

基于分数阶傅里叶变换的隧道低对比度裂缝检测

周丽军 刘 晓

(山西省交通科学研究院山西省公路智能监测工程技术研究中心 太原 030000)

摘 要 隧道结构与环境的复杂性,使得隧道裂缝的检测环境存在较多干扰,如混凝土泥浆、污渍、渗水的面积较大,与细小裂缝的对比度较低,利用常规的形态学方法很容易漏检裂缝。为解决此问题,提出一种基于分数阶傅里叶变换的裂缝检测方法。该方法通过分数阶傅里叶变换将裂缝图像映射到时频域空间,实现信号的时频域展开;同时不同阶次的分数阶傅里叶变换对应不同的时频域,有利于提取裂缝图像中的污渍特征,通过背景信息补偿污渍区域,均衡了图像背景的对比度;结合分数阶微积分方法对图像进行增强,最后利用连通域方法提取裂缝。实验结果表明,提出的方法能够有效去除隧道壁污渍,检测出低对比度的隧道裂缝。

关键词 分数阶傅里叶变换,裂缝检测,低对比度,图像增强

中图分类号 TP391.41 文献标识码 A

Low-contrast Crack Detection Method Based on Fractional Fourier Transform

ZHOU Li-jun LIU Xiao

(Shanxi Engineering Research Center for Road Intelligent Monitoring, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030000, China)

Abstract Due to the complexity of tunnel structure and environment, strong interference exists in the detection environment of tunnel cracks, such as concrete mud, dirt, water seepage area, etc. This results in low contrast between background and small cracks. Therefore, it is easy to miss cracks by using conventional morphological methods. In order to solve this problem, this paper proposed a crack detection method based on fractional Fourier transform. In this method, the image is mapped to different time-frequency domains by different order fractional Fourier transform, which is helpful to extract the filth feature in the crack image. The background contrast of the image is balanced by compensating the filth region with the background information. The fractional differential method is used to enhance the image and the connected domain method is used to extract the cracks. Experimental results show that the proposed method can effectively remove the filth region and detect tunnel cracks with low contrast.

Keywords Fractional fourier transform, Crack detection, Low-contrast, Image enhance

1 引言

隧道内的裂缝是影响隧道安全的重要隐患之一。初期较小的裂缝如果不加以重视,会逐渐发展扩大,严重影响隧道的运营安全,因此,定期对隧道内壁裂缝进行检测具有重要的意义^[1-2]。在很长一段时间内,裂缝的检测与识别主要依赖于人工,通过人工肉眼观测裂缝,这种方式效率低、危险性大、准确度差。近些年,学者们陆续引进和研发了隧道检测车系统,基于数字图像处理的裂缝检测方法逐步克服了人工裂缝检测的主观性,成为现今常用的无损检测技术。

目前常用的裂缝检测与识别方法主要有形态学方法^[3]、分形几何理论方法^[4]和边缘检测方法^[5]等。其中,基于图像分割的边缘检测与识别方法应用广泛,对预处理后的灰度图像进行二值化处理,通过统计标记区域的面积分布,测量标记区域的属性^[6-7]。这种方法对裂缝与背景对比度高、背景灰度值相对均匀的情况是有效的,但实际隧道衬砌裂缝周围环境比较复杂,干扰较多,如光线明暗不均,墙上有凹凸不平的混

凝土泥浆、剥落、拼接痕迹、污渍等,都会对裂缝检测产生影响。尤其是在裂缝与隧道壁对比度低而隧道上污渍点与背景对比度高的情况下,利用常规的二值化处理方法会突出污渍而抑制裂缝,导致裂缝漏检。因此,为了更有效地提取低对比度裂缝,需要首先剔除污渍,使得背景灰度值均衡。

分数阶傅里叶变换将裂缝图像映射到时频域空间,实现了信号的时频域展开,同时不同阶次的分数阶傅里叶变换对应不同的时频域,展示出信号从时域逐步变化到频域的所有变化特征,可以为信号的时频分析提供更大的选择余地^[8]。有学者利用分数阶傅里叶变换进行人脸识别,通过设置不同的参数可以得到人脸在不同时频域的信息,并将分数阶傅里叶变换后的变换域特征进行融合,用于识别人脸^[9]。

本文针对低对比度裂缝与高对比度污渍点的隧道进行裂缝的检测与识别,提出基于分数阶傅里叶变换的裂缝提取方法,通过分数阶傅里叶变换将裂缝图像映射到时频域空间,利用不同阶次的分数阶傅里叶变换对应不同的时频域,匹配裂缝图像中的污渍特征,提取裂缝图像中的污渍,通过背景信息

