

边缘检测算子及其在裂缝图像中的应用

张士萍^{1,2}, 刘加平¹

(1. 江苏省建筑科学研究院有限公司, 江苏 南京 210008; 2. 东南大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 简要介绍了几种经典的边缘检测技术, 并在 MATLAB 中利用这些算子对约束收缩引起的混凝土裂缝进行裂缝图像的边缘检测, 通过对比几种算子的分析结果, 总结出相对有效的裂缝图像边缘检测算子, 为进一步施行裂缝表征参数的提取提供依据。

关键词: 裂缝; 边缘检测; MATLAB

中图分类号: TU528.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-3550(2010)06-0025-03

Edge detection operators and their application in cracking image

ZHANG Shi-ping^{1,2}, LIU Jia-ping¹

(1. Jiangsu Research Institute of Building Science Co., Ltd., Nanjing 210008, China;

2. Department of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Several kinds of classical flame image edge detection operators have been introduced. Then they were applied in edge detection of concrete cracking due to restrained shrinkage through MATLAB. The effective image edge detection operator was concluded by comparison. And that will afford gist for characteristic parameters for cracking.

Key words: cracking; edge detection; MATLAB

0 引言

混凝土很容易受到外界环境以及荷载因素的影响而导致裂纹产生, 进而致使其强度、耐久性以及传输等宏观性能明显劣化。因而, 对混凝土裂纹的描述和表征非常重要的。关于混凝土表面裂缝的检测方法有人工测量以及超声检测等多种无损检测技术^[1]。人工测量是用裂缝刻度尺、放大镜等测量裂缝宽度, 这需要大量的人力和时间, 人为误差较大, 且精度和效率较低。超声检测法可检测出裂缝的位置、大小、扩展情况、种类和深度。也有学者采用声发射和电阻定性评价裂纹发展, 以及采用电子照相技术表征微裂缝^[2-4]。为有效进行混凝土裂缝的定量评价, 国内外学者已致力于用图像分析技术来着手研究^[5]。近几年来国内外许多学者已将数字图像处理技术运用到物体表面裂纹检测中并取得了较好的效果。用图像分析法来定量评价混凝土裂缝, 主要包含图像采集、图像处理和图像分析这 3 个过程^[5-6]。图像采集是整个图像分析法的基础, 其效果主要取决于硬件的性能。随着图像采集工具及图像处理软件的不发展及完善, 混凝土收缩测量的精度会进一步得到提高^[7]。图像处理与分析是最核心的两个环节, 其效果主要取决于软件的编写算法。图像处理实质是提取图像中的特征量或特殊信息, 供计算机进行分析和识别, 并对图像的灰度进行变换, 达到优化图像质量的目的。图像的边缘轮廓携带有重要信息, 要准确分析图像, 就需具备一张边缘轮廓清晰的图像。在计算混凝土材料的裂缝参数前, 必须最大限度地¹将裂缝区域从图像背景中提取出来。

收稿日期: 2010-03-08

基金项目: 江苏省博士后基金(0901089C)

图像最基本的特征是边缘, 所谓边缘是指其周围像素灰度有阶跃变化或屋顶变化的那些像素的集合。边缘可以粗略地分为阶跃边缘(step edge)与屋顶边缘(roof edge), 它存在于目标与背景、目标与目标、区域与区域、基元与基元之间^[8]。边缘对图像识别和分析十分有用, 它能勾画出目标物体轮廓, 使观察者一目了然, 包含了丰富的信息(如方向、阶跃性质、形状等), 是图像识别中抽取的重要属性。近年来, 随着数学和人工智能的发展, 出现了一些新的边缘检测方法, 如数学形态法、小波变换法、神经网络法、模糊检测法、IFS 边缘检测算子等^[9-11]。本文简要地介绍了几种经典算子的原理, 设计了相关试验来提取裂缝图像, 并使用 Matlab 对裂缝图像进行边缘检测, 分析这几种经典算子的优劣, 找出适合进行裂缝图像边缘检测的最佳算子, 以确保提取的裂缝参数的准确性, 提高裂缝的判别精度。

