

文章编号:1004-4213(2010)11-2097-5

一种测量无规则裂缝宽度的量化模型与实现^{*}

程旭升,曹益平[†],何宇航

(四川大学 光电科学技术系,成都 610064)

摘 要:建立了一种测量无规则裂缝宽度的量化模型,提出了一种真伪裂缝区域分割新方法.该方法通过边缘检测并利用形态学膨胀运算,在待测裂缝的两侧边缘区域选取近似等量的目标像素和背景像素后,设置门限以自适应选取最佳分割阈值,提取出裂缝区域,进而提取裂缝的走势及边缘像素,用建立的量化模型,即可实现宽度测量.该测量方法能有效克服裂缝图像的噪音较大、裂缝不规则等弊端,去除裂缝图像的伪裂缝区域,测量结果的重复准确度在 0.1 mm 以内.实验结果表明,该方法有效地实现了裂缝宽度的准确测量,具有较强的适应性.

关键词:图像处理;裂缝测量;自适应阈值;边缘检测;Otsu 法

中图分类号:TP391

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103911.2097

0 引言

由于地震等地质自然灾害、建筑物施工不当或年久失修等原因,有可能使建筑物表面产生裂缝,当裂缝宽度超过一定数值时会对建筑物的安全构成威胁,裂缝宽度的测量数据可以为建筑物的灾后损伤或是建筑物的施工质量的评估等提供可靠的参考.传统的裂缝宽度测量方法是通过人工目测估读标尺得到宽度、裂缝走势等数据,但这种方法受人的主观因素影响,使得测量的准确度和效率较低,因此人工测量方法逐渐被新的方法所取代,如声波测量法等.

本文提出一种实现不规则裂缝宽度测量的方法.该方法基于数字图像处理在裂缝两侧选取边缘区域的像素点集合,运用 Otsu 法^[1]计算阈值,并设置门限实现阈值的自适应选取.在得到较准确的阈值后,对裂缝图像二值化可将裂缝从背景区域中提取出来,进而提取裂缝边缘以及裂缝骨架,建立宽度测量的量化模型.通过前期的像素标定,运用中心线法^[2]即可计算得到裂缝的宽度数据.该测量方法的优点在于抗噪音能力强,可以较准确地提取裂缝区域,测量误差较小.

1 不规则裂缝宽度的量化模型

如图 1,在 $l \times l$ 的待处理区域内分割出裂缝区域后,分别提取裂缝左边缘像素集合 $\{(x_L, y_L)\}$,裂

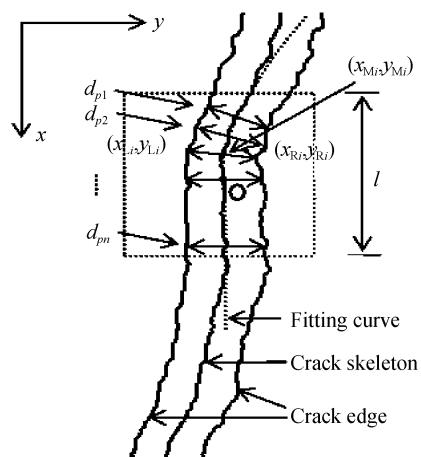


图 1 量化模型
Fig. 1 Quantitative model

缝右边缘像素集合 $\{(x_R, y_R)\}$ 以及裂缝骨架像素集合 $\{(x_M, y_M)\}$. 对提取的裂缝骨架像素集合作二次曲线拟合,曲线方程即裂缝走势的数学模型为: $y = ax^2 + bx + c$. 假设在 $l \times l$ 的待处理区域内骨架上有 n 个像素点,对于待处理裂缝骨架上任一点 (x_{Mi}, y_{Mi}) ,由拟合的曲线方程可知该点处的法线方程为

