

基于傅里叶变换的随机纹理瓷砖的高精度表面缺陷检测

段春梅, 张涛川

(佛山职业技术学院, 广东 佛山 528137)

摘要: 针对经典缺陷检测算法不能很好地提取随机纹理瓷砖图像的缺陷的问题, 提出一种基于傅里叶变换的随机纹理瓷砖表面缺陷高精度检测方法; 在此基础上, 完成了瓷砖表面缺陷检测硬件系统设计; 对采集的瓷砖图像, 首先利用傅里叶变换得到频率谱图像, 然后研究截止频率参数对滤波的影响, 设计最优滤波器进行滤波, 再通过傅里叶逆变换获得重构图像, 达到抑制背景纹理信息, 加强缺陷区域信息的目的, 最后通过阈值化和形态学操作获得缺陷区域; 实验结果表明: 该方法对不同的随机纹理瓷砖样本进行缺陷检测的准确率高, 在瓷砖缺陷检测中具有较高的实用价值。

关键词: 缺陷检测; 离散傅里叶变换; 滤波器设计; 随机纹理瓷砖

High-precision Surface Defect Detection of Random Texture Ceramic Tiles Using Fourier Transform

Duan Chunmei, Zhang Taochuan

(Foshan Polytechnic, Foshan 528137, China)

Abstract: Aiming at the problem that the defects of random texture tile images can not be well extracted via the classical defect detection algorithm, a high-precision surface defect detection method of random texture ceramic tiles using Fourier Transform is proposed. On this basis, the hardware system of ceramic tile surface defect detection is designed. At first frequency spectrum images are obtained by Fourier transform for the collected tile images, then the influence of cut-off frequency parameter on filtering is studied and the optimal filter is designed for filtering, and then reconstructed images are obtained through the inverse discrete Fourier transform to suppressing background texture information and strengthening the defect area information, finally, the defect areas are acquired by threshold and morphological operation. Experimental results show that this method has high accuracy on defect detection for different random texture ceramic tile samples, and it has high practical value in ceramic tile defect detection.

Keywords: defect detection; discrete Fourier transform; filter design; random textured ceramic tile

0 引言

随着瓷砖市场的不断发展, 人们对瓷砖的质量要求越来越高, 因此, 质量检测成为瓷砖生产线上不可缺少的重要环节。而常见的瓷砖表面缺陷包含裂纹、斑点、色差、黑心、鼓泡、磕碰、针孔等缺陷, 针对这些缺陷, 中国的许多中小企业依然依靠人工检测完成, 即使部分企业使用自动化检测, 也是大部分购买国外实时在线检测设备, 存在价格昂贵、不方便维护和升级等不利因素。而国内部分瓷砖检测设备主要应用于瓷砖素坯或者纯色瓷砖以及简单纹理瓷砖的缺陷检测。

为了减少瓷砖缺陷检测误差, 提高检测精度、准确度和生产效率, 推进了质量检测的自动化, 采用了机器视觉

技术对带有随机纹理的瓷砖表面缺陷进行自动检测。在空域范围内, 段春梅等^[1]采用机器视觉技术和图像处理技术对采集到的瓷砖素坯图像采用双边滤波器进行图像预处理, 降低噪声, 提高图像质量, 然后利用 Canny 边缘算子提取图像边缘, 在图像边缘的基础上, 采用最佳阈值分割算法实现图像分割, 利用圆弧度对缺陷特征进行描述, 并实现缺陷判别, 最后通过实验验证表面缺陷检测的准确度和稳定性。李庆利等^[2]提出了一种基于灰色关联分析的特征颜色提取算法, 完成了陶瓷砖表面缺陷检测软件设计。冯浩等^[3]利用双目立体视觉技术设计出一种以视差图作为分割基础的检测流程, 实现陶瓷表面的落渣缺陷检测问题。赖文敬等^[4]提出了一种基于相位测量轮廓术 (PMP) 的瓷砖表面平整度非接触式无损检测方法, 检测效率和精度较高, 可以进行多个瓷砖同时检测等优点。戴卫军^[5]针对蜂窝陶瓷形状不规则、侧面裂纹和侧面缺损细微造成外观质量检测难的问题, 将机器视觉应用到侧面缺陷检测中。余承乐等^[6]运用改进后的边缘检测算子 IMP-Canny 对古陶瓷进行裂纹检测。

