

# 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

蔡健荣, 刘梦雷, 孙力, 卢越, 杨杭

(江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 为了探究激光散斑技术检测冷鲜猪肉新鲜度的可行性, 用 660 和 465 nm 2 种波长的激光对宰后 24 h 的猪肉样本在 7 d 内的激光散斑图像进行采集。以时间序列散斑 (time history of speckle pattern, THSP) 图像的惯性矩 (inertia moment, IM) 作为散斑活性, 研究冷鲜猪肉散斑活性随货架期的变化规律。通过分析 2 种波长不同行的选取对 IM 值的影响, 发现不同波长其奇偶行 IM 的规律不同, 并针对传统 IM 算法容易出现异常值、稳定性差等缺点提出 3 点改进: 设计排序算法动态选择散斑活性最高峰及周围 2 个相邻行, 依此计算样本 IM 值; 改进共生矩阵的修正矩阵计算方法; 改进非零元素偏离对角线距离的计算方法。结果显示, 改进方法可以有效地抑制异常值干扰, 冷鲜猪肉散斑活性随货架期呈现先上升后下降的变化趋势。根据测得的挥发性盐基氮值 (total volatile basic nitrogen, TVB-N) 和散斑活性 IM 值建立猪肉新鲜度等级预测模型, 结果显示 465 nm 波长的激光判别效果要好于 660 nm 激光, 其训练集和预测集的识别率能达到 87.5% 和 89.29%。试验结果表明利用激光散斑技术检测冷鲜猪肉新鲜度的具有可行性。

**关键词:** 图像处理; 无损检测; 算法; 冷鲜猪肉; 新鲜度; 激光散斑; 惯性矩; 共生矩阵

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.035

中图分类号: S123; TN247

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-07-0268-07

蔡健荣, 刘梦雷, 孙力, 卢越, 杨杭. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.035 http://www.tcsae.org

Cai Jianrong, Liu Menglei, Sun Li, Lu Yue, Yang Hang. Laser speckle image detection of chilled pork freshness based on improved moment of inertia algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 268—274. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.035 http://www.tcsae.org

## 0 引言

中国是世界上猪肉生产和消费的第一大国, 猪肉的产量和消费量均占世界总量的一半<sup>[1]</sup>。猪肉在储藏过程中新鲜度会逐渐降低, 消费者难以准确判断。目前对猪肉新鲜度的检测主要根据感官评价及耗时费力的传统检测方法, 难以满足快速消费的猪肉市场。近年来, 国内外已有许多学者致力于冷鲜猪肉新鲜度的快速无损检测研究。如 Barbin 等<sup>[2-3]</sup>利用近红外高光谱成像技术对猪肉中挥发性盐基氮 (total volatile basic nitrogen, TVB-N)、蛋白质、脂肪、水分和细菌总数等指标进行了定量分析, 并对猪肉新鲜度进行了评价; 孙永海等<sup>[4-5]</sup>依据肉品的气味特征, 利用电子鼻对猪肉品质进行定性判别; 笔者所在课题组<sup>[6-7]</sup>利用近红外光谱技术和联合区间偏最小二乘法快速测定猪肉中挥发性盐基氮的含量。但这些快速检测方法尚未取得替代传统检测方法的突破。

激光散斑是一种新型的无损检测技术, 可以用来表征生物样品的活性<sup>[8-9]</sup>。当激光照射在粗糙物体表面 (与

激光波长相比), 经过不同光程的散射光之间相互干涉, 形成随机分布且明暗相间的光斑就是激光散斑。如果被测对象是具有活性的生物样品, 则产生的散斑图案呈现动态变化。这种动态散斑通常包含生物样品的各种信息, 如物体表面信息, 反射粒子的运动信息、温度信息等, 又称作生物散斑<sup>[10]</sup>。

目前, 国内外已有大量将激光散斑技术应用到生物样本的研究。此技术在医学上已成功应用于脑血管图像拍摄<sup>[11-13]</sup>、精子发育能力的检测<sup>[14-15]</sup>、血液 (相对) 流速和血液灌注率动态变化的监测<sup>[16-18]</sup>等诸多方面。对农产品的生物活性研究尚处于起步阶段, 主要包括种子活性检测<sup>[19-20]</sup>、果蔬成熟度检测<sup>[21-22]</sup>、农产品品质检测<sup>[23-26]</sup>等方面, 关于冷鲜猪肉新鲜度的研究尚未见到相关报道。