$$y = -1/(2ax_{Mi} + b)(x - x_{Mi}) + y_{Mi} \quad (1)$$

法线与裂缝左右边缘交于两点 (x_{Li}, y_{Li}) 和 (x_{Ri}, y_{Ri}) ,则两交点间的像素距离为

$$d_{pi} = \sqrt{(x_{Ri} - x_{Li})^2 + (y_{Ri} - y_{Li})^2} \quad (2)$$

如果通过事先像素标定获取电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 的像素当量 p ,即单位像素所映射的物空间实际尺寸,则该不规则裂缝区域的量化宽度可表示为

$$\bar{d} = \frac{p}{n} \sum_{i=1}^n d_{pi} \quad (3)$$

^{*} 国家高技术研究发展计划(2007AA01Z333)、国家重大专项(2009ZX02204-008)和四川省学术和技术带头人培养基金(07GRC-01)资助

[†] Tel: 028-85463879 Email: caoyiping@mail.sc.cninfo.net

收稿日期:2010-02-02

修回日期:2010-04-07

2 裂缝提取方法

本文提出的测量原理是建立在能够准确地提取出裂缝区域的基础上,若不能准确提取裂缝,就不能准确地实现裂缝宽度测量.裂缝图像主要是从一些工程构件表面(如混凝土表面或墙体表面等)采集而来,而一般的工程构件表面污迹较多以及混凝土沙石的颜色深浅不一,所采集到的裂缝图像噪音会较大;当各种裂缝本身的宽度差异较大时,会造成裂缝图像的目标像素所占整个图像面积的比例差别较大,以上这些原因使得裂缝图像较为复杂,提取裂缝区域时会有较大难度.虽然现有的一些图像分割方法^[3-8]对某些图像会有较好的分割效果,但经实验证明它们难以有效地提取裂缝区域,不适用于裂缝图像的分割.因此,本文提出了一种裂缝图像分割方法,该分割方法以最大类间方差法为基础,通过选取边缘像素及设置门限确定分割阈值,能够有效地提取出裂缝区域.

最大类间方差法又名 Otsu 法,它是以分组的目标类和背景类的类间方差最大时来动态地确定图像的分割阈值,类间方差越大,则分组的两类像素差别越大,分割效果也会越好. Otsu 法在对目标和背景像素较均匀的图像作分割时会有很好的效果且分割结果稳定,但是在对目标区域所占比例很小或很大的图像作分割时却可能会失败.因此为避免目标和背景区域相差较大的情况,在本文的分割方法中,并不是对图像的整体像素应用 Otsu 法计算阈值,而是对选取的部分裂缝图像像素应用 Otsu 法以确定阈值.

图像的目标边缘像素点带有阈值信息,若能选择出裂缝两侧边缘区域的像素点,以这些像素点的集合作为阈值计算的依据,可以得到较为准确的分割阈值.为选取裂缝两侧边缘区域像素,可对裂缝图像作边缘检测,找到裂缝的近似边界后作形态学膨胀运算,再映射到原裂缝图像中选取裂缝的边缘区域像素.由于裂缝图像的噪音较大,为尽量保持图像的细节,采用中值滤波^[9]滤去裂缝图像的椒盐噪音.在对滤波后的图像作检测边缘时,发现检测出的待测裂缝边界不连续,且错误将裂缝图像的噪音和污斑边缘也当成了裂缝边缘.为此对原图像进行高斯低通滤波,滤波后的图像虽然损失了裂缝边缘细节,却能很好地平滑图像噪音,发现进行边缘检测后,可以得到较为连续的裂缝边界,虽然还存在部分由于图像污斑、噪音引起的短枝,但通过检测其长度,长度小于预设值便予以排除,这样能得到良好的裂缝边缘双线结构.在得到较完整的裂缝边界二值图像

f_e 后,用一个 $N \times N$ 的结构元素 B 对其做形态学膨胀运算^[10],结构元素 B 膨胀二值图像 f_e ,定义为

$$f_e \oplus B = \bigcup \{f_e + b; b \in B\} \quad (4)$$

f_e 被 B 膨胀结果是将结构元素 B 对图像 f_e 所有像素做平移,与 B 有交集时所有 B 的原点所对应点的并集.膨胀得到图像后,再将其映射到自适应中值滤波后的裂缝图像中,选取裂缝边缘区域的像素后,应用 Otsu 法计算图像分割阈值.由于受高斯低通滤波影响,得到的裂缝双线结构会与滤波窗口大小有关而偏离实际的裂缝边缘,因此最初计算得到的分割阈值不可避免地受到高斯低通滤波的影响.为此设定阈值差门限,通过重复选取原裂缝边缘处的像素、比较前后两次的阈值差值,直到得到稳定的阈值,实现自适应选取阈值而排除高斯低通滤波的影响.具体分割步骤如下:

