

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210440

## 基于珍珠数字图像的颜色特征提取及检测方法研究\*

蒋存波 贾 猛 李昕烨 丁俊良

(桂林理工大学信息科学与工程学院 桂林 541006)

**摘要:** 为了优化珍珠颜色特征提取,提高珍珠颜色检测准确率,提出结合 K-means 聚类和局部梯度的阴影检测算法,结果表明该算法可以精确检测珍珠数字图像中珍珠的阴影,消除了阴影对提取颜色特征的干扰。在 Lab 颜色空间,提出基于珍珠回音廊效应区域的颜色特征提取,使用 GA-SVM 作为珍珠颜色识别方法,提出使用二次颜色检测策略,通过两次颜色检测确定珍珠颜色类别。通过对比实验结果表明,珍珠体色色系检测准确率达到 100%,珍珠颜色检测准确率达到 98.7878%。

**关键词:** 阴影检测;K-means 聚类;局部梯度;颜色特征;GA-SVM

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.2040

## Research on color feature extraction and detection method based on pearl digital image

Jiang Cunbo Jia Meng Li Xinye Ding Junliang

(School of Information Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

**Abstract:** In order to optimize the extraction of pearl color features and improve the accuracy of pearl color detection, a shadow detection algorithm based on K-means clustering and local gradients is proposed. The results show that the algorithm can accurately detect the shadow of pearls in pearl images and eliminate the interference of shadows on the extraction of color features. In the Lab color space, a color feature extraction based on the area of pearl echo gallery effect is proposed, GA-SVM is used as the pearl color identification method, and a secondary color detection strategy is proposed to determine the pearl color category through two color detections. The comparison experimental results show that the accuracy rate of pearl body color detection is 100%, and the accuracy rate of pearl color detection is 98.7878%.

**Keywords:** shadow detection;K-means clustering;local gradient;color characteristics;GA-SVM

### 0 引 言

珍珠品质分级对规范中国珍珠市场具有重要意义,一方面约束了一些不良销售商的以次充好行为,树立消费者的消费信心,另一方面,对整个珍珠产业链的更新升级具有很好的促进作用。根据国家标准 GB/T 18781-2008,可根据珍珠大小、体型、颜色、光泽和瑕疵等质量因素进行珍珠分级<sup>[1]</sup>。其中颜色对珍珠价值估计具有重要意义,目前珍珠颜色主要依靠人工肉眼进行检测,由于不同检测人员感官和技能差异,或同一个检测人员情绪和疲劳程度差异,都会造成对珍珠颜色的识别差异,进而对珍珠的正确分级带来不利影响。当前很容易获得珍珠的数字图像,图像中包含有与珍珠颜色相关的信息,利用计算机视觉技术进行珍

珠颜色检测,可以避免人工进行颜色检测识别存在的不足。

国外针对珍珠颜色检测识别,开发出了自动化检测设备,但售价高达几十万美元,且不对外公开相应技术。国内基于计算机视觉进行珍珠颜色检测主要集中在近十几年里,至今仍处于初级阶段。李革等<sup>[2]</sup>在 HIS(hue,intensity,saturation)颜色空间中,通过 **I** 分量分割掩模以消除珍珠的反光区域,利用振荡传播神经网络和 **H** 分量进行颜色分类,主要对红、白、黑 3 个色系进行分类。汤一平等<sup>[3]</sup>在 HIS 颜色空间中通过对光亮区的 **H** 分量进行直方图分析进行颜色判定,通过像素占比来达到红色和白色珍珠的检测。叶佳英<sup>[4]</sup>通过在 Lab[luminosity,a 表示从洋红色至绿色的范围(+127,-128),b 表示从黄色至蓝色的范围(+127,-128)]颜色空间进行珍珠颜色特征提取,使用基

收稿日期:2022-06-23

\* 基金项目:国家市场监督管理总局科技计划项目(2021MK088)资助

于遗传算法优化的支持向量机(genetic algorithm-support vector machine, GA-SVM)进行珍珠颜色检测,实现在白色、粉色、紫色和黄色等几个色系进行颜色分类。

