

文章编号: 2095-2163(2019)05-0240-06

中图分类号: TP391

文献标志码: A

基于频域信息与梯度特征融合的接触轨面缺陷检测

赵奕开, 郑树彬, 李立明

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 为了提高针对接触轨表面缺陷的检测效率, 提出一种基于频域信息与梯度特征的轨面缺陷检测算法。四元数傅里叶变换算法可以通过图像颜色、亮度、与运动特征来计算图像显著性, 分析获得图像的频谱和相位; 并在空域中计算构建相应的缺陷目标显著图, 得到缺陷区域; 并通过以图像梯度算法与四元数傅里叶变换结合的方式进行显著图像效果增强, 最终完成检测, 且进行了实验验证。实验结果表明, 融合算法对于接触轨中常见的若干种缺陷类型都能够做到实时、稳定、快速的识别分析, 且误检、漏检率较低。

关键词: 接触轨缺陷检测; 显著性检测; 四元傅里叶变换; 图像梯度

Contact rail surface defect detection based on fusion of frequency domain information and gradient feature

ZHAO Yikai, ZHENG Shubin, LI Liming

(School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

【Abstract】 In order to improve the efficiency of rail surface defect detection, a rail surface defect detection algorithm based on frequency domain information and gradient features is proposed. Quaternion Fourier transform algorithm can calculate image saliency by image color, brightness, and motion characteristics, and get the spectrum and phase of the image; then calculate and construct the corresponding defect target saliency map in spatial domain to get defect area; and enhance the image effect by combining image gradient algorithm with quaternion Fourier transform, finally complete the detection. The results are tested and verified by experiments. The experimental results show that the algorithm can identify and analyze several common types of defects in contact rails in real time, stably and quickly, and the rate of false detection and missed detection are low.

【Key words】 track defect detection; saliency detection; quaternion Fourier transform; image gradient

0 引言

在地铁运行系统中, 稳定的电源供应是保证机车运行的必要条件之一, 大部分地铁线路主要采用具有结构简单、稳定性好、简洁美观等优点的接触轨受流方式。但由于常年高强度的使用, 表面常会出现许多缺陷, 如擦伤、疤痕、裂痕等, 对列车的行驶安全造成隐患。本文将针对常见缺陷提出一种更高效简便的检测算法。

2007年, Hou等人^[1]提出了谱残差显著性检测算法(spectral residual, SR), 根据图像的频谱信息计算图像显著性; 该方法具有原理清晰、代码简洁、无需调整参数的特点。除此之外, 还有基于傅里叶频率调谐的显著性检测算法(frequency-tuned, FT)^[2]、基于图像签名的显著性检测(image signature, IS)^[3]以及基于脉冲离散余弦变换的显著性检测算法

(pulse discrete cosine transform, PCT)^[4]等。在基于傅里叶变换的图像显著性检测中, Guo等人^[5]提出了一种针对图像亮度特征进行傅里叶变换的图像显著性检测模型(phase spectrum of quaternion Fourier transform, PFT), 通过得到相位谱的傅里叶反变换定义图像显著性。得到了优于其他基于相同原理算法的显著图; 并在此基础上提出了使用图像的2个独立颜色特征、一个亮度特征和一个视频序列的运动特征来计算视频显著性的基于四元数的傅里叶相位谱显著性检测模型(phase spectrum of quaternion Fourier transform, PQFT)^[5]。该显著性检测模型结合了图像中包含的静态特征与运动特征进行检测; 并且四元数傅里叶变换算法相对于传统傅里叶变换算法来讲弥补了其只能处理单一特征的缺点。不仅如此, 由于PQFT算法融合了运动特征, 因此在视频序列的显著性检测上也具有很好的表现。

基金项目: 上海市科委项目(18030501300)。

作者简介: 赵奕开(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 故障检测、图像缺陷处理; 郑树彬(1979-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 故障检测、信号分析处理。

通讯作者: 郑树彬 Email: 522839835@qq.com

收稿日期: 2019-07-27

为了提高针对接触轨表面常见缺陷的检测效率, 本文提出一种基于图像频域信息与梯度特征的轨面缺陷检测算法。首先, 本文采用同态滤波预处理的方法, 设计了针对高、低频分量影响不同的滤波函数, 减弱图像低频部分, 扩大高频部分, 做到既减弱图像噪声影响, 同时又增强了缺陷目标和背景的对比度。其次, 以图像梯度算法与 PQFT 算法结合的显著图像增强算法, 分析获得图像的频谱和相位谱, 通过计算在空域中构建相应的缺陷目标显著图, 得到缺陷区域, 最终完成检测。本文对此拟展开研究论述如下。

