

基于改进 KNN 边缘滤波算法的 陶瓷绝缘子表面检测研究

朱梓清¹ 刘小峰²

(1.常州工程职业技术学院 常州 213001; 2.河海大学 常州 213001)

摘 要: 高压线上陶瓷绝缘子全表面检测是保证其质量的重要一环,由于其表面复杂,目前主流是人工检测,漏检、错检无法避免。用带有机视觉的自动化装置来检测陶瓷绝缘子是近年来的趋势,本文针对绝缘子的气泡、裂纹等主要缺陷进行识别,提出最优滤波器方法加大气泡缺陷对比度,对气泡 ROI 进行定位和提取,通过改进 KNN 边缘滤波来预处理图片,对裂纹进行定位识别,最后通过特征进行筛选。该方法能够快速、准确地识别陶瓷表面缺陷特征,识别效率在 200 ms 以内,识别率达到了 98.2%,满足高压线陶瓷行业的精度需求。

关键词: 视觉检测;陶瓷绝缘子;表面缺陷检测

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 52036040

Research on surface detection of ceramic insulator based on image processing

Zhu Ziqing¹ Liu Xiaofeng²

(1. Changzhou Institute of Engineering Technology, Changzhou 213001, China; 2. Hohai University, Changzhou 213001, China)

Abstract: The full surface detection of ceramic insulators on high-voltage lines is an important part of ensuring its quality. Due to the complexity of its surface, manual detection is the mainstream at present, and missed detection and false detection are inevitable. It is a trend in recent years to use automatic devices with machine vision to detect ceramic insulators. This paper identifies the main defects of insulators, bubbles and cracks, and preprocesses the pictures by improving KNN edge filtering. The weighted fitting method extracts bubble defects. Bubble ROI is used for positioning and extraction, threshold segmentation method, morphological crack processing and crack positioning, and finally through feature screening, this method can quickly and accurately identify the characteristics of ceramic surface defects, the recognition efficiency is within 200 ms, and the recognition rate has reached 98.2%, meeting the precision requirements of the high-voltage line ceramic industry.

Keywords: visual detection; ceramic insulators; surface defect detection

0 引 言

高压线中的绝缘串是由绝缘子叠加而成,因为有良好的绝缘性能,被用于高压架空输电线上,起到大规模高效传输电力的作用。我国电网已经形成很大的规模,后期的维护维修成本不断增加,而且由于环境的恶劣和使用时间长,绝缘子损坏导致的线路问题也不断发生。在外部恶劣环境的影响下,很小的一些瑕疵,如铁锈、裂纹、无釉、斑点等瑕疵都会快速变大,严重缩短陶瓷绝缘子的寿命,进而降低高压线的效率。因此,对陶瓷绝缘子表面完好程度有很高的要求,对其质量检测要求也越来越严格。

目前,陶瓷绝缘子这类大型陶瓷依然需要人工检测,存在劳动强度大、主观性强、眼睛容易疲劳,瑕疵分类错误、漏检率高、无法追溯等问题,采用工业自动化检测是制造业发展趋势,在检测环节使用机器视觉可以减少劳动力,节约成本,提高检测效率。

戴卫军^[1]提出了一种基于深度学习的陶瓷表面的缺陷的检测方法,该方法采用基于机器学习的进行区域生长法、领域加权法获取感兴趣区域,最后通过面积特征法、形状特征法判定缺陷,但是该方法可检测的陶瓷瑕疵种类较少,无法对具有曲面的陶瓷进行检测,而且裂纹检测时瑕疵区域像素点阈值设定存在问题,效果欠佳。苑玮琦等^[2]研究了

