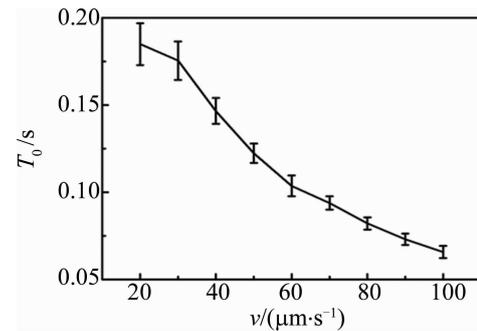


图7 平移台不同运动速率时的特征时间

Fig. 7 Characteristic time at different stage velocities

2.5 Fujii 指标

Fujii 指标具有计算效率高、物理意义明确的特点, 在生物散斑图像处理中获得广泛应用, 定义式为:

$$F(i, j, N) = \sum_{n=1}^{N-1} \frac{|I(i, j, n) - I(i, j, n+1)|}{|I(i, j, n) + I(i, j, n+1)|} \quad (5)$$

式中: N 为散斑图像总帧数。可见 Fujii 指标直接计算连续两张图像像素值的差, 能够直观反映强度的变化。本文作者进一步测试了 Fujii 指标的效果, 验证 Fujii 指标是否存在类似特征参数。由于糖浆样品各处颗粒运动的速率应近似相同, 本文作者模仿相关系数的处理方法绘制了不同曝光时间时感兴趣区域内 Fujii 指标的平均值随时间间隔的变化关系, 结果如图 8a 所示,

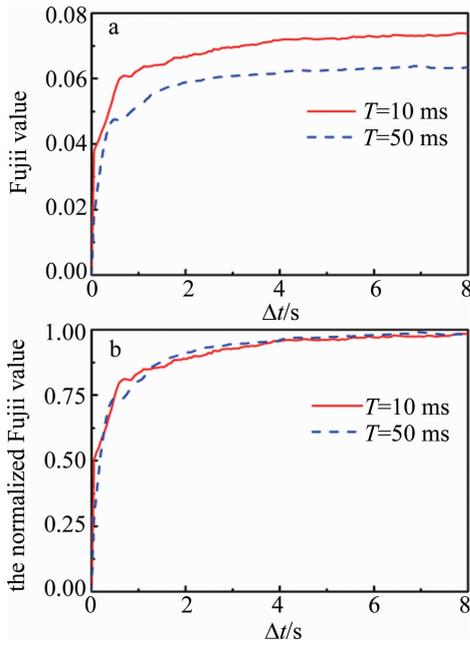


图8 Fujii 指标曲线
Fig.8 Fujii curves

Fujii 指标在短时间内快速上升后逐渐趋向于稳定值。受到曝光时间变化的影响,背景光强发生了较大的变化,使得两种曝光时间对应的稳态值不同,10 ms 时的稳态值略大于 50 ms 时的稳态值。为构造特征参数,使用稳态时的最大值对 Fujii 指标进行了归一化处理,结果如图 8b 所示。尽管稳态时的曲线几乎重合,但快速上升期的曲线差异较大,曝光时间 10 ms 对应的曲线上升速率远大于 50 ms 对应的曲线,意味着难以确定一个只与样品性质有关的特征参数。上述结果表明,与 Fujii 指标相比,相关系数随时间的变化关系能更有效表征颗粒扩散的速率。

3 实验测量应用

本文中开展了糖浆、酸奶、老酸奶、西红柿、苹果等常见 5 种食品及药品的实验测量,为减小测量时长,每次测量均持续 5 s,不同时刻的相关系数如图 9a ~ 图 9e, T_0 随实验时间的变化如图 10a ~ 图 10e 所示。图中, T_s 为实验时间。