1 缺陷显著性检测

本文检测算法流程如图 1 所示。其中, 接触轨成像系统由负责拍摄的高速面阵相机、负责恒定亮度的 LED 光源以及负责调整角度的高精度相机调节设备等部分共同组成。

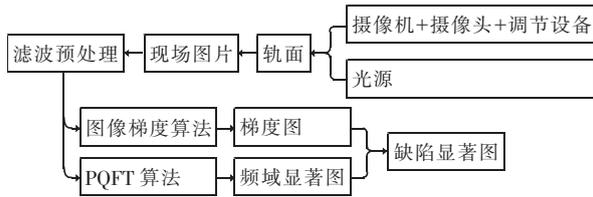


图 1 接触轨缺陷检测系统流程

Fig. 1 Flow chart of contact rail defect detection system

研究中, 为消除采集到的图像效果因外界因素干扰而产生对后续检测造成的不必要影响, 本文将通过同态滤波处理的方式对图片进行预处理, 加深缺陷区域与普通无伤轨面的对比差异; 同时对图像进行频域空间幅值信息的分析与获取相位谱信息; 再通过图像梯度算法来对图像做进一步处理, 突出边界信息, 最终实现显著性区域的识别, 完成检测。

2 缺陷检测算法

2.1 图像滤波预处理

同态滤波属于频域滤波的类别。同态滤波的优点在于可以解决普通频率滤波难以解决的乘性噪声或卷积性噪声(非线性噪声)。通过对此类噪声进行一系列数学运算可将其转换成加性噪声, 再用线性滤波方法进行分离处理, 处理结束后再通过反变换运算输出处理后的图像。其运算流程如图 2 所示。

对于一幅图像 $f(x, y)$, 可写作分量 $r(x, y)$ 与 $i(x, y)$ 的乘积, 即:

$$f(x, y) = i(x, y)r(x, y), \quad (1)$$

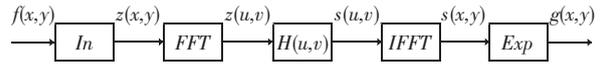


图 2 同态滤波流程图

Fig. 2 Homomorphic filtering flow chart

在此基础上, 可得分步运算过程阐述如下。

(1) 两边取对数。其数学公式可表示为:

$$\ln f(x, y) = \ln i(x, y)r(x, y), \quad (2)$$

(2) 两边取傅氏变换。其数学公式可表示为:

$$F(u, v) = I(u, v) + R(u, v), \quad (3)$$

(3) 用频域函数 $H(u, v)$ 处理 $f(u, v)$, $H(u, v)$ 是同态滤波函数。其数学公式可表示为:

$$H(u, v)F(u, v) = H(u, v)I(u, v) + H(u, v)R(u, v), \quad (4)$$

(4) 反变换到空域。其数学公式可表示为:

$$h_f(x, y) = h_i(x, y) + h_r(x, y), \quad (5)$$

(5) 两边取指数。其数学公式可表示为:

$$g(x, y) = \exp | h_f(x, y) | = \exp | h_i(x, y) | \cdot \exp | h_r(x, y) |. \quad (6)$$

由此可见, 增强后的图像依然是由入射分量 $h_i(x, y)$ 与反射分量 $h_r(x, y)$ 两部分组成, 入射分量在图像中体现为缓慢变化的部分, 在傅里叶变换中对应低频部分; 而反射分量在图像中体现为边缘交界处, 在傅里叶变换中对应高频部分。

因此, 研究中可以通过设计一个滤波函数 $H(u, v)$ 来对傅里叶变换的高低频分量分别造成影响。这里, 就给出同态滤波器的设计剖面如图 3 所示。

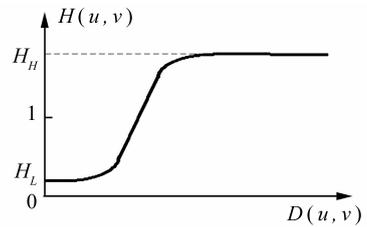


图 3 同态滤波器的剖面图

Fig. 3 Profile of homomorphic filters

当选取 $H_L < 1, H_H > 1$ 时, 滤波函数可以达到减弱低频信号分量的同时又增强高频信号分量的效果。在图像上呈现的效果则是压缩了图像的动态范围, 去除了一定噪声, 同时又强化了图像边缘之间的对比度。