针对具有复杂干扰的陶瓷瓦表面进行瑕疵检测的方法,该文章采用自动区域生长的方法对陶瓷瓦表面进行瑕疵提取,然后使用滑动滤波方法去噪音,对于裂纹瑕疵提取速度较快,但是精度不足。李小磊等^[3]给出了隧道裂缝的检测方法,比较了维纳滤波等去噪算子的表现,使用 Canny 和 sobel 算子提取裂缝的轮廓,该方法对于细微瑕疵效果不佳。沙翠翠^[4]设计了基于机器视觉的陶瓷管缺陷识别技术的方法,通过光源和相机的配合能够实现多种缺陷检测。该方法虽然实现了曲面陶瓷的打光和图像采集,但是应用场合比较单一,只限于陶瓷管件的检测。谢宏威等^[5]使用的无参考法,该方法具备对 PCB 板焊点有较好的检测,虽然检测精度高,但需要噪声对检测影响较小,对所拍摄图片要求高。杨先凤等^[6]采用改进的 Canny 算子边缘检测算法,虽然算法效率较高,但是多角度边缘采集时精度有限。晁云等^[7]提出了缺陷快速检测方法,但是精度不够。李绍波^[8]在钢材表面缺陷检测使用了红外检测与超声波检测技术,该方法没有办法在陶瓷领域取得较好的效果。文献^[9]在 YOLOv3 基础上提出一种检测冰箱金属表面缺陷的 Metal-YOLOv3 算法,通过优化损失函数和选取合适的先验框提升检测精度,但是在复杂环境中效果一般,且前期训练内容较多。明五一等^[10]主要对检测系统结合图像特征与深度学习方法对透明件表面缺陷进行归类,很好的解决了透明标准件表面的瑕疵检测,但是对于复杂结构的检测,特别复杂曲面的检测效果较差。

陶瓷绝缘子具有釉面反光大、不规则曲面多、细微缺陷小且检测范围大等特点,针对这些问题本文提出了一种绝缘子复杂表面检测方法,同时使用 8 台 CCD 相机对陶瓷的各个曲面进行面扫检测,把同一区域多相机图片进行小波变换后通过图像融合技术,对过度区域与权重函数的参数设置拟合出被测曲面的 ROI。通过改进 KNN 边缘滤波预处理 3D 拟合曲面镜像结合滑动滤波与自动区域生长方法消除噪音,然后通过 Sobel 算子进行轮廓亚像素描述,对裂纹和气泡进行定位和提取。

1 视觉方案与图像采集

1.1 打光方案

陶瓷绝缘子缺陷检测系统主要由图像采集和图像处理两个模块组成,图像采集是高精度和高效率视觉检测的关键。检测系统的图片采集装置包括照明光源和摄像机,其中摄像机及镜头的选择是根据陶瓷绝缘子本身的几何形状、材质 特征和表面缺陷检测的位置特点完成^[11]。

陶瓷釉面为反光的弧面,采用背投漫反射光源能够减少反光和眩光(图 1),但在直接反射区域仍会出现过曝,因此采用线扫方案,过曝区域可以在算法中通过绘制 ROI 的方式进行裁剪^[12]。

1.2 拍摄区域

陶瓷绝缘子全覆盖需要很大视野,在当前视觉拍摄条

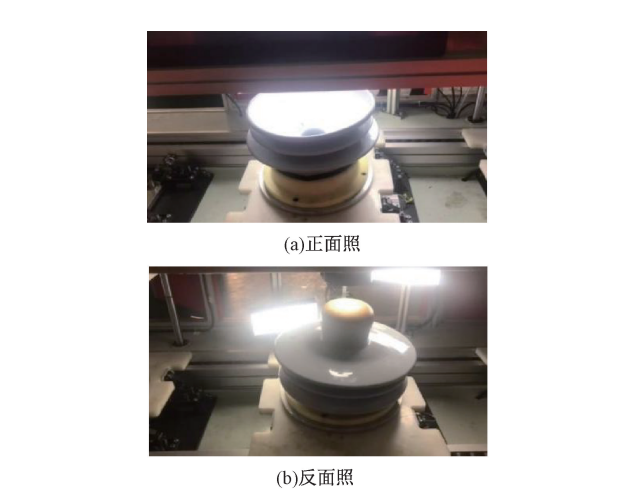


图 1 陶瓷绝缘子打光方案

件下,单个 CCD 相机无法快速地全覆盖拍摄,采用 8 个面阵相机以面扫方式拍摄才能全面覆盖整个产品。如图 2 所示每个面扫单元有 8 个检测面,一圈分为 12 个线扫单元,检测面有 98 个(表 1)。因此全面覆盖需要拍摄 98 张图片进行处理。