阴影检测一般作为图像处理的预处理过程。检测并去除珍珠图像中的阴影能避免阴影区域对提取珍珠颜色特征的影响,能有效提升得到的特征的质量。对于静态图像阴影检测可以分为:基于几何模型和基于阴影特征的阴影检测方法。其中,基于几何模型的阴影检测方法是指通过利用光照条件、场景结构等先验信息,建立阴影模型。基于阴影特征的检测方法是通过对亮度、颜色、梯度和纹理等信息对阴影区域进行标识,如:龙浩等<sup>[5]</sup>在 HSV(hue, saturation, value)颜色空间结合阴影先验信息,引入局部二值模式提取阴影区域。吴岳洲等<sup>[6]</sup>首先利用基于 HSV 颜色空间的阴影特性对阴影区域进行初步判定,然后通过设计 Gabor 筛选器筛选阴影区域实现阴影检测。Lalonde 基于图像的色彩特征和纹理属性,采用条件随机场标识阴影区域等<sup>[7]</sup>。

基于机器视觉的颜色检测技术应用十分广泛,在农产品<sup>[8]</sup>、车辆<sup>[9]</sup>、服饰<sup>[10]</sup>、食品<sup>[11]</sup>等行业都取得了不错的成果。为了提高珍珠颜色特征的有效性,根据珍珠数字图像中阴影的特点,提出结合 K-means 聚类 and 局部梯度的阴影检测算法,用于去除珍珠数字图像中的阴影,并提出使用珍珠回音廊效应区域颜色特征进行颜色分类,使用 GA-SVM 算法作为颜色分类算法。提出二次颜色检测策略进行珍珠颜色检测,并通过实验分析对比不同颜色空间中的分类效果。

## 1 实验装置

为了减少不可控光源的干扰,图像获取装置为一个封闭的空心圆柱体,采用一颗发光二极管(light emitting diode, LED)作为光源,如图 1 所示。为了使内部形成柔光空间,圆柱体内侧面使用黑色磨砂面。使用白色底板作为拍照背景,使用 OV5640 CMOS 500 万像素摄像头进行珍珠图像的拍摄。

实验获取珍珠图像如图 2(a)所示。Raman 等<sup>[12]</sup>将珍珠的光学特征分为三部分:1)光源的投影;2)环绕光影的彩色光环;3)珍珠边缘的一圈较亮的漫射光环,即回音廊效应。光源投影来自于珍珠表面的漫反射。漫散射彩色光环则是由于文石板片被有机质隔断成纳米晶粒,众多纳米晶粒对入射光产生各个方向的漫散射,从而引起某一色光在特定方向上的光增强而产生的。回音廊效应则是由于珍珠内部的“砖墙状”结构对入射光的多级反射-折射所导致的,该区域真实的反映了珍珠的体色<sup>[13]</sup>。因此将珍珠回音廊效应区域作为珍珠颜色特征提取的主要区域。

## 2 图像阴影检测

为了获取含有珍珠回音廊效应的数字图像,使用了小角度光源,在珍珠周围产生了月牙状阴影。阴影区域包含

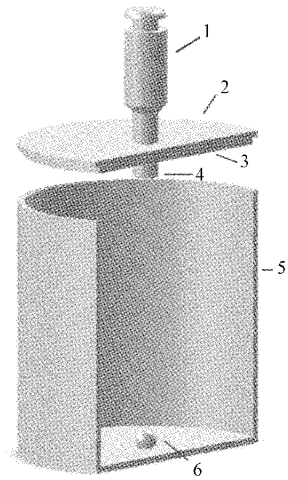


图 1 珍珠图像拍摄装置

1)测微头;2)上顶盖;3)光源位置;4)相机位置;  
5)遮光外壳;6)待检测珍珠。

了本影和半影,其中本影是由于光线完全被珍珠遮挡而形成的黑色区域,半影是由于光线部分被珍珠遮挡形成的阴影。为了能够提取更有效的颜色特征。提出了结合 K-means 与局部梯度的阴影检测算法。算法分为两个过程,第 1 个过程通过对 RGB 图像三个分量进行聚类,再结合珍珠图像中阴影的位置颜色信息确定阴影的主体,如图 2(b)所示。第 2 个过程进行精确检测,首先计算出第一个过程检测阴影的边缘,在珍珠灰度图像中依次对边缘点进行局部梯度计算,每一个像素点的值记为  $f(x, y)$ ,  $x$  和  $y$  为该点位置,将一个像素点周围 8 个点视为该点的邻域点,则该点左右两个邻域点的梯度分别记为  $g_{x+}$  和  $g_{x-}$ :