本文受国家自然科学基金项目(51705299),山西省交通运输厅科研项目(2017-1-25),山西省基础研究计划项目(201801D221047)资助。

周丽军(1984—),女,博士,工程师,主要研究方向为路桥隧道检测,E-mail:zhoulj2012@hotmail.com;刘 晓(1986—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为智能装备研发。

补偿污渍区域,均衡图像背景对比度,并结合分数阶微积分方法对图像进行增强,最后利用连通域方法提取裂缝。

2 分数阶傅里叶变换算法

当一段信号在时域无法分辨其特征时,可以在频域寻求其特征;若信号在时域、频域都难以辨别其特征,则可以考虑在时域、频域之间的分数域进行信号分析。这是分数阶傅里叶变换提出的基本思想。

传统的傅里叶变换是将信号在一组正交完备的正弦基上展开,所以正弦信号的傅里叶变换是一个 δ 函数。分数阶傅里叶变换是将信号在一组正交的 chirp 信号上展开,则一个 chirp 信号的某一阶次的分数阶傅里叶变换也是一个 δ 函数。分数阶傅里叶变换的定义^[10]如下。

信号 $s(t)$ 的 p 阶分数傅里叶变换是一个线性积分运算:

$$F^p s(u) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} K_p(t, u) s(t) dt \quad (1)$$

其中:

$$K_p(t, u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1-j\cot\alpha}{2\pi}} \exp(j \frac{t^2+u^2}{2} \cot\alpha - j \frac{tu}{\sin\alpha}), & \alpha \neq n\pi \\ \delta(t-u), & \alpha = 2n\pi \\ \delta(t+u), & \alpha = (2n+1)\pi \end{cases} \quad (2)$$

$F^p s(u) \equiv$

$$\begin{cases} \sqrt{\frac{1-j\cot\alpha}{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp(j \frac{t^2+u^2}{2} \cot\alpha - j \frac{tu}{\sin\alpha}) dt, & \alpha \neq n\pi \\ s(u), & \alpha = 2n\pi \\ s(-u), & \alpha = (2n+1)\pi \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\alpha \equiv \frac{p\pi}{2}$ 。

α 为旋转角度,如图 1 所示。

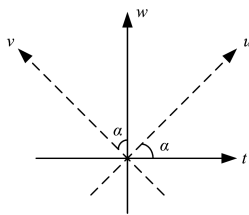


图 1 分数傅里叶变换示意图

当 $\alpha=0$, 即 $p=0$ 时,代表信号的时域特征;当 $\alpha=\pi/2$, 即 $p=1$ 时,就是我们熟悉的传统傅里叶变换;当 $0 < \alpha < \pi/2$, 即 $0 < p < 1$ 时,为分数阶傅里叶变换,其研究域介于时域和频域之间。

对于二维图像的分数阶傅里叶变换,可分别由 x, y 方向的一维离散分数阶傅里叶变换共同实现。任意阶次的分数阶傅里叶变换都同时包含不同程度的时频信息,将其用于图像分析中,有助于在时频面上更加深入地分析图像的能量分布,即幅度和相位信息。

如图 2 所示,对黑色的圆、深灰色矩形和浅灰色线条所组成的图像进行分数阶傅里叶变换,设置参数 p 在两个维度上的旋转角度分别为 $0.1, 0.9$ 时,能够检测出浅灰色的线条,而设置旋转角度分别为 $0.5, 0.8$ 时,只能检测出圆。因此,在不同阶数的傅里叶变换域能映射出不同的特征信息,有利于提

取图像中的不同特征。

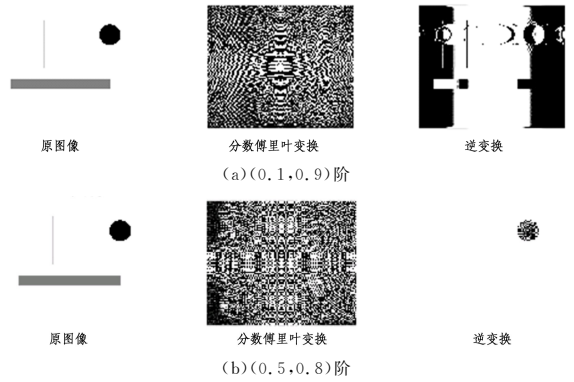


图 2 不同阶数分数阶傅里叶变换与其逆变换

3 污渍补偿与图像增强算法

1) 利用背景灰度值对分数阶傅里叶变换图像中找到的污渍点位置进行补偿,即:

$$(W, R) = \{(i, j) | I(i, j) = 0, i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N\} \quad (4)$$