本文基于激光散斑技术, 依据不同冷藏时间冷鲜猪肉的生物散斑活性差异, 分析其惯性矩 (inertia moment, IM) 值随货架期的变化趋势。其次, 针对传统 IM 算法易出现异常数据、检测稳定性差等问题, 提出了改进方法。最后, 采用线性判别分析 (linear discriminant analysis, LDA) 建立预测模型, 以期能为激光散斑应用于冷鲜猪肉新鲜度的快速检测提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 激光散斑图像采集系统

#### 1.1.1 激光波长的选择

图 1 为用高光谱测得的宰后 24 h 内冷鲜猪里脊肉表

收稿日期: 2016-10-24 修订日期: 2017-03-23

基金项目: 国家科技支撑计划资助 (2015BAD19B05); 中国博士后科学基金 (2015M580401); 江苏省高校自然科学研究重大项目 (15KJA550001); 江苏省博士后科学基金 (1501108C)

作者简介: 蔡健荣, 男, 上海人, 博士, 教授, 主要从事食品农产品质量快速无损检测技术研究。镇江 江苏大学食品与生物工程学院, 212013。

Email: Jrcai@ujs.edu.cn



面的光谱反射率均值曲线, 由图可知在可见光波长范围内, 猪肉组织在不同波长下的反射率有较大差异。为研究货架期内不同光谱段对检测猪肉散斑活性变化的影响, 分别选择最大吸收、最大反射区域的波段作为激光波长, 而现有与此接近的激光器波长有 465、660 nm (宁波远明激光技术有限公司, LSR465SD、LSR660NL), 因此将其作为激光散斑图像的激光波长。

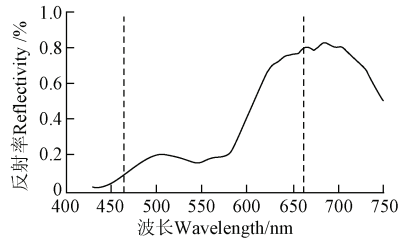
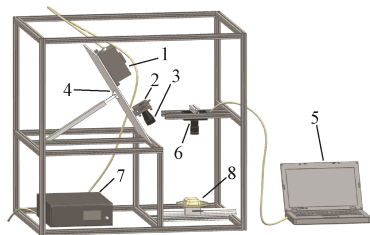


图 1 冷鲜猪肉的光谱反射率曲线

Fig.1 Spectral reflectance curve of chilled pork

### 1.1.2 试验装置

试验采用的激光散斑图像采集装置如图 2 所示。其中激光准直扩束系统采用 5 倍激光扩束镜 (武汉精密仪器有限公司, LBE-5), 激光四维调整架 (最大平移行程  $\pm 2$  mm)。激光出射光斑的尺寸约为  $4.8 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$ 。相机采用分辨率为  $640 \times 480$  pixels 的彩色 CCD 相机 (加拿大 Lumenera 公司, LU075C), 镜头焦距为 25 mm (日本 Computar 公司, M2514-MP2), 物距为 180 mm。



1.激光器 2.四维调整架 3.激光扩束镜 4.风撑 5.PC 6.CCD 相机  
7.数显可调电源 8.样品台  
1.Laser 2.Fourdimensional adjustment rack 3.Beam expander 4.Wind brace  
5.PC 6.CCD camera 7.Digital adjustable power supply 8.Sample platform

图 2 激光散斑图像采集系统

Fig.2 Laser speckle image acquisition system

### 1.2 试验样品

试验所用猪肉为宰后 24 h 内的冷鲜猪里脊肉, 购于镇江某超市, 试验前将样品分割成长宽厚约  $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} \times 8 \text{ mm}$  的肉块共 84 块, 置于带盖透明的培养皿中, 编号后置于  $4^\circ \text{C}$  恒温箱中贮藏待测。在 7 d 内完成对猪肉样本激光散斑图像的采集和 TVB-N 的测定。

### 1.3 散斑图像采集

为得到无耀斑的散斑图像, 选取的激光功率为 6 mW (0.11 A), 激光入射角为  $30^\circ$ 。为保证每次试验的一致性, 通过标记固定每次采集图像的位置。为避免样本的时间序列散斑图像 (time history of speckle pattern, THSP) 出现较多重复列, 以  $\Delta T=0.06 \text{ s}$  为时间间隔采集 640 幅分辨率为  $640 \times 480$  pixels 的激光散斑图像, 其原始图像如图 3 所示。

### 1.4 激光散斑图像处理方法

#### 1.4.1 传统激光散斑处理方法

1) 构建时间序列散斑 (THSP) 图<sup>[27]</sup>: 将每个样本采集的激光散斑图像先转化成灰度图, 然后提取每幅灰度图中固定的某行, 按照时间顺序从左至右构成一幅新的散斑图, 即为 THSP 图。

