

基于小波变换和模糊理论的裂纹图像增强算法^①

李沛轩, 叶俊勇

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 针对传统图像增强算法的缺陷, 提出了一种基于小波分析和模糊理论的图像增强算法, 该算法先对原始图像进行小波变换得到图像的高频和低频小波系数, 再定义新的模糊隶属度函数对低频系数进行模糊增强, 对不同方向上的高频系数进行小波阈值去噪, 通过小波重构得到增强后的图像, 所有算法通过 Matlab 编程验证, 能有效的增强图像, 改善图像的视觉效果. 实验结果表明, 算法是可行有效的.

关键词: 模糊理论; 小波变换; 阈值去噪; 隶属函数; 图像增强

Algorithm of Crack Image Enhancement Based Wavelet Transform and Fuzzy Theory

LI Pei-Xuan, YE Jun-Yong

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Focused on the limitation of traditional image enhancement algorithm, proposed an image enhancement algorithm based on wavelet transform and fuzzy set theory. Firstly, wavelet transform is used to decompose the original image. Secondly, a new membership function of fuzzy was defined and the low frequency coefficient was enhanced by fuzzy enhancement transformation. the high frequency coefficients of different directions was enhanced by wavelet threshold de-noising. Finally, the inverse wavelet transform was applied to restructure image. All algorithms are realized in Matlab. It's can enhance the image effectively and improve image visual effect. The experimental results demonstrate that the algorithm is feasible and effective.

Key words: fuzzy set theory; wavelet transform; threshold de-noising; neighborhood function; image enhancement

1 引言

图像增强是指加强图像中用户感兴趣的部分, 突出图像中的有用的信息, 减少噪声对图像的干扰. 其目的为改善图像的视觉效果、提高清晰度, 使图像更便于计算机的进一步处理. 在 PC 轨道梁混凝土裂纹图像中, 由于光照、天气以及图像采集硬件系统的影响, 得到的图像质量不高, 裂纹与图像的对比度低, 一些缺陷区域与背景灰度区域重叠. 因此在进一步对图像进行特征提取和识别之前, 有必要对图像进行增强处理, 提高图像的对比度, 增强图像的裂纹信息.

传统的图像增强方法主要有空间域方法和变换域方法两种, 空间域方法直接对图像中的像素进行操作, 常用的主要有灰度拉伸、直方图均衡、和空域滤波增强等, 在这些增强方法中, 灰度拉升法在提高图像对比度的同

时, 对边缘和噪声没有区分处理. 直方图均衡化法在突出裂纹的同时, 也加强了背景, 使背景更不均匀; 邻域平均法对抑制噪声有效, 但是具有模糊效应; 中值滤波法降噪效果比较明显, 但是仍然不能很好地解决边缘模糊的问题. 文献[1]利用锐化模板来增强裂纹图像边缘, 但边缘增强的同时, 也放大了噪声信息^[1]. 文献[2]利用差影法, 将裂纹图像像素灰度值与一幅标准的无裂纹图像像素灰度值相减, 从而增强裂纹图像中病害的目标. 但这种方法只有当裂纹图像内容不复杂时, 才能取得较好的效果^[2]. 这些空间域方法往往在增强图像的同时放大了噪声, 且对光照不均、灰度层次变化丰富的图像处理效果不佳, 因此基于模糊、变换域等技术的裂纹图像增强方法, 得到了越来越多的重视. 文献[3]在模糊域对裂纹进行增强, 根据模糊域中图像的模糊熵对裂纹图像

^① 基金项目: 国家科技支撑计划(2007BAG06B06); 重庆大学自然科学基金

收稿时间: 2013-03-13; 收到修改稿时间: 2013-04-19

像素进行分类,设计新的模糊隶属度函数以及模糊增强函数进行增强^[3].文献[4]根据裂纹图像灰度信息的先验知识,提出了一种裂纹图像增强的方法,并取得了一定的效果^[4].文献[5]根据破损裂纹呈现线性的特点,在脊波域利用 Canny 边缘检测算子来增强裂纹线的边界^[5].

