

# 基于轮廓特征的水下混凝土结构表面裂缝检测算法

陈从平, 邹雷, 汪卫

(三峡大学 机械与材料学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 针对水下混凝土结构表面裂缝难以准确检测的问题, 提出了一种基于轮廓特征的水下混凝土结构表面裂缝检测算法; 在对采集到的水下混凝土结构表面图像进行预处理和边缘检测后, 首先通过计算图像中边缘的长度和曲率来进行初步判别, 区分杂点和部分非裂缝; 然后根据裂缝轮廓相互匹配的特征, 利用模板搜索来检测出真实裂缝; 最后连接裂缝边缘断开部分, 优化裂缝检测结果; 实验结果表明, 与其它算法相比, 该算法检测出裂缝的准确率与完整率至少提高了 3.54%。

**关键词:** 水下混凝土结构; 裂缝检测; 轮廓特征; 边缘连接

## Underwater Concrete Structure Surface Crack Detection Algorithm Based on Contour Features

Chen Congping, Zou Lei, Wang Wei

(College of Mechanical & Materials Engineering, China Three Gorge University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** A new crack detection algorithm based on contour features is proposed aiming at the problem of accurate detecting the underwater concrete structure surface crack. After preprocessing and edge detection to the underwater concrete structure surface image, calculating the length and curvature of the edges to distinguish the noise points and part of non-crack. Then according to the match features of the crack, template search is used to detect the real cracks. Finally, connecting the broken parts of the crack to optimize the test results. Experiment results show that the cracks of the proposed detection method are more complete and accurate.

**Key words:** underwater concrete structure; crack detection; contour features; edge connection

### 0 引言

水下混凝土结构的抗拉强度低, 在长期服役期间, 由于承受很大的水压和温度梯度、水的冲刷、渗透、侵蚀及建筑质量等原因不可避免地会出现不同程度的裂缝。如果裂缝超过一定的宽度, 会使整体结构的安全性、完整性及可使役性降低<sup>[1]</sup>。而视觉技术具有“眼见为实”、灵活、可移植、可复用等诸多优点, 并且在海洋探测、海底打捞、水下焊接等领域得到了广泛的应用。因此, 采用数字图像处理技术为水下混凝土结构表面裂缝检测提供了一种有效的方法。

目前, 已有不少文献对基于图像处理的裂缝检测方法进行了研究, 主要分为以下两类: (1) 基于阈值分割的方法<sup>[2-4]</sup>。该类方法是在经典的阈值分割方法的基础上, 针对裂缝图像的特征结合形态学分析构造出各具特色的裂缝检测算法, 但是该类算法所检测到的裂缝准确性不高; (2) 基于边缘检测的方法<sup>[5-6]</sup>: 该类方法根据裂缝边缘在各个角度可能存在梯度, 结合噪声滤波等算法对现有的边缘检测算法进行改进, 但是该类算法往往只能检测出一系列的不相连的裂缝碎片, 不能检测出完整的裂缝。为了能够准确地检测出水下混凝土结构表面图像

中的裂缝, 本文充分利用裂缝轮廓相互匹配的特征, 提出了一种基于轮廓特征的水下混凝土结构表面裂缝检测算法, 大量实验验证了本文提出算法的有效性。

### 1 裂缝检测

水下混凝土结构表面裂缝图像具有对比度低、灰度分布不均、杂点较多的特点, 同时在实际检测过程中可能会受到水下环境干扰物的干扰, 导致图像中产生许多假细节。在对采集到的水下混凝土结构表面裂缝图像进行去噪、对比度增强和边缘检测处理后, 每一条裂缝边缘都存在一条与之相匹配的边缘, 而其它的干扰(杂点、伪裂缝等)则没有这样的特征, 根据裂缝轮廓的这个特征, 本文提出了一种基于轮廓特征的水下混凝土结构表面裂缝检测算法, 首先进行初步判别, 去除杂点和容易区分的非裂缝; 然后利用模板搜索算法进一步检测; 最后连接裂缝断开的部分, 优化检测结果。