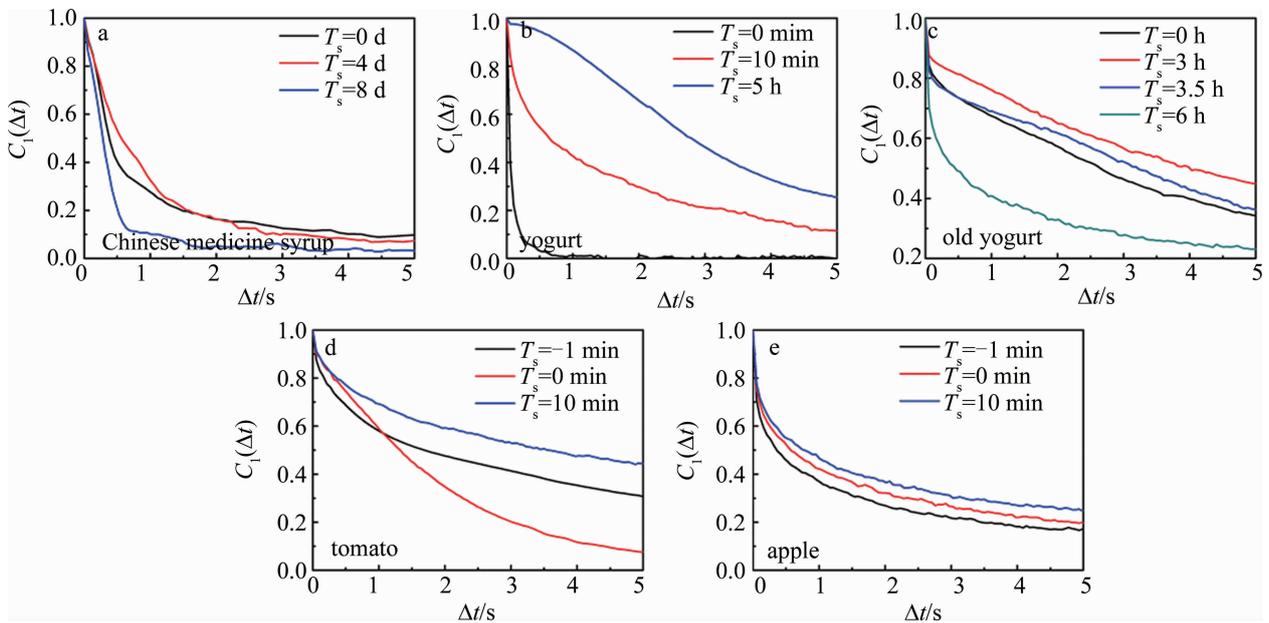
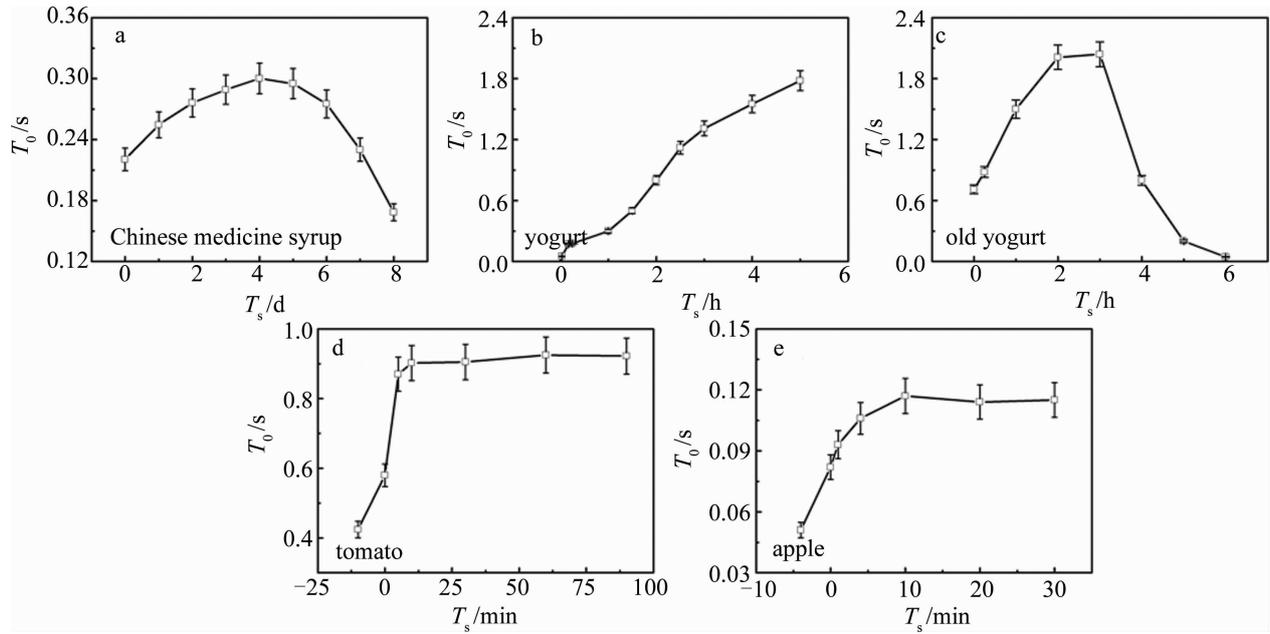