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = f(x + 1, y) - f(x, y) = g_{x+} \quad (1)$$

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = f(x - 1, y) - f(x, y) = g_{x-} \quad (2)$$

同理,计算出该点剩余的邻域点的梯度:  $g_{y+}, g_{y-}, g_{x+y+}, g_{x+y-}, g_{x-y+}, g_{x-y-}$ 。设置梯度敏感因子向量  $p$ , 每个邻域点位对应一个梯度敏感因子。将邻域点中梯度大于梯度敏感因子的像素点纳入阴影区域,重复该过程,直至检测到的阴影部分不在变化。第 2 个过程结束后,将得到精确的阴影区域,如图 2(c)所示。算法伪代码如算法 1 所示。

### 算法 1: 基于结合 K-means 与局部梯度的阴影检测算法

输入: RGB 珍珠图像

输出: 检测到的阴影区域

对 RGB 三分量聚类

根据珍珠图像中阴影特征确定阴影所在类别

根据聚类类别确定阴影区域

while 阴影区域改变

```

优化调整阴影区域,消除孤立点,平滑边缘
提取阴影边缘
边缘点梯度计算
将大于梯度敏感因子的点纳入阴影区域
end while
输出检测到的阴影区域

```

### 3 颜色特征提取

颜色特征提取是颜色分类的重要环节,直接决定分类模型的性能。国际照明委员会创建了十几种颜色空间模型,常用的颜色空间模型有 RGB、HSV 和 Lab 等。这些颜色空间模型都在一定行业得到了广泛的应用。为了更好的提取珍珠颜色特征,首先去除了检测到的阴影,提取珍珠图像,使用均值滤波进行图像降噪,降低由噪声带来的干扰。采用双阈值大津法进行图像分割,得到珍珠回音廊效应区域图像。将 RGB 颜色空间图像转换到不同的颜色空间模型,对于每一个颜色空间模型,通过分多个区域取样求均值以及整体均值的方法来获取每个通道 6 个特征值,共 18 个特征构成一条样本数据。

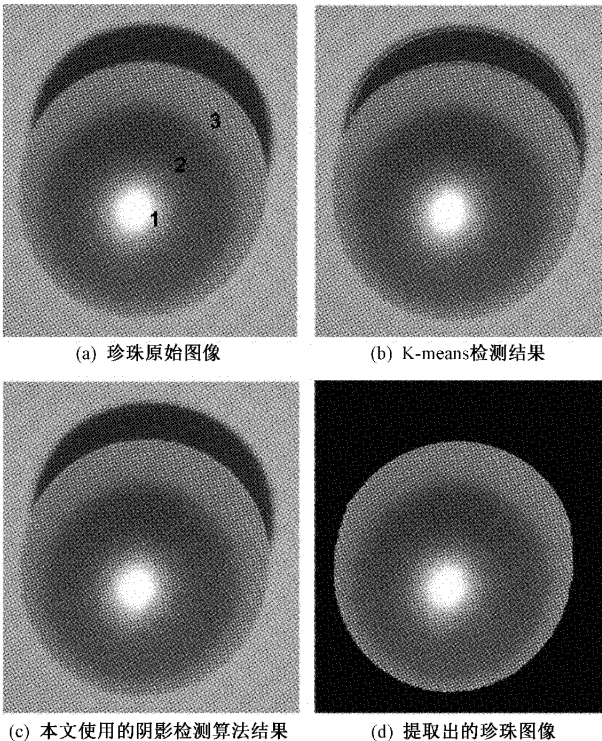


图2 珍珠图像

### 4 分类器的构建

使用支持向量机做颜色分类算法,相比深度学习算法而言,支持向量机更适合小样本的分类。支持向量机的原理是将输入向量通过预先选取的非线性关系映射到一个高

维特征空间,并在此空间中寻找一个分类超平面,使得两类分类间隔最大。对于数据集:

$$T = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\},$$

$$x_i \in R, y_i = \{-1, +1\}, i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