2.2 四元数傅里叶变换检测模型

四元数模型的基本原理是利用图像中的 2 个独立颜色特征、一个亮度特征与运动特征进行显著性检测。这是通过对图像动态特征与静态特征进行融合的方式解决图像显著性区域识别问题的算法。

四元数傅里叶变换算法相对于传统傅里叶变换算法来讲弥补了其只能处理单一特征的缺点,在针对接触轨表面缺陷检测问题的实际应用中可以得到更为理想的显著性图。算法原理及运算公式详见如下。

定义 t 时刻的输入图像为 $F(t)$ ($t = 1, 2, \dots, T$, T 表示输入视频的总帧数), $r(t)$ 、 $g(t)$ 和 $b(t)$ 分别表示 $F(t)$ 的红、绿和蓝三通道,则其独立的颜色通道 R (红)、 G (绿)、 B (蓝)、 Y (黄) 分别定义为^[6]:

$$R(t) = r(t) - \frac{g(t) + b(t)}{2}, \quad (7)$$

$$G(t) = g(t) - \frac{r(t) + b(t)}{2}, \quad (8)$$

$$B(t) = b(t) - \frac{r(t) + g(t)}{2}, \quad (9)$$

$$Y(t) = \frac{r(t) + g(t)}{2} - \frac{|r(t) - g(t)|}{2} - b(t), \quad (10)$$

定义 $F(t)$ 的亮度特征 $I(t)$ 为:

$$I(t) = \frac{r(t) + g(t) + b(t)}{3}, \quad (11)$$

定义 $F(t)$ 运动特征 $M(t)$ 为:

$$M(t) = |I(t) - I(t - \tau)|, \quad (12)$$

其中, τ 表示计算运动特征的时间间隔。

同时,根据研究结果,在人类视觉系统中红/绿、蓝/黄属于颜色对立的神经元,是相互独立存在的,因此可分别用 $RG(t)$ 、 $BY(t)$ 单独表示如下^[6]:

$$RG(t) = R(t) - G(t), \quad (13)$$

$$BY(t) = B(t) - Y(t), \quad (14)$$

除此之外, $M(t)$ 、 $I(t)$ 、 $RG(t)$ 、 $BY(t)$ 这 4 个特征通道在人类视觉系统中也几乎是独立的^[7]。因此,可以用一个四元数 $q(t)$ 表示图像中的上述 4 个特征,其数学公式可表示为:

$$q(t) = M(t) + RG(t)\mu_1 + BY(t)\mu_2 + I(t)\mu_3, \quad (15)$$

其中, $\mu_i, i = 1, 2, 3, \mu_i^2 = -1, \mu_1 \perp \mu_2, \mu_2 \perp \mu_3$ 。为了检测图像显著性,在已经用四元数表示的图像中,可用 Wine 等人^[8]提出的彩色图像四元傅里叶变换来表示。若检测过程中选用图片或视频帧作检测,可将式中 t 省略。 M 、 I 、 RG 、 BY 则为行列尺寸统一的二维矩阵,即上式可重新表示为:

$$q = f_1 + f_2 \cdot \mu_2, \quad (16)$$

其中,

$$f_1 = M + RG \cdot \mu_1, \quad (17)$$

$$f_2 = BY + I \cdot \mu_1, \quad (18)$$

式(16)的傅里叶变换可写为:

$$Q(u, v) = F_1[u, v] + F_2[u, v]\mu_2, \quad (19)$$

其中, $F_i[u, v]$ ($i = 1, 2$) 为 $f_i(m, n)$ 二维傅里叶变换,定义为:

$$F_i[u, v] = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-i\mu_2\pi(mv/M+nu/N)} f_i(m, n), \quad (20)$$

由此不难得到,傅里叶反变换 $f_1(m, n)$ 可由 $F_i[u, v]$ 获得,公式为:

$$f_i(m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{v=0}^{M-1} \sum_{u=0}^{N-1} e^{i\mu_2\pi(mv/M+nu/N)} F_i[u, v], \quad (21)$$