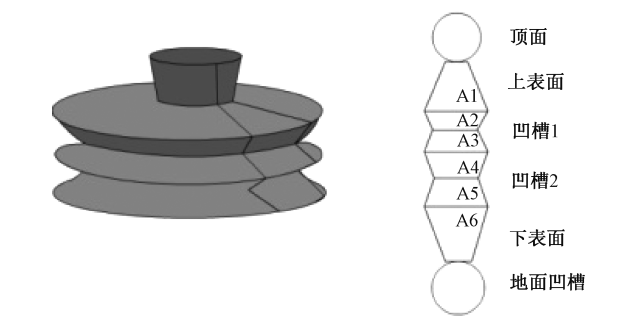


图 2 线扫单元示意图

表 1 检测面的命名规则

部位	命名
顶面	U1
中间	A1,B1,C1,⋯,K1,L1
	A2,B2,C2,⋯,K2,L2
	A3,B3,C3,⋯,K3,L3
	A4,B4,C4,⋯,K4,L4
	A5,B5,C5,⋯,K5,L5
	A6,B6,C6,⋯,K6,L6
底面	U2

使用摄像机成像时,步进电机驱动陶瓷绝缘子旋转,同步脉冲编码器触发线控制 8 台相机实时摄像,并将线扫描图像传送到视觉检测单元的图像处理模块上合成处理,再由各个相机给出线扫结果,合成结果后给出判定^[13]。

1.3 相机选择与安装

如图 3 所示,相机的架设采用环绕覆盖的方法进行拍摄,根据配置不同的镜头角度来提取感兴趣的区域(ROI)。摄像机从成像原理上就避免了上述面阵 CCD 成像的弊端,更有利于陶瓷套筒表面缺陷图像处理与识别。实验使用的陶瓷绝缘子表面缺陷视觉检测系统的主要配置如表 2。图 4 展示了在架设完相机后捕获的图像。

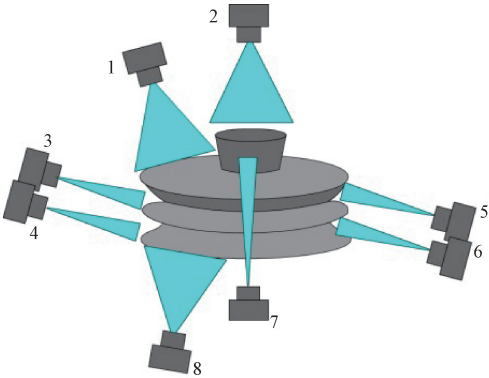


图 3 相机架设示意图

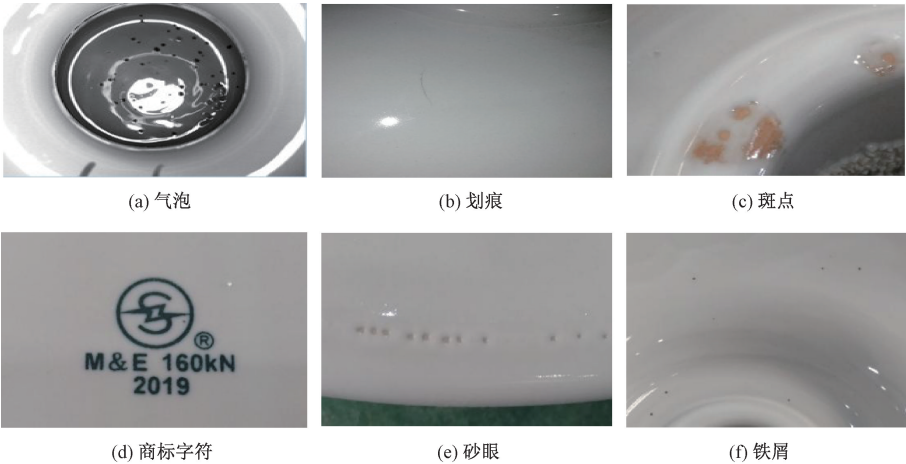


图 4 几种瑕疵的图像

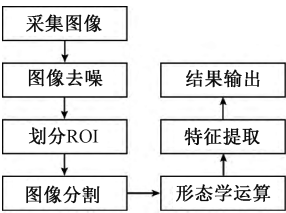


图 5 缺陷检测流程

基于小波的图像融合与拟合技术,首先取某瑕疵图片的多角度图片进行小波变换,对于变换后的图片进行金字塔分解,金字塔各层分别进行融合处理。各层上的频率分量根据融合规则进行融合处理,最终得到融合后的小波金字塔;对融合后所得小波金字塔进行小波逆变换,所得到的重构图像即为融合图像。