1 边缘检测算子

边缘检测的基本思想是通过检测每个像元和其邻域的状态, 以决定该像元是否位于一个物体的边界上。如果每一个像元位于一个物体的边界上, 则其邻域像元灰度值的变化就比较大。假如可以应用某种算法检测出这种变化并进行量化表示, 那么就可以确定物体的边界。常用的边缘检测算子主要有: 罗伯特(Roberts)边缘算子、索贝尔(Sobel)边缘算子、Prewitt 边缘算子、高斯-拉普拉斯(Laplacian of Gaussian)边缘算子和坎尼(Canny)边缘算子^[12-14]。

1.1 罗伯特(Roberts)边缘算子

罗伯特(Roberts)边缘算子是一种斜向偏差分的梯度计算

方法 梯度的大小代表边缘的强度,该算子通常有式(1)表示:

$$G[f(x,y)] = \{[\sqrt{f(x,y)} - \sqrt{f(x+1,y+1)}]^2 + [\sqrt{f(x+1,y)} - \sqrt{f(x,y+1)}]^2\}^{1/2} \quad (1)$$

式中 $f(x,y)$ 是具有整数像素坐标的输入图像,平方根运算使该处理类似于在人类视觉系统中发生的过程,罗伯特(Roberts)操作实际上是求旋转 $\pm 45^\circ$ 两个方向上微分值的和。

罗伯特(Roberts)边缘算子定位精度高,在水平和垂直方向效果较好,但对噪声敏感。

1.2 索贝尔(Sobel)边缘算子

索贝尔算子是一组方向算子,从不同的方向检测边缘。索贝尔算子不是简单求平均再差分,而是加强了中心像素上下左右四个方向像素的权重,运算结果是一幅边缘图像。

该算子通常有下列式(2)~(4)表示:

$$f'_x(x,y) = f(x-1,y+1) + 2f(x,y+1) + f(x+1,y+1) - f(x-1,y-1) - 2f(x,y-1) - f(x+1,y-1) \quad (2)$$

$$f'_y(x,y) = f(x-1,y-1) + 2f(x,y-1) + f(x+1,y-1) - f(x-1,y+1) - 2f(x,y+1) - f(x+1,y+1) \quad (3)$$

$$G[f(x,y)] = |f'_x(x,y)| + |f'_y(x,y)| \quad (4)$$

式中 $f'_x(x,y)$ 、 $f'_y(x,y)$ —— x 方向和 y 方向的一阶微分;

$G[f(x,y)]$ ——Sobel 算子的梯度;

$f(x,y)$ ——具有整数像素坐标的输入图像。

求出梯度后,可设定一个常数 T ,当 $G[f(x,y)] > T$ 时,标出该点为边界点,其像素值设定为 0,其他的设定为 255,适当调整常数 T 的大小来达到最佳效果。索贝尔(Sobel)算子通常对灰度渐变和噪声较多的图像处理得较好。

1.3 Prewitt 边缘算子

Prewitt 边缘算子是一种边缘样板算子,利用像素点上下、左右邻点灰度差,在边缘处达到极值检测边缘,对噪声具有平滑作用。由于边缘点像素的灰度值与其邻域点像素的灰度值有显著不同,在实际应用中通常采用微分算子和模板匹配合比法检测图像的边缘^[15]。

该算子通常有下列式(5)~(7)表示:

$$f'_x(x,y) = f(x+1,y-1) - f(x-1,y-1) + f(x+1,y) - f(x-1,y) + f(x+1,y+1) - f(x-1,y+1) \quad (5)$$

$$f'_y(x,y) = f(x-1,y+1) - f(x-1,y-1) + f(x,y+1) - f(x,y-1) + f(x+1,y+1) - f(x+1,y-1) \quad (6)$$

$$G[f(x,y)] = \sqrt{f'^2_x(x,y) + f'^2_y(x,y)} \quad (7)$$

式中 $f'_x(x,y)$ 、 $f'_y(x,y)$ —— x 方向和 y 方向的一阶微分;