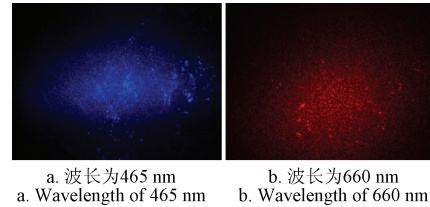


图 3 原始激光散斑图像

Fig.3 Original laser speckle image

2) 构建共生矩阵 (co-occurrence matrix, COM) 图: 对每幅时间序列散斑图, 若  $i, j$  为散斑图中相邻 2 个像素的灰度值,  $N_{ij}$  为图中  $i, j$  出现的次数, 如果将  $N_{ij}$  的值作为灰度值赋给所构建的共生矩阵图中第  $i$  行第  $j$  列元素, 即可构建时间序列散斑图的共生矩阵图。计算公式为<sup>[28]</sup>

$$\text{COM}=[N_{ij}] \quad (1)$$

3) 计算散斑活性: 惯性矩(IM)可直观地表示 COM 图中非零元素偏离对角线的程度, 如图 4 所示, 样本活性越大, 则其 COM 图中非零元素偏离对角线的距离就越远, 通过计算 IM 值可定量计算样本生物散斑活性。具体计算公式为<sup>[29]</sup>

$$M_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_i N_{ij}} \quad (2)$$

$$\text{IM} = \sum_{ij} M_{ij} (i-j)^2 \quad (3)$$

其中公式 (2) 是对共生矩阵 COM 进行归一化处理, 即求共生矩阵的修正矩阵 (modified co-occurrence matrix, MCOM)。式中  $\sum_i N_{ij}$  代表共生矩阵图中第  $i$  行所有像素灰度值的和,  $M_{ij}$  代表第  $i$  行第  $j$  列的元素  $N_{ij}$  在该行中的占比。公式 (3) 计算 COM 图中所有元素偏离主对角线的程度, 即为散斑活性。

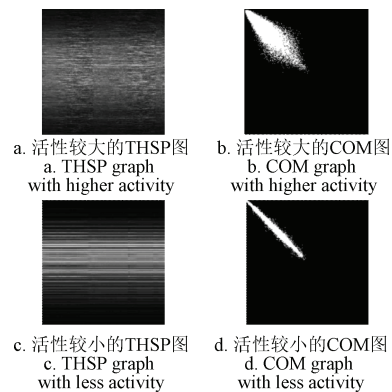


图 4 不同散斑活性的 THSP 和 COM 图对比

Fig.4 Comparison of THSP and COM with different speckle activities



1.4.2 激光散斑处理的方法改进

1) 不同行的选择

由 1.4.1 节可知，传统方法构建 THSP 通常是选择激光散斑图中的某一固定行，按照时间顺序构建其时间序列散斑图。因此所选行是否具有代表性，将严重影响检测结果的稳定性。通过对样本散斑图像从上到下，分别选择不同行构建 THSP 图，再求其惯性矩 IM，得到不同波长激光不同行的 IM 值如图 5 所示。

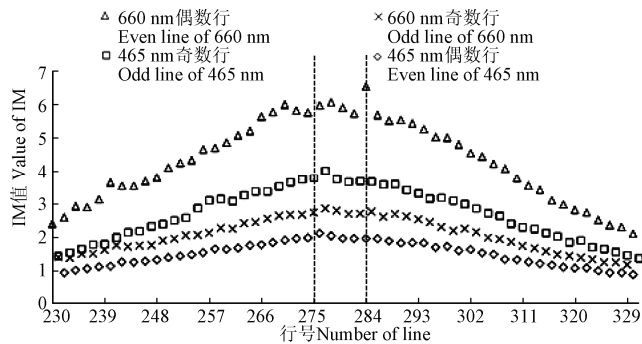


图 5 2 种波长下不同行的 IM 值分布

Fig.5 Distribution of IM values for different rows at two wavelengths

由图可知：IM 值在激光散斑点中心位置向四周呈近似的高斯分布，证明激光束是一种高斯光；465 nm 激光的散斑图像奇数行的 IM 值始终大于偶数行，而 660 nm 红光激光则恰好相反。这是由于 CCD 相机像元的滤光片的排列方式为拜耳分布所致，该结果将为 THSP 图像的构建提供参考。