但是实际上, 瓷砖种类繁多, 具有各种各样不规则的

收稿日期: 2019-03-22; 修回日期: 2019-04-16。

基金项目: 佛山市级科研项目项目(2013AG10010); 2016年佛山职业技术学院科研重点课题项目(KY2016Z02); 2017年佛山职业技术学院高层次人才引进科研专项(KY2017G01)。

作者简介: 段春梅(1982-), 女, 湖南邵阳人, 在读博士研究生, 高级工程师, 主要从事机器视觉, 三维扫描技术方向的研究。

纹理,缺陷的形态和大小不固定,并且缺陷与纹理背景可能区分不明显,从而增加了检测的难度。在空域范围内检测,由于纹理空间的复杂性,将会导致检测精度低,因此在频域范围内,基于傅里叶变换的随机纹理瓷砖的缺陷检测具有高精度、高可靠性等特性。刘伟斌等^[7]通过傅里叶变换对含有斑点的织物进行缺陷检测,在频域范围内,设计频域滤波器分离正常的纹理信息,保留瑕疵信息;应用傅里叶逆变换重构灰度图像,然后进行分割,阈值化,检测出瑕疵点。项文波等^[8]提出一种基于傅立叶变化及逆变换获取重构图像,从而提取方向纹理表面缺陷的算法,该算法通过频域滤波和图像重建有效地去除方向纹理的影响,提取换热器表面缺陷区域。董明利等^[9]提出一种基于光学傅里叶变换的大视场周期性微结构缺陷检测方法,并搭建相关实验系统进行实验验证。王福亮,左博等^[10-11]基于傅里叶图像重建进行磁体表面切削缺陷的检测,实验结果表明,该方法能有效地检测出一种表面切削缺陷。

本文旨在研究出一套基于傅里叶变换的随机纹理瓷砖表面缺陷检测的设计方案,使得瓷砖表面缺陷检测具有更高的精确度和可靠性。通过傅里叶变换,可以获得瓷砖的光谱图,设计频率滤波器实现频率滤波消除纹理背景的影响,利用傅里叶逆变换实现图像重建,转换回空间域,再采用阈值化、形态学操作提取瓷砖表面缺陷区域。在频域的滤波器设计中,研究截止频率参数对该方法的影响,从而得到优化值。实验结果表明,该方法能有效地检测瓷砖的表面缺陷,特别是在空间域中不利于缺陷检测的情况下。

1 瓷砖缺陷检测系统

在此工作中,开发了基于机器视觉的缺陷检测系统,该系统适用于大幅面瓷砖快速检测,系统包括检测平台、升降导轨、升降支架、扫描装置安装支架、相机、光源、和计算机。如图 1 所示。其中,工业相机、光源都安装在扫描装置安装支架上,相机的高度和角度可根据需求任意调整,以便实现全方位的拍照。该系统检测流程为:通过传输带将待瓷砖传输到检测平台上,当瓷砖到达检测平台的设定区域后,启动第二电机使升降支架到达指定位置,紧接着摄像机光电触发,开始进行快速拍摄,然后将拍摄好的图像通过数据接口等传送到计算机的软件,识别瓷砖表面的缺陷。

基于傅里叶变换的瓷砖表面缺陷检测的图像处理流程如图 2 所示。首先将采集的图片灰度化得到灰通图像 $G(x, y)$,经傅里叶变换将灰度图像 $G(x, y)$ 转换为光谱图 $F(u, v)$,设计一定截止频率的滤波器进行滤波,然后利用傅里叶逆变换转换回空间域获得图像 $D(x, y)$,最后通过阈值化、形态学操作,通过面积特征提取瓷砖表面的缺陷。

