



# 数字图像处理特色实验项目设计

## ——陶瓷碗缺陷检测

赵 怡, 王俊祥\*

(景德镇陶瓷大学 机械电子工程学院, 景德镇 333403)

**摘要:** 为培养学生利用图像处理技术解决工程应用问题的能力, 同时实现为陶瓷行业输送合格工程应用型人才的培养目标, 面向行业需求精心设计了一个数字图像处理特色实验项目——陶瓷碗缺陷检测。设计内容涵盖了验证性、综合性和创新性 3 个实验模块。该特色实验覆盖了多种图像处理技术, 让学生在实践中充分了解图像处理技术; 给出了面向行业特色的算法设计思路, 为学生开启一种利用算法解决行业问题的新思路。实验项目从工程应用出发, 兼顾特色地方院校的培养定位, 给出了特色实验案例设计的一种新思路, 充分激发学生兴趣, 培养学生解决复杂工程问题的能力。

**关键词:** 数字图像处理; 实验教学改革; 地方院校特色; 专业特色实验

中图分类号: G642.0; TP391

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20220059](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20220059)

# Development of Characteristic Experiment Project of Digital Image Processing—Defect Inspection for Ceramics

ZHAO Yi, WANG Junxiang\*

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Jingdezhen Ceramic University, Jingdezhen 333403, China)

**Abstract:** In order to cultivate students' ability to use image processing technology to solve the problems in engineering application, and to train application talents of ceramic industry, a digital image processing characteristic experiment project, defect inspection for ceramics, is designed in this paper. The project consists of three parts, including confirmatory experiment, comprehensive experiment and innovative experiment. On the one hand, the contents of the project involve the classical theory of digital image processing, so that students can fully understand the image processing technology in practice. On the other hand, the algorithm design idea oriented to industry characteristics is given in this paper, which provides a new idea for students to solve the engineering problem by using algorithms. The development of the project takes the feature orientation of local university into account, and gives a new idea of characteristic case design. The proposed project enhances the students' enthusiasm in experiment and cultivates students' ability to solve complex engineering problems.

**Key words:** digital image processing; reform of experimental teaching; the characteristic of local undergraduate university; professional characteristic experiment

数字图像处理是以理论为基础结合实际应用的课程, 是面向信息与通信工程、计算机科学与技术、软件工程、自动化、人工智能等专业的专业课程<sup>[1-4]</sup>。传统数字图像处理实验一般由单个知识点或者几个知识点的内容组合构成实验项目。实验项目内容大部分是给定一张图

像, 指导学生利用所学的知识对图像进行处理, 达到需要的图像效果即可。传统的实验内容和实验方式并不能体现实际工程应用中是如何分析和解决实际问题的。近年来, 数字图像处理技术在工业检测、人工智能等领域应用广泛, 实验作为掌握和运用课程知识内容的重要

收稿日期: 2022-01-21; 修回日期: 2022-09-27

基金项目: 景德镇陶瓷大学校级教育教学改革研究课题(TDJG-19-Y35); 景德镇陶瓷大学校级教育教学改革重点项目支持(TDJG-21-Z07)。

作者简介: 赵怡(1985-), 女, 硕士研究生, 实验师, 主要从事图像处理与信息安全方面的工作。

\* 通信作者: 王俊祥(1985-), 男, 博士, 教授, 主要从事图像处理与信息安全方面的工作。E-mail: [wjx851113851113@163.com](mailto:wjx851113851113@163.com)

学习环节,需不断开发出适应新应用新发展的特色实验项目。

## 1 特色实验项目开发的必要性

景德镇陶瓷大学属于地方特色院校,有鲜明的陶瓷特色<sup>[5-8]</sup>。电子信息工程等专业培养都围绕着“陶瓷信息化装备”方向开展。在“新工科”理念<sup>[9]</sup>的指导下,探索设计具有本校行业背景特色的数字图像处理实验项目内容,将陶瓷工业检测融入数字图像处理实验中,将课程中学习的图像预处理、图像特征提取等知识用于陶瓷行业应用中,不仅激发学生学习兴趣,还能提高学生解决工程问题的能力。将理论学习和工程应用结合起来,做到为陶瓷行业输送合格工程人才的培养目标。