#### 1.1 初步判别

边缘检测后的图像中存在许多的杂点和干扰, 如图 1(a) 所示, 为了去除这些杂点和干扰, 首先对边缘检测后的裂缝图像  $I$  中的边缘进行标记, 设标记后的边缘为  $E_i (i = 1, 2, \dots, N, N$  为边缘的个数), 如图 1(b) 所示。然后根据式 (1) 和式 (2) 分别计算每个边缘的长度  $L_i$  和曲率  $C_i$ , 如果  $L_i$  大于  $L$  且  $C_i$  大于  $C$  ( $L$  和  $C$  为给定的阈值), 则认为该条边缘为裂缝, 否则为杂点或干扰, 并将其去除, 从而得到剩下的边缘  $E_j (j$  为初步判别后剩下的边缘的标记号), 如图 1(c) 所示。

$$L_i = \sum_{p=1}^{n_i} E_i(p) \quad (1)$$

收稿日期: 2013-12-25; 修回日期: 2014-02-21。

基金项目: 中国水利水电科学研究院开放基金(IWHRKF201010); 国家自然科学基金(51005134); 宜昌市科学技术研究项目(A09302-37)。

作者简介: 陈从平(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要从事机器视觉、自动过程控制方向的研究。

$$C_i = \frac{L_i}{L_i^\Delta} \quad (2)$$

式 (1) 中,  $E_i(\rho)$  为边缘  $E_i$  中第  $\rho$  个像素点的灰度值,  $n_i$  为边缘  $E_i$  所包含的总像素数, 式 (2) 中,  $L_i^\Delta$  表示边缘方向有显著变化的像素的数目, 初判后的边缘可表示为:

$$E_j = \{E_i \mid L_i > L \& \& C_i > C\} \quad (3)$$

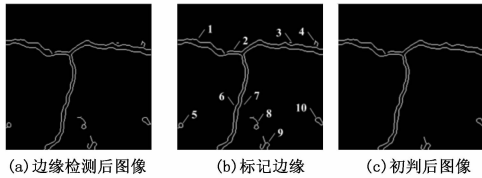


图 1 初步判别

### 1.2 模板搜索

初步判别后的裂缝图像中仍然存在一些难以区分的干扰(伪裂缝), 如图 1 (c) 所示, 为了检测出真实裂缝, 根据裂缝边缘相互匹配的特征, 采用模板搜索的方法, 判断是否存在其它的边缘与其相匹配, 从而检测出真实的裂缝, 具体分为如下两个步骤。

(1) 模板选择: 模板  $M$  对整个算法的效率与准确性都有很大的影响, 本文根据边缘在垂直方向和水平方向上的投影来选择不同的模板。如图 2 所示,  $V_j$  为边缘在垂直方向上的投影,  $H_j$  为边缘在水平方向上的投影, 比较  $H_j$  和  $V_j$  的大小, 如果  $H_j$  比  $V_j$  大  $T$ , 则采用如图 3 (a) 所示的模板; 如果  $H_j$  比  $V_j$  小  $T$ , 则采用如图 3 (b) 所示的模板; 否则将两种模板相结合。模板的选择可用式 (4) 来描述, 其中  $A$  表示模板矩阵,  $l_M$  和  $w_M$  分别为模板的边长, 且  $l_M$  大于  $w_M$ 。