本文提出一种基于小波分析和模糊理论相结合的图像变换域增强方法,首先对图像进行小波分解,对图像进行小波阈值去噪,再定义新的模糊隶属度函数,对图像的低频系数进行增强.既有效的去除了噪声也实现了对图像的增强,且改善了图像的亮度不均现象.

2 小波阈值去噪

阈值滤波是一种简单、直观、有效的小波域滤波法.所谓的阈值滤波就是指把分解后的小波系数的幅值同一个阈值进行比较,如果小波系数的幅值比这个阈值小,则把小波系数置为0;如果小波系数的幅值比这个阈值要大,则把小波系数保留或者进行修改后保留下来^[6].小波的阈值滤波最早由 Weaver 等提出. Donoho 等做出了系统的阐述.小波阈值去噪其理论前提是认为图像小波系数服从广义高斯分布,分解后比较大的小波系数主要由实际信号变换得到,而较小的小波系数则主要是由噪声变换而来.这样就可以通过选定阈值来达到去除噪声的目的.小波阈值去噪的关键在于选取合适的阈值和阈值函数^[7-9].

2.1 阈值的选择

阈值的选择对于去噪效果有着直接的影响,阈值选取过小,去噪后的图像仍然有过多噪声存在,阈值选取过大,一些重要的图像信息将被滤掉引起偏差^[10].很多业内人士对于如何选取阈值做了探讨,最著名的的是 Donoho 提出的统一阈值(UniversalThreshold):

$$T_{univ} = \sigma_n \sqrt{2 \lg_2(N)} \quad (1)$$

其中: σ_n 为零均值高斯白噪声的标准偏差; N 为小波系数的总个数.

除了统一阈值外,还有一些文献提出了不同的阈值选择方法.如 Donoho 等提出的 SURE 阈值, Nason 等提出的基于 Cross-Validation 准则的阈值, Chang 等提出的局部自适应阈值等.

本文中阈值 T 采用基于 Bayes Shrink 去噪法估计标准的阈值选取方法,其表达式为:

$$T = \hat{\sigma}_{noise}^2 / \hat{\sigma}_{signal} \quad (2)$$

其中, $\hat{\sigma}_{noise}^2$ 是噪声的方差估计, $\hat{\sigma}_{signal}^2$ 是图像信号方差的估计.对噪声方差的估计可以按下式进行:

$$\hat{\sigma}_{noise}^2 = \frac{\text{Median}(|w_{x_{ij}}|)}{C} \quad (3)$$

$w_{x_{ij}}$ 为分解后的子带图像像素, C 为常量,取 $C=0.6745$.图像的方差估计为

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w_{x_{ij}}^2 \quad (4)$$

$M \times N$ 为子带图像的大小.根据图像的方差等于图像信号的方差加上噪声的方差.可以得出图像的信号方差为:

$$\hat{\sigma}_{signal} = \sqrt{\max(\hat{\sigma}^2 - \hat{\sigma}_{noise}^2, 0)} \quad (5)$$

这样就可以求出最佳阈值 T .

2.2 阈值函数的选择

阈值函数主要分为硬阈值函数、软阈值函数以及半软阈值函数三种,不同的阈值函数体现了对小波分解后的系数的不同处理方式以及不同的估计方法.其中,硬阈值函数的小波系数的估计是无偏的,能很好的保留图像边缘等局部特征,但是滤波后容易在突变处产生较大的振荡(称为吉布斯现象).软阈值函数中小波系数的估计是有偏的,滤波后的图像过于平滑,导致图像边缘出现模糊.半软阈值函数具有一定的连续性,但是计算相对其他两种阈值函数要复杂.