图9 不同时刻的相关系数曲线
Fig.9 Correlation coefficient curves at different time

于 2023-05-17—05-25 每日 10 点测量糖浆样品的散斑活性,不同时刻的相关系数及特征时间结果分别如图 9a 及图 10a 所示。实验初期 T_0 从当天 0.22 s 上升至第 4 d 0.30 s,这主要是因为中药糖浆中一般含有一定水分,随着水分蒸发,液体粘度逐渐增加,导致颗粒运动速率降低。由于暴露在空气中,样品中乳酸菌含量逐渐增加,糖浆开始吸收空气中水气,蔗糖转化为葡萄糖和乳糖,产生酸败现象,导致颗粒速度加快,因此实验后期从第 5 d 开始 T_0 逐渐减小,至第 8 d 时已

减小至 0.17 s。

同样吸取酸奶样品约 2 mL 放置于载玻片上,于 2023-05-26T10:00 开始测量。由于含水量较高,蒸发快,酸奶 10 h 后已近似成为粉末,导致颗粒运动速率逐渐降低。图 9b 中相关系数曲线初始时下降速度较快,5 h 后则极为平缓, T_0 上升至 1.78 s。图 10b 中初始时刻 T_0 为 0.05 s,随着水分蒸发 T_0 迅速上升,8 min 后达到 0.17 s,此时 T_0 上升速度降低,最终在 5 h 后达到 1.78 s。

图 10 T_0 随实验时间的变化Fig. 10 Dependence of T_0 on the experiment time

由于老酸奶为胶状,在载玻片上无法自然流动,影响测量,因此撕开包装后直接在盒内测量,实验于 2023-05-27T10:00 开始测量,结果如图 9c 及图 10c 所示。实验开始时老酸奶表面存在一定水分,颗粒运动速率较快, $T_0=0.71$ s,随着水分蒸发,颗粒运动速率降低,3 h 后 T_0 上升至 2.04 s。由于老酸奶暴露在空气中时稳定期较短,蛋白质和乳糖发生分解,析出了水分,导致 4 h 后颗粒运动重新加快,在 6 h 后 T_0 下降至 0.045 s。

购买西红柿及苹果时,均目测样品表面,确保没有可见伤痕。实验于 2023-06-02T10:00 开始随机确定测量区域后首先测量该区域的相关系数,然后目测调整样品姿态,将样品从 30 cm 高度处自由掉落至光学面包板上,接触区域为前测量区域,最后连续测量相关系数。西红柿测量结果如图 9d 及图 10d 所示,图中实验时间为负时代表碰撞前,为 0 时代表碰撞后开始测量。碰撞前 $T_0=0.42$ s,碰撞后由于西红柿结构受到机械破坏,游离水被排出,酚类化合物氧化,导致受损组织褐变, T_0 上升至 0.58 s,10 min 后内部结构逐渐稳定, T_0 几乎保持不变,为 0.92 s。苹果的实验现象与西红柿类似,如图 9e 及图 10e 所示,同样在受到碰撞后颗粒运动速率降低。

