



计算机工程与应用  
Computer Engineering and Applications  
ISSN 1002-8331, CN 11-2127/TP

## 《计算机工程与应用》网络首发论文

题目: 基于机器视觉的桩护壁裂缝检测方法  
作者: 孙卫红, 李乾坤, 邵铁锋, 吴慧明  
网络首发日期: 2018-11-14  
引用格式: 孙卫红, 李乾坤, 邵铁锋, 吴慧明. 基于机器视觉的桩护壁裂缝检测方法[J/OL]. 计算机工程与应用.  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20181114.0934.002.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于机器视觉的桩护壁裂缝检测方法

孙卫红<sup>1</sup>, 李乾坤<sup>1</sup>, 邵铁锋<sup>1</sup>, 吴慧明<sup>2</sup>

SUN Weihong<sup>1</sup>, LI Qiankun<sup>1</sup>, SHAO Tiefeng<sup>1</sup>, WU Huiming<sup>2</sup>

1. 中国计量大学 机电工程学院, 杭州 310018

2. 浙江开天工程技术有限公司, 浙江 宁波 315111

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

2. Zhejiang Kaitian Engineering Limited Company, Ningbo, Zhejiang 315111, China

**SUN Weihong, LI Qiankun, SHAO Tiefeng, et al. Crack Detection Algorithm of Protective Wall for Piles Based on Machine Vision. Computer Engineering and Applications**

**Abstract:** A crack detection algorithm for protective wall based on machine vision for a range of issues is presented in this paper, such as complex texture and low contrast in surface image of protective wall, unfixed image shooting angle and distance cause relative threshold to be unusable. Firstly, the algorithm enhances the crack contrast through a pixel complement algorithm. Then the distributions of phase angles and gray levels are used to improve Canny operator for restraining the interfering edge points in the image background. Secondly, some multiple relative thresholds to eliminate complicated noise are setup according to the characteristics of crack. Finally, by forecasting the growing trend of the crack, the crack region has been complemented. The experimental results show that the algorithm can preferably detect and identify the crack of protective wall, and also can be applied to the crack detection in the surface of the traditional architectures.

**Key words:** protective wall for piles; crack detection; machine vision; Canny operator; relative threshold

**摘要:** 针对桩护壁表面图像纹理复杂、裂缝对比度低, 图像拍摄角度及距离不固定导致绝对阈值无法适用等问题, 提出一种基于机器视觉的桩护壁裂缝检测方法。首先利用像素点互补算法增强图像裂缝的对比度, 然后利用相位角及灰度分布改进 Canny 算子来抑制图像背景中干扰物的边缘点, 并根据裂缝特性设置多个相对阈值过滤噪声, 最后通过预测裂缝发展趋势对裂缝进行补全。实验结果表明, 该方法能够较好地检测和标识桩护壁裂缝区域, 并且对传统建筑表面的裂缝检测同样适用。

**关键词:** 桩护壁; 裂缝检测; 机器视觉; Canny 算子; 相对阈值

文献标识码: A 中图分类号: TP751.1 doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1805-0338

## 1 引言

钻孔桩成孔时因地质松散, 且在灌注混凝土前, 孔壁由于自立时间过长会造成坍塌。埋设钢筋混凝土材质的桩护壁能保持钻孔内的水头高于地下水位, 平衡孔壁与孔外

地下水压, 防止孔壁坍塌, 同时桩护壁还有隔离地表水、保护孔口地面、固定桩孔位置及钻头导向的作用<sup>[1-2]</sup>。然而, 在施工过程中由于应力、温度和地下环境等因素的影响会使桩护壁产生裂缝。裂缝的存在及延展严

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(No.2016YFC0701309-05)。

**作者简介:** 孙卫红(1969-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为数字化设计制造, 检测技术及自动化装备, 企业信息化, E-mail: whsun@126.com。

重影响着桩护壁的耐久性和承重能力,导致后续的灌注工程存在安全隐患,因此对桩护壁进行实时、有效的检测至关重要<sup>[3]</sup>。针对桩护壁的裂缝缺陷,现有的检测方法主要有人工检测法,超声波检测法<sup>[4]</sup>以及机器视觉检测法。人工检测存在效率低、危险性高以及漏检率大等问题;超声波检测不受环境可视度的影响,但波的传播介质由于其成分不确定,分布不均匀,传播速度及参数设定存在人为差异,且返回的波形图不具有直观性。