1) 对原图像 f 分别进行自适应中值滤波和高斯滤波处理,得到处理后的图像分别为 f_m 和 f_G .

2) 对图像 f_G 进行边缘检测后,判定检测到的边界长度是否满足预设长度值,将非裂缝边缘予以排除,得到较完整的裂缝边界图像 f_e .

3) 对边界图像 f_e 用一个大小为 $N \times N$ 的结构元素 B 做形态学膨胀运算,将膨胀后的边界图像映射到裂缝图像 f_m 中,选取 f_m 中对应位置的像素,得到边缘邻近区域像素点集合,利用 Otsu 法对像素点集合计算得到阈值 T .

4) 以阈值 T 对 f_m 作二值化处理,进行边缘检测(此时是对二值图像进行操作),得到新的边界图像 f'_e ,重复步骤 3),重新计算分割阈值得到 T' .

5) 比较阈值 T' 和 T ,若 $|T' - T| < 1$,则下一步;否则令 $T = T'$,重复步骤 4),得到新的阈值 T' 后返回步骤 5).

6) 以 T 作为裂缝图像最终分割阈值,对 f_m 二值化处理,提取出裂缝区域.

在得到准确的裂缝区域后,利用本文提出测量方法便可计算裂缝宽度值.

3 实验结果与分析

用最大类间方差法和本文提出的分割方法对两幅裂缝图像分别做二值化处理,实验结果如图 2、图 3.

图 2(a)是 CCD 采集的一幅混凝土表面的裂缝图像,可以看出裂缝宽度较小、目标像素较少,在整个图像上有许多污斑,且由于风化使图像左上角的像素灰度值低于其他背景位置的像素灰度值.图 2(b)是 Otsu 法的分割结果,可以看出错误地将左上部背景像素和部分污斑像素二值化为目标像素,裂

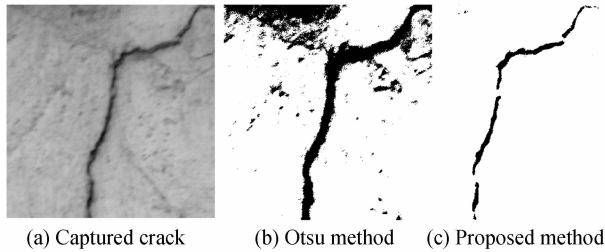


图 2 分割结果比较 1

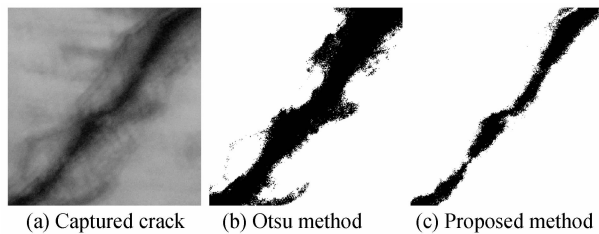
Fig. 2 The 1st comparison of segmentation result

图 3 分割结果比较 2

Fig. 3 The 2nd comparison of segmentation result

缝区域宽度明显大于实际宽度. 图 2(c)是本文方法的分割结果,可以看出得到了较准确的裂缝区域,为裂缝图像的宽度测量提供准确依据. 图 3(a)是一幅墙体内壁的裂缝图像,在裂缝区域的两侧有一个灰度过渡带,该区域是由于靠近裂缝区域的墙体涂料掉落形成的,其内侧的像素灰度值低于其外侧背景区域的像素灰度值,高于裂缝区域的像素灰度值,形成一个伪裂缝区域. 图 3(b)是 Otsu 法分割结果,该方法错误地将伪裂缝区域当作了目标区域,图 3(c)是使用本文方法的分割结果,较好地排除了伪裂缝区域,实现裂缝区域的准确提取. 在这两个分割实验中,由于所处理的裂缝图像对应的实际面积较大,带给分割的难度较大. 在本文的测量方法中,通过控制 CCD 使裂缝尽可能成像于待处理区域内,则该区域内裂缝像素与背景像素的对比度较高,分割时只对待处理区域内像素应用本文的分割方法效果会更好.

