

# 基于 OCT 成像的淡水无核珍珠 内部缺陷自动检测方法

石龙杰, 周 扬, 岑 岗, 刘铁兵, 施 秧,  
陈正伟, 黄 俊, 汪凤林, 岑跃峰

(浙江科技学院 信息与工程学院, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 针对淡水无核珍珠质层内部缺陷检测的需求, 提出一种通过光学相干层析图像实现淡水无核珍珠内部缺陷自动检测的方法。根据珠层灰度变化的特点, 识别图像中缺陷区域的梯度特征和缺陷位置变化特征, 并利用缺陷特征建立反向传播神经网络模型。实验中采集了内部无缺陷和内部有多种类型缺陷淡水无核珍珠的光学相干层析图像各 20 幅, 对图像进行预处理并提取特征, 利用  $K$ -means 算法检测样本类型与所提取特征的匹配度, 用特征与类型相匹配的样本特征训练反向传播神经网络模型, 使用反向传播神经网络模型对淡水无核珍珠内部缺陷层进行分类识别。实验结果表明该方法提取特征的匹配度为 92.5%, 分类准确率达到 100%, 验证了该方法的可行性和有效性, 提出的方法能够作为淡水无核珍珠内部缺陷识别和自动分类的有效手段。

**关键词:** 计量学; 光学相干层析成像; 珍珠; 缺陷; 梯度特征; 位置特征; 反向传播神经网络

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1000-1158(2020)10-1226-08

## Automatic Detection of Internal Defects in Freshwater Nucle-free Pearls Based on OCT

SHI Long-jie, ZHOU Yang, CEN Gang, LIU Tie-bing, SHI Yang, CHEN Zheng-wei,  
HUANG Jun, WANG Feng-lin, CEN Yue-feng

(School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University of Science and Technology,  
Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

**Abstract:** In order to expand the range of applications of optical coherence tomography technique, an automatic detection method for internal defects of freshwater nucleated pearls by optical coherence tomography is proposed. According to the grayscale change of defect layer, the proposed method extracted the gradient feature and defect location feature of the defect region in the image, and then established the back propagation neural network (BPNN) model for defection prediction based on the extracted feature. Twenty optical coherence tomography images of defect pearls and twenty optical coherence tomography images of health pearls were collected for image preprocessing and feature extraction in experiments, and  $K$ -means algorithm test was used to test the feature compatibility, and the compatible features were the input of the back propagation neural network model which finally classified the defect recognition. The experimental results show that the matching degree of feature extraction is 92.5%, and the classification accuracy is up to 100%, which proved the feasibility and effectiveness of proposed method, and showed the proposed method can be used as an effective method for the identification and classification of internal defects of freshwater pearls.

**Key words:** metrology; optical coherence tomography; pearl; defect; gradient feature; position feature; BPNN

## 1 引 言

中国的淡水珍珠产量连续多年位居世界第一,

高峰期总产量约占全球产量的 95%, 但销售额却不到世界珍珠销售额的 10%, 质量与产量严重脱节<sup>[1]</sup>, 故全面推进珍珠产业提质增效具有重要的现实意义<sup>[2]</sup>。在提质增效的具体实施中, 珍珠的产后

收稿日期: 2019-06-03; 修回日期: 2020-04-18

基金项目: 2017 年度教育部人文社会科学研究一般(规划基金)项目“互联网+”背景下大学生创新创业环境构建研究(17YJA880004)

浙江省科技计划(2017C31038, LGN19B050002)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

无损检测尤为重要。现有检测方法多是通过珍珠的尺寸、形状、光泽等指标进行检测分级<sup>[3]</sup>。近年来,机器视觉技术发展迅速,马丹丹等利用机器视觉技术以条码尺为基准精确定位了落纱小车在轨道上的位置<sup>[4]</sup>。张竟月等通过结合激光和机器视觉技术,并采用数字处理技术,提取图像特征,完成了玻璃容器中液体体积的高精度测量<sup>[5]</sup>。机器视觉技术也应用于珍珠外在质量的检测,文献[6,7]中分别设计了珍珠的机器视觉检测装置,使用相机从不同角度获取珍珠的图像并利用特征融合的方法,基于大小、形状、光泽、瑕疵和颜色等对珍珠进行自动分级。但对于珍珠内部质量的检测,尤其是对珍珠内部品质无损的检测却鲜见文献报道。

在淡水无核珍珠的生长过程中,其内部主要成分是碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ ),存在同质多相现象。大量研究证实,淡水珍珠质层碳酸钙物相主要是文石,含有少量的方解石、霏石以及微量有机质(蛋白质)和微量元素。优质珍珠的质层是由文石堆叠而成,呈砖墙结构<sup>[8]</sup>,而方解石和霏石主要存在于劣质淡水珍珠中<sup>[9]</sup>。霏石是碳酸钙的不稳定相,但在淡水无核珍珠中却很少被发现,因此,方解石是淡水无核珍珠内部缺陷的主要成分,其与有机物混合会造成珍珠颜色呈黄色,降低珍珠的品质。因此,建立一种无损识别淡水无核珍珠内部方解石缺陷层的方法尤为必要。