随着计算机和图像处理理论的快速发展,机器视觉技术由于其非接触、效率高、便捷直观等优点在缺陷检测领域得到越来越广泛的应用。王耀东等<sup>[5]</sup>提出分块图像局部算法将大视场图像进行网格化,有效地提高了隧道裂缝的检测精度;王平让等<sup>[6]</sup>通过种子连接算法将网格中灰度值最小的裂缝像素点进行连接,获得较完整的隧道裂缝;宋蓓蓓等<sup>[7]</sup>利用模糊C均值聚类分割沥青路面图像,提高了路面裂缝的识别率;黎蔚等<sup>[8]</sup>改进分水岭算法较好地保留了路面裂缝的细节;张德津等<sup>[9]</sup>参考裂缝的空间分布、灰度、几何等特征,对空间聚集区域进行评估实现沥青路面的裂缝检测。然而,桩护壁裂缝不同于隧道或路面的裂缝检测,其特殊性在于:(1)狭窄封闭的环境要求拍摄角度由传统检测的平拍变为俯拍,图像亮度由上至下递减,裂缝的下半区域被淡化;(2)CCD相机会因为缆绳的轻微摆动使拍摄实时角度及距离不稳定,图像中单个像素点无法直接加权转化为单位长度或单位面积,绝对阈值的过滤无法适用;(3)桩护壁表面成分复杂,裂缝周围常分布大面积干扰物,图像中裂缝区域的分割难度较大。

针对图像采集环境较差的裂缝检测,尤其是光照条件不佳、干扰物较多的桩护壁,有关裂缝检测的方法研究还相对不足。因

此,本文针对桩护壁裂缝图像的特殊性,提出一种基于机器视觉的桩护壁裂缝检测方法。预处理阶段利用裂缝像素点分布特性深化光照不足的裂缝区域,改善图像对比度,通过改进的Canny算子抑制干扰物边缘点,降低复杂背景对裂缝识别的影响;然后结合裂缝的线性、连续性、延展性等形态特性设置相对阈值去除噪声,并通过预测裂缝断裂部分的发展趋势对误删裂缝进行补全,获得较为完整的裂缝区域。

## 2 裂缝图像预处理

### 2.1 基于像素点互补的裂缝对比度增强

由于孔洞内光线不足,且拍摄方式为非传统的俯拍方式,桩护壁图像存在部分裂缝区域淡化及对比度低的问题。为此,根据裂缝形态及像素点灰度分布特性,提出一种基于像素点互补的算法来增强桩护壁裂缝的对比度,且在增强裂缝点的同时,有效抑制噪声及背景区域的增强。

#### 2.1.1 裂缝待增强点提取

裂缝虽然种类多样,但是以斜率骤变点作为拆分点进行拆分后,可以归纳为偏纵向裂缝和偏横向裂缝。拆分的裂缝两端点相连计算斜率 $\theta_i$ , $\theta_i$ 在区间 $(\pi/4, 3\pi/4) \cup (5\pi/4, 7\pi/4)$ 内定义为偏纵向裂缝,在区间 $(0, \pi/4) \cup (3\pi/4, 5\pi/4) \cup (7\pi/4, 2\pi)$ 内定义为偏横向裂缝。根据偏纵向裂缝和偏横向裂缝各自的灰度值分布特点,设计图1所示的两种十字形模板。

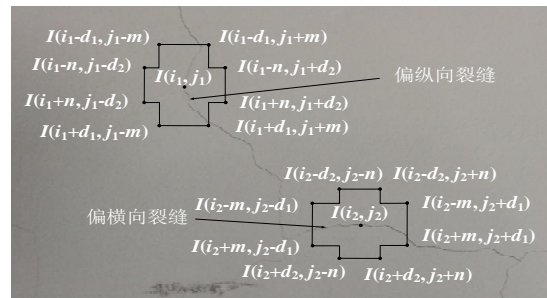


图1 两种十字形模板

针对偏纵向裂缝,待判断点  $I(i_1, j_1)$  的左右边界  $I(i_1-n, j_1-d_2) \sim I(i_1+n, j_1-d_2)$ ,  $I(i_1-n, j_1+d_2) \sim I(i_1+n, j_1+d_2)$  为检测边,设定初始值为 0 的计数参数  $C$ , 遍历检测边像素点并利用式(1)进行比较,当  $C$  为-1 时结束遍历,判定  $I(i_1, j_1)$  为非待增强点;当  $C$  收敛于  $4n+2$  时,判定  $I(i_1, j_1)$  为待增强点。针对偏横向裂缝,待判断点  $I(i_2, j_2)$  上下边界  $I(i_2-d_2, j_2-n) \sim I(i_2-d_2, j_2+n)$ ,  $I(i_2+d_2, j_2-n) \sim I(i_2+d_2, j_2+n)$  为检测边,采用相同的方式进行判断。

$$C = \begin{cases} C+1; & \text{待判断点} < \text{检测边灰度值} \\ -1; & \text{待判断点} > \text{检测边灰度值} \end{cases} \quad (1)$$

