

# 基于主干双尺度特征融合的裂缝宽度视觉测量

黄钊丰<sup>1</sup>, 唐昀超<sup>2\*</sup>, 邹湘军<sup>1\*\*</sup>, 陈明猷<sup>1</sup>, 周浩<sup>1</sup>, 邹天龙<sup>3</sup>

<sup>1</sup>华南农业大学工程学院, 广东 广州 510642;

<sup>2</sup>仲恺农业工程学院城乡建设学院, 广东 广州 510006;

<sup>3</sup>佛山市中科农业机器人与智慧农业创新研究院, 广东 佛山 528200

**摘要** 机器视觉对裂缝进行宽度测量时存在测量方向不能有效反映裂缝真实宽度方向、测量不精确的问题。为此,以水库大坝的裂缝为对象,主要研究了裂缝主干提炼和宽度测量方法。在图像细化的基础上进行进一步精简,得到裂缝的主干,其主干每点的八邻域总点数不超过2,精简了冗余的数据点,邻域分布种类数减至16种,增强了主干对裂缝形状的描述能力;融合主干宏观和微观特征作为宽度测量方向的依据,获得较对比方法更为准确的测量方向,实现裂缝宽度连续、准确的视觉测量。增加测量召回率与方向误差两种评估标准,全面地验证所提方法的准确性。所提方法具有实际工程应用的前景,并为其他细长不规则目标的径向视觉测量提供参考。

**关键词** 机器视觉; 视觉测量; 裂缝测量; 图像细化; 多尺度特征融合

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1015005

## Visual Measurement of Crack Width Based on Backbone's Two-Scale Fusion of Features

Huang Zhaofeng<sup>1</sup>, Tang Yunchao<sup>2\*</sup>, Zou Xiangjun<sup>1\*\*</sup>, Chen Mingyou<sup>1</sup>, Zhou Hao<sup>1</sup>,  
Zou Tianlong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>College of Engineering, South China Agriculture University, Guangzhou 510642, Guangdong, China;

<sup>2</sup>College of Urban and Rural Construction, Zhongkai University of Agriculture and Engineering,  
Guangzhou 510006, Guangdong, China;

<sup>3</sup>Foshan-Zhongke Innovation Research Institute of Intelligent Agriculture and Robotics, Foshan 528200,  
Guangdong, China

**Abstract** The width measurement of cracks by machine vision has problems of offsets in the width direction of the cracks and inaccurate measurements. To this end, taking the cracks of reservoir dams as objects, the method of crack backbone refining and width measurement was studied. Based on image thinning, the proposed method refined the cracks' backbone further. The total number of points in the eight neighborhoods of each backbone's point did not exceed two. Redundant data points were simplified, and the number of neighborhood distribution types was reduced to 16, which enhanced the backbone's ability to describe the crack shape. The backbone's macroscopic and microscopic features were combined as a basis for the width measurement direction to obtain a more accurate measurement direction than a baseline method used for comparison. As a result, the proposed method achieved continuous and accurate visual measurements of the crack width. By adding two evaluation criteria, measurement

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-04-22; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(31571568)、广东省省级科技计划(2019A050510035)、广东省普通高校省级重大科研项目(2020KZDZX1037)

通信作者: \*ryan.twain@gmail.com; \*\*xjzou1@163.com

recall rate and direction error, the proposed method was validated to be more accurate in actual engineering requirements than the baseline method. The proposed method has practical engineering applications and can be a reference for radial vision measurement of other slender and irregular targets.

**Key words** machine vision; visual measurement; crack measurement; image thinning; multi-scale feature fusion

## 1 引言

裂缝是常见的结构损伤,是威胁道路、桥梁、隧道、大坝等混凝土建筑结构健康的因素之一<sup>[1-3]</sup>。视觉测量因具有非接触、高精度、宽范围、便携等优点,逐渐取代人工目检,在各种检测领域均有较好的表现与应用前景<sup>[4-6]</sup>。研究者们已经给出了较为完整的流程框架,实现图像像素特征到真实物理空间上几何尺寸的映射<sup>[7-10]</sup>。但针对诸如裂缝等复杂细长不规则目标,目前视觉测量往往存在几何意义欠缺、结果不够准确等问题<sup>[11]</sup>。

