

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211040

基于自适应小波变换的陶瓷瓦鼓包检测方法*

魏建¹ 杨珊珊^{2,3} 郑胜^{2,3} 夏永麒⁴ 曾曙光³(1. 三峡大学计算机与信息学院 宜昌 443000; 2. 三峡大学三峡数学研究中心 宜昌 443000;
3. 三峡大学理学院 宜昌 443000; 4. 三峡大学机械与动力学院 宜昌 443000)

摘要: 瓷砖表面缺陷检测是瓷砖生产过程中不可缺少的环节,针对具有复杂立体纹理干扰的陶瓷瓦表面鼓包缺陷,为了满足自动化检测的需要,本文提出一种基于自适应小波变换的陶瓷瓦表面鼓包检测算法。首先,提取出陶瓷瓦的红色通道图像,并进行高斯滤波的预处理,抑制噪声;其次,采用自适应小波变换、线性中值滤波的方法增强鼓包与背景区域对比度;最后,利用二值化和形态学的方法,得到鼓包区域的信息。实验结果表明,该算法可以检测具有复杂立体纹理干扰的陶瓷瓦表面的鼓包缺陷,检测准确率达到98.5%,召回率达到了95.0%。

关键词: 陶瓷瓦;机器视觉;鼓包检测;小波变换;特征提取

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Detection method of ceramic tile bulge based on adaptive wavelet transform

Wei Jian¹ Yang Shanshan^{2,3} Zheng Sheng^{2,3} Xia Yongqi⁴ Zeng Shuguang³(1. College of Computer and Information, China Three Gorges University, Yichang 443000, China;
2. Three Gorges Mathematical Research Center, China Three Gorges University, Yichang 443000, China;
3. College of Science, China Three Gorges University, Yichang 443000, China;
4. College of mechanical and power engineering, China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

Abstract: Defect detection on ceramic tile surface is an indispensable process during its production. To meet the needs of automatic detection, this paper proposes an algorithm which is based on adaptive wavelet transform, to perform defect bulge detection on ceramic tile surface with complex stereoscopic texture interference. Firstly, the red channel image of the ceramic tile is extracted and preprocessed by Gaussian filtering to suppress noise. Secondly, adaptive wavelet transform and linear median filtering are used to enhance the contrast between the bulge and the background area. Finally, the methods of binarization and morphology are applied to obtain the information of the bulge area. It is noted that the algorithm can detect the bulging defects of ceramic tiles of complex three-dimensional texture, with an accuracy of up to 98.5% and recall rate over 95%.

Keywords: ceramic tile; machine vision; bulge detection; wavelet transform; feature extraction

0 引言

陶瓷瓦表面缺陷检测是生产过程中的一个重要步骤。由于生产工艺、生产环境等生产条件的不同,陶瓷瓦表面可能会出现鼓包、裂纹、缺角、缺釉、色差等缺陷^[1-4]。目前该生产过程的缺陷检测仍是采用人工检测的方法,而人工检测存在主观性强、劳动强度大、检测效率低的问题。为了提高检测效率与准确率、促进产业升级,实现陶瓷瓦缺陷的自动化检测至关重要。

近年来,在工业化生产的缺陷检测,如钢管、金属、瓷砖

等工件表面缺陷检测中,机器视觉^[5-12]的方法应用越来越常见。例如,刘源等^[13]利用 Sobel 算子对带钢管表面缺陷进行检测;王清晨等^[14]利用图像分块和自定义滤波的方法对金属表面裂纹进行检测;郭萌等^[15]利用 Kirsch 和 Canny 算子对陶瓷碗表面进行缺陷检测;李强等^[16]利用主成分分析方法对陶瓷瓦表面裂纹进行检测。以上算法对裂纹检测有一定效果。陶瓷瓦表面为立体状态且存在大量花纹,其表面可能会出现鼓包、裂纹、缺角、缺釉、色差等缺陷,其中形态最复杂、最难检测的缺陷是鼓包。目前,国内外对鼓包检测的研究相对较少。

收稿日期:2022-08-10

* 基金项目:国家自然科学基金(U1731124)、湖北省教育厅科技攻关计划重点项目(Q20201210)、三峡大学研究生教学改革研究项目(SDYJ202126)资助