在试验过程中，每次拍摄位置可能不完全一致、反复搬动会导致样本形态发生细微变化、以及猪肉表面不规则等原因，激光光强最高峰位置不一定出现某个特定位置，如果采用传统的固定行或列求取样本的 IM 值，其活性并不一定真实。

针对上述情况，设计了一种动态寻找激光光强最高峰位置的方法。经统计，重复摆放误差导致的激光光强最高峰位置位于第 231~291 行范围内；提取样本散斑图像在该范围内的 31 个奇数或偶数行；从散斑图像左侧开始扫描各行 IM 值，当某行 IM 值为最大且与相邻行的差值小于阈值 0.5 时（消除奇异值影响），记录该行值及位置坐标，直到扫描结束，最后取最高峰及周围 2 个相邻行的 IM 均值作为样本 IM。

2) 惯性矩算法的改进

激光散斑是激光在物体表面随机干涉形成的动态散斑，由于噪声的存在，个别像素灰度值可能会出现异常，这种异常点反映在共生矩阵中就会出现如图 6 虚线圆中的孤立点。按照公式 (3) 的计算方法，这些孤立点的修正矩阵为 1，则其对惯性矩的贡献为  $(i-j)^2$ ，造成 IM 出现异常值，无法真实反映样本活性的大小。

针对传统 IM 算法抗干扰性差的问题，提出以下两方面的改进措施：

①对修正矩阵 (MCOM) 算法的改进：传统计算 MCOM 的方法是求共生矩阵图中每个像素灰度值在所在行或列中的权重，这是导致 IM 出现异常值的原因。改进的方法如公式 (4)

$$M'_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_{ij} N_{ij}} \quad (4)$$

式中  $\sum_{ij} N_{ij}$  代表共生矩阵图中所有灰度值总和， $M'_{ij}$  代表每个  $N_{ij}$  在整个共生矩阵中的占比，由于每个点都相对独立，即使出现异常点，其整个共生矩阵中的权重较小，因此干扰力度降低。

②对非零元素偏离对角线距离的改进：由图 6 所示，非零元素几乎对称分布在对称线两侧，而 IM 算法的目的是定量反映共生矩阵图中非零元素偏离对称线的距离，故将原算法中用点坐标差值的平方计算偏离距离替换为非零元素偏离对称线距离的平方，改进后的惯性矩算法为

$$IM' = \sum_{ij} \frac{M'_{ij}(i-j)^2}{2} \quad (5)$$

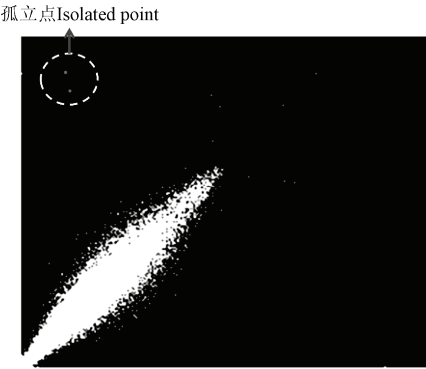


图 6 样本出现的孤立点

Fig.6 Isolated point of sample

1.5 TVB-N 测定及新鲜度预测模型建立

每个样本完成激光散斑图像采集后，用半微量定氮法（按照 GB/T5009.44-2003 执行<sup>[30]</sup>）测定样本中的 TVB-N 值。测定结果按国家标准 GB2707-2005<sup>[31]</sup>，TVB-N 值对应的肉类新鲜度等级（见表 1）进行评定。

表 1 肉类新鲜度等级划分标准

Table 1 Standard grades of meat freshness	
肉类新鲜度等级	TVB-N 值
Freshness level of meat	Value of TVB-N/(mg·100 g <sup>-1</sup> )
新鲜肉 Fresh meat	<15
次新鲜肉 Less fresh meat	15~25
腐败肉 Putrid meat	>25

为评判激光散斑活性对猪肉新鲜度的检测效果，采用 LDA 线性判别方法建立预测模型。选取其中 56 个猪肉样本作为校正集建立模型，其余的 28 个作为预测集来验证模型的稳定性。