由于小波去噪的目的在于去除噪声,所以本文选用计算量小且较为平滑的软阈值函数,其公式为:

$$T_{soft}(y_{ij}) = \begin{cases} 0, & |y_{ij}| < T \\ \text{sgn}(y_{ij})(|y_{ij}| - T), & |y_{ij}| \geq T \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\text{sgn}(y_{ij})$ 表示 y_{ij} 的符号; T_{soft} 为软阈值滤波的收缩函数, T 为阈值, y_{ij} 为分解后的小波系数.

2.3 小波基的选择

小波基的选择对于降噪效果的影响很大,如果大部分小波变换系数的幅值都接近零,则降噪效果比较好.在轨道梁面图像中,噪声主要包含有脉冲噪声和高斯噪声两大类.小波基的选择主要基于以下因素:小波基函数是平滑的函数的一阶倒数或者其本身就是平滑函数;要对小波函数的消失矩阶数适当考虑.小波基的正交性、对称性、正则性、紧支性和衰减性均对最终的效果有影响.基于以上因素,选择具有紧支集的正交归一小波簇 Daubechies 小波,对于不同的整

数而言,小波集

$$\{\psi_{j,k}(x)\} = \{2^{j/2} \psi(2^j x - k)\} \quad (7)$$

构成了一个正交归一集. Db 小波的光滑性主要由支集的长度来决定. 表 3.1 是一副加了标准偏差为 25 的高斯白噪声的梁面图像在不同的 Db 小波处理下的 PSNR 值,由此可见,Db8 小波基效果最优.

表 1 不同小波基软阈值滤波的 PSNR 值

小波基	Db2	Db3	Db4	Db5	Db6	Db7	Db8
PSNR 值 /db	24.92	25.16	25.30	25.40	25.41	25.42	25.43

3 改进的模糊增强

模糊增强的原理:模糊集合论是由 Zadeh 在 1965 年首先提出^[11],广泛应用于科学技术和国民经济的各个领域,一些学者利用图像的二义性,进行着在模糊特征平面进行图像处理的新技术的研究^[12-16]. Pal 和 King 首先将模糊理论引入图像增强处理的研究中,将图像从空间域的灰度平面转换到模糊特征平面,对变换后的图像修正隶属度,进行模糊增强处理,再通过模糊域反变换将数据从模糊域转换成图像.

在 Pal 和 King 的理论中,一幅图像可以看做一个矩阵,矩阵的元素为该点的灰度值,一副具有 L 个灰度级的 $M \times N$ 维图像可以当作一个 $M \times N$ 阶模糊矩阵 X. 按 Zadeh 表示法可以表示为:

$$X = \bigcup_{i=1}^M \bigcup_{j=1}^N \frac{\mu_{ij}}{x_{ij}} \quad (8)$$

其中 μ_{ij} 为图像(i,j)像素点的灰度 x_{ij} 相对于某一个特定的灰度值 L' 的隶属度. 一般 L' 取图像最大灰度级 $L-1$. Pal 算法中,隶属度函数为:

$$\mu_{ij} = G(\mu_{ij}) = [1 + (\frac{L-1}{F_d} - x_{ij})]^{-F_e} \quad (9)$$

F_d 、 F_e 分别为倒数模糊因子和指数模糊因子,一般情况下, $F_e=2$. 应用公式对变换后的图像进行非线性处理,增大 $\mu_{ij} > 0.5$ 的值或者减小 $\mu_{ij} < 0.5$ 的值,达到增加对比度的目的. 表示为:

$$\mu'_{ij} = T_r(\mu_{ij}) = T_r(T_{r-1}(\mu_{ij})) \quad r=1,2,3,\dots \quad (10)$$

$$T_1(\mu_{ij}) = \begin{cases} 2(\mu_{ij})^2 & 0 \leq \mu_{ij} \leq 0.5 \\ 1 - 2(1 - \mu_{ij})^2 & 0.5 \leq \mu_{ij} \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