光学相干层析技术(optical coherence tomography, OCT)作为一种高分辨率且无损的成像技术<sup>[10]</sup>,已在医学诊断<sup>[11,12]</sup>、组织厚度的测量<sup>[13]</sup>、材料结构分析<sup>[14,15]</sup>、陶瓷<sup>[16]</sup>和壁画<sup>[17]</sup>表面结构观察等方面广泛应用,同时也在珍珠内部结构检测领域有初步的应用尝试。曾楠等提出了使用 OCT 成像技术用于珍珠的无损检测<sup>[18]</sup>。Yang Z 利用光谱 OCT 图像鉴别真假珍珠<sup>[19]</sup>。Lee J H 利用相位敏感 OCT 分析了珍珠的散射相位变化特征,为珍珠真伪的鉴定提供了定量标准<sup>[20]</sup>。另外,国家质量监督检验检疫总局也于 2009 年将 OCT 列为珍珠质层厚度的推荐测量方法(《GB/T 23886-2009 珍珠质层厚度测定方法 OCT 法》)<sup>[21]</sup>。OCT 成像技术可二维重建淡水无核珍珠的近表层内部结构,且 OCT 操作简单,采集图像方便,因此应用于淡水无核珍珠内部缺陷的检测和分类具有可行性。

鉴于 OCT 成像技术在珍珠内部质量检测方面的独特优势,董俊卿利用 OCT 成像技术对海水珍珠的内部缺陷进行了成像,但对缺陷的识别仅限于人工分析图像,操作过程费时费力<sup>[22]</sup>。Zhou Y 等提出一种利用图论的方法来自动分类缺陷珍珠和非缺

陷珍珠的自动化算法<sup>[23]</sup>,将缺陷层上下边界的灰度均值作为分类依据,分类依据单一,不具有普适性,分类性能有待进一步提高。因此,基于 OCT 图像淡水无核珍珠内部缺陷的自动化识别和分类方法具有研究价值。

综上,OCT 成像技术已经能展现淡水无核珍珠的内部结构,但淡水无核珍珠产量极大,通过人工分析图像对每颗珍珠进行内部缺陷检测和分类耗时长,无法应用于实际工业生产,本文提出一种使用 OCT 成像技术对淡水无核珍珠内部缺陷自动识别的快速分类方法,通过提取珍珠 OCT 图像的特征并结合反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)模型进行内部缺陷分类判别,实现全自动化的缺陷检测与分类。

## 2 珍珠样本及 OCT 图像处理

### 2.1 珍珠样本及其图像采集

珍珠样品由诸暨市淡水珍珠主要生产商之一的浙江阮仕珍珠股份有限公司提供,40 个样品均为 2015 年采收的淡水无核珍珠。使用美国 Thorlabs 公司生产的 TELSTO 1300V2 型谱域 OCT 成像仪采集淡水无核珍珠的断层扫描图像,图像横向分辨率为  $10\text{ }\mu\text{m}$ ,纵向分辨率为  $3.4\text{ }\mu\text{m}$ ,信噪比为 120 dB,扫描速度 7.6 kHz,扫描范围 6 mm,采集过程无需对珍珠样本进行预处理,所采集的图像尺寸为  $530 \times 1040$ 。采集的 40 幅图像中,20 幅是无缺陷的珍珠图像,20 幅是有缺陷的珍珠图像,图 1 给出了典型淡水无核珍珠样本的 OCT 图像。

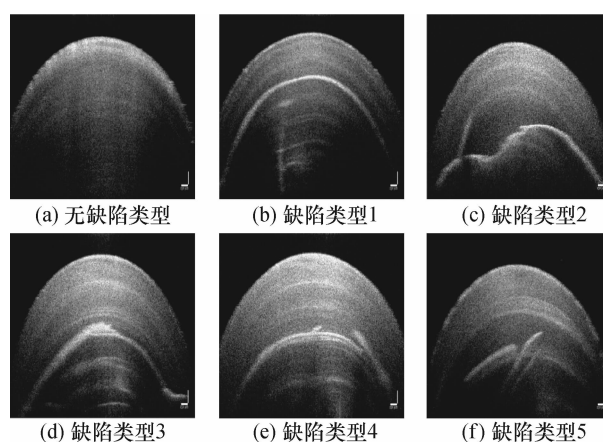


图 1 典型淡水珍珠 OCT 图像

Fig. 1 OCT images of typical freshwater pearls

### 2.2 缺陷识别方法

为了定位 OCT 图像中珍珠缺陷层的具体位置,缺陷识别方法分为图像预处理、特征提取与样本匹

配度检测、分类模型训练及模型预测等 4 个主要步骤,方法流程如图 2 所示。图像预处理过程主要是为了消除图像中噪声对后续特征提取的影响,完成目标和背景的分割、目标对象的拉平变换和进行必要的裁剪,以便于后续的特征提取。特征提取主要根据珠层内部缺陷部位从“暗”到“亮”到“暗”的变化特点,从梯度变化和位置特征着手提取特征。样本匹配度检测是为了检测从样本中提取的特征是否对应样本的类型,确保训练 BPNN 模型的特征真实可靠。最后使用与样本类型相匹配的特征训练并测试 BPNN 模型,通过 BPNN 模型预测淡水无核珍珠质层内部是否存在缺陷,根据珍珠质层内部有无缺陷实现自动分类。