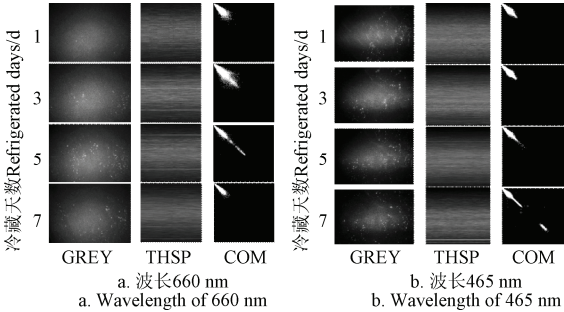
2 结果与分析

2.1 激光散斑图像处理

根据 1.4.1 中的图像处理方法，将采集到的激光散斑



图像先转化成灰度图像，依次进行 THSP 和 COM 处理。2 种波长的处理结果如图 7 所示（从上至下分别为某样本第 1 天，第 3 天，第 5 天和第 7 天）。可知，猪肉冷藏天数不同，构建 THSP 图以及生成的 COM 图也不同，表明其活性发生了变化，但根据 COM 图仍难以做出客观评价，还需要计算其 IM 值进行定量分析。



注：GREY 为灰度图；THSP 为构建的时间序列散斑图；COM 为生成的共生矩阵图。  
Note: GREY is the gray-scale graph; THSP is the time history of speckle pattern constructed; COM is the generated covariance matrix.

图 7 两种波长的激光散斑图像处理结果

Fig.7 Results of laser speckle image processing with two wavelengths

2.2 传统统计方法与改进方法对比

为验证改进方法的合理性，通过统计分析，得到 465 nm 波长下不同货架期内样本 IM 的特征值见表 2。由于 2 种方法的计算过程不同，得到的 IM 值处于不同的数量级，为比较 2 种方法处理结果的稳定性，选择变异系数与差商这 2 个特征值进行比较。结果显示在整个冷藏期间，传统方法 IM 值的变异系数和差商远大于改进方法，说明传统方法的 IM 值波动较大，而改进方法的 IM 值较平顺。比较最大值和均值 2 个特征值可知，改进方法可以有效避免异常值的影响，且不改变散斑活性的变化趋势，因而认为改进方法比传统方法更合理。

表 2 两种处理方法的统计结果（465 nm）

Table 2 Statistical results of two methods (465 nm)

方法 Method	特征值 Characteristic value	冷藏时间 Refrigerated storage time/d			
		1	3	5	7
传统方法 Traditional method	最大值 Maximum value	41 367	42 772	31 172	13 024
	均值 Mean	18 555	7670	5 942	2 834
	变异系数 Coefficient of variation	0.459 9	1.145	1.174	1.175
	差商 Difference quotient	11.55	232.7	102.0	84.12
改进方法 Improved method	最大值 Maximum value	5.905	9.301	4.908	2.221
	均值 Mean	3.914	3.263	2.568	1.530
	变异系数 Coefficient of variation	0.245 7	0.587 0	0.344 7	0.218 3
	差商 Difference quotient	1.888	5.900	3.173	1.718

2.3 两种波长处理结果的比较

两种激光器的波长为 660 和 465 nm 时，绘制冷鲜猪

里脊肉冷藏过程中的散斑活性变化如图 8 所示。可以看出：随冷藏时间的增加，前者散斑活性呈现先升高后下降的变化；而后者散斑活性在前 3 d 基本保持不变，之后也出现升高再下降的变化。该变化趋势可能与猪肉组织细胞的变化有关，Zdunek 等<sup>[32]</sup>认为生物散斑活性可能与细胞内物质运输、细胞质环流有关。在猪肉熟化过程中，组织细胞迅速死亡，细胞内结构蛋白逐渐被酶解，导致细胞骨架坍塌，物质运输停滞，细胞内自由水外溢，这都是导致散斑活性出现动态变化的原因，因此可以用散斑活性来反映猪肉的新鲜度变化；猪肉散斑活性最高峰的出现时间，660 nm 早于 465 nm。说明波长为 660 nm 激光对猪肉组织变化更敏感。由图 1 可知，465 nm 波长下的光大部分被猪肉吸收，而 660 nm 波长下大部分被反射出来，散射光中携带了猪肉组织的生物信息，故 660 nm 波长的激光对猪肉组织变化更敏感，散斑活性最高峰时间要早于 465 nm 激光。后续研究可以结合 2 种波长激光对猪肉组织变化的响应时间不同的特征，为猪肉新鲜度的检测提供更多信息。

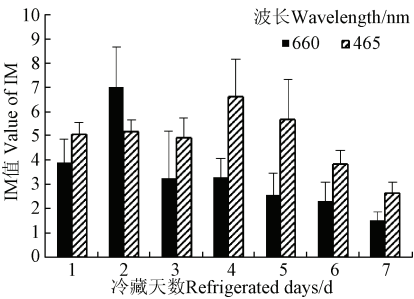


图 8 不同波长的激光对猪肉散斑活性的影响

Fig.8 Effect of laser with different wavelengths on speckle activity of pork

2.4 LDA 判别结果讨论

根据表 1 所示的猪肉新鲜度等级分类标准，可将测得的 TVB-N 值分成新鲜、次新鲜和腐败 3 个等级，结合 660 和 465 nm 激光波长下测得的散斑活性 IM 值，建立新鲜度等级 LDA 线性判别模型，结果如表 3 所示。