为了进一步验证本文提出的裂缝宽度测量方法,以图 2(a)中的裂缝作为待测对象,选取 5 处裂缝作为待测对象,待测位置及采集图像如图 4(测量装置为防止由于环境光场引起 CCD 视场光照不均,屏蔽了环境光场而采用独立的均匀光源照明,CCD 的分辨率为 $1\ 280 \times 1\ 024$,经过标定后每像素对应的实际当量为 $0.023\ \text{mm}$). 调整像素已标定好的 CCD 的摆放姿势,分别采集待测处的裂缝图像,使得待测裂缝正向穿过预处理区域. 图中虚线表示每次采集裂缝图像时 CCD 摆放的姿势. 对每一待测位置重复测量 5 次,测量结果如表 1. 分析可知,

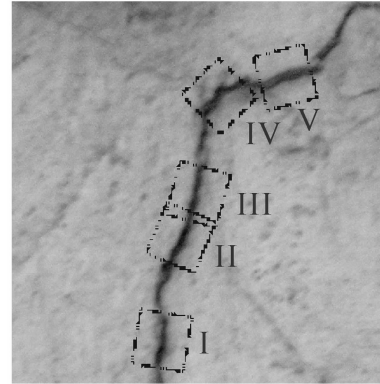


图 4 测量位置

Fig. 4 Measuring position

表 1 测量结果(单位: mm)

Table 1 Result of measurement (Unit: mm)

Position	I	II	III	IV	V
Sequence					
1 st	3.435	3.997	3.682	4.587	5.080
2 nd	3.511	3.984	3.702	4.739	5.182
3 rd	3.483	4.011	3.698	4.678	5.104
4 th	3.436	4.067	3.675	4.712	5.048
5 th	3.511	4.048	3.732	4.706	5.057
avg	3.475	4.021	3.698	4.684	5.094
Max fluctuation	0.040	0.046	0.034	0.097	0.088
std	0.038	0.035	0.022	0.059	0.054

尽管各测量位置的裂缝走势与边界污染程度不同,但均可有效获得裂缝宽度的量化数据,且最大波动差值为 $0.097\ \text{mm}$,最大标准差仅为 $0.059\ \text{mm}$. 并且分析了高斯低通滤波对测量结果准确度的影响,在截止频率 $D_0 = 15 \sim 40$ 的范围内,宽度均值的最大差值为 $0.024\ \text{mm}$ (出现在 II 中),平均差值为 $0.013\ \text{mm}$;标准差的最大差值为 $0.027\ \text{mm}$ (出现在 IV 中),平均差值为 $0.010\ \text{mm}$. 结果表明该方法是可行的,受高斯低通滤波的影响很小,具有很高的重复测量准确度. 由于该测量方法基于数字图像处理,测量结果依赖于 CCD 的分辨率,测量结果的最小误差为像素的实际当量,若有较高分辨率的 CCD,则测量的准确度会更高.

4 结论

本文提出了一种测量无规则裂缝宽度的量化模型与实现方法,该方法通过重复选取裂缝边缘区域像素以自适应选取分割阈值,能够很好地抑制噪声,准确地提取出裂缝区域与裂缝走势;以一定长度内的宽度均值作为待测位置的宽度值,克服裂缝的不规则性,能够保证测量结果的稳定性,测量结果的重

复准确度优于 0.1 mm. 实验结果证实了该测量方法的可行性, 具有较强的实用性, 可以应用于一般工程构件表面裂缝宽度测量.