表 2 视觉检测系统配置要求

电机	相机	镜头	光源型号
转 0.5~10 r/s	高分辨率面 CCD	焦距 8 mm	400×80 面阵漫
工作电压 直流 24 V	阵相机,像素 1 200×960	可调节镜头	反射光源

2 瑕疵提取

2.1 多相机图片 3D 拼接拟合技术

陶瓷绝缘子的瑕疵有很多,本文针对有代表性的两类瑕疵(气泡和裂纹)进行检测算法研究,主要流程如图 5 所示。算法基于视觉软件对图片进行处理,提出一种 3D 图像拼接方法,首先把某个区域的多相机拍摄的图片进行 3D 拼接和拟合,采用自适应极大值关联的抑制函数为拼接依据,在个相机拍摄的相同图片提取特征点,通过小波变换与透视变换算法,对陶瓷表面 3D 曲面进行还原,同时构造基于高斯曲面的非线性过度函数。

对于图像融合建立一系列规则,基于小波变换的图像融合,低频成分决定图像的轮廓,同时也影响图像的边缘细节。现有的图像融合规则大部分都忽略了边缘信息,针对这一问题,本文提出了低频成分基于区域梯度的融合策略。

2.2 气泡处理

由于陶瓷绝缘子灰度图片中(图 6)的气泡等瑕疵都是圆形瑕疵,这类瑕疵可以先从形状上面区分,然后按照灰度值分类具体瑕疵。为了方便特征分析,采用阈值分割(图 7)将陶瓷绝缘子的瑕疵从背景中提取出,以免受背景干扰。

陶瓷绝缘子表面的瑕疵区域与完好表面的灰度值有区别,传统的阈值分割方法很多,而图像分割是指利用图像信息中某些特征,从图像中提取感兴趣目标。常见的有傅里叶变换以及傅里叶逆变换:

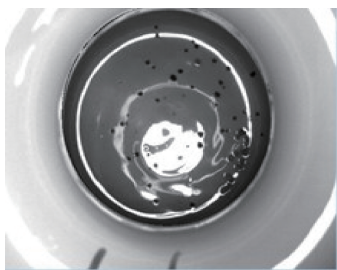


图 6 转灰度图片



图 7 阈值分割

$$F(u, v) = \frac{1}{M+N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(ux/M+vy/N)} \quad (1)$$

$$F(x, y) = \frac{1}{M+N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(u, v) e^{-j2\pi(ux/M+vy/N)} \quad (2)$$

其中, u, v, x, y 为像素坐标, M, N 为图片的长和宽, 将傅里叶变换函数的幅度模在频谱图中以灰度值表示, 灰度值的大小代表模的大小, 最终频谱图将 $|F(u, v)|$ 作为亮度表示, 称为幅度谱模。使用傅里叶变换算法对图像中感兴趣的区域进行分割后, 对各个分割区域特征进行描述并组成一定的结构, 从而获得的最优图像分割结果。通过傅里叶系数对图像进行特征提取, 取出如下图像几个形状特征:

图像面积 A 的计算:

$$A = \iint f(x, y) dx dy \quad (3)$$

图像中心点 (\bar{x}, \bar{y}) 计算:

$$\bar{x} \iint f(x, y) dx dy = \iint x b(x, y) dx dy \quad (4)$$

$$\bar{y} \iint f(x, y) dx dy = \iint y b(x, y) dx dy \quad (5)$$

图像的圆形度提取:

$$F1 = \frac{|P_1|}{\sum_{n=1}^{+\infty} |P_n + P_{-n}|} \quad (6)$$

当 Fourier 系数 P_n 中除 P_1 之外其他项全为 0 时,

$U(t) = p_1 e^{j\omega t}$ 表示轮廓曲线 C 的形状是以 $|P_1|$ 为半径的一个圆。

如图 7 阈值分割后的图片仍有很多干扰因素, 需要去噪声。首先使用傅里叶变换将图像由空域转换到频域, 接着在频域对图像进行修改, 再次进行傅里叶变换, 最后将图片由频域转换到空域, 重建图像, 以达到去除某种噪声、