图像的四元傅里叶变换 $Q[u, v]$ 写成指数形式,如式(22)所示:

$$Q[u, v] = \|Q[u, v]\| e^{i\mu\Phi}, \quad (22)$$

其中, $\|\cdot\|$ 表示幅度谱; Φ 表示相位谱; μ 表示四元数的虚数单位。

傅里叶变换的相位谱是计算视觉显著性的关键特征^[5],因此设 $\|Q[u, v]\| = 1$,使得 $Q[u, v]$ 只包含相位谱信息,并用式(21)计算其傅里叶反变换,用 q' 表示如下:

$$q' = \rho_0 + \rho_1 \cdot \mu_1 + \rho_2 \cdot \mu_2 + \rho_3 \cdot \mu_3, \quad (23)$$

最终的视觉显著图定义为:

$$sM = g * \|q'\|^2. \quad (24)$$

其中, $*$ 表示二维卷积; g 表示标准差为 σ 的二维高斯滤波器,最终的显著图为归一化后的 sM 二维矩阵。当式(15)的 $M(t)$ 为 0 时即可计算静态图像的显著性图。

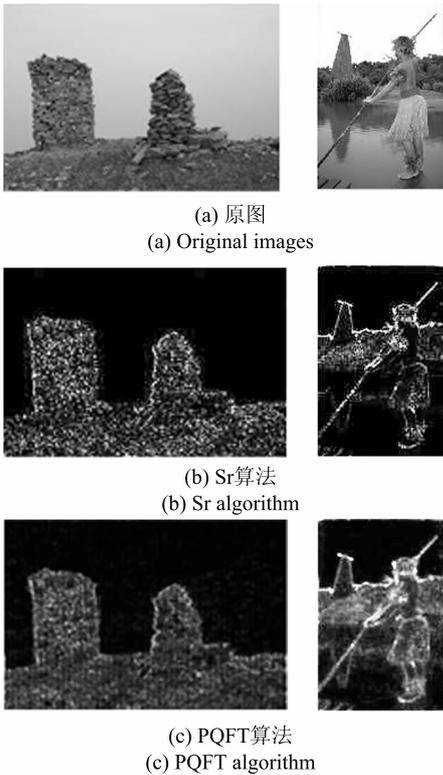
至此,研究给出了 PQFT 算法与传统谱残差算法的效果对比如图 4 所示。

2.3 基于图像梯度与四元数傅里叶变换算法结合的显著图像增强

为了进一步提高上文所得到缺陷显著性图的清晰度,本文将图像梯度与 PQFT 算法相结合,来有效实现显著信息增强。

在一幅图像中,图像梯度能够表现为边缘与结构的关系;视觉显著性则可以表示一幅图像中针对人类视觉最具吸引力的区域。

因此研究中可将上述 2 种表现方式结合,即当图片中的待检测区域既有边缘结构、又同时为视觉显著性区域时,则可更清晰地得到缺陷显著图^[9]。实验结果如图 5 所示。由图 5 可以观察到,利用此种算法可以更加精准地获得接触轨面缺陷显著性图。



(a) 原图

(a) Original images

(b) Sr算法

(b) Sr algorithm

(c) PQFT算法

(c) PQFT algorithm

图4 PQFT算法效果与传统谱残差算法效果对比

Fig. 4 Comparison of PQFT algorithm and traditional spectral residual algorithm

作为数字图像处理的重要内容,梯度算法可以加强体现图像中重要目标和均质背景之间的突出变化。边缘检测是图像梯度性质最常应用的领域,其最重要性质是梯度方向体现在图像灰度最大变化率上^[10]。而在现场采集图像中存在常见缺陷的接触轨表面上,发生缺陷的区域通常有着灰度值变化率较大的特点,故而可据此特点有效区分出背景区域与目标区域。同时,图片通过梯度算法处理后可以大幅减少数据量,消除大部分冗余背景信息,且保留了图像中显著度较高的边缘信息。研究推得该计算方法及公式表达可做重点阐释如下。

一幅图像 $f(x,y)$ 在点 (x,y) 一阶微分,即为图像在此点的梯度值,是一个具有大小和方向的矢量,用 G_x, G_y 分别表示该点沿 x 方向和 y 方向的梯度,则梯度矢量可写作:

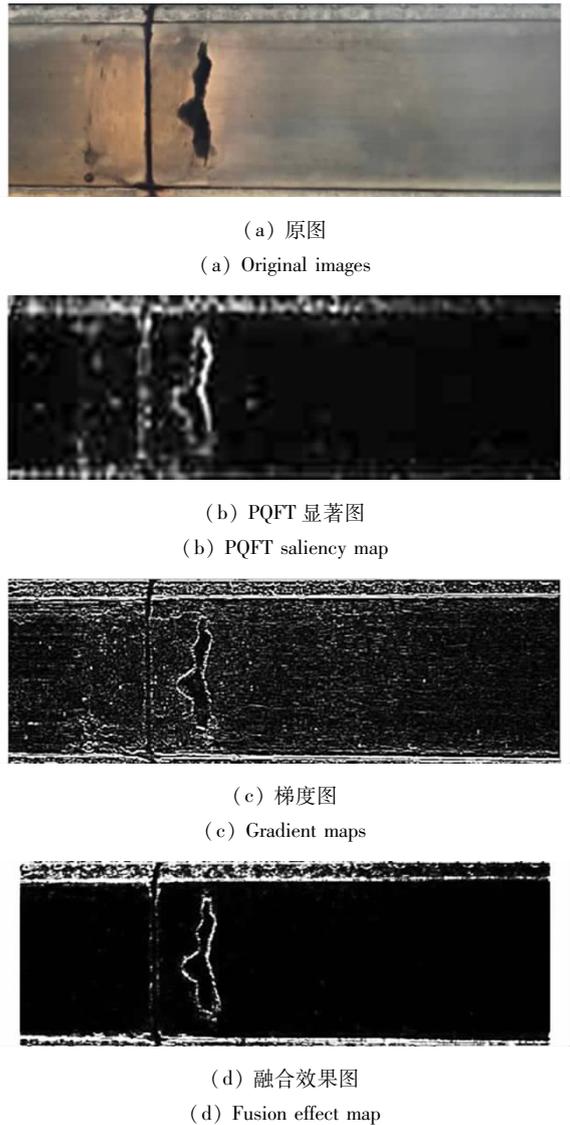
$$\nabla f(x,y) = [G_x, G_y]^T = \left[\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T, \quad (25)$$

这个矢量的幅度为:

$$mag(\nabla f) = g(x,y) = \sqrt{\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}}, \quad (26)$$

方向角为:

$$\Phi(x,y) = \arctan \left| \frac{\partial f}{\partial x} / \frac{\partial f}{\partial y} \right|, \quad (27)$$



(a) 原图

(a) Original images

(b) PQFT显著图

(b) PQFT saliency map

(c) 梯度图

(c) Gradient maps

(d) 融合效果图

(d) Fusion effect map

图5 图像梯度算法与PQFT算法结合的图像检测方法效果图

Fig. 5 An image detection method based on image gradient algorithm and PQFT algorithm

梯度的方向是 $f(x,y)$ 函数变化率最高的地方,即图像边缘处越明显,则梯度值越高,例如接触轨表面存在的疤痕区域,而在平滑区域、诸如完好无损的轨面上则梯度值较小。最终输出的梯度图像中,梯度值越高的部分越会保留,梯度值较低的部分则会被剔除。

本文将结合图像梯度理论和视觉显著性原理来衡量一个像素的显著性值。研发方法可表述为:通过PQFT算法输出视觉显著图来表示图像区域中对人类视觉的吸引力部分;并使用图像梯度算法来客观反映图像中的边缘结构信息。因此当图像中的某块像素区域同时具备了明显的边缘结构信息、且又是视觉显著性区域的这2个决定因素时,就可推断出该区域为目标检测区域。

令 I 为输入图像, 先是计算图像的梯度值, 运算时可用到如下公式:

$$W_G = \left(\left(\frac{\partial}{\partial x} I \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} I \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (28)$$

并将得到的图像梯度值进行归一化, 以方便后续数据处理, 然后利用四元傅里叶变换检测算法获得的显著性图像, 来定义新的显著性图为:

$$W = W_G \times W_S. \quad (29)$$

其中, W_G 是归一化后的图像梯度值, W_S 是四元数傅里叶变换算法处理得到的显著性值。

从图 5 的实验结果分析得知, 通过本文算法最终输出的结合效果图可以将梯度图像中琐碎复杂的背景做到完全有效的滤除, 并且使检测目标拥有更加清晰可见的边缘信息。

3 实验验证与结果分析

本文算法有效性的检验与实现是在 Inter Core 2.6 Ghz CPU 4 GB 内存 4 GB Win10 系统的 PC 机上通过 Matlab 软件进行识别检测。缺陷检测类型为常见的 4 类缺陷, 即: 疤痕、划痕、波纹擦伤、麻点。样本图像检测效果图如图 6 所示。