## 2 特色实验的总体设计思路

如图1所示,设计的特色实验项目由验证性实验、综合性实验和创新性实验3大模块组成。首先,学生在教师的指导下完成验证性实验模块和综合性实验模块<sup>[10-13]</sup>。其次,教师对实验中缺陷检测模块的原理和步骤讲解后,让学生分组编写代码进行创新性实验模块。实验内容设计的难度逐层递进,构建从基础到创新的教学实验。

验证性实验模块包括:

- 1) 图像复原,即图像去噪声、图像运动模糊复原;
- 2) 图像增强,包括直方图均衡化;
- 3) 图像校正,包括几何标定校正;
- 4) 图像形态学,包括图像二值化、图像区域填充;
- 5) 图像分割,包括边缘提取。

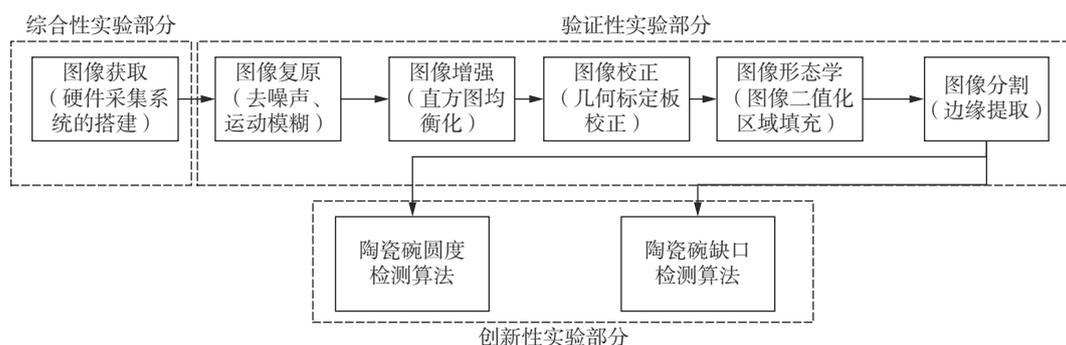


图1 陶瓷碗口缺陷检测特色实验整体框图

验证性实验模块中使用的图像处理技术属于经典方法,有丰富的代码资源供学生参考。验证性实验旨在加深学生对图像处理中经典方法的理解、掌握和使用。综合性实验模块为图像采集硬件系统搭建,实现陶瓷图像同步采集以及陶瓷生产流水线智能控制,实验内容包括:光源选择、工业相机选择、相机与待检物体的位置等。教师指导学生在现有硬件设备基础上搭建图像采集系统,采集到清晰无失真陶瓷图像。此部分涉及多种知识的运用,属于综合实验,旨在提高学生对知识的综合运用能力。以上两类实验可兼顾大部分学生对知识的掌握和运用。在以上实验基础上设置创新性陶瓷碗口圆度和碗口缺口检测算法开发实验。教师给出检测算法原理和步骤,学生分组讨论利用MATLAB设计缺陷检测源代码。创新性实验旨在提高学生创新能力和对工程应用问题

的分析能力。

## 3 特色实验具体实施

### 3.1 验证性实验模块

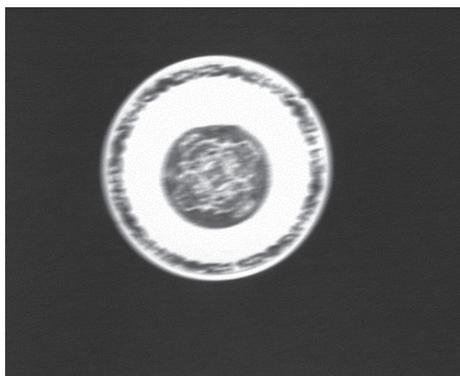
#### 3.1.1 图像复原实验

在硬件采集系统已获得图像基础上,如果采集过程中有高斯噪声或椒盐噪声干扰,需要对图像进行滤波去噪声处理。另外,由于陶瓷图像是在动态流水线上拍摄的,还可能会产生运动模糊,需要对图像去除运动模糊。这两类操作都属于图像复原技术。MATLAB中根据复原原理进行代码编写或者调用Deconvwnr函数可以实现维纳滤波复原。如图2(a)所示,图像有X方向运动模糊并含有高斯噪声,对其进行约束最小二乘滤波复原,得到如图2(b)所示结果。