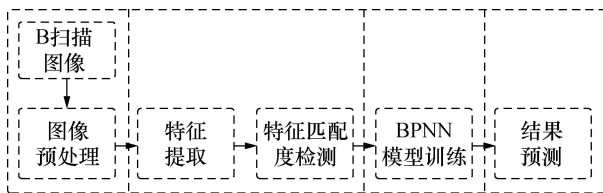


图 2 缺陷识别方法流程图

Fig. 2 Flow chart of proposed method

### 2.2.1 图像预处理

图像预处理过程如图 3 所示,因 OCT 图像中共轭噪声集中分布在图像顶部区域,故珍珠目标在采集过程中,珍珠目标避免落在顶部区域,可对图像上部边缘(本设备涉及前 30 行)的像素灰度值清零,消除共轭噪声的影响。接着,对图像进行一次形态学开运算,消除图像背景中零星像素点,减少背景中散斑噪声的干扰。同时,因图像中背景和目标的分界线位置在图像上半部分,故对图像上半部分进行搜索,将像素灰度值不为零且都属于同一个八连通区域像素集合成为一个区域,逐一搜索各个区域,将总像素不超过 40 的区域内所有像素清零,去除无效区域对背景和目标分离过程中的影响。为了平滑目标的上轮廓,对图像进行一次形态学闭运算。最后使用 canny 算子对图像中珍珠目标进行边缘检测,将检测到的珍珠目标上边缘作为珍珠目标和背景的分界线。最后根据边界线在图中的所在位置,取未做任何处理的珍珠 OCT 原始图像,将边界上部像素灰度值清零,下部像素灰度值保持不变,用于后续步骤处理。

由于淡水无核珍珠的珠层在成形过程中,呈年轮状结构,为了便于提取水平和垂直方向的梯度变换特征,随即对图像中的目标进行了拉平变换。以珍珠目标的上边缘为基准,对图像每列像素进行上移目标,使上边缘上的点都位于第一行。

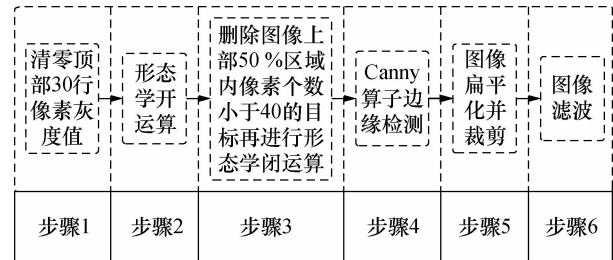


图 3 图像预处理流程图

Fig. 3 Flow chart of image preprocessing

OCT 通过检测珍珠内部散射介质的背向单次散射光成像,散射光随着深度的增加而发生衰减,因此所采集到目标底部的灰度值较小,导致底部区域珍珠目标与背景的对比较低,不能满足有效的特征提取。另一方面,采集图像时,OCT 的焦点位于所采区域中心位置的上部,目标边缘区域信息相较于目标中心区域灰度值小,因此目标的中心区域更能反映不同类型珍珠之间的特征差异。同时,目标拉平后,目标边缘会变得模糊,为快速提取有效的特征,在不裁剪到缺陷区域的前提下,选择裁去上部边缘 5%、下部边缘 25%、左右边缘各 25% 的区域,裁剪后图像尺寸为  $318 \times 520$ ;最后,为减小目标内部散斑噪声对特征提取的影响,采用中值滤波对图像降噪。经过反复测试,  $[5 \times 12]$  的模板有较好的效果。降噪后的图像作为提取特征步骤的输入。图像预处理步骤中的具体过程如图 4 所示。

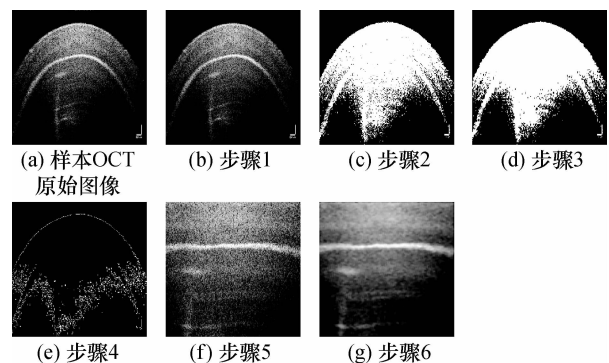


图 4 图像预处理过程中对应图 3 各步骤的图像

Fig. 4 Images corresponding to each step of image preprocessing process shown in figure

### 2.2.2 特征提取与样本匹配度检测

方解石作为珍珠质层中的缺陷,同等成像条件下,在 OCT 图像中像素灰度值比文石层像素灰度值大,呈现出“亮”的突变,因此在 OCT 图像从上向下搜索过程中,跨过缺陷部位上边界时像素灰度值是由小到大突变的,跨过缺陷层下边界时是由大到小突变,即从图像上反映出“暗”到“亮”再到“暗”的

变化特点,而内部无缺陷淡水无核珍珠 OCT 图像的像素灰度值沿着搜索方向像素灰度值呈现下降趋势。通过自定义卷积模板  $\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1; 0 & -1 & 0; 0 & 0 & 1 & 0; 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$  对图像进行滤波,生成自定义梯度图像,再对自定义梯度图像中每个像素以自身为起始点的垂直方向 5 个像素灰度值求和生成待搜索梯度图像;把待搜索梯度图像每列灰度值最大的像素点作为缺陷层上边界的待拟合像素点,同时,从缺陷层上边界位置开始,将此列灰度值最小的像素点作为缺陷层下边界的待拟合像素点。在自定义梯度图像中找到上边界和下边界待拟合像素点所在的位置,分别求出上、下边界的灰度均值作为 BPNN 待输入的两个特征。