### 2.1.2 裂缝对比度增强

针对偏纵向裂缝的待增强点  $I(i_1, j_1)$ , 上下边界  $I(i_1-d_1, j_1-m) \sim I(i_1-d_1, j_1+m)$ ,  $I(i_1+d_1, j_1-m) \sim I(i_1+d_1, j_1+m)$  为增强边。 $I(i_1, j_1)$  的新灰度值  $I_e(i_1, j_1)$  定义如式(2)所示:

$$I_e(i_1, j_1) = \min\{I(i_1, j_1), I(i_1-d_1, j_1-m) \sim I(i_1-d_1, j_1+m), I(i_1+d_1, j_1-m) \sim I(i_1+d_1, j_1+m)\} \quad (2)$$

针对偏横向裂缝的待增强点  $I(i_2, j_2)$ , 上下边界  $I(i_2-m, j_2-d_1) \sim I(i_2+m, j_2-d_1)$ ,  $I(i_2-m, j_2+d_1) \sim I(i_2+m, j_2+d_1)$  为增强边。 $I(i_2, j_2)$  的新灰度值  $I_e(i_2, j_2)$  定义如式(3)所示:

$$I_e(i_2, j_2) = \min\{I(i_2, j_2), I(i_2-m, j_2-d_1) \sim I(i_2-m, j_2+d_1), I(i_2+m, j_2-d_1) \sim I(i_2+m, j_2+d_1)\} \quad (3)$$

待增强点中既有裂缝像素点,也存在灰度值小的噪声点,但噪声点为判断点的十字形模板,增强边灰度值均大于判断点灰度值,根据式(2)和(3),噪声点不会被增强。

十字形模板 4 个参数共同影响裂缝对比度的增强效果。其中,  $n$  越大,像素点是否为待增强点的判断越严格,背景点不容易被误判,但裂缝点容易被遗漏;  $m$  越大,待增强点被增强的可能性越大;由于裂缝是连续的,灰度在小范围内不会有明显变化,因此  $d_1$  应较大,提取稍远位置的裂缝点灰度来增强待增强点,但过大的  $d_1$  会导致增强边无法捕捉到裂缝点或者捕捉到噪声、干扰物等区域的像素点;为了使待判断点与其周围的背景点进行比较,  $d_2$  应较小,但应大于裂缝的一般宽度。文中选取不同背景、不同条件下

采集的 200 张裂缝图像,通过分析这些裂缝长宽及灰度的变化规律,采用大步进入基于像素点互补的裂缝对比度增强算法,观测图像中裂缝和背景是否有明显的灰度变化,最终得到各参数的极值范围:  $m \geq 6$ ,  $1 \leq n \leq 13$ ,  $10 \leq d_1$ ,  $10 \leq d_2 \leq 30$ 。根据极值范围设置 4 个参数的初始值分别为  $m=6$ 、 $n=1$ ,  $d_1=d_2=10$ , 并以步长为 1 代入式(4):

$$f(m, d_1, n, d_2) = (P, G) \quad (4)$$

式中,  $f$  表示基于像素点互补的裂缝对比度增强算法,  $P$  为增强率(裂缝增强率与背景增强率的差值),  $G$  为增强度(背景区域与裂缝区域平均灰度值变化的差值)。利用增强率  $P$ 、增强度  $G$  作为对比度增强效果的判断依据,  $P$ 、 $G$  越大增强效果越理想,但由于  $m$ 、 $n$  越大,运算时间越长,结合运算时间,最后得到十字形模板最优参数分别为  $m=12$ 、 $n=10$ 、 $d_1=25$ 、 $d_2=20$ 。

利用得到的十字形模板的最优参数值,对选取的 200 张裂缝图像进行灰度腐蚀算法<sup>[10-11]</sup>与本文算法的对比度增强实验,统计图像中的各类区域增强率、平均灰度值变化及增强度如表 1 所示。各个区域增强率越大,增强越完整;平均灰度值变化小于 0 则加深,大于 0 则淡化;增强度为正时,裂缝区域对比度增强,且增强度越大增强越显著。

从表 1 可以看出,两种算法均能提升裂缝对比度。灰度腐蚀算法使裂缝区域灰度值变化更大,但同时背景及干扰物区域也被过度增强;本文基于像素点互补的裂缝对比度增强算法,裂缝区域虽没有被完全增强,但背景及干扰物的增强被成功抑制,且当裂缝区域中包含深裂缝时,增强效果更显著。因此,基于像素点互补的裂缝对比度增强算法更适合噪声复杂,并含有深裂缝的桩护壁裂缝图像。