可知，465 nm 波长的判别效果好于 660 nm，其训练集和预测集的识别率分别为 87.50%和 89.29%，误判主要集中在新鲜度等级的过渡区域，特别是新鲜肉与次新鲜肉的误判较多，这可能与 TVB-N 值和散斑活性 IM 值的变化趋势不同有关。TVB-N 是猪肉组织蛋白分解的产物，在储藏过程中随时间呈线性增加，而散斑活性 IM 值反映猪肉组织整体活性的变化，随储藏时间呈先增后降的变化，故难以预测 TVB-N 值。但散斑活性 IM 值对不新鲜猪肉的识别效果较好，由图 8 可知，腐败猪肉的散斑活性 IM 值很小，表明激光散斑技术对猪肉新鲜度检测具有可行性，并且激光散斑技术因其快速、无损、低价等特点，是一项很有潜力的检测技术。后续研究可通过增加肉色，时间序列散斑图像的自相关系数等指标检测，以期建立更全面的预测模型。



表 3 两种波长预测模型中训练集和预测集的判别结果

Table 3 Identification results of training set and forecast set in prediction models with two kinds of wavelength

波长 Wavelength/nm	样本集 Sample set	新鲜度等级 Level of freshness	样本数 Sample numbers	识别结果 Identification results			识别率 Identification rate/%
				新鲜 Fresh	次新鲜 Less fresh	腐败 Putrid	
660	训练集 Training set	新鲜 Fresh	16	11	4	1	82.14
		次新鲜 Less fresh	26	3	22	1	
		腐败 Putrid	14	1	0	13	
	预测集 Forecast set	新鲜 Fresh	8	5	2	1	71.43
		次新鲜 Less fresh	13	3	9	1	
		腐败 Putrid	7	1	0	6	
465	训练集 Training set	新鲜 Fresh	16	14	1	1	87.50
		次新鲜 Less fresh	26	2	23	1	
		腐败 Putrid	14	2	0	12	
	预测集 Forecast set	新鲜 Fresh	8	7	1	0	89.29
		次新鲜 Less fresh	13	2	11	0	
		腐败 Putrid	7	0	0	7	

3 结 论

本文选取宰后 24 h 的冷鲜猪里脊肉为研究对象, 探究激光散斑技术应用于冷鲜猪肉新鲜度检测的可能性。试验结论如下:

1) 散斑图像不同行的选取对样本惯性矩 (inertia moment, IM) 值具有很大影响, 两者关系呈现类似高斯分布; 由于 CCD 相机像素特定的排列方式导致不同波长的激光其散斑图像奇偶列的 IM 规律不一样, 具体为 660 nm 波长下 IM 值总是偶数行大于奇数行, 而 465 nm 波长下则相反。因此在实际应用中, 应针对不同波长的激光选择散斑图像光强最大的行来构建时间序列散斑 (time history of speckle pattern, THSP) 图。

2) 针对散斑图像不同行的选取对 IM 值影响、传统 IM 算法异常值干扰等问题, 提出 3 点改进: 设计了排序算法动态选择散斑活性最高峰及周围 2 个相邻行来计算样本 IM 值, 改进共生矩阵的修正矩阵计算方法以及改进非零元素偏离对角线距离的计算方法。结果显示, 改进方法可以有效地抑制异常值干扰, 能真实反映出样本的活性差异。

3) 分别用 660 和 465 nm 激光器对猪肉样本 7 d 内的散斑活性进行连续监测后发现, 猪肉表面活性随冷藏天数呈现先升高后降低的变化, 且 660 nm 激光对猪肉组织的变化更敏感, 表明激光散斑可以反映出猪肉样本货架期内的活性变化。

4) 分别用 660 和 465 nm 激光器的散斑活性 IM 值结合测得的猪肉样本挥发性盐基氮 (total volatile basic nitrogen, TVB-N) 等级, 采用 LDA 线性判别方法建立猪肉新鲜度等级预测模型, 结果显示 465 nm 波长的激光判别效果要好于 660 nm 激光, 其训练集和预测集的识别率能达到 87.50%和 89.29%, 表明激光散斑技术对猪肉新鲜度的检测具有可行性。

研究仅对激光散斑技术应用于冷鲜猪肉新鲜度检测可行性以及相关处理方法的改进进行探索, 对其机理分析及相关定量模型分析等尚待进一步研究。

[参 考 文 献]

[1] 李香春, 李洪军. 我国肉制品工业现状及发展趋势[J]. 肉类工业, 2004(3):5-7.