增强图像的目的。此外, 也可通过空间域滤波完成去噪。

传统的滤波方法^[14]无法达到最佳滤波, 如图 8 所示, 为了达到更好的滤波效果, 本文提出了最优滤波器的推导, 最优滤波器指的是 $o(x, y)$ 与所希望得到的信号 $d(x, y)$ 差别最小的滤波器。信号 $b(x, y)$ 加上噪声 $n(x, y)$, 输入一个无限冲击响应为 $h(x, y)$ 的线性移不变系统, 得到滤波器的输出结果 $o(x, y)$ 。

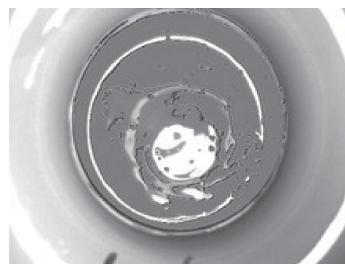


图 8 均值滤波

假设 $o(x, y)$ 是处理结果, $d(x, y)$ 是理想信号, 则两者差的平方积分为:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (o(x, y) - d(x, y))^2 dx dy \quad (7)$$

原始图像等于理想图像和噪声之和:

$$i(x, y) = b(x, y) + n(x, y) \quad (8)$$

根据定义即为:

$$\phi_{id} = \phi_{bb} + \phi_{bn} \quad (9)$$

在此假设, 信号与噪声不相关, 则有:

$$H = \frac{\phi_{id}}{\phi_{ii}} = \frac{1}{1 + \phi_{nn}/\phi_{bb}} \quad (10)$$

式中: ϕ_{nn}/ϕ_{bb} 为信噪比, 对于信噪比很高的部分, 系统增益几乎趋近于 1, 对于噪音主导的部分, 系统增益非常低, 系统的增益无限接近于信噪比, 所以该方法为最优滤波方法。

如图 9 所示, 最优滤波器采用非线性滤波方法, 在已知原始图像的功率谱的前提下, 由于噪音的频谱是平的, 自然图像的相应频率成分的能量不断衰竭, 亮度出现明显的不连续变化, 因此最终图像分割成为很多小区域。



图 9 最优滤波器方法

腐蚀的主要作用是消除物体边界点。通过腐蚀, 将感兴趣的区域与不需要或着有影响的边缘部分开, 同时去除小毛刺、小凸起。如果两个区域之间有细小的连通, 可以使用腐蚀把两个区域之间细小的连接去掉, 将两个区域分

开,得到两个独立的特征区域。

对去噪的图像进行图形选择,首先选择像素值的区域阈值,接着选择圆形度的区域阈值。对选择后的图像,进行开运算,得到最终瑕疵图像。图片处理结果如图 10、11 所示。

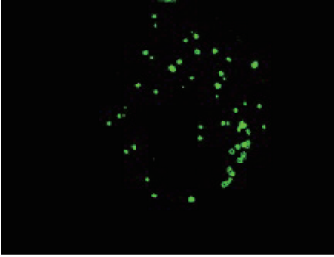


图 10 最优滤波瑕疵提取

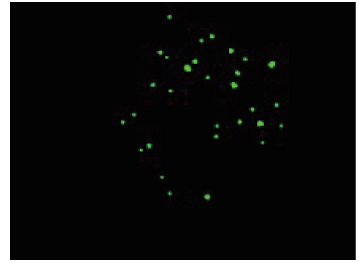


图 11 去噪后的气泡图像

2.3 裂纹处理

陶瓷裂纹(如图 12)是陶瓷常见的瑕疵种类,对陶瓷外观有较大的影响,为了对图片特征进行高度重复性的提

取,必须通过滤波进行图片预处理。通常针对椒盐噪声和高斯噪声使用权系数矩阵的均值滤波和中值滤波^[15],图 12(b)和(c)中采用 9×9 的加权系数矩阵分别对原图进行均值滤波和中值滤波的结果,在消除噪音的同时对裂纹检测也会带来不可逆的干扰。本文采用了改进 KNN 边界平滑滤波方法对陶瓷表面进行滤波。改进 KNN 边界平滑滤波能够更大限度的保证灰度值临界的对比度,还能够最大程度的消除椒盐噪声和高斯噪音(如图 12(d)所示)。