$G[f(x,y)]$ ——Prewitt 算子的梯度;

$f(x,y)$ ——具有整数像素坐标的输入图像。

求出梯度后,可设定一个常数 T ,当 $G[f(x,y)] > T$ 时,标出该点为边界点,其像素值设定为 0,其他的设定为 255,适当调整常数 T 的大小来达到最佳效果。Prewitt 算子不仅能检测边缘点,而且能抑制噪声的影响,因此对灰度和噪声较多的图像处理得较好。

1.4 高斯-拉普拉斯(Laplacian of Gaussian)边缘算子

拉普拉斯算子是一个二阶导数算子,而前面提到的三种算子均为一阶导数算子。该算子是一个与方向无关的各向同性(旋转轴对称)边缘检测算子。若只关心边缘点的位置而不顾其周围的实际灰度差时,一般选择该算子进行检测。

该算子通常有式(8)表示:

$$\nabla^2 f(x,y) = f(x+1,y) + f(x-1,y) + f(x,y+1) + f(x,y-1) - 4f(x,y) \quad (8)$$

式中 $\nabla^2 f(x,y)$ ——数字图像中每个像素关于 x 轴和 y 轴的二阶偏导数之和,即处理后像素 (x,y) 处的灰度值;

$f(x,y)$ ——具有整数像素坐标的输入图像。

由于拉普拉斯算子为二阶差分,其方向信息丢失,常产生双像素,对噪声有双倍加强作用,因此它很少直接用于边缘检测。

鉴于此,Marr 和 Hildreth 将高斯滤波和拉普拉斯边缘检测结合在一起,形成了 LOG(Laplacian of Gaussian)算子,即高斯-拉普拉斯算子,也常称为马尔算子(Marr-Hildreth)。该算子先用高斯算子对图像进行平滑,然后采用拉普拉斯算子根据二阶微分过零点来检测图像边缘^[8]。

高斯-拉普拉斯算子通常如式(9):

$$\nabla^2 G(r) = \frac{-1}{\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

式中 σ ——方差;

r ——离原点的径向距离,即 $r^2 = x^2 + y^2$;

x,y ——图像的横坐标和纵坐标。

高斯拉普拉斯算子是两种算子的结合,既具备高斯算子的平滑特点又具备拉普拉斯算子锐化特点。平滑和锐化,积分和微分是一对矛盾的 2 个侧面,统一在一起后就变成了最佳因子。因为图像中包含噪声,平滑和积分可以滤掉这些噪声,消除噪声后再进行边缘检测(锐化和微分)会得到较好的效果。

1.5 坎尼(Canny)边缘算子

坎尼算子是一类最优边缘检测算子,它在许多图像处理领域得到了广泛应用。Canny 考核边缘检测算子的指标是:①低误判率,即尽可能地把边缘点误认为是非边缘点;②高定位精度,即准确地把边缘点定位在灰度变化最大的像素上;③抑制虚假边缘^[1]。

Canny 从这三项指标出发,推导出了最佳边缘检测算子—Canny 边缘算子。该算子的基本思想是:先对处理的图像选择一定的 Gauss 滤波器进行平滑滤波,抑制图像噪声,然后采用一种称之为“非极值抑制”(Nonmaxima Suppression)的技术,细化平滑后的图像梯度幅值矩阵,寻找图像中的可能边缘点,最后利用双门限检测通过双阈值递归寻找图像边缘点,实现边缘提取。

Canny 方法也使用拉普拉斯算子,该方法与其他边缘检测方法的不同之处在于,它使用 2 种不同的阈值分别检测强边缘和弱边缘,并且仅当弱边缘与强边缘相连时才将弱边缘包含在输出图像中,因此这种方法较其他方法而言不容易被噪声“填充”,更容易检查出真正的弱边缘。