针对无缺陷样本,其 OCT 图像上缺陷位置无法单纯使用梯度变化来确定,即会有较大的纵向波动,在这种情况下,可能搜索到并非缺陷部位的真实边界。因此将图像每条边界上相邻点的纵向距离大于阈值 10,即认为存在一次波动。在得出每幅图像缺陷层上、下边界的位置后,依次判断同一边界相邻两个边界点的纵向距离,分别统计上、下边界的波动次数作为另一组待输入的两个特征。

为保证训练出的 BPNN 模型具有良好的预测性能,需要确定从每个样本中所提取的特征与样本类型匹配,使用与样本类型相匹配的特征作为数据集训练和测试 BPNN 模型。本文选择  $K$ -means 算法对样本与特征的匹配度进行检测, $K$ -means 作为一种无监督学习的聚类算法,根据相似性的原则,将具有相似度较高的样本划分至同一类。 $K$ -means 算法在聚类类别少的数据集中聚类效果优,收敛速度快,本文所聚类类别为缺陷珍珠和非缺陷珍珠两类,使用  $K$ -means 算法能够对样本进行有效聚类。

$K$ -means 算法聚类流程如下:

- (1) 从数据集中随机选择两个样本,初始化聚类中心;
- (2) 计算每个样本与聚类中心的欧式距离,分配给每个样本距离最近的聚类中心的类型,使用每个聚类样本的特征均值更新聚类中心;
- (3) 重复步骤(2),直到聚类中心不在变化;
- (4) 输出聚类中心和每个样本的类型。

聚类结束后,剔除数据集中与样本类型不匹配的特征,将余下样本的特征作为 BPNN 的输入,训练 BPNN 模型。

### 2.2.3 BPNN 模型

BPNN 是一种按照误差逆向传播算法训练的多层前馈神经网络,它主要通过梯度搜索技术对网络

进行训练,使网络的预测结果更接近训练集样本真实值,是目前应用最广泛的网络之一,其优点如下:具有实现任何复杂非线性映射的功能、具备自学习的能力、网络具有一定的推广、概括能力,对于二分类问题,BPNN 有准确的预测能力<sup>[25]</sup>。

典型的 3 层 BPNN 模型的拓扑结构如图 5 所示,BPNN 的训练包括信号的前向传播和误差的反向传播两个过程。正向传播时,将样本特征作为输入信号通过隐藏层的各个神经元节点,经过非线性变换后通过输出层产生输出结果,将实际输出与期望输出结果对比,若实际输出与期望输出结果不同,计算实际输出与期望输出之间的误差。误差反向传播时,将误差通过隐藏层向输入层逐层传播,并分摊给各层中的所有神经元节点,从各层获得的误差信号作为调整各神经元节点之间连接权值的依据。通过调整输入神经元节点与隐藏层神经元节点的连接强度和隐藏层神经元节点与输出层神经元节点的连接强度以及阈值,使误差沿梯度方向下降,经过反复学习训练,确定与最小误差相对应的权值和阈值。

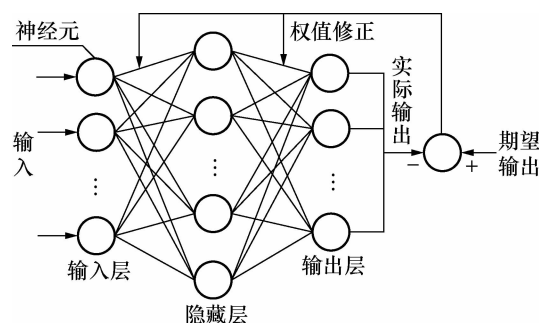


图 5 BPNN 模型拓扑图

Fig. 5 The topology of BPNN model

创建 BPNN 模型分 3 个阶段,分别为设计、训练和测试阶段。设计阶段,使用 Matlab 自带工具箱完成对 BPNN 模型的创建,对神经网络的层数和各层的节点数、均方根误差 MSE、迭代次数 epoch、学习率  $\eta$ 、各层神经元的传递函数和训练方法进行设置。在训练和测试阶段,将每个图像样本中提取的 4 个特征作为输入,采用留一法划分训练集和测试集后对网络进行训练,并使用均方根误差 MSE 评价网络的学习性能。最后的测试阶段,将绝对误差  $E$  作为检验 BPNN 模型预测结果准确性的依据,其计算公式为:

$$E = |\hat{y}_i - y_i| \quad (1)$$

式中: $\hat{y}_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为第  $i$  个样品的预测值; $y_i$  为第  $i$  个样品的真实值; $n$  为样品的数目。相对误差越小,表明 BPNN 模型的预测性能越好。规定预测值与真实值之间的绝对误差在 0.5 以内则预测正