[2] Barbin D F, Elmasry G, Sun D W, et al. Non-destructive assessment of microbial contamination in porcine meat using NIR hyperspectral imaging[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 17: 180—191.

[3] Barbin D F, Elmasry G, Sun D W, et al. Non-destructive determination of chemical composition in intact and minced pork using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Food Chemistry, 2013, 138(2/3): 1162—1171.

[4] 孙永海, 孙瑜, 孙钟雷. 肉品气味信息采集系统的设计[J]. 吉林大学学报信息科学版, 2008, 26(2): 169—174.

[5] 孙永海, 孙钟雷, 李宇. 基于遗传组合网络的肉用人工嗅觉系统[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37(5): 1209—1213.

Sun Yonghai, Sun Zhonglei, Li Yu. Meat artificial olfactory system based on composite GA-RBF network[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(5): 1209—1213. (in Chinese with English abstract)

[6] 蔡健荣, 万新民, 陈全胜. 近红外光谱法快速检测猪肉中挥发性盐基氮的含量[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2808—2812.

Cai Jianrong, Wan Xinmin, Chen Quansheng. Feasibility study for the use of near-infrared spectroscopy in the quantitative analysis of TVB-N content in Pork[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2808—2812. (in Chinese with English abstract)

[7] Cai Jianrong, Chen Quansheng, Wan Xinmin, et al. Determination of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content and Warner- Bratzler shear force (WBSF) in pork using Fourier transform near infrared (FT-NIR) spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2011, 126(3): 1354—1360.



- [8] Pajuelo M, Baldwin G, Rabal H, et al. Bio-speckle assessment of bruising in fruits[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2003, 40(1/2): 13—24.
- [9] 段怡婷, 李光宇, 高瞻. 生物散斑测量技术综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 17—29.
- [10] 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 Menghan, Dong Qingli, Liu Baolin, et al. Application of biospeckle on analysis of agricultural products quality[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(24): 284—292. (in Chinese with English abstract)
- [11] Li Pengcheng, Ni Songlin, Zhang Li, et al. Imaging cerebral blood flow through the intact rat skull with temporal laser speckle imaging[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(12): 1824—1826.
- [12] Ramirez-San-Juan J C, Regan C, Coyotl-Ocelotl B, et al. Spatial versus temporal laser speckle contrast analyses in the presence of static optical scatterers[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(10): 106009—106009.
- [13] Wood T, Smit E, Maes E, et al. Monitoring of cerebral blood flow during hypoxia - ischemia and resuscitation in the neonatal rat using laser speckle imaging[J]. *Physiological Reports*, 2016, 4(7): e12749.
- [14] Carvalho P H A, Barreto J B, Braga R A, et al. Motility parameters assessment of bovine frozen semen by biospeckle laser (BSL) system[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 102(1): 31—35.
- [15] González-Peña R J, Jr B R, Cibrián R M, et al. Monitoring of the action of drugs in melanoma cells by dynamic laser speckle[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(5): 057008.
- [16] Briers J D. Wavelength dependence of intensity fluctuations in laser speckle patterns from biological specimens[J]. *Optics Communications*, 1975, 13(3): 324—326.
- [17] Yuan S, Devor A, Boas D A, et al. Determination of optimal exposure time for imaging of blood flow changes with laser speckle contrast imaging[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(10): 1823—30.
- [18] Fujii H, Asakura T, Nohira K, et al. Blood flow observed by time-varying laser speckle[J]. *Optics Letters*, 1985, 10(3): 104—106.
- [19] Braga R A, Fabbro I M D, Borem F M, et al. Assessment of seed viability by laser speckle techniques[J]. *Biosystems Engineering*, 2003, 86(3): 287—294.
- [20] Men S, Yan L, Qian H, et al. Laser speckle detection system for seed viability assessment [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 556—562: 3156—3159.
- [21] Rabelo G F, Braga Júnior R A, Fabbro I M D. Laser speckle techniques in quality evaluation of orange fruits[J]. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental*, 2005, 9(4): 570—575.
- [22] Minz P D, Nirala A K. Laser speckle technique to study the effect of chemical pre-treatment on the quality of minimally processed apples[J]. *Laser Physics*, 2016, 26(4): 045602.
- [23] Szymanska-Chargot M, Adamiak A, Zdunek A. Pre-harvest monitoring of apple fruits development with the use of biospeckle method[J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 145(3): 23—28.
- [24] Pajuelo M, Baldwin G, Rabal H, et al. Bio-speckle assessment of bruising in fruits[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2003, 40(1/2): 13—24.
- [25] Vega F, Torres M C. Automatic detection of bruises in fruit using Biospeckle techniques[C]// 2013 XVIII Symposium of Image, Signal Processing, and Artificial Vision (STSIVA). 2013: 1—5.
- [26] 刘海彬, 高迎旺, 卢劲竹, 等. 基于激光散斑的梨缺陷与果梗/花萼的识别[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 319—324.  
Liu Haibin, Gao Yingwang, Lu Jinzhu, et al. Pear defect and stem/calyx discrimination using laser speckle[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(4): 319—324. (in Chinese with English abstract)
- [27] Oulamara A, Tribillon G, Duvernoy J. Biological activity measurement on botanical specimen surfaces using a temporal decorrelation effect of laser speckle[J]. *Journal of Modern Optics*, 1989, 36(2): 165—179.
- [28] Zobrist A L, Thompson W B. Building a distance function for gestalt grouping [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1975, 24(7): 718—728.
- [29] Kruger R P, Thompson W B, Turner A F. Computer Diagnosis of Pneumoconiosis[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 1974, SMC-4(1): 40—49.
- [30] GB/T 5009.44-2003, 肉与肉制品卫生标准的分析方法[S].
- [31] GB2707-2005, 猪肉卫生标准[S].
- [32] Zdunek A, Herppich W B. Relation of biospeckle activity with chlorophyll content in apples[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2012, 64(1): 58—63.