2 裂缝图像边缘检测

试验室成型一组约束收缩开裂的试件,利用高分辨率数码相机摄取裂缝图像,如图 1 所示。分别在 MATLAB 中利用上述各边缘检测算子对图像进行边缘检测,边缘检测结果如图 2 所示。一般认为,边缘线清晰、连贯性较好、能检测结果。从裂缝图像边缘检测效果图中可以看出,Roberts 算子、Sobel 算子和 Prewitt 算子的结果图边缘连续性较差,不利于裂缝图像特征参数的提取。LOG 算子和 Canny 算子的检测结果图边缘连续性相对较好。LOG 算子通过高斯函数对图像进行平滑处理,因此对噪声的抑制作用比较明显。Canny 算子与其他边缘检测算子的不同之处在于,它使用 2 种不同的阈值分别检测强边缘和弱边缘,并且仅当弱边缘与强边缘相连时才将弱边缘包含在输出

图像中,因此这种方法较其他方法而言不容易被噪声“填充”,更容易检查出真正的弱边缘。由于 Canny 算子能检查出真正的弱边缘,其边缘定位比较精确,边缘连续性稍好于 LOG 算子,但 Canny 算子容易受噪声的影响,如果配合理想的滤波器首先滤除背景噪声,Canny 算子也是一种很好的裂缝图像边缘检测算子,但需要配合滤波器将使操作变得比较复杂。由此可知 LOG 算子相对来说比较简单,且效果理想,是相对比较有效的裂缝图像边缘检测算子。最大限度地将其裂缝区域从图像背景中提取出来后,采用图像分析软件测量出沿裂缝轮廓方向上的裂缝宽度分布,可以较精确的计算出平均宽度。

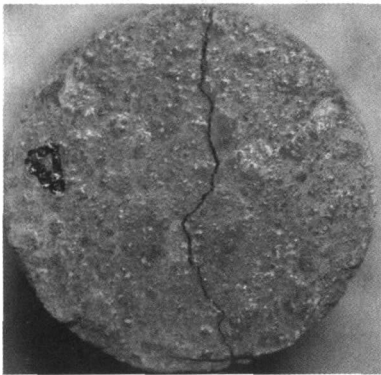


图1 混凝土表面裂缝

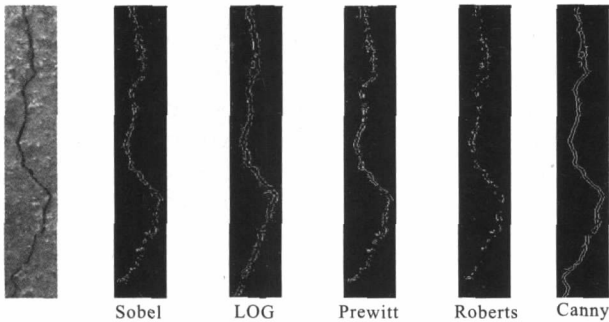


图2 裂缝图像边缘检测结果

3 结论

在 MATLAB 中分别采用这几种边缘检测算子对裂缝图像进行边缘检测。通过反复试验可以证明,罗伯特(Roberts)边缘算子、索贝尔(Sobel)边缘算子和 Prewitt 边缘算子对噪声较为敏感,得到的往往是断续的、不完整的结构信息,为了能成功地检测到真正的边缘,一般都要先对原图像进行平滑来去除图像中的噪声,再进行边缘检测。高斯拉普拉斯(Laplacian of Gaussian)

边缘检测算子将高斯滤波和拉普拉斯边缘检测结合在一起,先对图像进行平滑和积分以滤掉噪声,消除噪声后再进行边缘检测(锐化和微分),得到的效果比较好,且实现容易。坎尼(Canny)边缘算子提取的边缘线型连接程度也较好,边缘提取的也较完整,但易受噪声影响。因此高斯拉普拉斯(Laplacian of Gaussian)边缘检测算子是相对比较有效的裂缝图像边缘检测算子。

参考文献：

[1] 侯宝隆,蒋之峰.混凝土的非破损检测[M].北京:地震出版社,1992.