确 绝对误差在 0.5 及以上则预测错误。设计阶段, 本文采用两层神经网络结构, 分别为隐藏层和输出层。输出层节点数由输出数据个数决定, 实现的是对淡水无核珍珠内部缺陷和非缺陷的分类, 一共分为两类, 因此输出层节点数为 1。隐藏层节点数的选择对神经网络的预测性能有一定的影响, 可根据经验公式确定隐藏层的节点数, 如式(2)所示:

$$L = \sqrt{M + N} + a \quad (2)$$

式中:  $M$  为输入层节点数,  $N$  为输出层节点数,  $a$  为 1~10 之间的调节整数。在 BPNN 模型的训练过程中 MSE 应该逐渐减小, 但是由于内部缺陷珍珠和非缺陷珍珠提取的特征比较明显, MSE 设定的大小对 BPNN 训练的速度影响不大, MSE 设置的较小或者较大都能完成训练, 且预测性能差距不大, BPNN 的具体训练参数设置如表 1 所示, 其他参数均采用 Matlab 的默认设置。

表 1 BPNN 模型训练参数的确定

Tab. 1 Determination of BPNN model training parameters

迭代次数	均方根误差	学习率	隐藏层节点数
100	$10^{-3}$	0.01	9

在对 BPNN 模型训练之前, 量化 BPNN 的输出结果, 内部无缺陷的珍珠标签为 1, 内部缺陷的珍珠标签为 0。训练阶段, 为避免过度学习和欠学习状态的发生, 留一法用于检验网络的预测性能。

### 3 实验结果

本文通过灰度突变和定位缺陷层在珍珠 OCT 图像中的位置来提取图像特征, 为了展示图像的特征, 图 6 给出了 6 种典型的珍珠样品的 OCT 图像及其特征提取过程, 最终对缺陷层的上、下边界进行了准确定位, 图 6(a) 是内部无缺陷的淡水珍珠 OCT 图像, 图 6(b)~图 6(f) 是内部有多种类型缺陷的淡水珍珠 OCT 图像。无缺陷淡水珍珠因没有缺陷层, 在 OCT 图像中所提取出的上、下边界不是真实缺陷层的上、下边界, 其同一边界水平相邻列的边界点纵向距离差距大, 而对于内部缺陷的淡水珍珠 OCT 图像的缺陷层, 处于同一边界上的相邻点的纵向距离差距小, 所定位的缺陷层上、下边界较平滑, 可见该波动特点是后续能够准确检测出淡水珍珠内部的缺陷的依据。表 2 给出了 6 个典型样本从 OCT 图像提取 4 种特征具体数值, 保留小数点后面 4 位有效数字。

通过表 2 对比了内部无缺陷珍珠和内部有缺陷

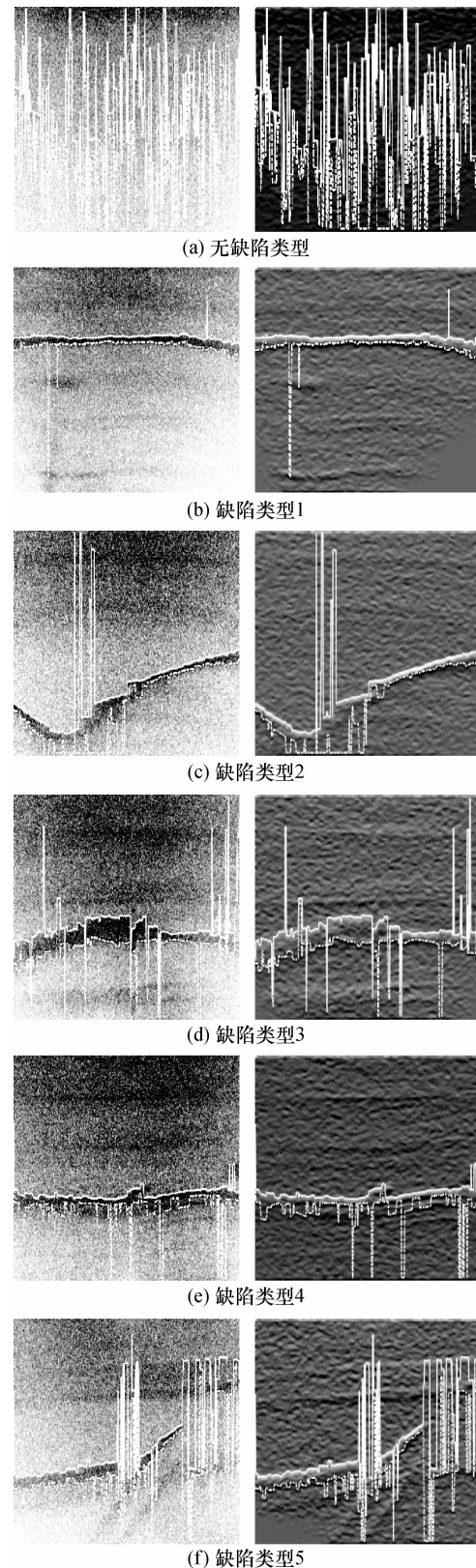


图 6 6 个典型样品的缺陷层位置图, 缺陷类型与图 1

相对应。左列: 目标被拉平后的负片图像;

右列: 目标被拉平后的垂直梯度图像

Fig. 6 Defect locations of six typical samples, Corresponding

to each image in figure 1. Left column: negative image

where the target is flattened and cropped;