### 2.2 基于 Canny 算子改进的边缘检测

裂缝图像的背景中常存在各种不同的干扰物,如墙壁图像中的门窗、电线,路面图像中的车痕、管道,桩护壁图像中的石块、



表 1 2 种算法增强率及增强程度

增强算法	图像类型	裂缝区域		背景区域		干扰物区域		
		增强率	平均灰度值变化	增强率	平均灰度值变化	增强率	平均灰度值变化	增强度
灰度腐蚀 算法	仅浅裂缝	100%	-49.01	100%	-33.61	100%	54.22	15.40
	含深裂缝	100%	-54.59	100%	-33.43	100%	58.83	21.16
本文算法	仅浅裂缝	83.7%	-18.44	2.0%	-1.19	2.1%	2.15	16.25
	含深裂缝	89.3%	-32.64	2.1%	-1.01	2.7%	1.77	31.63

杂草等,此类背景干扰形态复杂,面积较大,空间位置与裂缝相近甚至相连,如不能在预处理环节进行抑制,会加大之后形态学分割的难度。因此,提出一种基于 Canny 算子改进的边缘检测算法,在识别裂缝边缘的同时使用式(5)所示的 Sobel 卷积模板  $P_x$ 、 $P_y$  对图像的灰度图进行卷积,得到 X 方向的梯度  $G_x$  以及 Y 方向的梯度  $G_y$ 。

$$P_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad P_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

进一步通过公式(6)得到每个点的方位角  $\gamma(x, y)$ , 其中  $\text{atan2}(G_x, G_y)$  表示四象限反正切函数(弧度制)。

$$\gamma(x, y) = \frac{\text{atan2}(G_x, G_y) \times 180}{\pi} \quad (6)$$

将方位角  $\gamma(x, y)$  划分到如图 2 所示  $D_1 \sim D_8$  的 8 个方向区间,然后利用最大类间方差法(Otsu 法)获取阈值  $T$ 。针对每一个边缘点  $I(x, y)$ ,沿其相位角反向延长线的区间方向获取  $L$  个点,当  $I(x, y)$  满足式(7)则抑制。

$$255T \geq \begin{cases} I(x, y+1), \dots, I(x, y+L); \gamma \in D_1 \\ I(x-1, y+1), \dots, I(x-L, y+L); \gamma \in D_2 \\ I(x-1, y), \dots, I(x-L, y); \gamma \in D_3 \\ I(x-1, y-1), \dots, I(x-L, y-L); \gamma \in D_4 \\ I(x, y-1), \dots, I(x, y-L); \gamma \in D_5 \\ I(x+1, y-1), \dots, I(x+L, y-L); \gamma \in D_6 \\ I(x+1, y), \dots, I(x+L, y); \gamma \in D_7 \\ I(x+1, y+1), \dots, I(x+L, y+L); \gamma \in D_8 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $255T$  为阈值  $T$  的反归一化结果,式(7)表示当边缘点对应区间内获取  $L$  个点的灰

可以有效抑制干扰物边缘点,分离裂缝与干扰物相连的边缘。

首先通过传统 Canny 算子<sup>[12]</sup>初步确定图像的边缘点,再根据 X 方向和 Y 方向,度值均小于  $255T$  时,判定其为干扰物边缘点。通过对 200 张背景中含大面积干扰物的裂缝图像进行实验测试,改进的 Canny 算子对图像中不同成分边缘点的抑制率统计结果见表 2。

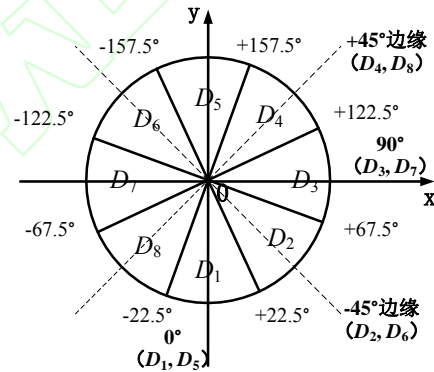


图 2 相位角区间划分

表 2 改进 Canny 算子对不同成分边缘点抑制率

裂缝边缘点误删率	大面积噪声边缘点抑制率
0.7%	91.6%

图 3 是改进前后的 Canny 算子处理结果对比图,相比较传统的 Canny 边缘检测(图 3(b)),改进后的 Canny 算子(图 3(c))在不破坏裂缝边缘的前提下,可以有效抑制干扰物边缘。