2 缺陷检测方法

2.1 离散傅里叶变换法

二维离散傅里叶变换的作用是将空间域信号变换到频

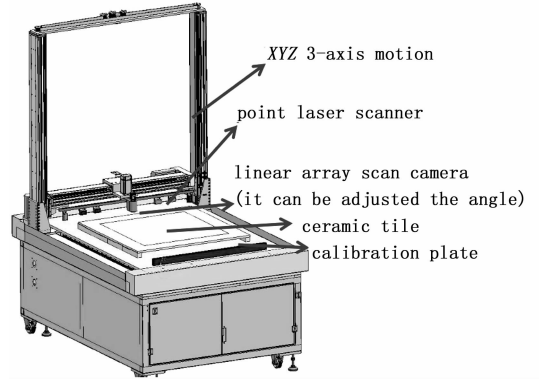


图 1 瓷砖缺陷检测系统图

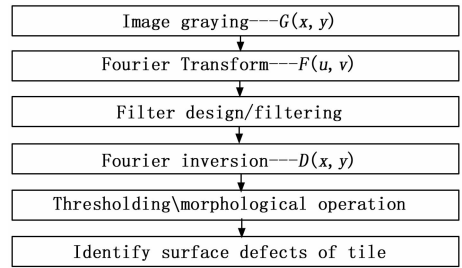


图 2 基于傅里叶变换的表面缺陷检测图像处理流程图

域。通过相机采集到的一幅尺寸为 $M \times N$ 的瓷砖图像 $F(x, y)$ 数据是二维离散的,将该图像灰度化得到瓷砖的 8 位灰度图像 $G(x, y)$,其离散傅里叶^[12]变换为:

$$F(u, v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{M-1} G(x, y) \exp \left[-j2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right] \quad (1)$$

$F(u, v)$ 所在坐标系被称为频域,其中由 $u = 0, 1, 2, \dots, M-1$ 和 $v = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 定义的 $M \times N$ 矩阵常称为频域矩阵。通常来说, $F(u, v)$ 也是复数,其可定义为^[10]:

$$F(u, v) = R(u, v) + jI(u, v)$$

$$R(u, v) = \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{M-1} G(x, y) \cos \left[2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right] \quad (2)$$

$$I(u, v) = \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{M-1} G(x, y) \sin \left[2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right]$$

傅里叶变换后所得频谱图中含了 3 种用于描述图像信息的特征的变量,即为傅里叶变换的幅度、相位角和功率谱,其计算公式分别为:

$$|F(u, v)| = \sqrt{R^2(u, v) + I^2(u, v)} \quad (3)$$

$$\varphi(u, v) = \arctan \frac{I(u, v)}{R(u, v)} \quad (4)$$

$$P(u, v) = |F(u, v)|^2 = R^2(u, v) + I^2(u, v) \quad (5)$$

一般设置傅里叶频谱的原点是 $(M/2, N/2)$,有利于进行频谱分析,其中频谱图大小为图像大小,中心点为低频分量,中心亮点代表了整幅图像的平均灰度,每一个像素点都代表一个频率值,该点的灰度值表示其幅值。

2.2 滤波器设计

瓷砖纹理是随机的,其傅里叶变换对应的的频谱图以

图像中心点呈发散状态分布。傅里叶频率域滤波的目的是增强缺陷区域, 抑制纹理背景。因此需要设计一个最佳滤波器, 对频率进行滤波, 以达到增强缺陷, 滤除纹理背景的目的。由于瓷砖表面的缺陷和瓷砖纹理图案都具有随机性, 设计滤波器时一定要设置合适的参数, 区分瓷砖纹理信息和表面缺陷信息^[5]。本文设计理想高通滤波器, 抑制纹理信息, 凸显表面缺陷。滤波器设计^[13]公式为:

$$H(u, v) = \begin{cases} 0, D(u, v) \leq D_0 \\ 1, D(u, v) > D_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中: D_0 表示通带的半径, $D(u, v)$ 表示频域中, 点 (u, v) 与中心点 $(M/2, N/2)$ 的距离。

$$D(u, v) = \sqrt{\left(u - \frac{M}{2}\right)^2 + \left(v - \frac{N}{2}\right)^2} \quad (7)$$