自适应小波变换的方法能自动调整参数,通过提供不同的频率窗口减小或去除不同特征的相关性。其主要作用是提取出图像在不同尺度下的分解图,得到对比度较强的细节图。自适应小波变换的算法适用于提取不同特征信息。例如,石雪松等^[17]提出了一种基于人工蜂群与模糊 C 均值的自适应小波变换的噪声图像分割方法,较好地保留了图像边缘纹理信息,提升了抗噪性能与分割性能;范伟强等^[18]利用自适应小波变换分解煤矿降质图像,再利用自适应小波阈值增强不同尺度下高频子图,最后进行小波重构增强了图像;Qu 等^[19]利用自适应小波变换的方法对信号作预处理,保留了桥梁损伤的信息并去除了噪声。

由于陶瓷瓦表面受复杂立体纹理干扰,为了实现表面鼓包缺陷检测,本文提出一种机器视觉和数字图像处理技术相结合的陶瓷瓦表面鼓包检测方法,采用自适应小波变换(adaptive wavelet transform, AWT)检测陶瓷瓦表面鼓包。首先对陶瓷瓦图像进行尺度分解,提取具有鼓包特征的尺度并进行重构,再使用水平中值滤波滤除鼓包^[20],与重构图进行差分,提升鼓包与背景区域对比度,最后利用二值化和形态学处理的方法来检测鼓包。

1 陶瓷瓦鼓包检测算法

1.1 自适应小波变换(AWT)原理

小波变换(wavelet transform, WT)通过对小波进行伸缩和平移运算,提供一个随频率变化的窗口对信号进行局部分析,克服了傅里叶变换中窗口大小不随频率变化的缺点,是分解信号和提取特征的理想工具。自适应小波变换(adaptive wavelet transform, AWT)能够自动地调整母小波的参数,提取图像里不同的信号特征。本文选用 àtrous 小波分解图像^[21],方法是通过有限滤波器的近似内插,从而达到无抽取的离散小波变换,其基本原理如下:

设原始信号为 $P_0(x)$, 低通滤波器为 $V(l)$, 信号 $P_0(x)$ 经过一次滤波可得到一个低频分量和一个高频分量,其中,高频分量表示图像的细节信息,又被称为小波面、

小波系数,低频分量表示图像的近似信息,还能继续进行滤波分解。令 n 次滤波后的低频分量为 $P_n(x)$, 第 n 次分解得到的高频分量为 $W_n(x)$, 有如下数学描述^[22]:

$$P_n(x) = \sum_l V(l)P_{n-1}(x + 2^{n-1} \cdot l) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$W_n(x) = P_{n-1}(x) - P_n(x) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中, n 为分解次数,又被称为尺度。àtrous 小波变换将信号分解为多个小波面和一个近似信号,多个小波面表示不同的细节信息,近似信号表示背景信息。若要将其重构,可将所有小波面和近似信号进行叠加,如下述公式:

$$P'(x) = P_N(x) + \sum_{n=1}^N W_n(x) \quad (3)$$

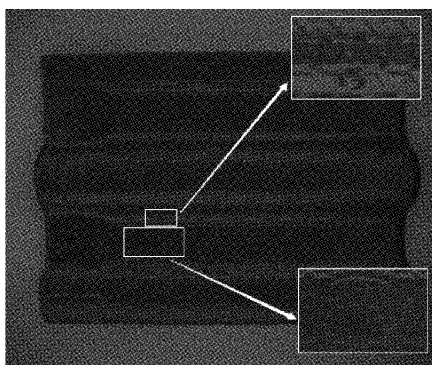
将 àtrous 小波变换拓展二维图像 $P(x, y)$ 中,分解后的图像与原始图像尺寸一致,可以提取不同尺度下的高频分量 $W_n(x)$, 实现对具有不同特征的图像进行特征分离。且同理可得,重构图像 $P'(x, y)$ 可由分解后的小波系数与背景信息叠加得到:

$$P'(x, y) = P_N(x, y) + \sum_{n=1}^N W_n(x, y) \quad (4)$$

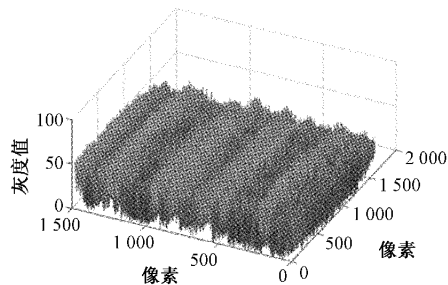
àtrous 小波算法还具有以下优点:1)运算简单;2)计算中没有插值和抽样,有利于获取图像的细节纹理特征;3)可通过滤波器滤波实现变换过程,易于编程实现^[23]。