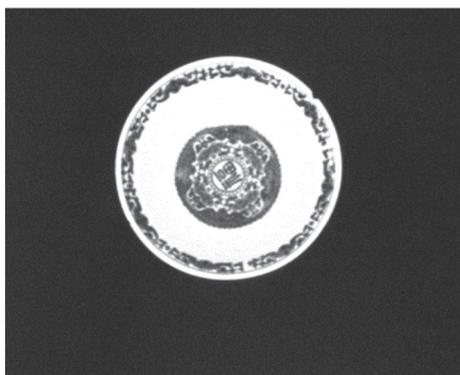
#### 3.1.2 图像增强实验

在采集图像的过程中,还可能由于采集环境

中光源照射不足，导致图像对比度不足，图像视觉效果较暗。图像增强实验通过直方图均衡化或直方图规定化对图像进行处理，增强图像对比度。MATLAB 中根据直方图均衡化的原理进行代码编写或者调用 `histeq` 函数可以实现直方图均衡化。如图 3(a)所示为对比度低的原图像，进行均衡化后的图像如图 3(b)所示，可以看出对比度提高，视觉效果改善。



(a) X 方向运动模糊并含高斯噪声图像



(b) 约束最小二乘方滤波复原后结果

图 2 运动模糊和噪声图像的复原



(a) 原图像



(b) 直方图均衡化后图像

图 3 直方图均衡化

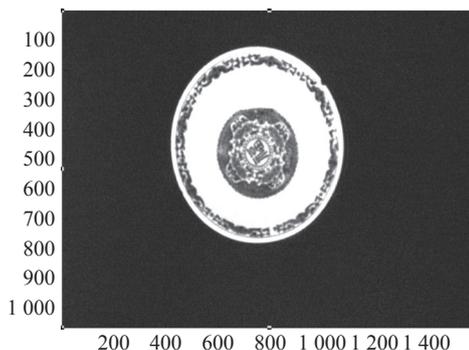


图 4 几何标定板校正图像

### 3.1.3 图像校正实验

普通相机的成像模型(透视投影)是在特定假设上对真实事物的近似，在实际应用中存在误差。为避免数据采集设备与待测物体之间的成像角度所导致的物体几何形变，保证陶瓷检测的精度，并且为确定图像中物体真实的物理尺寸和像素尺寸的换算关系，需要建立相机成像的几何模型，需要借助常用的“几何标定板”校正陶瓷图像在拍摄中存在的几何畸变，并确定物理尺寸和像素尺寸换算关系。通过相机拍摄带有已知的固定间距的图案阵列平板(“几何标定板”)，进行标定可以得出相机的几何模型，得到准确的测量结果。几何校正后的图像如图 4 所示。

### 3.1.4 图像形态学实验

校正后的灰度图像，需要进行二值化处理和区域填充，去除不需要的图像内容简化图像处理。第一，对图像进行分割，将图像分割成目标和背景。第二，对分割后图像进行区域填充。图像的直方图有明显的双峰，可以通过基本全局阈值分割法将图像分割为背景和目标。将目标区域阈值设置为 1，背景区域设置为 0。此时由于图像中碗内的花纹与检测目标无关，只需要碗的边界信息。对图像进行区域填充，利用形态学中的孔洞填充进行区域填充处理。首先，在 MATLAB 中根据基本全局阈值法原理进行代码编写或者调用

graythresh 函数计算阈值;其次,使用 im2bw 函数进行图像二值化。第三,根据孔洞填充原理进行代码编写或者调用 bfill 函数实现区域填充,得到如图 5 所示结果。