Right column: gradient image

珍珠的 4 种特征,可以看出无缺陷珍珠的上边界灰度均值小于缺陷珍珠的上边界灰度均值,而下边界灰度却呈现出相反的趋势。从波动性上分析,无缺陷珍珠上、下边界的波动次数相较于缺陷珍珠的上、下边界波动次数大,可见不同类型珍珠之间的 4 种特征存在显著差异,可作为分类判别的依据。

表 2 不同类型珍珠的 4 种特征对比

Tab. 2 Comparison of four features of different types of pearls

样本类型	上边界 灰度均值	下边界 灰度均值	上边界 波动次数	下边界 波动次数
无缺陷	43.055 8	-40.963 5	146	86
缺陷类型 1	169.165 4	-170.019 0	2	4
缺陷类型 2	202.478 8	-116.963 0	10	11
缺陷类型 3	106.053 8	-114.688 0	32	21
缺陷类型 4	138.682 7	-106.573 0	7	25
缺陷类型 5	110.461 5	-85.051 9	43	35

为验证本文方法对提取特征的准确性,使用 K-means 算法分别根据样本的梯度特征和位置特征对样本进行聚类,如图 7 所示。图 7(a) 是所有淡水珍珠样本 OCT 图像的位置特征二维分布图,从图中可以看出,根据样本的上、下边界波动次数特征分布特点来看,样本主要分布在 2 个区域。图 7(b) 显示的是 K-means 算法对 OCT 图像位置特征的自动聚类结果。图 7(a) 结合图 7(b) 可以看出 K-means 算法能够根据样本的上、下边界波动次数特征对两种类型的珍珠样本进行聚类,同一区域内均为同一种类型样本,再结合图 7(c) 中珍珠的真实类型与 K-means 算法聚类预测的类型对比,所有样本中的 3 个样本聚类的类型与珍珠的真实类型不相同,余下 37 个样本聚类的类型与珍珠的真实类型相同。图 7(d) 是所有淡水珍珠样本 OCT 图像的梯度特征二维分布图,从图中可以看出,上边界像素灰度均值较大的样本其下边界灰度均值相对较小。图 7(e) 显示的是 K-means 算法对 OCT 图像梯度特征的自动聚类结果,图 7(d) 结合图 7(e) 可以看出 K-means 算法按照样本的上、下边界像素灰度均值特征也能完成两种类型珍珠的聚类,再结合图 7(f) 中珍珠的真实类型与 K-means 算法聚类的珍珠类型对比结果,其中 3 个样本聚类的类型与珍珠的真实类型不相同,余下 37 个样本聚类的类型与珍珠的真实类型相同。将图 7(c) 与图 7(f) 结合进行对比发现 3 个样本按照位置特征和梯度特征进行聚类,聚类的类型与珍珠真实类型均不相同,其余 37 个样本按照位置

特征和梯度特征进行聚类,聚类的类型与珍珠的真实类型均相同。结果显示聚类的匹配度为 92.5%,表明可以将样本的上、下边界分别对应的边界点波动次数和上、下的像素灰度均值可以作为区分淡水珍珠内部有无缺陷的特征。

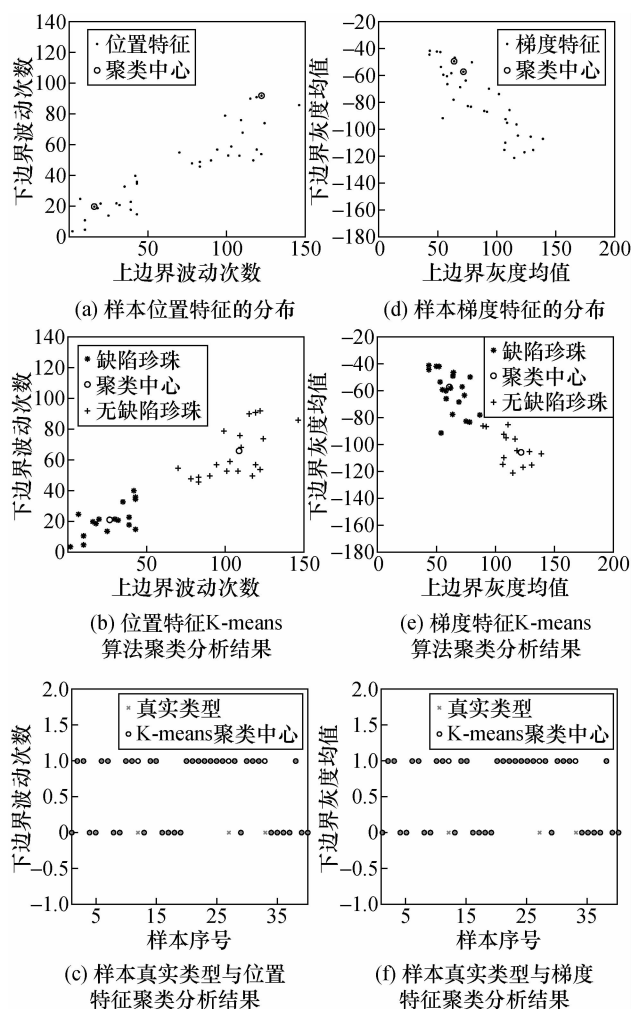


图 7 K-means 算法聚类分析图

Fig. 7 Clustering analysis results of K-means algorithm

剔除 K-means 算法聚类出的类型和真实类型不同的珍珠样本,使用 K-means 算法聚类出的类型与真实类型相同珍珠样本的特征训练 BPNN 模型,采用留一法检验 BPNN 模型的预测准确性,结果如图 8 所示,图 8(a) 给出了样本的真实类型与预测类型,图 8(b) 是每个样本真实类型与预测类型之间的数值绝对误差,根据绝对误差小于 0.5 即为预测正确的判断标准,从图 8(b) 中可以看出,所有样本的预测类型数值与真实类型数值之间的绝对误差均小于 0.5, BPNN 模型预测出的类型与真实类型相同,预测准确率达到 100%。表明经 K-means 算法聚类分析所选择特征训练出的 BPNN 模型能够作为珍珠类型的预测模型,证明了本文所提出的方法能够自动检测珍珠内部缺陷,并实现淡水无核珍珠按照内