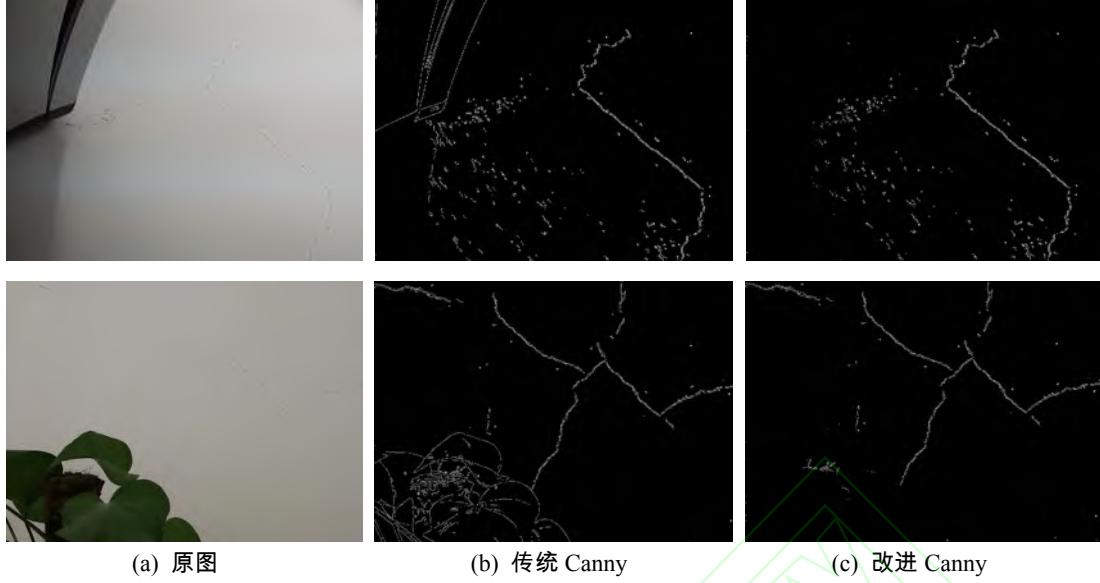


图3 Canny 算子改进前后的结果对比图

### 3 裂缝图像噪声过滤

由于摄像头拍摄角度及距离不固定,图像中各类成分的像素点数量随拍摄条件的不同而改变,单个像素点无法直接加权转化为单位长度或单位面积,要避免使用绝对阈值过滤各种噪声。综合考虑裂缝连通区域的连续性、规律性及形态特征,提出一种基于连通区域的相对阈值滤波算法来过滤多种类型的噪声。

#### 1) 占框比滤波

裂缝具有空间连续性,且分支较多,端点扩展面积大,但真实面积小,这些特征导致连续的裂缝与其外接矩形框的比值极小。如式(8)计算各连通区域的占框比:

$$R_k = \frac{\sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W A_k(i, j)}{h_k w_k} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中,  $H$ 、 $W$  分别为图像的高和宽,  $A_k$  为图像中高  $h_k$ 、宽  $w_k$  的连通区域,数量为  $n$  个。 $R_k$  越小,表明该区域的扩展特征越明显,且  $h_k w_k$  越大,  $R_k$  作为判断依据的可信度越高。

#### 2) 面积及长宽比滤波

裂缝属于一种细长的形态,其长度远大于宽度,并且具有一定的面积。由于单一的

面积和长宽比滤波都使用绝对阈值,容易误删桩护壁图像中的裂缝区域,因此,本文如式(9)结合面积和长宽比滤波设置相对阈值,对图像中离散的点状和线状噪声进行过滤。

$$E = \frac{\min \left\{ \frac{Minw_k}{Minh_k}, \frac{Minh_k}{Minw_k} \right\}}{\sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W A_k(i, j)} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中,  $Minh_k$  和  $Minw_k$  分别为连通区域最小面积外接矩形的高与宽。 $E$  越小,裂缝特征越显著,该区域为裂缝的可能性越高。

#### 3) 特殊形状的噪声滤波

图像中还可能存在形状不规则的噪声,无法满足上述过滤条件,如桩护壁表面上的水渍、污泥等。通过大量图像分析,裂缝的宽度分布往往是均匀规则的,集中在某一区间内,而此类噪声宽度分布则无规律性,骤变频繁。针对这些特点,首先对图像进行逐行扫描,统计各区域横向宽度最多落值,设为  $d_x$ ,再进行逐列扫描,统计纵向宽度最多落值,设为  $d_y$ 。假设第  $K$  个连通区域落在区间  $[d_1 - \sigma_1, d_1 + \sigma_1]$  与  $[d_2 - \sigma_2, d_2 + \sigma_2]$  的宽度值共  $X$  个,落在区间外的宽度值共  $Y$  个,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  为允许偏差值,计算如下:

$$\sigma_1 = \frac{d_x}{2} \quad \sigma_2 = \frac{d_y}{2} \quad (10)$$

若  $X$  大于  $Y$ , 则保留该连通区域, 否则置 0。

## 4 裂缝补全

### 4.1 裂缝发展趋势预测

由于光线不足、裂缝深度较浅等原因, 局部裂缝灰度值在增强之后仍接近于背景灰度值, 导致实际检测中, 裂缝的连通区域出现断裂, 而断裂部分往往是长条无分支的形态, 容易被误删。通过对大量裂缝样本的分析, 发现无论是何种裂缝, 总是由几条主干裂缝向周围延展而形成的。因此, 裂缝发展趋势的预测是裂缝补全的关键。