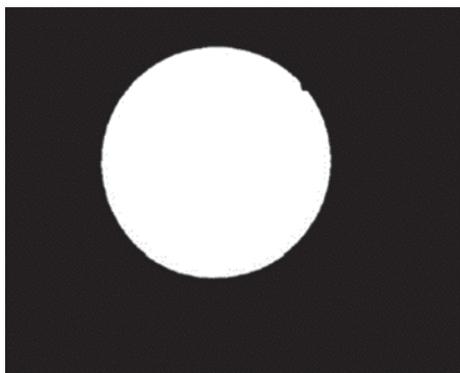


图 5 二值化、区域填充

### 3.1.5 图像分割实验

由于对碗口进行缺口检测,只需要碗口的边缘信息。得到陶瓷碗区域填充的图像后,对图像进行边缘检测。采用各种边缘检测算子进行边缘提取,对各种边缘算子进行边缘提取比较,选择 canny 边缘算子进行边缘提取。canny 算子具有低错误率,边缘点可以被很好地定位且单一边缘点响应等优点。MATLAB 中根据 canny 算子原理进行代码编写或者调用 edge 函数,选择 'canny' 可以实现边缘提取。使用 canny 算子提取的边缘图像如图 6 所示。

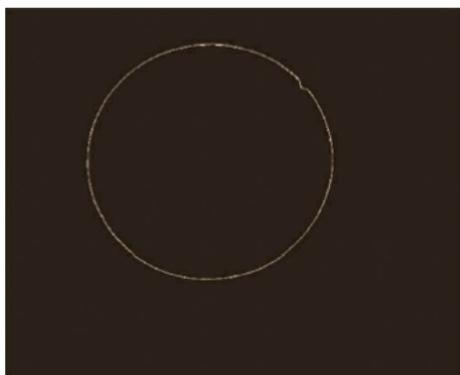
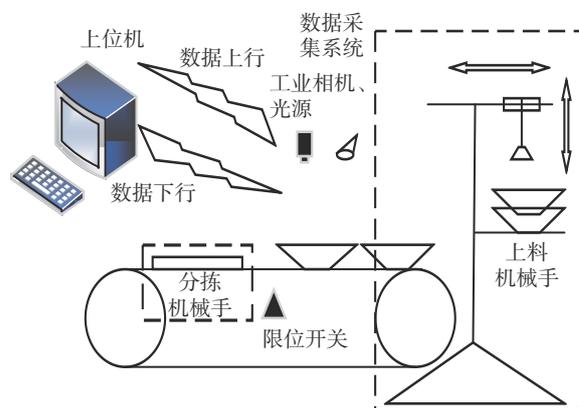


图 6 边缘提取得到碗口边缘

## 3.2 综合性实验模块

综合性实验包含图像采集硬件设备的搭建和软件程序嵌套在硬件仿真平台中,协助实现陶瓷图像数据的同步采集以及陶瓷生产流水线的智能控制两大功能。硬件系统搭建如图 7 所示。



(a) 硬件系统搭建示意图



(b) 硬件系统搭建实物图

图 7 硬件系统搭建

- 1) 陶瓷产品的上料机械手(往生产线上自动搬运)。
- 2) 陶瓷产品的传送(传送带)。
- 3) 产品的分拣机械手。

以上 3 部分硬件为实验室已有设备,借助数据采集卡进行智能控制实现全自动化控制。教师指导实验具体操作过程为以下 3 个步骤。

- 1) 上料机械手将陶瓷堆成一垛,然后借助二维上料机械手将陶瓷碗逐件放置在生产线上。
- 2) 采用高精度的工业相机进行数据采集。为提高陶瓷图像的拍摄质量,在传送带上安装 LED 辅助光源。该步骤为此部分实验需要学生学习的重点内容。为实现陶瓷图像采集,需要进行光源选型和数量的确定、工业相机的选型、光源和相机位置确定、相机与待检物体位置、角度关系确定等。