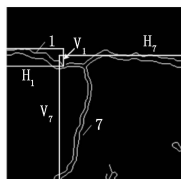


图 2 边缘投影长度示意图

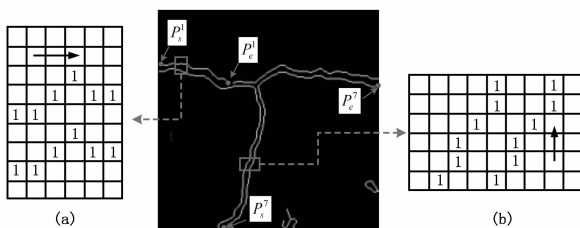


图 3 模板搜索示意图

$$M = \begin{cases} A_1^{l_M \times w_M}, & H_j - V_j > T \\ A_2^{l_M \times w_M}, & V_j - H_j > T \\ A_3^{l_M \times w_M}, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

(2) 模板搜索: 如图 3 所示, 从边缘的起始端点  $P_i^s$  开始, 用选择的模板沿边缘方向逐个像素进行搜索, 并记录模板中包含的八连通区域的个数  $n_p^i (p = 1, 2, \dots, L_j)$ , 直到搜索到边缘的结束端点  $P_i^e$  为止。如果  $n_p^i$  大于 1, 则表明该像素点属

于裂缝边缘, 统计边缘中满足条件的像素个数  $num(n_p^i > 1)$ , 如果  $num(n_p^i > 1)$  大于或等于  $\Delta n$ , 则表明该边缘为裂缝 CR; 否则, 该条边缘为干扰 NC, 即可表示为:

$$\begin{cases} num(n_p^i > 1) \geq \Delta n \Rightarrow E_j \in CR \\ num(n_p^i > 1) < \Delta n \Rightarrow E_j \in NC \end{cases} \quad (5)$$

### 1.3 裂缝边缘连接

检测后的裂缝边缘可能会存在断开的情况, 如图 4 (a) 所示, 为了使检测结果更加准确, 本文基于裂缝边缘相互匹配的特征, 连接边缘断开部分, 对检测结果进行优化, 具体分为如下两个步骤。

(1) 判断断开部分的具体位置: 设裂缝图像的长和宽分别为  $l$  和  $w$ , 裂缝边缘的端点坐标为  $P_d(x_d, y_d)$ , 如果存在两个端点  $P_{d1}$  和  $P_{d2}$  满足式 (6) 和式 (7), 则表明这两个端点为断开位置, 式 (7) 中  $d(\ )$  表示两点的欧式距离,  $d_0$  为所设阈值。

$$P_{d1} = \{P_d(x_d, y_d) \mid 0 < x_d < l \& \& 0 < y_d < w\} \quad (6)$$

$$P_{d2} = \{P_{d1} \mid \min\{d(P_{d1}, P_{dk})\} < d_0 \mid P_{dk} \in P_d\} \quad (7)$$

(2) 边缘连接: 如图 4 (a) 所示, 根据断开点坐标, 分别在水平和垂直方向上搜索另外一条边缘  $E_j^f$  上面与断开点对应的点  $P_{d1}^f(x_1^f, y_1^f)$  和  $P_{d2}^f(x_2^f, y_2^f)$ , 然后分别计算相对应两点之间的距离  $d_1$  和  $d_2$ 。如果  $d_1$  等于  $d_2$ , 则按照如图 4 (b) 所示的方法, 以边缘  $E_j^f$  为准线在断开点的垂直或水平方向以距离  $d$  将断开部分补齐; 如果  $d_1$  不等于  $d_2$ , 则先用前面提到的平移方法连接, 然后用直线连接余下断开部分。最后得到如图 4 (c) 所示的完整裂缝边缘  $E$ , 边缘连接方法可以表示为:

$$E = \begin{cases} E_j \cup E_{P_{d1}^f P_{d2}^f}^{d_1=d_2} & d_1 = d_2 \\ E_j \cup E_{P_{d1}^f P_{d12}^f}^{d_1=d_2} \cup E_{P_{d12}^f P_{d2}^f} & d_1 < d_2 \\ E_j \cup E_{P_{d2}^f P_{d21}^f}^{d_1=d_2} \cup E_{P_{d21}^f P_{d1}^f} & d_1 > d_2 \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{aligned} d_1 &= |x_1 - x_1^f| + |y_1 - y_1^f| \\ d_2 &= |x_2 - x_2^f| + |y_2 - y_2^f| \end{aligned}$$