Liu F 等<sup>[13]</sup>提出以连通区域最小面积外接矩的方向  $\alpha$  作为裂缝的整体发展方向具有参考意义, 但是未反映出断裂部位的局部趋势; 李清泉等<sup>[14]</sup>利用最小代价路径搜索裂缝, 能较好地连接零碎的裂缝片段, 但忽略了残留噪声的干扰, 因此本文在上述两种方法的基础上, 提出了一种依据裂缝末端斜率作为主发展方向进行局部扇形区域遍历的裂缝补全算法。

根据相近相似原则, 距离越近的裂缝末端斜率越接近, 从而呈现一种可衔接状态, 此时斜率可以较好地表达裂缝的发展趋势, 但是当断裂部分为转弯处时(只考虑较小幅度的弯曲, 大角度的弯曲存在延展的随机性), 综合考虑裂缝末端方向  $\beta$  作为主发展趋势的同时, 添加以  $\alpha$  为参考依据的扇形区域来完善对裂缝发展趋势的判断, 扇形区域计算如下:

$$\theta_1 = \omega\theta \quad (\omega = \frac{2|\alpha - \beta|}{\pi}) \quad (11)$$

$$\theta_2 = \theta - \theta_1 \quad (12)$$

式中  $\theta$  为扇形区域圆心角, 裂缝发展趋势预测如图(4)所示, 图中矩形框为该连通区域的最小面积外接矩,  $\theta_1$  为远离  $\alpha$  方向的扇形区

域圆心角,  $\theta_2$  为邻近  $\alpha$  方向的扇形区域圆心角,  $\omega$  为加权参数, 与  $\alpha$ 、 $\beta$  两个方向的角度差成正比,  $\omega$  越大, 裂缝末端的方向越偏离裂缝整体发展方向,  $\alpha$  的参考价值越小, 而  $\beta$  可以更好地代表裂缝实际的发展趋势。

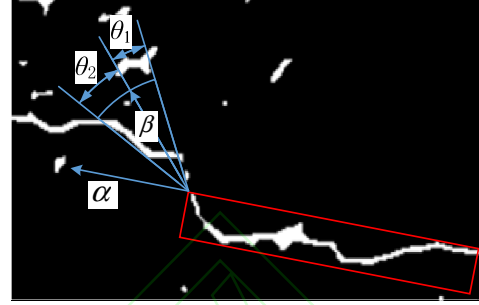


图 4 裂缝发展趋势预测示意图

### 4.2 补全过程

按照上述原则, 裂缝补全过程如下:

- 1) 提取经过完全噪声过滤的图像  $I_1$  中, 各连通区域四个方向的末端端点;
- 2) 截取各连通区域四个方向的末端, 提取末端骨架, 计算骨架两端点的斜率  $k_i$ ;
- 3) 以四个方向末端端点为圆心,  $k_i$  作为末端方向  $\beta$ , 依据式(11)、(12)生成扇形区域, 对只经过面积及长宽比滤波处理的图像  $I_2$  进行遍历, 捕捉遍历过程中非零点坐标;
- 4) 构建与  $I_1$ 、 $I_2$  大小相同的零矩阵  $I_3$ , 将 3) 中捕捉的坐标在  $I_3$  中置 1;
- 5) 利用点膨胀算法将  $I_3$  中的非零坐标点转化为连通区域, 表达式如式(13)、(14):

$$C_1 = I_1 \cup I_3 \quad (13)$$

$$C_{z+1} = (C_z \oplus B) \cap I_2 \quad z = 1, 2, \dots, \infty \quad (14)$$

式中,  $\oplus$  表示形态学处理中的膨胀运算符号,  $B$  是边长为 3 的正方形核, 当  $C_z$  收敛于  $C_{z+1}$  时, 裂缝补全完成。

## 5 实验结果与分析

文中首先对图 5 所示的传统建筑表面裂缝图像进行了大量实验, 采用图 6 所示的人工分割图像为标准识别结果, 比较本文算法与其他算法。其中, 图 7 为基于 Mask 匀光和灰度腐蚀优化图像的 Ostu 分割算法<sup>[15]</sup>(简称优化 Otsu 算法)的检测结果, 图 8 为本文