在所设计的滤波器中, 参数截止频率会影响检测效果, 截止频率过大则会漏检缺陷, 截止频率过小则无法有效抑制背景纹理, 所以需通过实验评估参数变化的影响, 选择最合适的截止频率优化滤波器。

2.3 缺陷定位

经过滤波器滤波后的图像, 通过傅里叶逆变换进行重建得到重构图, 然后进行 blob 分析, 识别缺陷区域。其具体步骤如下:

第一步: 傅里叶逆变换

对滤波后的图片进行傅里叶逆变换, 其二维离散傅里叶逆变换^[10]公式如下:

$$D(x, y) = \frac{1}{\sqrt{M \cdot N}} \sum_{v=0}^{N-1} \sum_{u=0}^{M-1} F'(u, v) \cdot \exp\left[j2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)\right] \quad (8)$$

其中: $x = 0, 1, 2, \dots, M-1$ 和 $y = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。因此, 给定 $F(u, v)$ 就可以通过逆 DFT 得到 $D(x, y)$ 。

第二步: 图像分割

将重构图像分离为目标像素和背景像素, 阈值分割之后一般需要进行开操作、闭操作等形态学处理才能满足使用要求。其迭代的最佳阈值计算方法为: 首先分别计算图像背景区域 B 和缺陷物体区 O 的灰度均值 h_b 和 h_o , 通过背景区域和目标区域的灰度值计算阈值初始值 Y^k , 根据计算好的阈值将图像划分为 h_1 和 h_2 两部分区域, 重新计算两区域的平均灰度值 h_1 和 h_2 , 然后通过 h_1 和 h_2 求阈值 Y^{k+1} , 比较 Y^k 与 Y^{k+1} 的大小, 如果相等, 则为最佳阈值, 如果不相等, 则迭代操作, 直到满足要求。其流程如下图 3 所示^[14]。

通过阈值分割, 初步确定缺陷区域目标, 但是存在一定噪点, 则需要通过开运算去除噪声, 除去图像中的较小面积的像素块, 消除噪点的影响, 平滑缺陷目标对象的边界轮廓, 保留缺陷目标的形状信息, 同时不能明显改变其目标区域的面积。其腐蚀运算和膨胀运算公式如下所示^[15]。开运算则先腐蚀运算, 再膨胀运算。本文的采取圆形结构元素实现开运算操作。

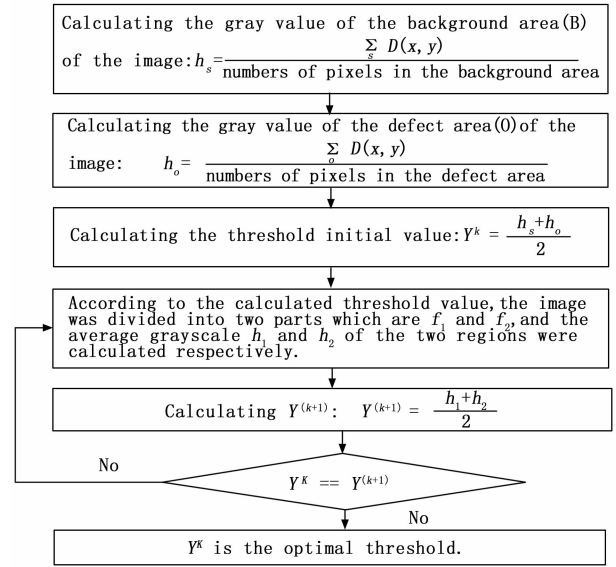


图 3 最佳阈值计算的流程图

$$D(x, y) = \min(x', y') \text{src}(x + x', y + y') \quad (9)$$

$$D(x, y) = \max(x', y') \text{src}(x + x', y + y') \quad (10)$$

第三步: 采用面积滤波获取缺陷区域。

在瓷砖目标缺陷分割完成之后, 紧接着需要对分割出来的缺陷进行量化操作。量化操作需要依据缺陷的相关特征参数进行操作, 然后根据特征参数对所分割出的缺陷进行定量分析。由于瓷砖表面缺陷一般都是形状不规则, 为了更好地获取缺陷目标, 本文采用的是面积特征参数对瓷砖目标缺陷进行量化操作, 获取最终的缺陷目标, 并用红色填充缺陷区域。