3) 分拣机械手根据上位机给出的检测结果,将产品搬运到对应的工位。

## 3.3 创新性实验模块

在通过 3.1 节中的实验得到陶瓷碗外边界图像之后,指导教师启发学生从陶瓷图像中的外边界出发确定圆心。圆心的确定步骤为:在外边界上

随机选取 3 个点，并分别记录坐标为  $A_1(x_1, y_1)$ 、 $A_2(x_2, y_2)$ 、 $A_3(x_3, y_3)$ 。由 3 个点组成的三角形的外接圆圆心为  $O(x_o, y_o)$ ，该圆心就是陶瓷外边界的圆心，并有：

$$\sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2} = R, i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

式中， $R$  为标准圆的半径。

以下两种可能存在的缺陷会导致求取圆心坐标波动较大。

1) 当陶瓷外边界不圆时，确定的圆心会不同。边界圆度越差，圆心的坐标波动越大。根据圆心坐标的波动程度可以用来判定碗口的圆度。通过 3.3.1 节中介绍的碗口圆度检测实验进行检测。

2) 当陶瓷外边界存在缺口时，确定圆心时随机选择的点恰好落在缺口位置，通过 3.3.2 节中介绍的碗口缺口检测实验进行检测。

### 3.3.1 陶瓷碗口圆度检测实验

指导教师给出圆度检测算法步骤，要求学生根据步骤编写 MATLAB 代码。

1) 重复执行圆心坐标计算，获得所有圆心的坐标序列。

2) 对圆心坐标序列进行排序，对获得的圆心横纵坐标值相加求平均  $m = \frac{1}{2}(x_{oi} + y_{oi})$ 。比较均值  $m$  并将其由小到大重新排列，构成新的圆心序列  $O = \{O_i(x_i, y_i) | i \in [1, n]\}$ ， $n$  表示执行  $n$  次计算得到的圆心个数。

3) 陶瓷圆心波动程度和陶瓷圆心的确定。删除序列  $O$  中最大和最小两个圆心，从而去除极端数据对平均数的影响。计算剩余圆心坐标的均值、方差， $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  为横、纵坐标均值， $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  为横、纵坐标方差：

$$\bar{x} = \frac{1}{n-2} \sum_{i=2}^{n-1} x_{oi} \quad (2)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n-2} \sum_{i=2}^{n-1} y_{oi} \quad (3)$$

$$\sigma_x = \frac{1}{n-2} \sum_{i=2}^{n-1} (x_{oi} - \bar{x})^2 \quad (4)$$

$$\sigma_y = \frac{1}{n-2} \sum_{i=2}^{n-1} (y_{oi} - \bar{y})^2 \quad (5)$$

计算两个方差之和  $\sigma = \sigma_x + \sigma_y$ ，并预设  $\sigma$  的阈

值  $T_1$ 。  $\sigma > T_1$ ，表明圆心波动大，陶瓷碗口边界不圆；若  $\sigma < T_1$ ，表明陶瓷碗口圆，反复实验得出阈值  $T_1 = 100$ 。将圆心序列的坐标平均值作为圆心，图 8 为碗口圆度和缺口检测实验得出的结果，圆心坐标为  $x_o = 459.2$ 、 $y_o = 757.6$ ，碗口圆度检测合格。

```
x =
    459.1791

y =
    757.6351

该碗的圆度检测合格
Elapsed time is 0.006014 seconds.
该碗存在缺口1
Elapsed time is 0.606242 seconds.
该碗存在缺口count
缺口检测结束
Elapsed time is 1.286431 seconds.
fx >>
```