## Laser speckle image detection of chilled pork freshness based on improved moment of inertia algorithm

Cai Jianrong, Liu Menglei, Sun Li, Lu Yue, Yang Hang

(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Laser speckle is a new type of nondestructive detection technology, which can be used to characterize the activity of biological samples. Based on the laser speckle technique, an experimental platform was designed to investigate the feasibility of detecting the freshness of chilled pork. The optical maser with the wavelength of 465 and 660 nm and the power of 6 mw was used in this study. 84 pieces of chilled pork 24 h after slaughter, were cut into  $6\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 8\text{ mm}$  and placed in a transparent dish with a lid. After numbering them, the samples were kept at  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  until measurement. For each sample, 640 laser speckle images with the resolution of  $640 \times 480$  pixels were obtained at a regular interval of 0.06 s. The step was repeated every day for 7 days. Afterwards the laser speckle images were processed with a traditional method. Firstly the grey-scale processing was conducted, the fixed line in each gray images obtained was extracted, and the THSP (time history of speckle pattern) image was constructed using them according to the storage time. Then the co-occurrence matrix (COM) was calculated. Finally, the inertia moment (IM) of the COM was calculated and considered as the activity value of samples. The results showed that the IM values obtained by the traditional method frequently had abnormal values, and the computational stability of the method was rather poor. The IM values could be influenced by the traditional algorithm and the selection of different row, through which it was found that the traditional method was prone to outliers in the calculation of the correction matrix. Besides, the choices of different rows had great influence on IM values. The IM values presented Gaussian-like distribution from the center of the laser speckle to the around. And the IM values of odd or even lines under different excitation wavelengths were various due to the Bayer arrangement of CCD (charge coupled device) camera pixel. In this study, 3 kinds of improvements about traditional algorithms were proposed according to above findings. First, the sort algorithm was designed to calculate the IM values by dynamically selecting 3 lines with the highest activity in speckle images. Second, the calculation method of modified matrix for COM was improved. Finally, the method of calculating the distance between non-zero element and the diagonal was improved. The results exhibited that the outlier disturbance was effectively suppressed by the improved method. The speckle activity of chilled pork showed an upward trend firstly and then downward along with the shelf life. Besides, the activity changes of pork were more sensitive under laser wavelength of 660 nm than that under laser wavelength of 465 nm. According to the measured total volatile basic nitrogen (TVB-N) and speckle activity IM to establish pork freshness prediction model, and the results showed that the discrimination under the laser wavelength of 465 nm was better than the 660 nm laser, and the recognition rate for the training set and the prediction set could reach 87.50% and 89.29%, respectively. Therefore, using laser speckle technique to detect the freshness of cold pork is feasible, and the traditional method can be replaced by the improved method.

**Keywords:** image processing; nondestructive determination; algorithms; chilled pork; freshness; laser speckle; moment of inertia; co-occurrence matrix