针对裂缝的识别分割,研究者们从经典 digital image process(DIP)方法和神经网络模型两方面进行了大量的研究,使裂缝的提取更具鲁棒性<sup>[12-16]</sup>。但是,在定量层面分析裂缝危害程度的研究相对较少,并且就裂缝危害程度指标之一的宽度而言,视觉测量中如何明确定义裂缝宽度并且连续地进行视觉测量仍是具有挑战性的任务<sup>[11]</sup>。以往研究者使用裂缝的骨架作为宽度测量的依据<sup>[17-18]</sup>,但所涉及的方法得到的骨架仍存在冗余数据,存在骨架点八邻域内的总点数大于2的问题,骨架的定义仍不够准确。并且基于冗余骨架提出的宽度测量方法并不能稳健地得到符合几何测量意义的、准确的测量点。Kim等<sup>[19]</sup>寻找距离裂缝骨架点最邻近的两个边缘点作为宽度的测量点。朱苏雅等<sup>[20]</sup>和Luo等<sup>[21]</sup>均从裂缝骨架点开始向4个方向分别寻找裂缝边缘,以4个方向上两边缘距离的最小值作为裂缝的宽度。以上取最值的宽度定义方法在理想化的裂缝模型上取得阶段性的研究成果。但现实中宽度往往指裂缝生长方向法向上的两边缘直线距离,并且裂缝边缘常呈现不规则凹凸形态,两边缘不严格关于骨架对称,以上方法存在部分与宽度几何意义不相符的测量点,测量准确性有待提高。并且,仅以数值结果作为测量方法优劣的评价标准的全面性也有待提高。因此,在如何让机器视觉测量能更贴切地反映裂缝客观实际宽度的问题上仍存在很大的研究空间。

基于以上背景,本文选取位于野外的水库大坝裂缝作为研究对象,以图像细化提取裂缝骨架算法

为基础进一步研究了更为精简的裂缝主干提炼算法。所得主干上任一点的八邻域内其余主干点的数量不超过2,增强了主干对裂缝形状的描述能力。其具体表现为:在宏观尺度上,为主干曲线拟合过程减少冗余的数据点;在微观尺度上,主干点的邻域分布种类数减少至16种,便于按照邻域分布类型对主干点进行分类。然后,结合主干宏观斜率特征与微观邻域分布特征获得更准确的测量方向,定义裂缝的宽度为位于裂缝边缘,并且在该测量方向上的两测量点之间的直线距离,提出裂缝宽度测量方法。增加测量召回率与方向误差两种评估标准,与文献[20-21]中的方法进行比较,更全面地验证所提测量方法具备更为准确的、符合宽度几何意义的视觉测量性能,可进行连续、稳健的测量。

## 2 基本原理

### 2.1 裂缝视觉测量流程

所提宽度测量方法的基本流程为裂缝分割、主干提炼、宽度测量,具体流程如图1所示。其中,裂缝分割采用对边缘细节特征敏感的U-net语义分割模型<sup>[22]</sup>,分割结果如图2所示。裂缝主干提炼预处理可有效地处理裂缝分割中可能存在的误判问题,提高主干提炼的稳健性。

### 2.2 裂缝主干提炼

裂缝主干包含着裂缝形态信息,具有确定裂缝位置、提供宽度测量依据等作用。经典的Zhang-Suen图像细化算法<sup>[23]</sup>可用于提取裂缝的粗主干,然而粗主干仍存在冗余数据,可进一步地对其进行精简,得到裂缝的主干。

裂缝主干提炼算法的输入为只有裂缝和背景两类像素的裂缝二值图像,过程为迭代细化,进行每一轮迭代时都将最外层轮廓转换为背景。算法设某一裂缝像素点为 $P_0$ ,在 $P_0$ 的八邻域内,从 $P_0$ 的正上方像素点开始,顺时针依次设为 $P_1 \sim P_8$ ,若为背景点,赋值为0,否则赋值为1。并且令 $A(P_0)$ 表示 $P_0$ 的八邻域内0和1顺时针依次连接的像素点数量, $B(P_0)$ 表示 $P_0$ 的八邻域内裂缝像素点的数量。