[2] GRANGER S,PIJAUDIER CABOT G,LOUKILI A,et al.Monitoring of cracking and healing in an ultra high performance cementitious material using the time reversal technique[J].Cement and Concrete Research,2009(39):296-302.

[3] YANG Z.Assessing cumulative damage in concrete and quantifying its influence on life cycle performance modeling[D].Dissertation,Purdue University,West Lafayette,IN,2004.

[4] SAMAHA H R,HOVER K C.Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete[J].ACI Materials Journal,1992,89(4):416-424.

[5] 耿飞,解建光,钱春香.图像分析技术对混凝土裂缝的定量评价[J].混凝土,2005(5):78-94.

[6] RINGOT E,BASCOUL A.About the analysis of microcracking in concrete[J].Cement and Concrete Composites,2001(23):261-266.

[7] 吴浩,姚燕,王玲.数字图像处理技术在水泥混凝土研究中的应用[J].混凝土与水泥制品,2007(4):8-13.

[8] 贾永红.数字图像处理[M].武汉:武汉大学出版社,2003.

[9] HARALICK R M,STERNBERG S R,ZHUANG Xin-hua.Image analysis using mathematical morphology[J].IEEE Trans on PAMI,1987,9(4):532-550.

[10] MALLAT S,HWANG W L.Singularity detection and processing with wavelets[J].IEEE Trans On Information Theory,1992,38(2):617-643.

[11] CHEN W F,LU X Q,CHEN J J,et al.A new algorithm of edge detection for color image:generalized fuzzy operator[J].Science in China(A),1995,38(10):1272-1280.

[12] 袁春兰,熊宗龙,周雪花,等.基于 Sobel 算子的图像边缘检测研究[J].激光与红外,2009,39(1):85-87.

[13] 王坤,刘天伟,杜芳芳,等.MATLAB 在对图像进行边缘检测方面的作用[J].沈阳师范大学学报:自然科学版,2005,23(2):161-165.

[14] 张艳群,孟凡荣.MATLAB 在图像边缘检测中的应用[J].计算机应用研究,2004(6):144-146.

[15] 章毓晋.图像分割[M].北京:科学出版社,2001.

作者简介：张士萍(1982-),女,博士,研究方向:土木工程材料耐久性。
单位地址：江苏省南京市江宁区万安西路 59 号(211103)
联系电话：13770604152

·上接第 20 页

[2] 陈肇元.钢筋的混凝土保护层设计要求亟待改善-混凝土结构设计规范的问题讨论之一[J].建筑结构,2007,37(6):108-114.

[3] 王青,徐港.混凝土结构保护层作用及厚度取值分析[J].三峡大学学报:自然科学版,2007,29(4):317-320.

[4] 刘秉京.混凝土结构耐久性设计[M].北京:人民交通出版社,2007.

[5] 任昭君.混凝土中钢筋的锈蚀机理及检测技术[J].工程建设,2007,39(5):11-15.

[6] 宁波工程学院.宁波象山港公路大桥及接线工程混凝土结构耐久性研究[R].宁波:宁波市高等级公路建设指挥部,2008.

[7] 葛燕,朱锡昶,朱雅仙,等.混凝土中钢筋的腐蚀与阴极保护[M].北京:化学工业出版社,2007:11.

[8] 张誉.混凝土结构耐久性概论[M].上海:上海科技技术出版社,2003.

[9] 于成龙,李胜强.混凝土碳化机理及预测模型分析[J].重庆建筑,2009(5):47-50.

[10] 刘芳,宋志刚,潘仁泉,等.用 Fick 第二定律描述混凝土中氯离子浓度分布的适用性[J].混凝土与水泥制品,2005(4):7-10.

[11] CECS 220:2007,混凝土结构耐久性评定标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2007.

作者简介：高明赞(1987-),男,主要从事混凝土结构耐久性研究和工程管理。
单位地址：浙江省宁波市海曙区宁波工程学院混凝土结构耐久性研究所(315016)
联系电话：13486709208