最后,对增强后的 μ'_{ij} 进行逆变换,通过 $G(\mu'_{ij})$ 的逆公式,将数据由模糊域转换到图像的空间域.

$$x'_{ij} = G^{-1}(\mu'_{ij}) \quad (12)$$

在 Pal 和 King 的算法中,满足 $\mu_{ij} = G(x_{ij}) = 0.5$ 的特殊灰度级被称作渡越点, F_d 随之确定. 而渡越点的选取具有随机性,依靠大量的反复实验和经验来决定, Pal 和 King 算法中没有一套成熟可行的渡越点选取方案,而不同的阈值对增强效果有着极大的影响. 在变换过程中当 $x_{ij}=0$ 的时候 μ_{ij} 为最小,记为 α . Pal 和 King 算法中 $F_e=2$,此时 $\alpha > 0$,当经过公式(4)变换后会出现 $\mu'_{ij} < \alpha$ 的现象,造成公式(6)无解,为了解决这个问题, Pal 算法中将所有 $\mu'_{ij} < \alpha$ 的灰度硬性设置为 $\mu'_{ij} = \alpha$,这样原图像中很多的低灰度值被置 0,从而损失部分低灰度信息,导致图像的边缘细节提取效果受到影响,且运算量大,耗时多.

本文在 Pal 和 King 算法的基础上,改进隶属度函数和模糊变换函数. 定义的新的隶属度函数如下

$$\mu_{ij} = G(x_{ij}) = \log_2(1 + (x_{ij} - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})) \quad (13)$$

其中 x_{\min} 为最小灰度值, x_{\max} 为最大灰度值. 新的公式使得隶属度变换的结果分布范围在 [0, 1] 之间,避免了一些低灰度值被硬性的置为 0,保留了图像的低灰度细节信息.

模糊变换函数如下:

$$\mu'_{ij} = T_r(\mu_{ij}) = T_r(T_{r-1}(\mu_{ij})) \quad r=1,2,3,\dots \quad (14)$$

$$T_1(\mu_{ij}) = \begin{cases} \frac{\sin(\pi(\mu_{ij} - 0.5)) + 1}{4} + \mu_{ij}^2 & 0 \leq \mu_{ij} \leq 0.5 \\ \frac{\sin(\pi(\mu_{ij} - 0.5)) - 1}{4} + \mu_{ij}^2 - 2\mu_{ij} & 0.5 \leq \mu_{ij} \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

可以看到, μ'_{ij} 在增强后是大于或等于 0 的,逆变换公式为

$$x'_{ij} = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min})(2^{\mu'_{ij}} - 1) \quad (16)$$

所以 $2^{\mu'_{ij}} - 1 \geq 0$, 因此,增强后的 $x'_{ij} \geq x_{\min}$,使得低灰度值不再被硬性置为 0,保留了低灰度值边缘细节信息. 随着迭代次数的增多,图像增强效果越来越明显,当次数趋于无穷大的时候,图像将变为一幅二进制图像,实际成为了图像分割.

4 小波阈值去噪和模糊理论结合的图像增强
在前面所涉及的基础上,本文采用的图像增强方法如下:

1) 对图像进行小波分解,使图像的细节特征随着

分解尺度的不同而分解开来,图像能量主要集中在低频分量上.

2) 使用改进的模糊增强函数对图像的低频带进行模糊增强处理,提高图像的对比度.

3) 对图像的高频带进行小波阈值去噪,去除噪声.

4) 完成上述操作后,对图像进行重构得到增强后的图像.