其中,  $x_i$  为第  $i$  个特征向量,  $y_i$  为第  $i$  个特征向量的类标记。则最佳分类面为:

$$\omega \cdot x + b = 0 \quad (4)$$

为了求得这样的超平面,在支持向量机的原目标函数和约束条件上引入惩罚参数 ( $C$ ) 和松弛变量 ( $\xi$ ), 其中  $C > 0$ , 值越大, 对分类的惩罚越大, 松弛变量  $\xi_i = \max(0, 1 - y_i(\omega \cdot x_i + b))$ , 每一个样本都对应一个松弛变量, 表明该样本不满足约束的程度。经过优化目标函数, 使用拉格朗日乘子法得到拉格朗日函数, 构造并求解如式(5)的凸二次规划问题。

$$\min_{\alpha} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i \cdot x_j) - \sum_{i=1}^N \alpha_i$$

$$s.t. \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0, 0 \leq \alpha_i \leq C, i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

求解式(5)凸二次规划问题, 得到最优解  $\alpha^*$ , 由式(6)、(7)求得  $\omega^*$  和  $b^*$ 。

$$\omega^* = \sum_{i=1}^N \alpha_i^* y_i x_i \quad (6)$$

$$b^* = y_j - \sum_{i=1}^N \alpha_i^* y_i (x_i \cdot x_j) \quad (7)$$

则分类决策函数  $f(x)$  为:

$$f(x) = \text{sign}(\omega^* \cdot x + b^*) \quad (8)$$

在核函数的选用上, 本文使用径向基函数(radial basis function, RBF) 又称之为高斯核函数。核函数的目的是, 将输入空间中非线性问题, 通过核函数, 将特征向量映射到更高维空间, 成为线性可分问题。高斯核函数定义如式(9)。

$$K(x, z) = \exp\left(-\frac{\|x - z\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

则分类决策函数  $f(x)$  为对应的高斯径向基函数分类器:

$$f(x) = \text{sign}\left(\sum_{i=1}^N \alpha_i^* y_i \exp\left(-\frac{\|x - z\|^2}{2\sigma^2}\right) + b^*\right) \quad (10)$$

支持向量机有两个重要参数, 一是惩罚参数 ( $C$ ), 二是高斯核函数参数 ( $g$ )。如何选取  $C$  和  $g$  的值, 对于支持向量机的分类效果有着重要的作用。目前经常使用的参数优化算法有网格搜索法(grid search)、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)和遗传算法(genetic algorithm, GA)等, 这些智能优化算法都有着不同的优势, 都有很广泛的应用。

支持向量机是一个二分类算法, 为了实现支持向量机的多分类问题, 有一类对一类的分类方法(one-against-one)和一类对余类的分类方法(one-against-all), 两者都可以实现支

持向量机的多分类问题。当一个分类任务有  $M$  个类别时,使用一类对一类分类方法会让每两个类之间生成一个二分类的分类器,解决这个问题就会有  $M(M-1)/2$  个分类器,对于一个新数据,可以采用投票的方式进行分类,得票最多的类别记为该数据的类别。该方法的缺点是,当类别  $M$  很大时,分类器的数量也就十分庞大。使用一类对余类的方法会生成  $M$  个分类器,但是,在模型训练时一类中的数据量往往会远小于其余类的总和数量,这就会导致训练出的模型

会偏向数据量多的一方,影响分类效果。

本文使用淡水有核养殖珍珠进行颜色检测实验,珍珠颜色由孕育珍珠的贝类(主要是三角帆蚌)决定,主要有白色、粉色、紫色以及少数异彩珍珠。选择白色系、粉色系和紫色系,其中粉色系中分为粉色和浅粉色,紫色系中分为深紫色、紫色和浅紫色,共 6 个颜色类别进行检测分类。不同颜色的珍珠如图 3 所示,因为类别数量小,所以选用一类对一类的多分类方法。