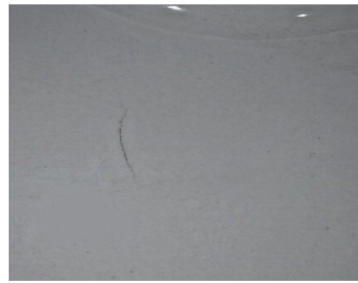
(a) 原图



(b) 均值滤波



(c) 中值滤波



(d) KNN边缘滤波

图 12 各种滤波算法对比

在使用改进 KNN 边缘滤波完成后,对边缘轮廓进行提取,得到物体表面各个位置的轮廓,为后续对圆环的定位以及圆环周围缺陷的检测奠定基础。基于 Sobel 算子和 Laplace 算子分别进行边缘提取,为了能够较为准确地提取出图像待检部位的裂纹信息,需要保留对比度的实际差异来分析。

对于陶瓷裂纹边缘图像亮度可以写成如下形式:

$$E(x, y) = B_1 + (B_2 - B_1)u(x \sin \theta - y \cos \theta + \rho) \quad (11)$$

而图形 $E(x, y)$ 的 Laplace 算子处理结果为:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} = (B_2 - B_1)\delta'(x \sin \theta - y \cos \theta + \rho) \quad (12)$$

只有 Laplace 算子在处理结果中会保留边缘两侧亮度差的正负信息。亮度差正负信息在对于瑕疵的种类分别有重要的参考价值,如图 13 所示,使用 Laplace 算子来处理裂纹能够取得很好的效果,因为 Laplace 算子对噪声比较敏感,所以先前的改进 KNN 滤波已经取得了不错的效果。采用高斯-拉普拉斯算法将高斯的低通滤波器和 Laplace 算子结合对图像处理得到图像,然后使用二阶导数过零点检测,得到的二阶导数为 0 的点为边缘像素坐

标。对于边缘像素点进行连接处理筛选,得到较为完整的裂纹轮廓图像。



图 13 使用高斯 laplace 算子处理的轮廓图片

Sobel 算子同样可以对图像进行边缘提取,得到物体表面各个位置的轮廓,为后续对裂纹的定位以及周围缺陷的检测提供支撑。基于 Sobel 边缘提取能够较为准确地提取出图像待检边缘及骨架,首先用 2 种滤波器进行掩膜,它决定了卷积的计算方式,设定其掩膜矩阵为一阶水平、竖直的 3×3 卷积模板为:

$$\mathbf{T}_x = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}, \mathbf{T}_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

使用式(13)中矩阵对图像进行卷积:

$$\begin{cases} \Gamma_x = f(x,y)\mathbf{T}_x(x,y) \\ \Gamma_y = f(x,y)\mathbf{T}_y(x,y) \end{cases} \quad (14)$$

其中,使用 2 个卷积核对每个像素做卷积运算 Γ_x, Γ_y 是该点在 X、Y 轴方向上的一阶导数,能将带有边缘梯度的图像输出,对于输出的图像再次使用阈值去除轮廓以外的线。得到的图像如图 14 所示。

从轮廓效果上,可见 Sobel 算子对此陶瓷绝缘子裂纹边缘提取有较好的适应性,因此最终选择 Sobel 算子进行裂纹边缘提取。

3 实验结果

为了便于分析,采用 3D 曲面拟合拼接和一般平面图



图 14 使用 Sobel 算子处理的轮廓图片

片拼接进行实验对比。实验采用工业相机采集图片为 $1\,200\times 960$ pixels,两种方法的时间与正确率曲线如图 15 所示。

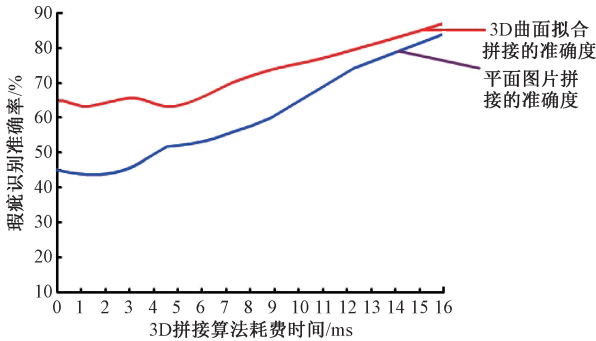


图 15 采用 3D 图片拼接技术时间与准确度分析图

从图 15 中不难看出,采用曲面拟合拼接技术,虽然增加了特征点和检测时间,但是由于采用小波金字塔搜索策略,能够缩小检测范围,上层图像为下层图像进行约束匹配,从而大大提高了准确度和减少了匹配的时间。