5 实验结果及分析

本文所有算法均在MATLAB环境下完成,采用一幅裂纹图像分别做中值滤波、Pal算法、目前流行的NSCT算法和文中算法进行去噪增强,原图背景稍暗、图像对比度不均匀,且局部的边缘细节不明显.图2是中值滤波处理,图像的对比度没有得到增强,噪声得到一定的消除,细节部分变模糊,影响图像的视觉效果,图3是Pal算法增强处理后的图像,对比度得到加强,但是噪声并没有得到有效的处理.图4是基于NSCT变换的图像增强处理后的效果,裂纹边缘得到明显增强,但

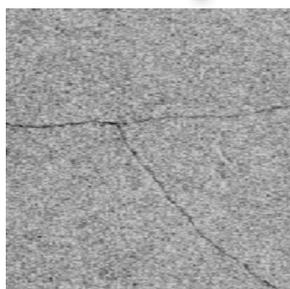


图1 原始图像

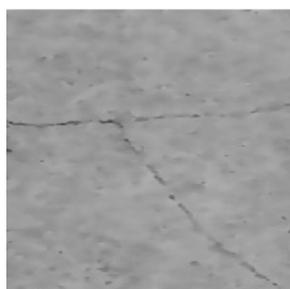


图2 中值滤波

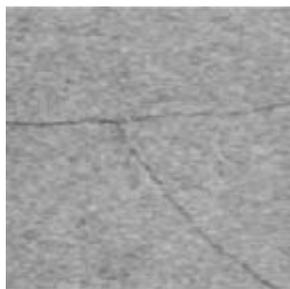


图3 Pal算法增强

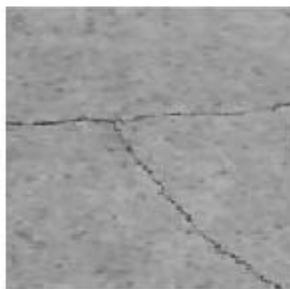


图4 NSCT变换增强

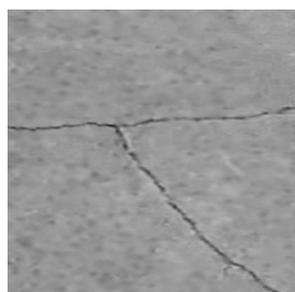


图5 本文算法

是去噪程度不够.图5为本文算法处理后的图像,可以看到增强后图像噪声得到了明显的抑制,且图像的细节清晰,更有层次感,同时具有较好的视觉效果.

表2 各种方法处理后的PSNR值

去噪方法	中值滤波	PAL方法	NSCT变换	本文方法
PSNR值/dB	23.42	15.23	23.15	24.89

6 结语

混凝土裂纹图像具有的噪声主要来自外界的干扰以及梁面材料本身的影响和设备内部噪声.多表现为脉冲噪声和高斯噪声,对于脉冲噪声,常用方法是中值滤波,对于高斯噪声,常用方法为均值滤波.但是裂纹图像往往两种噪声是并存的,在预处理的过程中,一方面要有效滤除噪声,另一方面要保护裂纹信息,尽量减少对边缘的模糊,增强对比度.相对于传统的图像增强方法,小波分析和模糊去噪相结合的增强算法在增强图像的同时去除噪声,排除噪声的干扰,增强了图像的细节和轮廓.实验表明,该算法能使图像具有良好的视觉效果,对图像的光照不均有一定的改善,为后续处理打下基础.目前,在小波域上进行模糊增强处理,仅仅是一个初步的尝试,有许多地方还有待改善.如何改进算法,使算法具有更好的增强效果,是后面努力的方向.

参考文献

- 褚燕利.路面裂缝自动检测图像识别系统研究[学位论文].西安:长安大学,2008.
- Koutsopoulos HN, Downey AB. Primitive-based classification of pavement cracking images. *J. Transp. Engrg.*, 1993,1(3):136-143.
- 唐磊,赵春霞,王鸿南.一种自适应路面图像模糊增强算法. *光子学报*,2007,36(10):1943-1948.
- Cheng HD. Automated real-time pavement distress detection using fuzzy logic and neural network. *SPIE 5 Proceeding*, 1994,2946:140-151.
- 张大奇,曲仕茹,等.道路裂纹线检测中的脊波域图像增强算法. *中国公路学报*,2009,22(2):26-30.
- Donoho DL. De-noising by soft-thresholding. *IEEE Trans Inform Theory*,1995,41(3):613-627.
- 赵世亮.基于小波域的模糊增强算法. *微处理机*,2010,2:71-74.