图 8 MATLAB 中运行陶瓷碗缺陷检测结果

### 3.3.2 陶瓷碗口缺口检测实验

当陶瓷碗口有缺口存在时，利用碗口缺口检测实验进行缺口检测。教师指导学生根据缺口的特点以及简单的几何先验知识进行缺口检测实验，当圆的外边界上存在缺口时，其到圆心的距离会出现一个突变，设计半径曲线和半径残差曲线用于检测缺口的存在。通过式(1)确定圆心  $O(x_o, y_o)$ ，求圆心与边界上顺时针方向旋转的每个点  $(x_i, y_i)$  的欧氏距离：

$$L_i = \sqrt{(x_o - x_i)^2 + (y_o - y_i)^2} \quad (6)$$

式中： $(x_o, y_o)$  为圆心坐标； $(x_i, y_i)$  为边界上每个点坐标； $L_i$  组成边界半径集合， $L = \{L_i | i \in [1, L_{size}]\}$ ， $size$  是边界的尺寸。

绘制集合  $\{(i, L_i) | i \in [1, L_{size}]\}$  的曲线，横轴为序号  $i$ ，纵轴为  $L_i$  半径。图 9(a) 为有缺口的碗口边缘，图 9(b) 为碗口理想半径曲线，碗口理想半径曲线为直线，常数  $L$  为碗口半径。图 9(c) 为有缺口的碗口半径曲线，曲线上有半径减小的波动，波动的位置可以定位缺口位置。但实验实际操作中，数据采集装置的数字化操作使提取的陶瓷轮廓变得粗糙，导致半径曲线不光滑、局部毛刺较

多, 加剧了干扰并增加缺口检测的难度, 曲线如图 10(a)所示。

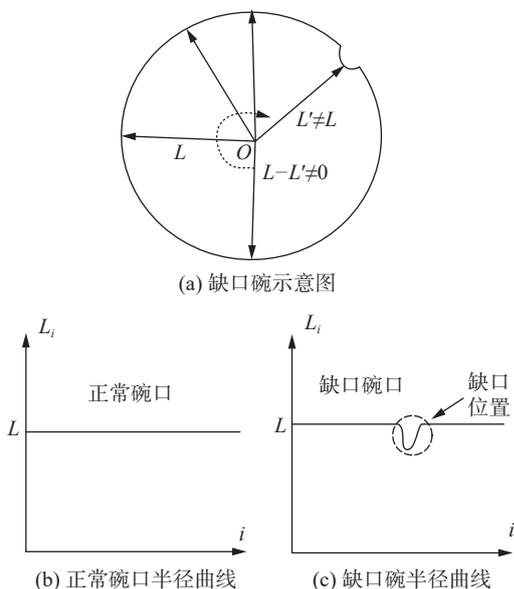


图 9 陶瓷碗缺口检测示意图

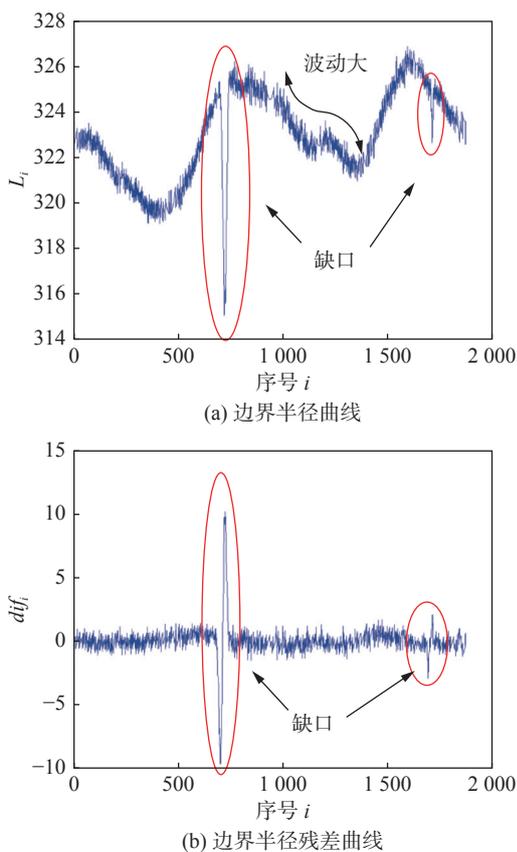


图 10 MATLAB 运行算法绘制两类边界半径曲线

引导学生使用半径残差曲线来减小干扰, 由于相邻半径的相关性较强, 通过对两个相邻像素点进行差分运算, 可以克服原半径曲线的不稳定

的缺点。半径残差曲线定义为:

$$dif_i = \begin{cases} L_i - L_{(i-L_{leg})}, & i \in (L_{leg}, L_{size}] \\ L_i - L_{(L_{size}-L_{leg}+i)}, & i \in (0, L_{leg}) \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $L_{leg}$  表示半径残差曲线的步长,  $L_{size}$  表示碗口边界轮廓上的像素点数目。以序号为横坐标, 对应的残差序列值为纵坐标可得到半径残差曲线, 如图 10(b)所示。根据残差曲线上的横坐标找到缺口位置, 并在图像上定位缺口位置。

虽然半径残差曲线表现出较好的稳定性, 但局部毛刺仍然存在, 严重影响缺口位置和尺寸估计。采用指数运算来扩大差异, 从而实现局部毛刺抑制和突出缺口处的突变:

$$dif_i^x = (dif_i)^x \quad (8)$$

式中,  $x$  为指数参数, 实验中取 2。

计算式(8)的最大值  $\max\_dif$ 。搜索所有值在  $[\frac{1}{2} \max\_dif, \max\_dif]$  区间点坐标, 构成一个突变脉冲位置序列:

$$loc = \left\{ loc_i | loc_i \in [1, L_{size}] \text{ 且 } dif_{loc_i} \in \left[ \frac{1}{2} \max\_dif, \max\_dif \right] \right\}$$

然后, 依次计算在  $loc$  序列中每个相邻元素位置上的差值构建另一个序列, 称为突变脉冲差分位置序列  $loc\_dif = \{ loc\_dif_i = loc_i - loc_{(i-1)} | i \geq 2 \}$ 。预设阈值为  $T_{loc}$ , 用以下情况判断是否有缺口存在。

1) 当  $loc\_dif$  序列中有一半或以上的元素值大于阈值  $T_{loc}$  时, 说明曲线中只存在波动且位置分散, 不存在由缺口产生的突变。

2) 当  $loc\_dif$  序列中有一半或以上连续相邻元素的值小于阈值  $T_{loc}$ , 超出阈值的元素位置集中, 曲线有尖且突变的峰值, 尖峰对应于缺口位置。

为验证所设计的缺口检测算法的有效性, 为实验提供 3 种情况碗口缺口情况, 绘制半径残差指数曲线, 如图 11 所示。经过反复实验设定阈值  $T_{loc} = 5$ 。图 11(a) 对应没有缺口的情况, 曲线中无明显的尖峰, 点的纵坐标在  $[\frac{1}{2} \max\_dif, \max\_dif]$  位置区间较分散, 对应上述提到的第一种情况。图 11(b) 对应单个缺口的情况, 曲线中有明显的尖峰, 横坐标位置集中且小范围的元素值在  $[\frac{1}{2} \max\_dif, \max\_dif]$  内, 对应上述提到的第二种情