为了验证 T_0 测量的一致性,在实验时每次测量均重复了 5 次,图 10 中绘制了误差棒,5 种样品的平均相对误差均小于 5%,表明相关系数反映了样品内部颗粒运动的速率, T_0 为样品自身的特征参数,且具有明确的物理意义,能够有效补充传统分析指标,具有较

好的应用潜力。同时通过限制感兴趣区域,相关系数同样可具备空间分辨能力。

生物散斑测量技术主要通过散斑图像的变化速率表征样品内部颗粒运动的速率,理论上对样品形态没有限制,本文作者测试了糖浆、酸奶、老酸奶、西红柿、苹果等不同种类的样品,验证了可行性。由于工业相机采集图像的帧速有限,颗粒运动速率过快时 T_0 可能短于两帧图像的间隔,引入误差,而西红柿、苹果、糖浆等样品内部颗粒运动速率有限,能够满足测量要求,因此一方面可将该技术应用于市场质量监督,另一方面也可应用于农产品及药品在线测量,确认产品是否存在被污染的情况。

4 结论

针对生物散斑技术的特点,本文中搭建了实验测量装置,开发了相应图像处理算法,提出基于相关系数曲线构造特征时间表征样品的生物散斑活性。以中药糖浆、酸奶、老酸奶、西红柿及苹果作为对象开展了实验,结果表明,特征时间几乎不受曝光时间及实验区域的影响,稳定性好且计算效率较高,可视为仅与样品相关的属性,具有较好的工程应用优势。特征时间直观揭示了样品内部颗粒运动的速率,包括:(a) 中药糖浆首先因水分蒸发粘度变大活性降低,然后因为酸败现象活性升高;(b) 酸奶因水分蒸发逐渐形成粉末,过程中活性连续降低;(c) 老酸奶首先表面水分蒸发活性降低,然后内部分解析出水活性升高;(d) 西红柿和苹果在碰撞后因机械损伤活性持续降低,十多分钟后