(下转第190页)

标跟踪技术具有较好的可扩展能力,可为今后的多目标对象的行为识别奠定良好的基础。

参考文献

- 1 Stauffer C, Grimson W. Learning patterns of activity using real time tracking, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2000,22(8):747-767.
- 2 Haritaoglu I, Harwood D, Davis LS. W4: real-time surveillance of people and their activities, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2000,22(8):809-830.
- 3 Amer A, Dubois E, Mitiche A. Real-time system for high-level video representation: application to video surveillance: Conference on Visual Communication and Image Processing (VCIP). Proc. of the SPIE International Symposium on Electronic Imaging. Santa Clara, USA, January 2003, 5022: 530-541.
- 4 Collins R, Lipton A, Kanada T, et al. A system for video surveillance and monitoring: VSAM final report, Technical report CMU-RI-TR-00-12, Carnegie Mellon University, May 2000.
- 5 Lv F, Kang J, Nevatia R, Cohen I, Medioni G. Automatic tracking and labeling of human activities in a video sequence. Proc. of the 6th IEEE International Workshop on Performance Evaluation of Tracking and Surveillance(PETS04), Prague, Czech Republic, May 2004.
- 6 Davis J, Bobick A. The representation and recognition of human movement using temporal templates. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, 23(3):257-267.
- 7 孟繁锋,屈桢深,曾庆双,等. isMHI 结合 CAMSHIFT 的多目标跟踪. *计算机应用*, 2009, 29(6):1673-1676.
- 8 GARY RB, JAMES WD. Motion segmentation and pose recognition with motion history gradients. *Machine Vision and Application*, 2002, 13(7):174-184.
- 9 Aggarwal J, Cai Q. Human motion analysis: a review. *IEEE Wkshp. Nonrigid and Articulated Motion Workshop*, 1997:90-102.
- 10 王亮亮,孙即祥,谭志国. 基于人脸检测和 CamShift 算法的人脸跟踪系统. *微计算机应用*, 2008, 29(2):14-17.
- 11 汤一平,叶永杰,朱艺华,顾校凯. 智能全方位视觉传感器及其应用研究. *传感技术学报*, 2007, 20(6):1316-1320.
- 12 彭州,赵保军. 基于 Contourlet 变换和模糊理论的红外图像增强方法. *激光与红外*, 2011, 41(6):0635-0640.
- 13 刘会明. 基于模糊自适应算法的胸片图像增强研究. *电子测试*, 2011, 9:39-42.
- 14 李刚,桂预风,肖新平. 一种改进的基于模糊对比度的图像增强方法. *湖北工业大学学报*, 2008, 23(1):76-78.
- 15 姜桃,赵春江,陈明,等. 自适应图像模糊增强快速算法. *计算机工程*, 2011, 37(19):0213-0214.
- 16 欧阳琰,陈先桥,初秀民. 路面破损图像的模糊增强方法研究. *计算机工程与应用*, 2010, 46(10):184-186.

(上接第 194 页)

- 8 钱苏敏,张琳絮,张云,等. 基于小波阈值改进的去噪算法研究. *国外电子测量技术*, 2012, 31(5):49-51.
- 9 惠飞,史昕,赵祥模,等. 基于改进阈值函数的小波去噪算法研究. *现代电子技术*, 2011, 34(12):61-64.
- 10 孟志强,王鼎顺,周华安. 小波图像消噪中阈值与信噪比的单峰规律与阈值试探方法. *电子测量与仪器学报*, 2006, 20(5):63-67.
- 11 Pal SK, King RA. On edge detection of X-ray images using fuzzy sets. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1983, 5(1):69-77.