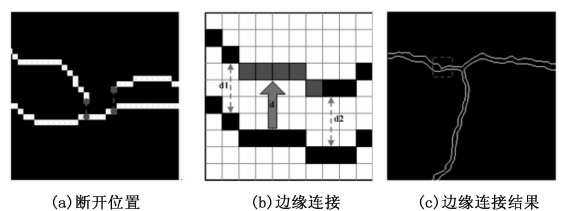


图 4 边缘连接过程

## 2 实验结果及分析

为验证本文算法的有效性, 分别用本文算法, 基于 Canny 算子的裂缝检测算法以及基于形态学的裂缝检测算法对采集到的 100 副不同类型的水下混凝土结构表面裂缝图像进行实验, 图片大小为  $256 \times 256$  像素, 本文算法的相关参数设置为:  $L = 15, C = 0.1, l_M = 31, w_M = 5, T = 50, \Delta n = 50, d_0 = 15$ 。

选取如图 5 所示的 3 幅不同类型的水下混凝土结构表面裂缝图像, 检测结果分别如图 6, 图 7 和图 8 所示。可以看出使用基于 Canny 算子的裂缝检测算法检测到的裂缝图像存在其它杂质, 且属于裂缝的部分不完整; 使用基于形态学的裂缝检测算法检测的裂缝虽然没有其它的杂质存在, 属于裂缝的部分较完整, 但是会存在很多分支; 而使用本文算法检测道德裂缝则不存在杂质也没

有其它的分支，且裂缝没有出现断开的情况。

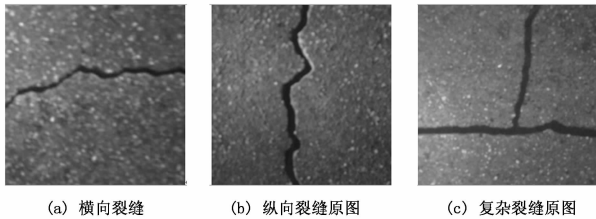


图 5 裂缝原图

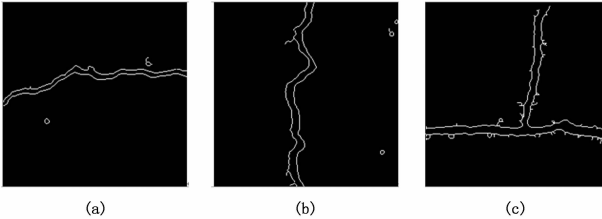


图 6 基于 Canny 算子的裂缝检测算法检测结果

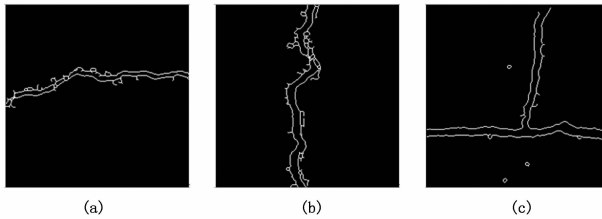


图 7 基于形态学的裂缝检测算法检测结果

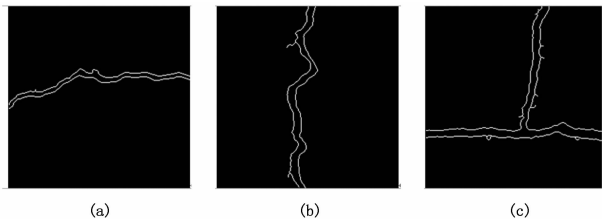


图 8 本文算法检测结果

由于视觉评价裂缝检测结果带有主观性，所以本文定义了完整率  $CT$ ，准确率  $PT$  和  $F1-Measure (F1)$  这 3 个指标客观的评价检测结果，