参考文献

- [1] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, **SMC-9**(1): 62-66.
- [2] WANG Lei, HUANG Zhan-hua, CAI Huai-yu, *et al.* Processing and width measurement of digital image of crack on engineering structure component[J]. *Computer Measurement & Control*, 2006, **14**(8): 992-993.
王雷, 黄战华, 蔡怀宇, 等. 工程结构构件裂缝图像的处理与宽度测量[J]. *计算机测量与控制*, 2006, **14**(8): 992-993.
- [3] LIU Yu, LI Yan-jun, ZHANG Ke. A method of multi-pixels edge detecting of image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 380-384.
刘煜, 李言俊, 张科. 一种多像素图像边缘提取方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 380-384.
- [4] REN Ming-wu, YANG Jing-yu, SUN Han. New histogram modification based on image edge model [J]. *Journal of Computer Research & Development*, 2001, **38**(8): 972-976.
任明武, 杨静宇, 孙涵. 一种基于边缘模式的直方图构造新方法[J]. *计算机研究与发展*, 2001, **38**(8): 972-976.
- [5] MA Wen-ke, WANG Ling, HE Hao. Local threshold segmentation algorithm for fingerprint images[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, **45**(34): 177-179.
马文科, 王玲, 何浩. 一种指纹图像的局部阈值分割算法[J]. *计算机工程与应用*, 2009, **45**(34): 177-179.
- [6] BRINK A D. Edge-based dynamic thresholding of digital images [C]. COMSIG 1991 Proceedings, South African Symposium on Communications and Signal Processing, 1991: 63.
- [7] WANG Guo-fu, OU Yang-Shan, LIU Qing-hua, *et al.* Fast identification and location for series image of space-borne electro-optical tracking system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 220-223.
王国富, 欧阳缙, 刘庆华, 等. 星载光电跟踪系统连续帧图像快速识别定位算法研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1): 220-223.
- [8] LIU Jian-zhuang, LI Wen-qing. The automatic thresholding of gray-level pictures via two-dimensional otsu method[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1993, **19**(1): 101-105.
刘健庄, 栗文青. 灰度图像的二维 Otsu 自动阈值分割法[J]. *自动化学报*, 1993, **19**(1): 101-105.
- [9] HE Tai-cheng, ZHU Hong, QUAN Yong. Edge-feature-based sub-pixel registration algorithm using integral projections[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2346-2349.
何泰诚, 朱红, 全勇. 一种基于边缘特征的亚像素投影配准算法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2346-2349.
- [10] XIANG Jing-bo, SU Xiu-qin. A pyramid transform of image denoising algorithm based on morphology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 457-460.
向静波, 苏秀琴. 基于数学形态学的金字塔图像去噪[J]. *光子学报*, 2009, **38**(2): 457-460.

A Quantitative Model and Implementation of Width Measurement for Irregular Crack

CHENG Xu-sheng, CAO Yi-ping, HE Yu-hang

(Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: A quantitative model of width measurement for irregular crack is established. A novel method on distinction between true and pseudo cracks is presented, which uses the theory of edge detection and morphological dilation operation. By selecting two approximate equivalent sets of target pixels and background pixels at the marginal areas of cracks' both sides, the best threshold is calculated adaptively. Then the edge's pixels and the movement of crack through the binarization image are extracted. Using the quantitative model, the width of crack can be measured. The experimental results show that the proposed method can effectively overcome the image noise, manipulate any irregular crack, and also remove the pseudo crack. The repeatability precision of the method is superior to 0.1 mm.

Key words: Image processing; Crack measurement; Adaptive thresholding; Edge detection; Otsu method

CHENG Xu-sheng was born in 1987. Now he is pursuing his M. S. degree at Department Optoelectronics of Sichuan University. His research interests focus on optical information processing and 3D information inspecting etc.



CAO Yi-ping was born in 1962. Now he is a professor at Department of Opto-electronics, Sichuan University, and his research interests focus on optical Information processing, 3D sensing technology and laser interference measurement.