3 实验结果与分析

针对 8 种不同纹理的 300×300 像素瓷砖和 8 种不同纹理的 600×600 像素瓷砖进行检测实验。其中无缺陷的瓷砖样本 2 样, 有缺陷的样本 14 样, 样本缺陷有裂纹、斑点、色差、黑心、磕碰, 划痕、污点等真实缺陷共计 35 处。针对每种样本采集 1 幅图像共计 16 幅样本图像进行实验验证与分析, 并分别从准确率、时间效率等方面对实验结果进行比较与分析。

3.1 常见的瓷砖缺陷检测

由于篇幅有限, 本文仅对尺寸为 300×300 像素的瓷砖样本图像进行分析介绍, 实验采集的瓷砖图片样本是 300×300 像素的 24 位的带纹理的灰度图像, 将其灰度化得到 8 位的灰度图像, 如图 4 所示, 图 4 (a) 是无缺陷的瓷砖灰度图像, 图 4 (c) 是带有缺陷的瓷砖灰度图像, 两张图像具有相同的纹理背景, 利用上面的二维离散傅里叶变换方法, 分别得到图像的频率谱, 如图 4 (b) (d) 所示。

对图 4 (d) 所示的带有缺陷的瓷砖样本图像频率谱图进行滤波, 为了得到最优化的滤波器, 分别取截止频率 0.1, 0.4, 0.6 进行实验, 并对相应的效果进行分析选取最合适的截止频率, 其处理后的效果如图 5 所示。

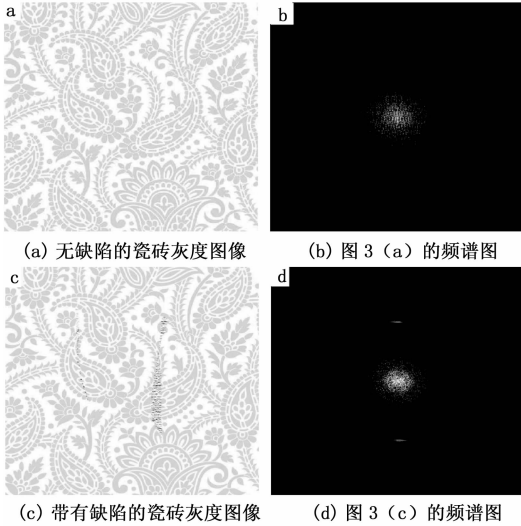


图 4 瓷砖的灰度图像和傅里叶变换图像

检测出 15 个完整缺陷, 3 个不完整缺陷数目, 1 个虚假缺陷数目; 对于 600 * 600 像素瓷砖样本, 共有 16 个真实缺陷数目, 实际检测出 14 个完整缺陷, 1 个不完整缺陷数目, 1 个虚假缺陷数目。见表 1 所示。

表 1 瓷砖缺陷检测对比表

Tile size/ mm	300 * 300	600 * 600
Detection numbers	19	16
Real detection numbers	18	15
Complete detection numbers	15	14
Incomplete detection numbers	3	1
False detection numbers	1	1
accuracy rate/%	94.7	93.7

在检测过程中, 采集图片、傅里叶变换、滤波、傅里叶逆变换、blob 分析分别消耗时间为: 10.264 ms、28.103 ms、16.095 ms、35.574 ms, 整个程序共计消耗 3 517.867 ms。