把改进的 KNN 边界平滑滤波方法实验验证。采用 KNN 边界滤波以及均值滤波和中值滤波进行对比实验,实验样本为 1 000 组,从 1~1 000 进行编号。检测结果如表 3 所示。

表 3 随机裂纹样本检测结果

产品类型	检测总数 (1 000)	检测正确 个数	算法	平均耗时/ ms	准确率/ %
合格	802	788	改进 KNN 边界滤波算法	25	98.2
合格	788	701	一般 KNN 边界滤波	35	88.9
合格	805	695	中值滤波	51	86.3
合格	900	680	均值滤波	53	75.5

由实验可以看出传统的滤波方式滤波精度太差,误判率太高,改进 KNN 边界平滑滤波能够更大限度的保证灰度值临界的对比度。提高瑕疵识别精度。

同时 KNN 边界平滑滤波能够根据临界值的分割技

术,快速找到对比度较高的特征点,从而提升了效率。

4 结 论

本文提出了一种基于机器视觉技术的陶瓷绝缘子全

表面多瑕疵检测方法。视觉检测工位机械结构保证多角度全覆盖检测,包括内壁的检测,采用 6 自由度机器人进行搬运和翻转,配合 CCD 相机群组采集图像。按照图像的处理流程设计多相机多瑕疵算法,通过采用最优滤波器、Laplace 算子、最佳阈值分割算法和特征提取算法,精确快速对陶瓷绝缘子划痕、气泡等瑕疵进行准确识别和定位。本文提出的方法对其他工业陶瓷的瑕疵检测的研究具有一定的通用价值。

参考文献

- [1] 戴卫军. 基于机器视觉的蜂窝陶瓷侧面缺陷检测算法研究[J]. 陶瓷学报, 2014, 3(3): 291-295.
- [2] 苑玮琦, 薛丹. 基于机器视觉的隧道衬砌裂缝检测算法综述[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 3100-3111.
- [3] 李小磊, 曾曙光, 郑胜, 等. 基于滑动滤波和自动区域生长的陶瓷瓦表面裂纹检测[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(21): 41-47.
- [4] 沙翠翠. 基于机器视觉的陶瓷管缺陷识别技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- [5] 谢宏威, 张宪民, 邝泳聪. 基于图像特征统计分析的 PCB 焊点检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 401-407.
- [6] 杨先凤, 吴媛媛, 赵玲. 基于 Canny 改进算子的油管裂纹检测算法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(3): 98-103.
- [7] 晁云, 曹利钢. 基于机器视觉的陶瓷砖表面缺陷快速检测方法的研究[J]. 制造业自动化, 2013, 35(17): 8-20.
- [8] 李少波, 杨静, 王铮, 等. 缺陷检测技术的发展与应用研究综述[J]. 自动化学报, 2020, 46(11): 2319-2336.
- [9] 袁野, 谭晓阳. 复杂环境下的冰箱金属表面缺陷检测[J]. 计算机应用, 2021, 41(1): 270-274.
- [10] 明五一, 贾豪杰, 何文斌, 等. 透明件表面缺陷的机器视觉检测综述[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(1): 116-124.
- [11] 李致金, 武鹏, 乔治, 等. 基于机器视觉的机器人工件定位系统[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(12): 127-130.
- [12] 周晶. 基于机器视觉的玻璃加工 AOI 系统的开发[J]. 机床与液压, 2020, 48(7): 119-122.
- [13] 刘明周, 马靖, 张森, 等. 基于机器视觉的机械产品装配系统在线作业方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(9): 2343-2353.
- [14] 冈萨雷斯著, 阮秋琦等译. 数字图像处理(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [15] 余永维, 殷国富, 蒋红海, 等. 磁瓦表面图像的自适应形态学滤波缺陷提取方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(3): 351-356.

作者简介

朱梓清, 硕士, 讲师, 高级工程师, 主要研究方向为大数据与人工智能。

E-mail: 3106675@qq.com

刘小峰, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为人工智能与自动化。