1.2 陶瓷瓦表面鼓包图像特点分析

陶瓷瓦有瓦棱和瓦槽两部分,其中瓦棱凸出而瓦槽凹陷,具有起伏不平的特点,相机采集到的图片会受到光照不均匀的影响,出现亮暗条纹带。典型的陶瓷瓦图像如图 1(a)所示,其表面灰度图如图 1(b)所示。图 1(a)中,鼓包及厂家商标分别高亮于图片右上角和右下角。由图 1(b)陶瓦表面灰度明显高低起伏,给鼓包检测增加了难度。由于鼓包的形态特征,鼓包样本图片会出现局部异常区域^[24]。其中,陶瓷瓦鼓包主要出现在花纹区域,对比度低,易与纹理混淆。陶瓷瓦表面的纹理为三角爪型,呈 120° 交错分布。通过实地调研,不同厂家陶瓷瓦的纹理类似,主要差别在于各厂家商标不一样。



(a) 典型陶瓷瓦鼓包图像



(b) 表面灰度图

图 1 陶瓷瓦鼓包图像

针对上述陶瓷瓦花纹区域鼓包的特征及难以检出的问题,本文提出基于 AWT 的陶瓷瓦表面鼓包检测算法。

1.3 基于 AWT 的陶瓷瓦表面鼓包检测算法流程

为了将鼓包从背景中分离出来,设计分割算法流程如

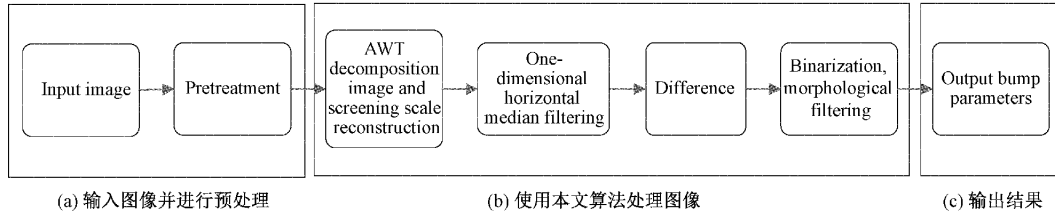


图2 图像鼓包分割算法流程

如图3(a)所示。

步骤2)图像预处理:由于鼓包主要出现在陶瓦的花纹区域,且图像在采集及传输过程中还易受到噪声的干扰,因此还需对上一步的图像进行预处理。采用高斯滤波及选取陶瓷瓦花纹区域为待检测区域。其中,高斯滤波是一种线性平滑滤波器,用于去除噪声,平滑图像,其原理是通过一个模板对图像的每一个像素进行加权平均,减小相邻像素间的灰度差,算法中高斯滤波窗口大小为 3×3 ;选取陶瓦的待检测区域可利用预处理后图像的行和列均值与总的均值相比较,得到待检测陶瓦区域 W_1 。预处理后图像如图3(b)所示,计算公式如下:

$$L(i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n W_0(i, j), i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$M(j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m W_0(i, j), j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$K = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_0(i, j), i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

其中,图像 W_0 大小为 $m \times n$; $W_0(i, j)$ 为 W_0 的像素值;设待检测区域灰度矩阵为 W_1 ,大小为 $m_1 \times n_1$ 。

步骤3)使用AWT的方法分解 W_1 ,可得到 W_1 不同尺度的信息,选取包含鼓包信息的尺度并进行重构得到 W_2 , W_2 如图3(c)所示。

步骤4)对 W_2 作一维水平中值滤波处理得到 W_3 , W_2 中鼓包信息表现为小概率的异常点区域^[21],水平中值滤波可以将鼓包信息抹去, W_3 如图3(d)所示。

步骤5)将 W_2 与 W_3 差分得到 W_4 ,可提高鼓包与背景区域的对比度, W_4 如图3(e)所示。

步骤6)利用灰度阈值 T_1 对 W_4 进行二值化,实现鼓包的分割。计算公式如下:

$$T_1 = \frac{8}{m_1 n_1} \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{n_1} abs(W_4(i, j)) \quad (8)$$