(W, R) 为污渍点的集合,对污渍点赋予背景灰度值:

$$I(W, R) = \frac{1}{MN - K} \sum_{i \in W, j \in R} I(i, j) \quad (5)$$

其中, K 为污渍点的个数。

2) 对污渍点进行背景补偿后的图像整体上对比度较低。为了获取清晰的裂缝图像,需要增强裂缝与背景的对对比度。对补偿后的图像进行分数阶微积分^[11],并利用分数阶掩模实现图像增强,即:

$$I^{-\nu} s(t) \approx s(t) + (-\nu) s(t-1) + \frac{(-\nu)(-\nu+1)}{2} s(t-2) + \dots + \frac{\Gamma(-\nu+1)}{n! \Gamma(-\nu-n+1)} s(t-n) \quad (6)$$

其中, Γ 为伽马函数。

分别沿着图像像素点的 8 个方向 ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$) 做偏分数阶积分,叠加后构造出 5×5 的掩模:

$(v^2-v)/2$	0	$(v^2-v)/2$	0	$(v^2-v)/2$
0	$-v$	$-v$	$-v$	0
$(v^2-v)/2$	$-v$	8	$-v$	$(v^2-v)/2$
0	$-v$	$-v$	$-v$	0
$(v^2-v)/2$	0	$(v^2-v)/2$	0	$(v^2-v)/2$

将掩模与图像做卷积,就得到 ν 次次的增强图像。

图 3 中显示了 5×5 的分数阶掩模算子分别在 0.5 阶与 0.8 阶时的图像增强效果。通过比较可以看出, 0.5 阶的图像增强效果要好于 0.8 阶的效果, 0.8 阶情况下裂缝与背景的对对比度不高,不利于裂缝的识别。

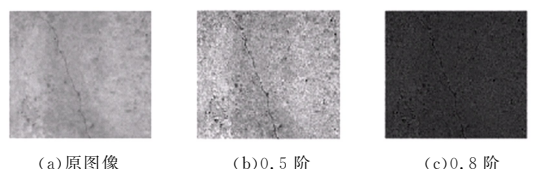


图 3 5×5 分数阶掩模算子在不同阶数下的图像增强

4 实验结果与分析

为了验证所提方法的有效性,利用本研究院自主研发的

隧道智能检测车对山西省某隧道进行定检,获得隧道内实测裂缝图像,并且裂缝与周边背景的对比度较低,而裂缝周边污渍与背景的对比度高。将本文方法与文献[12]中的污渍提取方法进行比较,结果如图4所示。

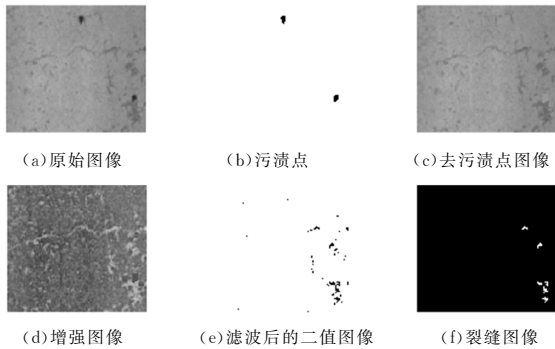


图4 文献[12]方法提取污渍与裂缝

从图4可以看出,利用文献[12]方法得到的污渍点与背景灰度值的对比度相差很大,很容易将其提取出来,但是与背景对比度相差不太大的污渍(如图4(a)中右下角的污渍)很难提取出来,使得经过图像增强后,污渍被当作目标提取,同时抑制了裂缝信息。

裂缝具有线状纹理特征,而污渍具有离散、点状、片状特征,这些不同的特征在分数阶傅里叶变换中对应了不同分数阶的时频信息。图5为对原图像进行 $(0.2, 0.35)$ 阶的傅里叶变换结果,从时频图中能看出圆状污渍在图谱中的圆形分布,通过逆变换能还原出大部分污渍,与图4(b)相比,除了两处对比度较大的污渍以外,还提取了右下角的片状污渍。