首先对原始水下裂缝图像中的裂缝边缘进行人为的标记，然后将人为标记的裂缝边缘与检测到的裂缝边缘比较，计算 3 个评价指标的大小，这 3 种评价指标定义如下：

$$CT = \frac{L_d}{L_r} \tag{9}$$

$$PT = \frac{L_d}{L_t} \tag{10}$$

$$F1 = 2 \cdot \frac{CT \cdot PT}{CT + PT} \tag{11}$$

式中， $L_d$  表示检测结果中属于裂缝边缘的像素和， $L_r$  表示人为标记的裂缝边缘的像素和， $L_t$  表示检测结果中所有边缘的像素和，客观评价的计算结果如表 1 所示。从表 1 中的计算结果可知：利用本文算法检测到的裂缝边缘的完整率、准确率与  $F1-Measure (F1)$  比另外两种算法至少提高了 3.54%，表明利用本文算法能得到更加完整，更加准确的裂缝轮廓。

表 1 评价指标的计算结果

评价指标	算法	a	b	c
CT	Canny 算法	0.904 4	0.907 1	0.830 2
	形态学	0.713 2	0.817 9	0.720 1
	本文算法	0.942 6	0.945 4	0.906 7
PT	Canny 算法	0.838 7	0.846 9	0.735 5
	形态学	0.544 5	0.682 4	0.638 0
	本文算法	0.874 1	0.901 0	0.872 4
F1	Canny 算法	0.870 3	0.876 0	0.780 0
	形态学	0.617 5	0.744 0	0.676 6
	本文算法	0.907 1	0.922 7	0.889 2

### 3 结论

水下混凝土结构表面裂缝反映了在役混凝土结构的许多信息，为提取裂缝轮廓，提出一种基于轮廓特征的水下混凝土结构表面裂缝检测算法。在对水下裂缝图像预处理与边缘检测后，首先根据裂缝边缘的形状特征进行初步判别，然后基于裂缝轮廓相互匹配的特征，用模板搜索的方法检测真实的裂缝，最后连接裂缝断开部分。通过实际水下混凝土结构表面图像对算法进行了验证，结果表明利用本文算法能得到准确性与完整性更高的裂缝轮廓。

#### 参考文献：

[1] 卫 军, 曹龙飞, 曾艳霞, 等. 混凝土结构裂缝特征提取研究 [J]. 武汉理工大学报, 2011, 33 (11): 72-75.

[2] 徐志刚, 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.

[3] Tsai Y C, Kaul V, Mersereau R M. Critical assessment of pavement distress segmentation methods [J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 136 (1): 11-19.

[4] 闫茂德, 伯绍波, 贺显曜. 一种基于形态学的路面裂缝图像检测与分析方法 [J]. 工程图学学报, 2008, (2): 142-147.

[5] Albert A P, Nii A O. Evaluating pavement cracks with bidimensional empirical mode decomposition [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2008, 1-7.

[6] Zhou J, Huang P S, Chiang F P. Wavelet-based pavement distress detection and evaluation [J]. Opt. Eng. 2006, 45 (2): 1: 10.

[10] 陈志梅, 王贞艳, 张井岗. 滑模变结构控制理论及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.

[11] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[12] 高为炳. 离散时间系统的变结构控制 [J]. 自动化学报, 1995, 21 (2): 154-160.

[13] 孙 彪, 孙秀霞. 基于跟踪微分器的离散滑模控制器 [J]. 控制与决策, 2009, 24 (10): 1517-1521.

(上接第 1466 页)

[6] 王冠林, 武 哲. 垂直起降无人机总体方案分析 [J]. 飞机工程, 2006, (1): 10-14.

[7] 段文博. 可悬停双旋翼微型飞行器设计与制造 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.

[8] 吴俊琦. 四桨动力布局在十字形升力体上的一体化设计与气动特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.

[9] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.