由式(8)得二值化图像 W_5 ,即为:

$$W_5(i, j) = \begin{cases} 1, & abs(W_4(i, j)) \geq T_1 \\ 0, & abs(W_4(i, j)) < T_1 \end{cases}$$

图2所示。

步骤1)输入图像:陶瓦图像在采集及传输过程中会受到光照不均的影响,采用红色通道图像可以有效去除光照不均的干扰,且保留鼓包信息较完整。陶瓦原始图像 W_0 。

$$i = 1, 2, \dots, m_1; j = 1, 2, \dots, n_1 \quad (9)$$

二值化图像 W_5 如图3(f)所示。再对 W_5 使用连通域法、形态学滤波,即可得到鼓包的面积、个数和质心坐标。

步骤7)输出鼓包缺陷信息

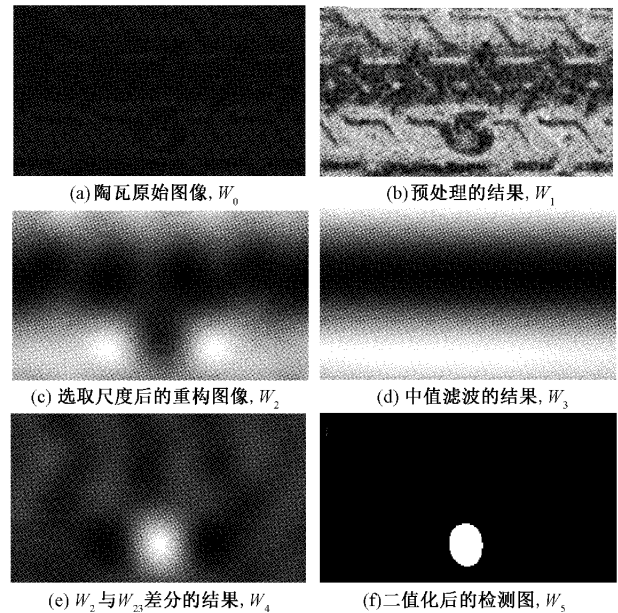


图3 基于 AWT 的陶瓷瓦鼓包分割算法流程

1.4 最佳尺度的确定

自适应小波变换(AWT)能够提取图像中的不同特征,且能有效的减小或去除这些特征的相关性。花纹区域的鼓包受复杂纹理的干扰,与背景区域对比度低,为了在保留鼓包信息的基础上尽量减少背景的影响,选取合适的尺度去分解图像至关重要。接下来对最佳尺度的确定方法进行分析。

陶瓷瓦图像一般可用AWT的方法分解出22个不同的尺度图,鼓包信息一般集中在17~21共5个尺度上。选取200张含有鼓包信息的陶瓷瓦样本图片,统计不同尺度下是否具有鼓包特征如图4所示。

同时展示部分尺度下鼓包部位的分解图如图5所示,图5(a)是预处理后的陶瓷瓦图像,图5(b)和图5(c)是取

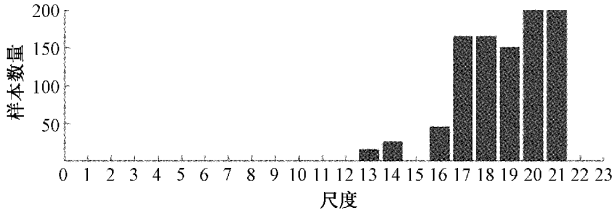


图 4 不同尺度下包含鼓包特征统计图

4 尺度和 8 尺度时对应的图像,图 5(d)和图 5(e)是取 17 尺度和 21 尺度对应的图像。图 5(f)是取 17~21 共 5 个尺度进行重构所对应的图像。