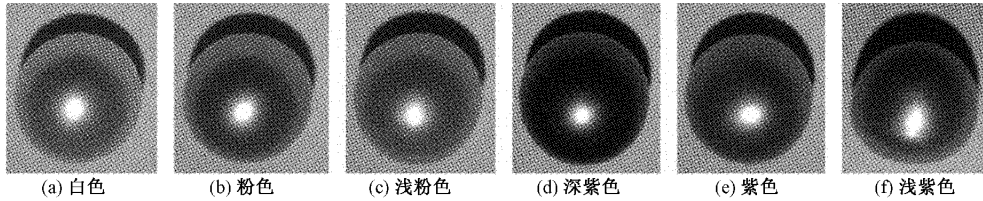


图 3 不同颜色的珍珠图像

### 5 实验结果与分析

实验机器的操作系统是 Windows10, CPU 为 Inter Xeon Silver 4216, 内存 32 GB, 显卡为 RTX3090。共拍摄珍珠数字图像样本共 827 张, 其中白色样本 270 张, 粉色样本 130 张, 浅粉色样本 147 张, 深紫色样本 90 张, 紫色样本 100 张, 浅紫色样本 90 张。经过前期的阴影检测、阴影去除、图像降噪等预处理操作, 提取珍珠颜色特征, 再进行珍珠颜色检测。颜色分类策略是二次颜色检测, 首先对白色、粉色和紫色 3 个色系进行分类, 得到色系后再进一步进行具体颜色细分。这样做有以下两个优点, 一是二次颜色检测综合准确率高于一次颜色检测准确率; 二是珍珠所在色系的检测准确率达 100% 且具有很好的稳定性, 即使在第二次颜色检测错误的情况下, 也能准确检测出体色所在色系。如表 1 所示, 使用 Lab 颜色空间提取的特征, 为了使各类的样本数量相近, 随机从白色、粉色、浅粉色中各取出 90 条样本数据, 使用 GA-SVM 方法进行分类, 一次颜色检测中检测错误 4 颗, 其中 2 颗紫色检测为浅紫色, 1 颗浅粉色检测为白色, 1 颗紫色检测为浅紫色。二次颜色检测中检测错误 2 颗, 均为紫色检测为浅紫色。

表 1 颜色分类策略对比

颜色分类策略	颜色特征	检测珍珠数量	正确检测数量	准确率/%
一次颜色检测	Lab 颜色空间	165	161	97.575 7
二次颜色检测	Lab 颜色空间	165	163	98.787 8

为了对比基于不同寻优算法的支持向量机的性能, 不同算法在不同颜色特征上的性能。分别使用在 RGB、HSV、Lab 颜色空间中提取的珍珠颜色特征。分别在基于网格搜索法、粒子群算法和遗传算法参数寻优的支持向量

机中进行珍珠体色所属色系检测实验, 比较参数寻优消耗时间、交叉验证准确率和测试准确率 3 个指标。由于网格搜索法需要预设参数搜索范围, 搜索范围过小时, 就存在只能找到局部最优解的情况, 无法找到全局最优解, 随着搜索范围增加, 搜索时间就会随之增加, 搜索范围的确定主要是依靠经验或多次尝试来确定。本文中网格搜索预设惩罚参数 ( $C$ ) 和高斯核函数参数 ( $g$ ) 范围为  $-10 \sim 10$ , 搜索步长为 0.2。粒子群算法和遗传算法中的初始种群数量和迭代次数均设置为 20 和 200。实验结果如表 2 所示。

表 2 不同寻优算法在不同的颜色特征上的性能对比

方法	颜色空间特征	消耗时间/s	交叉验证准确率/%	测试准确率/%
Grid Search-SVM	RGB	180.7	99.697 4	<b>100</b>
	HSV	153.3	<b>99.848 7</b>	99.393 9
PSO-SVM	Lab	150.1	99.697 4	99.393 9
	RGB	115.9	98.735 2	<b>100</b>
	HSV	96.3	97.166 5	98.790 3
GA-SVM	Lab	100.5	98.790 3	<b>100</b>
	RGB	30.8	99.827 0	99.596 8
	HSV	<b>19.4</b>	99.697 4	<b>100</b>
	Lab	20.9	<b>99.848 7</b>	<b>100</b>