况。同样的,对于多个缺口的图像及曲线如图 11(c)所示。一般来说,只要缺口尺寸大于碗口圆度的偏差值,缺口就能检测出来。

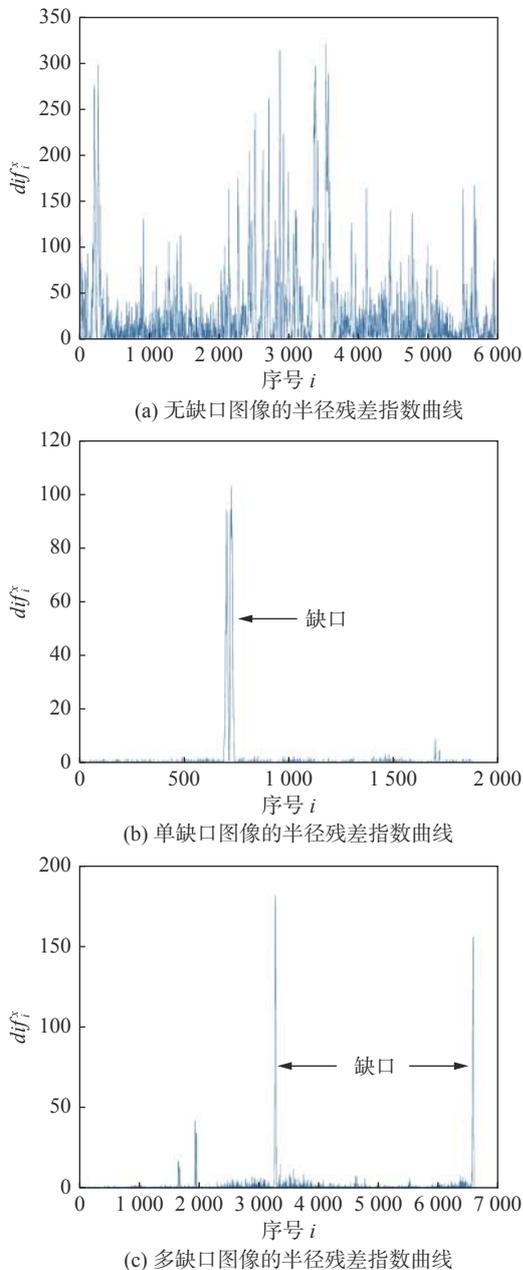


图 11 不同缺口检测结果的比较

#### 4 结束语

本文充分利用数字图像处理的各种知识,设计陶瓷碗缺陷检测特色实验项目。该实验项目分为验证性实验、综合性实验和创新性实验,兼顾

对数字图像处理技术的基础掌握和能力提升两方面。该实验项目让学生在实验中获得行业特色工程应用完整的设计理念、流程和方法。实验项目兼具基础性和创新性,能激发学生的学习兴趣 and 创新能力,符合地方特色院校对工程教育人才培养的目标和要求。

#### 参考文献

- [1] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理[M]. 4版. 阮秋琦,译.北京:电子工业出版社,2020.
- [2] GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. 数字图像处理(Matlab版)[M]. 阮秋琦,译.北京:电子工业出版社,2013.
- [3] STEGER C, ULRICH M, WIEDEMANN C. 机器视觉算法与应用[M]. 2版. 杨少荣,译.北京:清华大学出版社,2019.
- [4] 章毓晋. 中国图像工程:2018[J]. 中国图象图形学报, 2019, 24(5): 665-676.
- [5] 王俊祥,张影,胡欢,等. 一种基于同态滤波的陶瓷防眩光处理技术研究[J]. 陶瓷学报, 2019, 40(1): 62-66.
- [6] WANG J X, LIU Y, ZHANG D. A new computer vision based multi-indentation inspection system for ceramics[J]. Multimedia Tools & Applications, 2017(76): 2495-2513.
- [7] 王俊祥,彭华仓,胡鸿豪,等. 基于计算机视觉的陶瓷圆度快速检测系统研究[J]. 陶瓷学报, 2015, 36(5): 530-535.
- [8] 韩文,于盛睿,徐晗. 地方高校工程训练的实践教学体系构建与特色定位[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(1): 221-225.
- [9] 商泽进,邓庆田,李新波,等. 基于“新工科”理念的理工基础学科实验教学改革设计[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(9): 149-150.
- [10] LI J, LI X, YANG B, et al. Segmentation-based image copy-move forgery detection scheme[J]. IEEE Trans Inf Forensics Secur, 2015, 10(3): 507-518.
- [11] 马学条,周彦均,王永蕙,等. 基于形态学重建的分水岭图像分割实验教学研究[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(3): 93-97.
- [12] 王琳,管庆,于永斌,等. 新工科背景下的“综合设计”课程教改实践[J]. 实验科学与技术, 2021, 19(4): 57-60.
- [13] 刘艳,曹光静,朱金秀,等. 双目视觉实验平台及教学项目设计[J]. 实验技术与管理, 2021, 37(1): 44-48.

编辑 张俊