部缺陷自动分类。

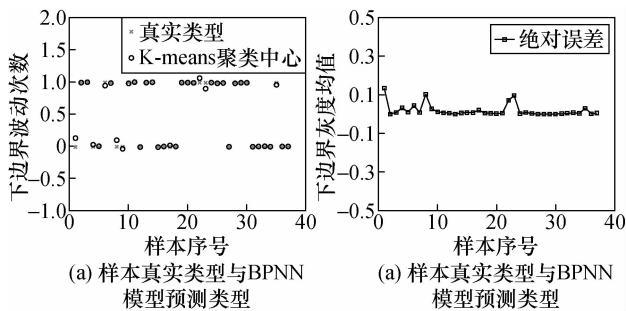


图8 BPNN 预测结果图

Fig. 8 Prediction result of BPNN model

## 4 分析与讨论

在珍珠内部缺陷检测的方法中,现有方法主要是通过专家经验人工判别、X 射线法和光学相干层析成像法<sup>[26-27]</sup>。人工检测效率低,且准确性因人而异,X 射线检测技术具有明显的缺陷,珍珠在长时间的 X 光照射下会失去光泽,导致其价值的损失。OCT 成像技术能在微米级分辨率下无损的扫描并显示珍珠内部组织结构,除了无损的优点外,OCT 还具有扫描速度快、操作简单,几乎对所有珍珠都具有普适性的优点。

OCT 成像技术作为一种珍珠内部缺陷检测的新方法,现有的应用大多数都是基人工对图像进行观察和得出检测结论,这项工作耗时费力。本研究是图像处理技术和 OCT 成像技术的结合,提出了一种完全自动化的方法对淡水无核珍珠内部缺陷部位的检测并分类,该方法作为 OCT 成像技术在珍珠内部缺陷检测方面应用的补充,提高了分类的准确性和效率,为淡水无核珍珠内部质量检测与分类的产业化应用奠定了基础,并且在其他产品分类上具有推广价值。

## 5 结 论

本文提出了一种能够根据 OCT 图像进行淡水无核珍珠内部有无缺陷的自动分类算法,通过提取图像垂直梯度和珍珠内部缺陷位置的变化特征,通过 K-means 算法选择与样本类型匹配的特征训练 BPNN 模型,实现对淡水无核珍珠自动化检测分类。实验过程验证了淡水无核珍珠的 OCT 成像的有效性以及 OCT 成像技术在对淡水无核珍珠内部缺陷检测上的可行性。本文提出的方法能够对各种缺陷类型的珍珠有准确的识别能力,分类性能较传统方法有所提升,具有较强的普适性、准确

性和执行速度。

## [参 考 文 献]

- [1] 刘晓军. 推动淡水珍珠养殖业转型升级的思考和他议[J]. 中国水产, 2018, (5): 46-49.  
Liu X J. Thoughts and Suggestions on Promoting the Transformation and Upgrading of Freshwater Pearl Aquaculture [J]. *Chinese Aquatic Product*, 2018, (5): 46-49.
- [2] 梁靛,石润润. 全面推进珍珠产业提质增效[J]. 浙江经济, 2017, (20): 50-51.  
Liang L, Shi R R. Comprehensively Carrying Forward the Quality Improving and Benefit Increasing of the Pearl Industry [J]. *Zhejiang Economy*, 2017, (20): 50-51.
- [3] Zhu F, Wu K, Ma L, et al. Research on real-time measurement and grading method for pearl color [C]// Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2007.
- [4] 马丹丹,王鹏程,刘基宏. 基于机器视觉的条码尺精确测量技术在落纱小车中的应用[J]. 计量学报, 2019, 40(3): 409-415.  
Ma D D, Wang P C, Liu J H. Application of Accurate Measurement Technology of Barcode Scale in Doffing Vehicle Based on Machine Vision [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2019, 40(3): 409-415.
- [5] 张竟月,孙斌,谢玄达,等. 基于激光和机器视觉的微量液体容量计量方法[J]. 计量学报, 2018, 39(4): 504-506.  
Zhang J Y, Sun B, Xie X D, et al. Volume Metrology Method for Micro Liquid Based on Laser and Machine Vision [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, 39(4): 504-506.
- [6] Tang Y P, Xia S J, Zhu Z L. Research on Pearl Detecting and Grading Based on Monocular Multi-view Machine Vision [J]. *British Journal of Applied Science & Technology*, 2014, 4(15): 2136-2151.
- [7] Xuan Q, Fang B W, Liu Y, et al. Automatic Pearl Classification Machine Based on Multi-Stream Convolutional Neural Network [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(8): 6538-6547.
- [8] 欧阳茜茜,杨磊,罗剑秋,等. 珍珠的成分、结构及呈色机理研究进展[J]. 广州化工, 2012, 40(12): 23-26.  
Ouyang Q Q, Yang L, Luo J Q, et al. Components and Structure with its Color Generation Mechanism of Pearl [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2012, 40(12): 23-26.
- [9] 罗永安,楚世辰,陈蓉娜. 中国北方珍珠的特征研究[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(2): 111-115.  
Luo Y A, Chu S C, Chen R N. Characteristics Research