结构进入稳定状态。本文中的研究结果有望为食品、药品行业提供一种新的无损检测工具,通过颗粒运动速率表征生物样品的特性,应用前景广阔。

参 考 文 献

- [1] KIM D M, YOO S M. Colorimetric systems for the detection of bacterial contamination: Strategy and applications[J]. *Biosensors*, 2022, 12(7): 532.
- [2] WANG M, ZENG J, WANG J Q, *et al.* Dual-mode aptasensor for simultaneous detection of multiple food-borne pathogenic bacteria based on colorimetry and microfluidic chip using stir bar sorptive extraction[J]. *Microchimica Acta*, 2021, 188: 244.
- [3] PAN S W, LU H C, LO J I, *et al.* Using an ATR-FTIR technique to detect pathogens in patients with urinary tract infections: A pilot study [J]. *Sensors*, 2022, 22: 3638.
- [4] CHIRMAN D, PLESHKO N. Characterization of bacterial biofilm infections with Fourier transform infrared spectroscopy: A review [J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2021, 56(8/10): 673-701.
- [5] LUO J Y, YANG Ch L, CHEN L, *et al.* Detection and identification of mulberry bacterial wilt and its pathogen using Fourier transform infrared spectra[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2015, 32(4): 578-584 (in Chinese).
罗金燕, 杨春兰, 陈磊, 等. 桑细菌性萎蔫病及其病原的红外光谱鉴别[J]. *浙江农林大学学报*, 2015, 32(4): 578-584.
- [6] LI B Zh, CHEN F, GUO Zh Zh, *et al.* Isolation and identification of Salmonella/Escherichia coli analogues in raw pork by matrix-assisted laser desorption ionization time-of-flight mass spectrometry[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2018, 9(4): 717-722 (in Chinese).
李滨洲, 陈飞, 郭珍珍, 等. 基质辅助激光解吸电离飞行时间质谱技术分离鉴定生鲜猪肉中沙门氏菌/大肠杆菌类似菌[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(4): 717-722.
- [7] YAN L, LIU J, MEN S. The biospeckle method for early damage detection of fruits[J]. *Modern Physics Letters*, 2017, B31(19/21): 1740034.
- [8] PIECZYWEK P M, NOWACKA M, DADAN M, *et al.* Postharvest monitoring of tomato ripening using the dynamic laser speckle [J]. *Sensors*, 2018, 18: 1093.
- [9] NASSIF R, NADER C A, AFIF C, *et al.* Detection of golden apples' climacteric peak by laser biospeckle measurements [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(35): 8276-8282.
- [10] KUMARI S, NIRALA A K. Biospeckle image processing algorithms for non-destructive differentiation between maturity and ripe stages of Indian climacteric fruits and evaluation of their ripening period [J]. *Laser Physics*, 2019, 29(7): 075601.
- [11] AMARAL I C, BRAGA R A, 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.
- [12] PANDISELVAM R, MAYOOKHA V P, KOTHAKOTA A, *et al.* Biospeckle laser technique—A novel non-destructive approach for food quality and safety detection [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 97: 1-13.
- [13] GRAU R, VERDU S, PÉREZ A J, *et al.* Laser-backscattering imaging for characterizing pork loin tenderness. Effect of pre-treatment with enzyme and cooking [J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 299: 110508.
- [14] THAKUR P S, CHATTERJEE A, RAJPUT L S, *et al.* Laser biospeckle technique for characterizing the impact of temperature and initial moisture content on seed germination [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 153: 106999.
- [15] LI D, XIA Q, YU T, *et al.* Transmissive-detected laser speckle contrast imaging for blood flow monitoring in thick tissue: From Monte Carlo simulation to experimental demonstration [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 241.
- [16] BRAGA R A, 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.
- [17] ENGQVIST L, SHEIKH R, DAHLSTRAND U. Laser speckle contrast imaging enables perfusion monitoring of the anterior segment during eye muscle surgery [J]. *Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, 2022, 26(3): 155-158.
- [18] SUN Q, ZHAN H Q, CAO Zh L, *et al.* Laser biospeckle technique based on wavelet energy spectrum maps [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(6): 0611004 (in Chinese).
孙奇, 詹浣湫, 曹兆楼, 等. 基于小波能量谱图的生物散斑技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(6): 0611004.
- [19] BAI K, HE F T, ZHANG M, *et al.* Evaluation method of laser speckle based on gray level co-occurrence matrix [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(4): 479-482 (in Chinese).
白可, 贺锋涛, 张敏, 等. 基于灰度共生矩阵的激光散斑评价方法 [J]. *激光技术*, 2016, 40(4): 479-482.
- [20] 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 (in Chinese).
邓博涵, 陈嘉豪, 胡孟晗, 等. 生物散斑技术在水果品质量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.
- [21] WANG J S, ZHANG W J, PAN Zh W, *et al.* Thermal strain measurement based on laser speckle digital image correlation method [J]. *Laser Technology*, 2023, 47(2): 171-177 (in Chinese).
王俊松, 张吴记, 潘志伟, 等. 基于激光散斑数字图像相关法的热应变测量 [J]. *激光技术*, 2023, 47(2): 171-177.
- [22] STETEFELD J, MCKENNA S A, PATEL T R. Dynamic light scattering: A practical guide and applications in biomedical sciences [J]. *Biophysical Reviews*, 2016, 8(4): 409-427.
- [23] CAO Zh L, WANG D, KOYNOV K, *et al.* Diffusion of isolated surface-active molecules at the air/water interface [J]. *Colloid and Polymer Science*, 2014, 292: 1817-1823.