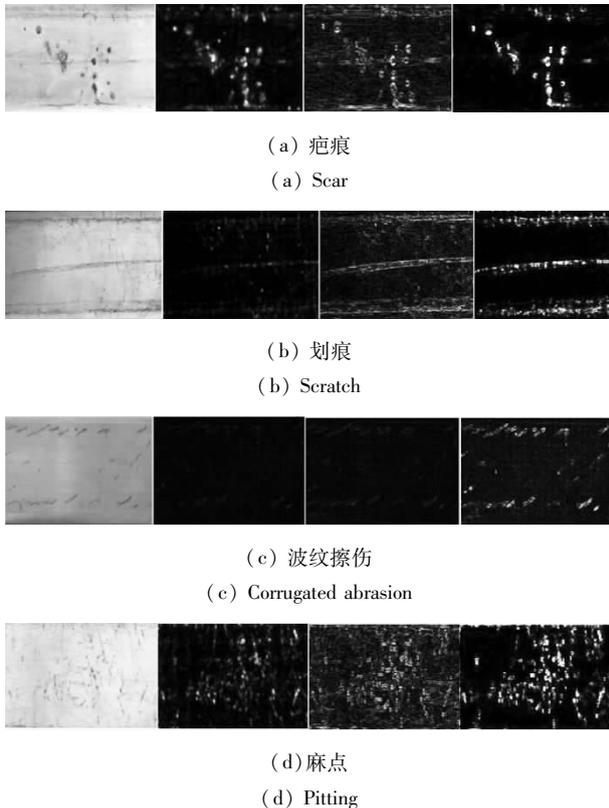


图 6 常见缺陷检测效果图

Fig. 6 Common defect detection effect diagram

由于现场采集图像样本有限, 本文通过对现有图片进行旋转、对称、裁剪、加噪等方法扩充实验样本数量, 并对实验结果进行记录。分别记录其有效检测数量、漏检数量、误检数量, 并随即计算出检测率、漏检率、误检率, 此后再与其它算法检测结果进行横向对比。其中, 记录 x 表示缺陷检出个数, y 表示漏检个数, z 表示误检个数, n 为缺陷样本总个数, 各检测指标的数字定义为: 检测率 $D = x/n$, 漏检率 $L = y/n$, 误检率 $E = z/n$ 。算法检测结果对比见表 1。

表 1 算法检测结果对比

Tab. 1 Comparisons of detection results of algorithms

本文算法	D	L	E
PQFT	83.6	16.4	13.4
SR	74.3	25.7	15.7
PQFT+梯度	95.3	4.7	5.2

分析检测数据可知, 当仅使用 PQFT 算法或 SR 算法对轨面常见缺陷进行检测时, 误检率和漏检率都较高, 目标区域不够明显。将经同态滤波预处理后的图片再进行融合算法处理后能够在一定程度上降低漏检率。在本次研究中, 通过将图像梯度算法与 PQFT 算法得到的目标图像相融合, 最终得到的全新检测算法能有效降低漏检率与误检率, 提升检测精度。这里, 将不同缺陷类型检测率定义为:

$$D_i = x_i/n_i (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (30)$$

针对 D_i 的检测率结果如图 7 所示。其中, 针对纹理较为明显的缺陷, 其识别准确率可达到 95% 以上。

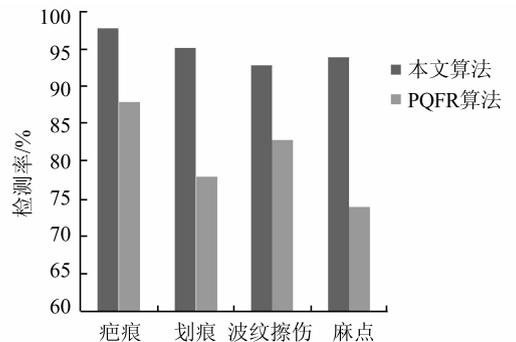


图 7 本文算法与 PQFT 算法针对常见不同缺陷类型检测率

Fig. 7 The detection rate of this algorithm and PQFT algorithm for common different types of defects

4 结束语

针对接触轨表面常见缺陷检测的实时性要求, 以及对传统检测算法干扰噪声较多、检测效果以及效率不理想的问题, 本文提出了一种基于图像频域

信息与梯度特征的轨面缺陷检测算法。通过融合同态滤波方法去除光照不均匀的影响,构建了四元傅里叶变换显著性检测模型,同时通过融合图像梯度信息,最终实现了精准分割提取缺陷区域。