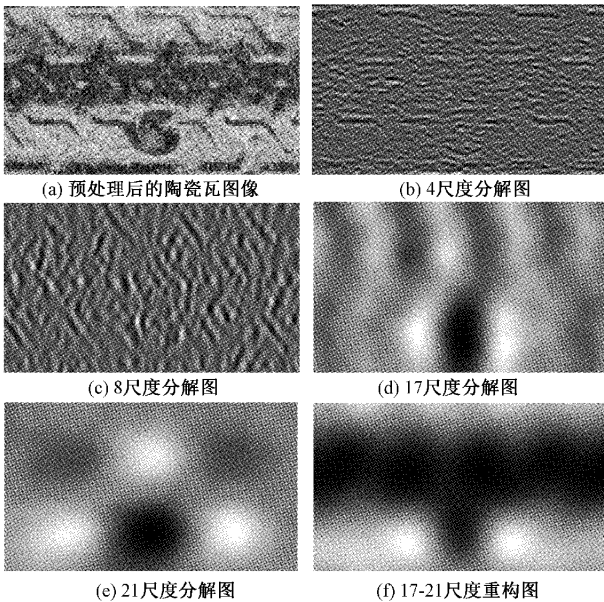


图 5 不同尺度下陶瓦分解图

综上分析可知,陶瓦鼓包缺陷信息并不出现在每个尺度的分解图上。为了能够准确的检测出鼓包,结合图 4 和 5 可得,选取 17~21 共 5 个尺度的分解图时包含鼓包信息最完整,且背景花纹信息较少,最利于进一步检测。

1.5 图像特征提取

二值化后的图像 W_s 中,鼓包为白色区域,而背景全部被置黑,可使用连通域法得到每个连通域的面积和质心坐标。其中,非鼓包区域有时也会形成连通域造成干扰,但多表现为面积较小的杂点,可设立面积阈值对干扰区域进行排除;同样,也会出现大鼓包被分解成多个小鼓包的情况,可设立一个距离阈值,把最大连通域视为鼓包的主要部分,取最大连通域的质心坐标为基点,计算其余连通域质心与最大连通域质心的距离,将距离小于阈值的连通域归为一类,并使用闭运算将其连接起来。

2 实验结果分析

本文建立了一套基于机器视觉的陶瓷瓦表面缺陷检测系统用于验证算法,该陶瓷瓦检测系统使用焦距为

12 mm、分辨率为 2 048 pixel×2 448 pixel 的 CMOS 线阵相机(BASLER 公司的 ACA2440-20gc 型相机),设立点状光源、背光式照明的 LED 照明系统,并利用光电开关进行陶瓷瓦图像样本的自动采集。其原理为 LED 灯光经反光布漫反射到陶瓷瓦表面,陶瓷瓦经传送带传送时触发光电开关,相机工作并采集到图像。采用工控机(Intel(R) Core(TM) i7-6700K CPU @ 4.00 GHz、32 GB 内存、64 位 Windows7 操作系统)对图像处理,基于 Matlab 开发了鼓包检测软件,通过工控机输出信号,判定陶瓷瓦是否存在鼓包缺陷。陶瓷瓦鼓包检测过程如图 6 所示:图 6(a)是陶瓦待检测区域红色通道图像,图 6(b)是取 17~21 尺度的重构图,图 6(b)是对图(a)作一维水平中值滤波的结果,图 6(d)是图 6(b)与图 6(c)差分的结果,图 6(e)是鼓包检测结果。

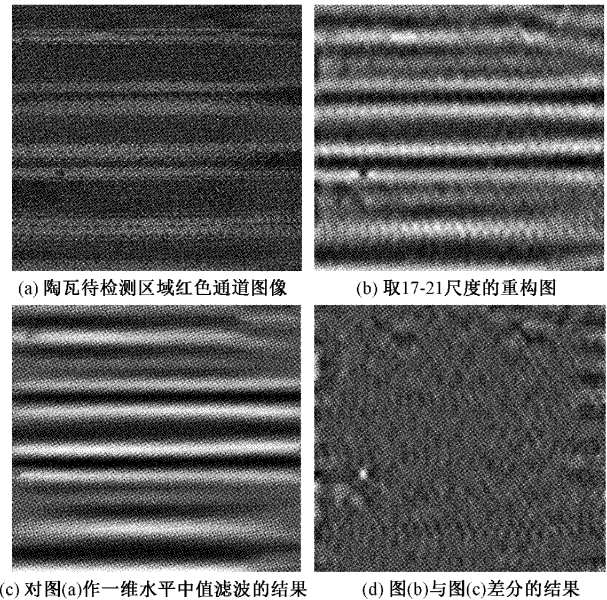


图 6 陶瓦鼓包检测流程

图 7 是 3 个不同形态鼓包检测结果,其中图 7(a)、图 7(c)、图 7(e)是陶瓦待检测区域红色通道图像,图 7(b)、图 7(d)、图 7(f)是鼓包检测结果。由图 7,本文算法对不同大小、不同位置、不同形态的鼓包样本均有较好的检测效果。