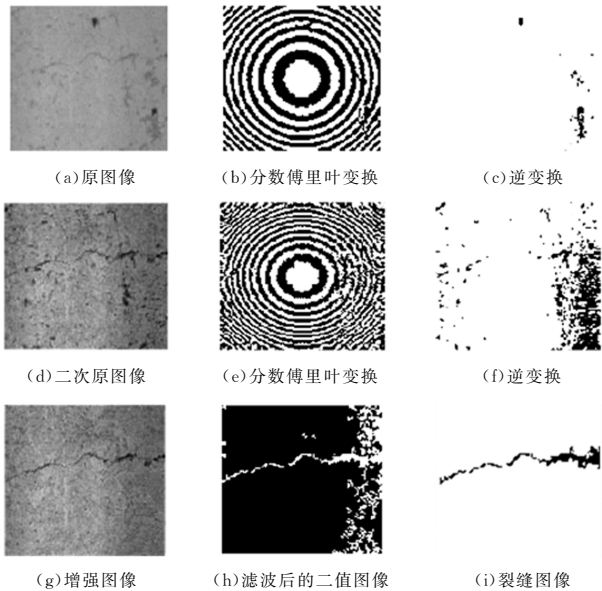


图5 本文方法提取裂缝

结果如图5(d)所示,通过图像增强,一些隐蔽的污渍也突显出来,尤其是在图像右半幅,对其再进行 $(0.3, 0.28)$ 阶的傅里叶变换,从图5(e)的图谱中可以看出这些隐蔽的污渍呈现出较多的高频成分,对其进行逆变换,得到的隐蔽污渍如图5(f)所示。利用隐蔽污渍周边的背景信息补偿污渍区域,再进行图像增强,得到的结果如图5(g)所示,通过滤波与裂缝提取方法获得的裂缝图像如图5(i)所示,与图4(f)相比,此方法能较好地提取低对比度下的裂缝。

结束语 本文针对隧道低对比度并且有污渍点的裂缝提出基于分数阶傅里叶变换的裂缝检测方法。该方法通过分数阶傅里叶变换将裂缝图像映射到时频域空间,利用不同阶数分数阶傅里叶变换提取裂缝图像中的明显污渍与隐蔽污渍,有效利用背景信息补偿了污渍区域,均衡了图像背景对比度,使用分数阶微积分方法对图像进行增强,最后利用连通域方法提取裂缝。实验结果表明,所提方法能够去除隧道内壁污渍,从而有效地检测出低对比度的隧道裂缝。本文方法中尚未实现对分数阶数的自动选择,下一步的工作主要是解决基于信噪比最大的分数阶数优化问题。

参考文献

- [1] 白彪. 地铁隧道表面图像裂缝识别算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [2] 朱力强, 白彪, 王耀东, 等. 基于特征分析的地铁隧道裂缝识别算法[J]. 铁道学报, 2015, 37(5): 64-70.
- [3] 瞿中, 林雨丹, 郭阳. 形态学与区域延伸相结合的图像裂缝检测算法研究[J]. 计算机科学, 2014, 41(11): 297-300.
- [4] 杨松, 邵龙潭, 郭晓霞, 等. 基于骨架和分形的混凝土裂缝图像识别算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1850-1855.
- [5] 王世芳, 车艳丽, 李楠, 等. 一种基于多尺度脊边缘的沥青路面裂缝检测算法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(4): 32-41.
- [6] 李锋, 阚建霞. 基于 Sobel 算子的图像快速二维最大熵阈值分割算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(S1): 209-210.
- [7] 赵志刚, 赵祥模, 宋焕生, 等. 基于直方图估计和形状分析的沥青路面裂缝识别算法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(10): 2260-2266.
- [8] YANG X, BALEANU D, SRIVASTAVA H M. 3-Local Fractional Fourier Transform and Applications[M]. Elsevier Ltd, 2016: 95-145.
- [9] 王亚星. 基于分数阶傅里叶变换的人脸识别[D]. 郑州: 郑州大学, 2015.
- [10] 孟祥意, 陶然, 王越. 分数阶傅里叶域循环多抽样率信号处理理论[J]. 中国科学(E辑: 技术科学), 2009, 39(5): 1004-1015.
- [11] 李博, 谢巍. 基于自适应分数阶微积分的图像去噪与增强算法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(1): 185-192.
- [12] 周丽军. 基于图像增强与分水岭分割的隧道低对比度裂缝提取方法[J]. 计算机科学, 2018, 45(S1): 259-261.

对去除污渍的图像进行分数阶微积分图像增强,得到的