在实验验证中,通过本文算法对单幅图像进行平均检测的时间仅为 34 ms,本文算法的优点在于:不仅检测速度快、准确度高;且算法复杂度低,对于接触轨中常见的若干缺陷种类,其平均检测率达到了 95%,有效降低了缺陷的漏检率和误检率,且完全能够满足现阶段接触轨的检测需求。

参考文献

- [1] HOU Xiaodi, ZHANG Liqing. Saliency detection: A spectral residual approach[C]//2007 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2007). Minneapolis, Minnesota, USA: IEEE Computer Society, 2007: 1-8.
- [2] ACHANTA R, HEMAMI S, ESTRADA F, et al. Frequency-tuned salient region detection[C]//2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, FL, USA: IEEE Computer Society, 2009: 1597-1604.
- [3] YU Ying, WANG Bin, ZHANG Liming. Pulse discrete cosine transform for saliency-based visual attention[C]//Proc of the 8th IEEE International Conference on Development and Learning. Shanghai, China: IEEE Press, 2009: 41-46.
- [4] HOU Xiaodi, HAREL J, KOCH C. Image signature: Highlighting sparse salient regions [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(1): 194-201.
- [5] GUO Chenlei, MA Qi, ZHANG Liming. Spatio-temporal saliency detection using phase spectrum of quaternion Fourier transform [C]//2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2008). Anchorage, Alaska, USA: IEEE Computer Society, 2008: 2908-2915.
- [6] ITTI L, KOCH C, NIEBUR E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(11): 1254-1259.
- [7] ENGEL S, ZHANG Xuemei, WANDELL B. Colour tuning in human visual cortex measured with functional magnetic resonance imaging [J]. Nature, 1997, 388(6637): 68-71.
- [8] SANGWINE S J, ELL T A. The discrete Fourier transform of a colour image [C]//Image Processing II Mathematical Methods, Algorithms and Applications. Chichester UK: IEEE, 2000: 430-441.
- [9] GUPTA R, CHAUDHURY S. A scheme for attentional video compression [J]. Pattern Recognition and Machine Intelligence, 2011, 6744: 458-465.
- [10] 邓亚蒙. 图像梯度与谱残差结合的显著性检测方法 [J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2016, 32(1): 80-83, 94.
- [6] LI Chunming, XU Chenyang, GUI Changfeng, et al. Distance regularized level set evolution and its application to image segmentation [J]. IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2010, 19(12): 3243-3254.
- [7] PHAM D L, PRINCE J L. An adaptive fuzzy C-means algorithm for image segmentation in the presence of intensity inhomogeneities [J]. Pattern Recognition Letters, 1999, 20(1): 57-68.
- [8] 冯飞, 刘培学, 李丽, 等. FCM 融合改进的 GSA 算法在医学图像分割中的研究 [J]. 计算机科学, 2018, 45(S1): 252-254.
- [9] CHUANG K S, TZENG H L, CHEN S, et al. Fuzzy C-means clustering with spatial information for image segmentation [J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2006, 30(1): 9-15.
- [10] 宗永胜, 胡晓辉, 屈应照. 结合空间邻域信息的核 FCM 图像分割算法 [J]. 计算机应用与软件, 2017, 34(4): 221-225, 333.
- [11] A LIPOUR S, SHANBEHZADEH J. Fast automatic medical image segmentation based on spatial kernel fuzzy c-means on level set method [J]. Machine Vision and Applications, 2014, 25(6): 1469-1488.
- [12] 刘晨, 池涛, 李丙春, 等. 结合全局和局部信息的水平集图像分割方法 [J]. 计算机应用研究, 2017, 34(12): 3889-3894.
- [13] LI Xuanping, WANG Xue, DAI Yixiang. Adaptive energy weight based active contour model for robust medical image segmentation [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2018, 90(3): 449-465.
- [14] 张爱华, 王帆, 陈海燕. 基于改进 CV 模型的高原鼠兔图像分割 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(8): 32-37.
- [15] 范虹, 侯存存, 朱艳春, 姚若侠. 烟花算法优化的软子空间 MR 图像聚类算法 [J]. 软件学报, 2017, 28(11): 3080-3093.

(上接第 239 页)