为了验证算法的有效性,在陶瓷瓦厂采集了 200 张陶瓷瓦的样本。其中,无鼓包样本 160 张,有鼓包样本 40 张。

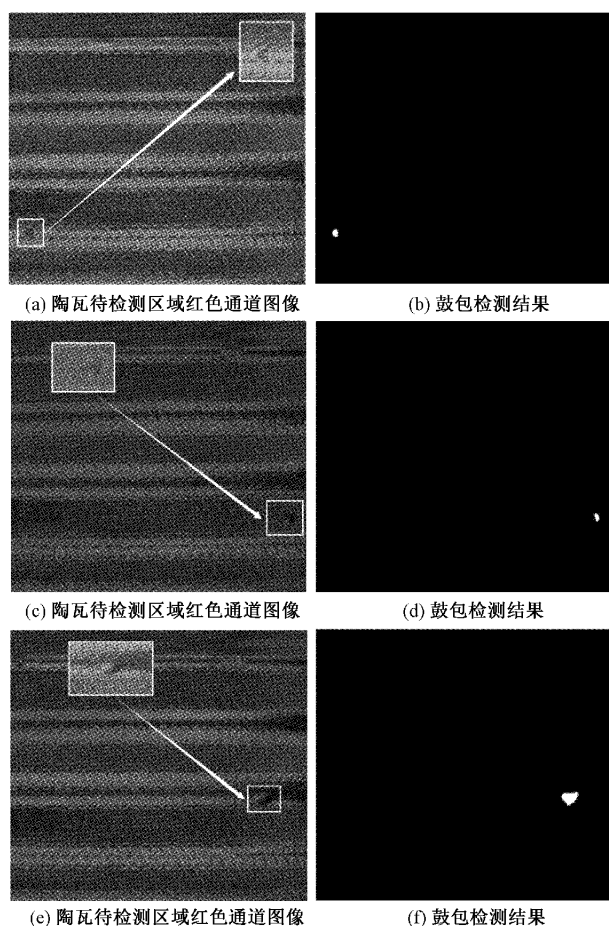


图7 3个不同形态鼓包检测结果

40张有鼓包样本中包含小鼓包样本24张,大鼓包样本16张。采用本文算法和张绍伟等提出的鼓包检测算法^[25]对上述陶瓷瓦样本进行了批量测试,测试结果如表1。由表1看见,本文算法中,40个鼓包样本检测出38个鼓包样本,其中未检测出鼓包的2张鼓包样本中,鼓包面积较小且形态为填充在花纹中;160个无鼓包样本中检测出159个无鼓包样本;总的检测准确率为98.5%,召回率为95.0%。文献[25]算法中,40个鼓包样本检测出31个鼓包样本;160个无鼓包样本中检测出155个无鼓包样本;总的检测准确率为93.0%,召回率为77.5%。由表1,本文算法的准确率和召回率均明显高于张绍伟等^[25]提出的算法。

表1 检测结果

算法	样本数量	检测正确数量	召回率/%	准确率/%
本文算法	200	197	95.0	98.5
文献[25]算法	200	186	77.5	93.0

3 结论

本文采用自适应小波变换的方法处理陶瓷瓦图像,实

现了陶瓷瓦表面的鼓包检测。利用机器视觉与数字图像处理技术相结合的手段,对图像进行多尺度分解,并运用水平滤波、差分、二值化等处理方法,实现了鼓包与背景的分,有效排除了以立体纹理为主的复杂背景干扰问题,并且对面积小、对比度低的小鼓包检测效果较好。实验结果表明,该算法的检测准确率为98.5%,召回率为95.0%,可为后续陶瓷瓦表面缺陷的自动化检测和分级提供指导。