如表 2 所示, 由于受到预设搜索范围的影响, 网格搜索法平均消耗时间最长, 且检测准确率仅在 RGB 颜色空间特征达到 100%, 在 HSV 和 Lab 颜色空间中均有两颗检测错误。粒子群算法平均消耗时间优于网格搜索法, 测试准确率仅在 HSV 颜色空间中有 3 颗检测错误, 但其交叉验证准确率均低于网格搜索法和遗传算法, 泛化能力相比较弱。基于遗传算法的支持向量机, 不仅在检测准确率上

优于基于粒子群算法和网格搜索法的支持向量机,且遗传算法平均消耗时间最低。

对比同一算法在不同颜色空间特征中的性能,在使用本文的颜色特征提取方式下,在不同的颜色空间提取特征对分类算法的影响较小,但基于 Lab 颜色空间特征的性能整体优于 RGB 和 HSV 颜色空间特征。

综上所述,在珍珠颜色检测应用中,通过对比试验,结果表明,使用本文颜色特征提取方式,基于 Lab 颜色空间特征的 GA-SVM 在效率和准确度上都有很好的优势,可实现珍珠体色所在色系 100% 检测准确率,本文提出使用了二次颜色检测策略,来确定珍珠体色的具体颜色分类,综合准确率 98.7878%,比一次颜色检测准确率高 1.21 个百分点。

## 6 结 论

本文设计制作了封闭的单光源装置,避免了不可控光源的干扰,从而获得了理想的含有珍珠回音廊效应的数字图像。提出基于结合 K-means 和局部梯度的阴影检测算法,该算以及提出的珍珠颜色特征提取方式使得不同颜色空间的颜色特征具有相近的分类性能,削弱了不同颜色空间的差异,说明了该方法提取的特征具有较高的有效性。提出二次颜色检测策略,比一次颜色检测有更高的准确率。通过实验对比,基于遗传算法的支持向量机在 Lab 颜色空间特征中性能最优。

今后的研究工作主要有两点,一是进一步提高珍珠颜色检测的准确性、鲁棒性和实时性。二是设计制作珍珠颜色检测自动化设备。

## 参考文献

- [1] GB/T 18781-2008, 珍珠分级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [2] 李革, 李斌, 王莹, 等. 基于 HIS 颜色模型的珍珠颜色分选方法[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 284-287.
- [3] 汤一平, 夏少杰, 李陈荣, 等. 基于单目多视角视觉的珍珠品质检测[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 276-283.
- [4] 叶佳英, 邓飞, 王佩欣, 等. 基于机器视觉的珍珠颜色特征提取与识别[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(20): 226-230, 240.
- [5] 龙浩, 李庆党, 张明月. 基于 HSV 颜色空间和局部纹

理的阴影消除算法研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(18): 81-87.

- [6] 吴岳洲, 熊运余, 周磊, 等. 基于 HSV 颜色空间检测与 Gabor 筛选器的阴影检测[J]. 光电子·激光, 2009, 20(12): 1626-1630.
- [7] LALONDE J F, EFROS A A, NARASIMHAN S G. Detecting ground shadows in outdoor consumer photographs[J]. European Conference on Computer Vision, Berlin, Heidelberg, 2010, 6312: 322-335.
- [8] 朱树良, 赵昆昆, 高古腔, 等. 花生种皮颜色智能识别模型的建立与应用[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(2): 324-330.
- [9] 范振帅, 黄玉超, 谭里民, 等. 车身颜色识别技术在涂装车间面漆工艺中的应用[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(18): 1404-1409.
- [10] 侯媛媛, 何儒汉, 刘军平. 融合颜色特征和深度特征服装图像检索算法[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(10): 194-199.
- [11] 黄兆良, 朱启兵. 基于 RGB 颜色模型的红富士苹果表皮红色区域检测[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 64-70.
- [12] RAMAN C V, KRISHNAMURTI D. The structure and optical behaviour of pearls [J]. Proceedings Mathematical Sciences, 1954, 39(5): 215-222.
- [13] 付芬. 珍珠的结构和光学效果的形成机理及体外合成探索[D]. 济南: 山东大学, 2014.

## 作者简介

蒋存波, 硕士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为嵌入式技术。

E-mail: jiangcunbo@163.com

贾猛(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式与人工智能。

E-mail: 1215424252@qq.com

李昕焯, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式与智能仪器检测。

E-mail: 1194213046@qq.com

丁俊良, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式与智能检测。

E-mail: 782023231@qq.com