- of the North Pearl of China [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(2): 111–115.
- [10] Huang D, Swanson E A, Lin C P, *et al.* Optical coherence tomography [J]. *Science*, 1991, 254(5035): 1178–1181.
- [11] Antony B J, Kim B J, Lang A, *et al.* Automated segmentation of mouse OCT volumes (ASiMOV): Validation & clinical study of a light damage model [J]. *Plos One*, 2017, 12(8): e0181059.
- [12] Cakir B, Reich M, Lang S, *et al.* OCT Angiography of the Choriocapillaris in Central Serous Chorioretinopathy: A Quantitative Subgroup Analysis [J]. *Ophthalmology and Therapy*, 2019, 8(1): 75–86.
- [13] Vuong V S, Moisseiev E, Cunefare D, *et al.* Repeatability of Choroidal Thickness Measurements on Enhanced Depth Imaging OCT using Different Posterior Boundaries [J]. *American Journal of Ophthalmology*, 2016, 57(12): 104–112.
- [14] Sousedik C, Breithaupt R. Full-fingerprint volumetric subsurface imaging using Fourier-domain Optical Coherence Tomography [C]//International Workshop on Biometrics & Forensics, 2017, Coventry, UK. New York: IEEE, 16917452.
- [15] Chang S, Schriemer H P, Kleiman R N, *et al.* Detection and analysis of jade material using optical coherence tomography [C]//SPIE Photonics North 2010, Niagara Falls, Canada. 7750: 775001.
- [16] 董俊卿, 李青会, 严鑫. 基于 OCT 成像技术对常见陶瓷文物断面结构的无损分析 [J]. *自然杂志*, 2015, 37(5): 325–331.
- Dong J Q, Li Q H, Yan X. Nondestructive analysis of section structure of common ceramic cultural relics based on OCT imaging technology [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2015, 37(5): 325–331.
- [17] 杨珊珊, 朱锐, 米磊, 等. 光学相干层析成像技术对壁画的检测研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 147–152.
- Yang S S, Zhu R, Mi L, *et al.* Application of optical coherence tomography in the detection of the mural [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 147–152.
- [18] 曾楠, 何永红, 马辉, 等. 应用于珍珠检测的光学相干层析技术 [J]. *中国激光*, 2007, 34(8): 1140–1145.
- Zeng N, He Y H, Ma H, *et al.* Pearl Detection with Optical Coherence Tomography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(8): 1140–1145.
- [19] Yang Z, Yang Z, Sanghoon K, *et al.* Spectroscopic OCT: towards an effective tool for distinguishing authentic and artificial Chinese freshwater pearls [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(3): 622–628.
- [20] Lee J H, Shin J G, Kim H Y, *et al.* Quantitative discrimination of pearls using polarization-sensitive optical coherence tomography [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 2197.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 23886-2009 珍珠层厚度测定方法-光学相干层析法 [S]. 2009.
- [22] 董俊卿, 李青会. 应用 OCT 成像技术对海水珍珠的无损测量研究 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(4): 30–40.
- Dong J Q, Li Q H. Research on nondestructive measurement of sea pearls using optical coherence tomography technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 30–40.
- [23] Zhou Y, Liu T B, Shi Y, *et al.* Automated Internal Classification of Beadless Chinese Zhuji Freshwater Pearls based on Optical Coherence Tomography Images [J]. *Scientific Reports*, 2016, (6): 33819.
- [24] Dandu J R, Thiagarajan A P, Murugan P R, *et al.* Brain and pancreatic tumor segmentation using SRM and K-MEANS classification [J]. *Health and Technology*, 2019, 10: 1–9.
- [25] Hartigan J A, Wong M A. Algorithm AS 136: A K-means clustering algorithm [J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1979, 28(1): 100–108.
- [26] Ju M J, Lee S J, Min E J, *et al.* Evaluating and identifying pearls and their nuclei by using optical coherence tomography [J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13468.
- [27] 张刚生, 谢先德, 戚绍祺, 等. 贝壳珍珠层的 X 射线衍射研究 [J]. *矿物岩石*. 2002, 22(4): 8–11.
- Zhang G S, Xie X D, Qi S Q, *et al.* X-Ray Diffraction Study of Nacre in Shell of Hyriopsis CumingII (Lea) [J]. *Journal of Mineralogy & Petrology*, 2002, 22(4): 8–11.



第一作者: 石龙杰(1994–) 男, 安徽亳州人, 浙江科技学院研究生, 研究方向为 OCT 图像处理。

Email: longjie\_shi@163.com



通讯作者: 周扬(1983–) 男, 浙江宁波人, 浙江科技学院副教授, 博士, 研究方向为 OCT 图像处理。

Email: zybuaa@163.com