参考文献

- [1] WANG G, FANG H B, WANG D Z, et al. Ceramic tile surface defect detection based on deep learning[J]. Ceramics International, 2022, 48(8): 11085-11093.
- [2] 王永强. 基于机器视觉技术的卫生陶瓷缺陷检测研究[J]. 中国陶瓷, 2014, 50(11): 53-56.
- [3] 李庆利, 张帆. 陶瓷砖表面缺陷视觉检测算法研究[J]. 中国陶瓷, 2015, 51(3): 44-47.
- [4] 熊建平. 基于计算机视觉的墙地砖表面缺陷检测[J]. 电子测量技术, 2015, 38(5): 53-55.
- [5] 杜培玉, 金永. 基于机器视觉的双凸透镜缺陷检测研究[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(8): 91-96.
- [6] 李良福, 孙瑞赟. 复杂背景下基于图像处理的桥梁裂缝检测算法[J]. 激光与光电学进展, 2019, DOI: 10.3788/LOP56.061002.
- [7] QU Z, LIN L D, GUO Y, et al. An improved algorithm for image crack detection based on percolation mode[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic, 2015, 10(2): 214-221.
- [8] 郝勇, 赵翔, 温钦华, 等. 基于机器视觉的深沟球轴承滚珠遗漏检测[J]. 激光与光电子学进展, 2018, DOI: 10.3788/LOP55.021502.
- [9] 郭振黎, 邢飞, 姜小平, 等. 基于机器视觉的启动器外观缺陷检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(2): 1-8.
- [10] 苑玮琦, 齐健婷. 冰勺表面缺陷检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 239-250.
- [11] 黄梦涛, 连一鑫. 基于改进 Canny 算子的锂电池极片表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 199-209.
- [12] 毛伟生, 李林升, 周文一, 等. 基于小波阈值与区域分裂合并的锂电池极片缺陷检测方法[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(8): 46-53.
- [13] 刘源, 夏春蕾. 一种基于 Sobel 算子的带钢表面缺陷图像边缘检测算法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(3): 138-143.
- [14] 王清晨, 景军锋. 采用机器视觉的金属表面横向裂纹检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11): 71-77.
- [15] 郭萌, 胡辽林, 赵江涛. 基于 Kirsch 和 Canny 算子的陶瓷碗表面缺陷检测方法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 24-33.
- [16] 李强, 曾曙光, 郑胜, 等. 基于机器视觉的陶瓷瓦表面裂

- 纹检测方法[J]. 激光与光电子学展, 2020, 57(8): 51-57.
- [17] 石雪松, 李宪华, 孙青, 等. 基于人工蜂群与模糊 C 均值的自适应小波变换的噪声图像分割[J]. 计算机应用, 2021, 41(8): 2312-2317.
- [18] 范伟强, 刘毅. 基于自适应小波变换的煤矿降质图像模糊增强算法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(12): 4248-4260.
- [19] QU H Y, LI T T, WANG R L, et al. Application of adaptive wavelet transform based multiple analytical mode decomposition for damage progression identification of Cable-Stayed bridge via shake table test[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, DOI:10.1016/j.ymssp.2020.107055.
- [20] 张雪峰, 闫慧. 基于中值滤波和分数阶滤波的图像去噪与增强算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 482-487.
- [21] 曹义亲, 曹婷, 黄晓生. 基于 à trous-NSCT 变换和区域特性的图像融合方法[J]. 计算机科学学, 2019, 46(6): 270-276.
- [22] NUNEZ J, OTAZU X, FORS O, et al. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1204-1211.
- [23] 董张玉, 赵萍, 胡文亮. a'Trous 小波与 HIS 变换相结合的遥感影像融合分析[J]. 测绘科学, 2011, 36(2): 178-180.
- [24] 梅锋, 赵春晖. 基于空域滤波的核 RX 高光谱图像异常检测算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(6): 697-702.
- [25] 张绍伟, 曾曙光, 郑胜, 等. 基于机器视觉的陶瓷瓦表面鼓包缺陷检测算法研究[J]. 南阳理工学院学报, 2019, 11(2): 36-41.

作者简介

魏建, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机视觉、图像处理。

E-mail: 201808120021010@ctgu.edu.cn

杨珊珊, 博士, 讲师, 主要研究方向为计算机视觉、图像处理、模式识别。

E-mail: yangss@ctgu.edu.cn

郑胜, 博士, 教授, 主要研究方向为人工智能、图像处理、计算机视觉、光电数据处理等。

E-mail: zsh@ctgu.edu.cn

曾曙光, 博士, 副教授, 主要研究方向为数字图像处理、人工智能等。

E-mail: zengshuguang19@163.com