算法的检测结果。



图 5 墙壁裂缝原图

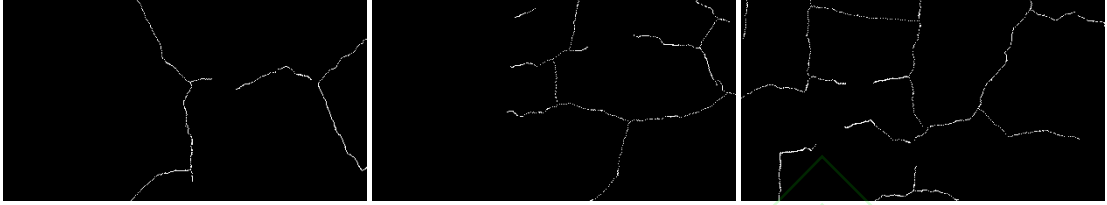


图 6 人工分割

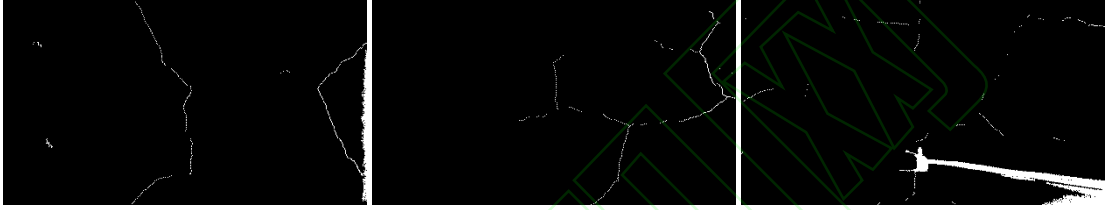


图 7 优化 Otsu 法

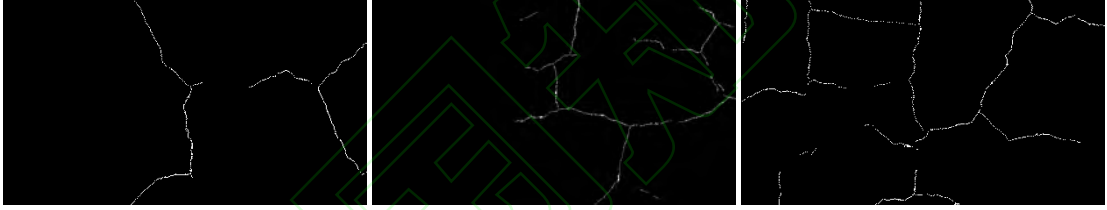


图 8 本文算法

通过与图 6 所示的人工分割图像进行对比,两种算法对图 5 中深裂缝的检测都较为理想,但如图 7 所示,对于光照不足或裂缝较浅的区域,由于优化 Otsu 算法预处理阶段适应性不足,并采用单一的大津阈值进行分割,易造成漏检情况;当背景复杂程度提升,出现干扰物时,优化 Otsu 算法不能较好地分离裂缝与干扰物的连通区域。而如图 8 所示,本文算法对光照不足或裂缝较浅的区域检测较好,背景中的干扰物成功与裂缝区域分离并被消除,检测结果与人工分割的结果更为吻合,尽管在裂缝大角度弯曲区域出现少许漏检,但不影响裂缝主体的提取。

进一步通过结构相似性 (structural similarity, 简称 SSIM)<sup>[16]</sup>量化两种算法与人工分割的相似度,给定算法检测结果图  $x$  和

人工分割结果图  $y$ , 两张图的 SSIM 按照式 (15) 求出:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (15)$$

式中  $\mu_x$  是  $x$  的平均值,  $\mu_y$  是  $y$  的平均值,  $\sigma_x^2$  是  $x$  的方差,  $\sigma_y^2$  是  $y$  的方差,  $c_1$ 、 $c_2$  是用来维持稳定的常数, SSIM 的范围为 -1 到 1, 越接近 1 相似度越高。

由于实验的结果图属于二值图像,使用传统的 SSIM 评估两种算法检测结果图与人工分割结果图的相似度均接近于 1, 导致差异不明显,因此将空白模板  $I_0$  (尺寸与检测结果图相同,但全为 0 值) 的 SSIM 值作为基准线,来减少背景对相似度的影响,提高二值图相似度的差异性。改进后的 SSIM 计算过



程如式 ( 16 ) :

$$ssim(x, y, I_0) = \frac{SSIM(x, y) - SSIM(I_0, y)}{1 - SSIM(I_0, y)} \quad (16)$$

同样,改进的结构相似性(ssim)越接近1,相似度也越高。两种算法的相似度评估结果如表3所示。

表3 SSIM与ssim的相似度评估结果

	优化 Otsu 法	本文方法	空白模板
SSIM(无干扰物)	0.9866	0.9960	0.9849
SSIM(有干扰物)	0.9554	0.9959	0.9759
ssim(无干扰物)	0.1163	0.8374	0
ssim(有干扰物)	-0.3196	0.8356	0

为验证本文方法在桩护壁裂缝图像检测中的适应性,对100m长的桩护壁进行图像采集,随机挑选无裂缝和含有裂缝的图像各100张,其中包括部分相同裂缝不同拍摄距离的图像。检测过程中,根据现场图像的