4 结论

搭建基于机器视觉的瓷砖表面缺陷检测系统, 采用傅里叶变换算法, 将瓷砖缺陷检测从空域转到频域进行处理, 有利于缺陷与纹理背景区分不明显的随机纹理瓷砖缺陷高精度检测。在频域空间, 设计合适的滤波器进行滤波, 抑制纹理背景信息, 增强缺陷区域信息, 然后通过傅里叶逆变换重构图像, 通过 Blob 分析以识别缺陷区域。实验结果表明, 该方法能有效、稳定地检测随机纹理瓷砖图像的缺陷。这种基于傅里叶变换的方法可以处理任意大小像素的瓷砖图像。其中滤波器的截止频率取值会影响缺陷检测结果, 通过实验找出了其优化值。

参考文献:

- [1] 段青梅, 张涛川. 基于机器视觉的瓷砖素坯表面缺陷无损检测算法研究 [J]. 智能计算机与应用, 2017, 7 (3): 37-40.
- [2] 李庆利, 王永强, 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.
- [3] 冯浩, 唐磊, 曹利钢. 基于双目立体视觉的陶瓷表面落渣检测 [J]. 陶瓷学报, 2017, 38 (6): 925-929.
- [4] 赖文敬, 肖景红, 顾轩, 等. 高精度检测瓷砖表面平整度 [J]. 中国陶瓷, 2014, 50 (10): 52-56.
- [5] 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, 35 (3): 291-295.
- [6] 余承乐, 柳炳祥. 基于 IMP-Canny 算子的古陶瓷裂纹检测研究 [J]. 陶瓷学报, 2017, 38 (1): 103-107.
- [7] 刘伟斌, 郑力新, 周凯汀. 采用频域滤波的织物疵点检测方法 [J]. 华侨大学学报 (自然科学版), 2017, 38 (4): 562-566.
- [8] 项文波, 戴跃伟, 茅耀斌. 基于傅立叶图像重建的车用换热器表面缺陷检测 [J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38 (3): 126-130.

(下转第 35 页)

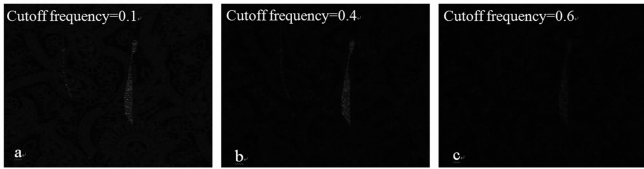


图 5 截止频率对图 4 (d) 频谱图的滤波效果影响

截止频率确定删除频率的区域大小。截止频率小可能无法有效地移除背景纹理信息, 如图 5 (a) 所示, 该截止频率为 0.1, 该图可以清晰的显示缺陷区域, 包含一大一小两个缺陷区域, 但是周边还有一定的纹理信息; 截止频率大则可能导致缺陷的丢失, 如图 5 (c) 所示, 该截止频率为 0.6, 该图已经全部移除纹理背景, 但是小缺陷区域则不明显。实验结果表示, 截止频率取值 0.4 时, 该样本图像具有最佳的检测效果, 如图 5 (b) 所示, 去掉大部分背景纹理信息, 同时明显显示缺陷区域。

然后在此基础上通过傅里叶逆变换得到重构图, 并进行阈值操作、开运算操作 (圆形半径取值 3.5) 及通过面积特征进行缺陷最后定位, 图 4 (a) (c) 的缺陷检测效果图如图 6 所示。

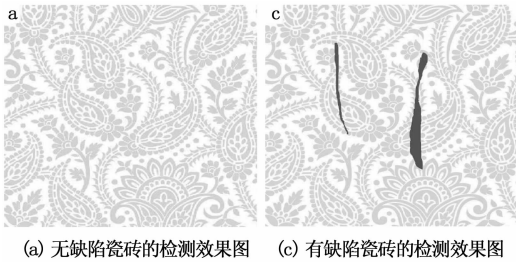


图 6 图 4 (a) (c) 的最终缺陷检测图

3.2 准确率与检测速度分析

用于实验的 16 个样本的图像上共有 35 个真实缺陷, 对于 300 * 300 像素瓷砖样本, 共有 19 个真实缺陷数目, 实际