纹理复杂程度及光照条件分析,设置Canny算子中滞后阈值<sup>[10]</sup>的低阈值为21,高阈值为63,裂缝补全的扇形区域圆心角 $\theta$ 为 $\pi/6$ 。同样采用人工分割为标准识别结果,图9是具有代表性的桩护壁现场裂缝检测结果图,通过与人工分割的检测结果对比,本文方法的准确率达到90.1%。进一步地,采用优化Otsu法同时对上述图像进行了裂缝识别,结果显示:无法从图像背景中有效地识别出裂缝的分布区域,说明优化Otsu法对桩护壁环境中的裂缝检测适应性差,无法满足桩护壁及特殊环境中裂缝检测的需求,而本文提出的算法可以较好地适应桩护壁环境中的裂缝检测。

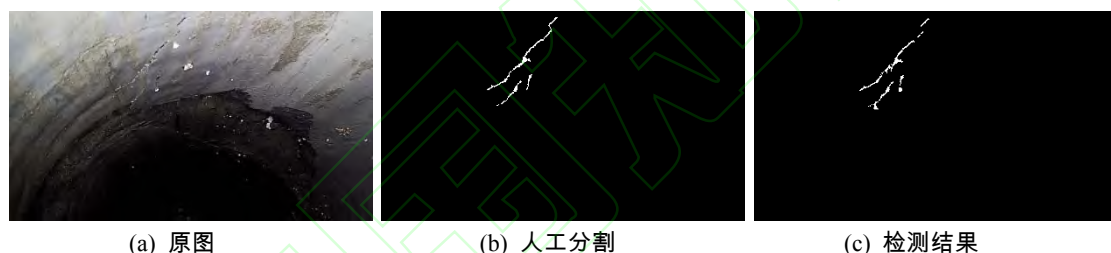


图9 桩护壁现场检测

## 6 结束语

本文提出了一种基于机器视觉的桩护壁裂缝检测方法,首先利用像素点互补算法在避免噪声及背景增强的前提下,加深裂缝区域以达到改善裂缝图像对比度的目的,并根据边缘点相位角对应区间内的灰度分布调整Canny算子的约束条件,抑制背景中大面积干扰物的边缘点识别,再将边缘轮廓经过闭运算获得平滑连续的二值图像;其次,基于裂缝连通区域的特征提出多种相对阈值,有效地过滤多种形态的噪声;最后遵循裂缝发展的趋势对裂缝进行补全,减少局部断裂裂缝的误删情况。通过对传统建筑表面裂缝图像和桩护壁表面裂缝图像的检测实验,结果表明提出的方法可以较好地提取出

裂缝区域,是一种具有工程应用价值的桩护壁表面裂缝检测方法,并且对传统建筑表面的裂缝检测具有一定的适用性。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ 106-2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京:中国工业出版社.
- [2] 彭必建. 考虑窜孔效应的人工挖孔桩护壁设计方法研究[J]. 地质与勘探, 2016, 52(2):307-315.
- [3] 韦永安. 人工挖孔桩护壁坍塌的处理方法探讨[J]. 工程建设与设计, 2016(7):167-168+172.
- [4] 张鹏. 管道缺陷漏磁和超声波检测数据的对比分析[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(10):113-119.
- [5] 王耀东,朱力强,史红梅,等. 基于局部图像纹理计算的隧道裂缝视觉检测技术[J]. 铁道学报, 2018,

---

40(2):82-90.

[6] 王平让, 黄宏伟, 薛亚东. 基于图像局部网格特征的隧道衬砌裂缝自动识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5):991-999.

[7] 宋蓓蓓, 韦娜. FCM 分割和形态学的沥青路面图像裂缝提取[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(4): 31-34.

[8] 黎蔚, 高璐. 基于改进的分水岭算法的路面裂缝检测[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(20):263-266+270.

[9] 张德津. 基于空间聚集特征的沥青路面裂缝检测方法[J]. 自动化学报, 2016, 42(3):443-454.

[10] Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2009.

[11] 王耀东. 基于图像处理的地铁隧道裂缝识别算法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7):1489-1496.

[12] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1986(6):679-698.

[13] Liu F, Xu G, Yang Y, et al. Novel Approach to Pavement Cracking Automatic Detection Based on Segment Extending[C]//International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling. IEEE, 2008: 610-614.

[14] 李清泉, 邹勤, 毛庆洲. 基于最小代价路径搜索的路面裂缝检测[J]. 中国公路学报, 2010, 23(6): 28-33.

[15] 王耀东, 余祖俊, 白彪, 等. 基于图像处理的地铁隧道裂缝识别算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7):1489-1496.

[16] 靳鑫, 蒋刚毅, 陈芬, 等. 基于结构相似度的自适应图像质量评价[J]. 光电子·激光, 2014, 25(2): 378-385.