裂缝主干提炼算法的一次迭代分为奇数次子

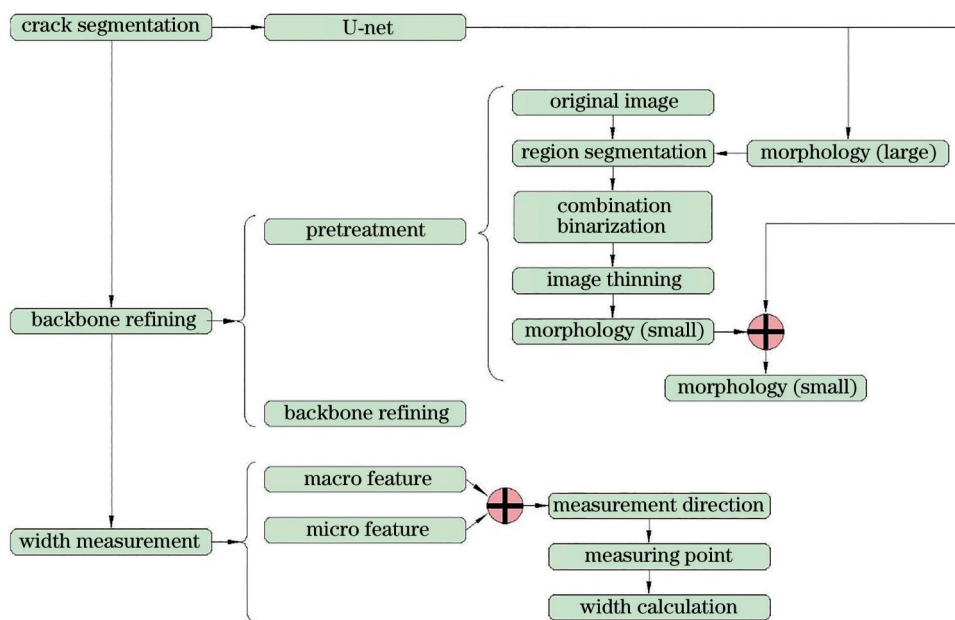


图 1 所提方法的流程

Fig. 1 Flowchart of the proposed method

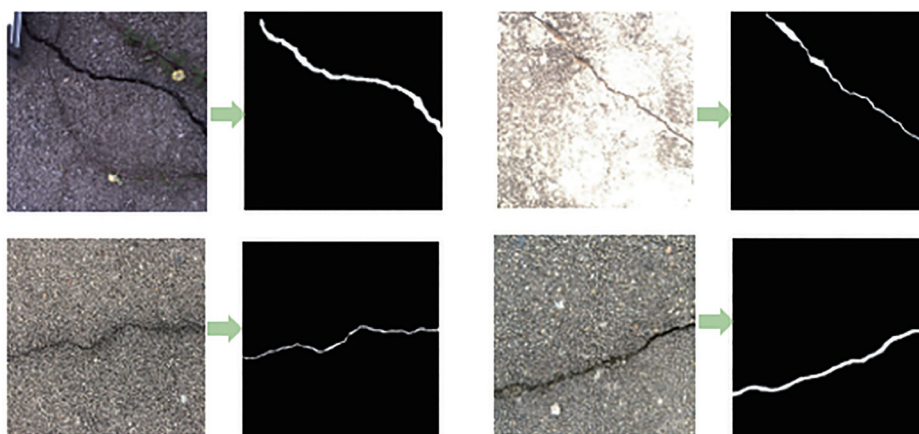


图 2 U-net 裂缝分割结果

Fig. 2 Crack segmentation results of U-net

迭代与偶数次子迭代。

$$\begin{cases} A(P_0) = 1 \\ 2 \leq B(P_0) \leq 6 \\ P_1 \times P_3 \times P_5 [P_7] = 0 \\ P_3 [P_1] \times P_5 \times P_7 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

在每次子迭代当中,将满足规则式(1)的裂缝像素点标记为最外层像素点,在一次迭代完成前将被标记的像素点统一转换为背景像素点。其中方括号为偶数次子迭代的规则,使用时将方括号中的内容代替前面元素。算法按式(1)对裂缝进行迭代细化,直到没有裂缝像素点被标记为最外层像素点为止,所得图像为裂缝的粗主干。粗主干中仍存在

冗余点,可继续进行主干精简。

$$\begin{cases} B(P_0) > 2 \\ P_1 = 1 \wedge P_6 = 0 \\ P_3 \neq 0 \vee P_4 \neq 1 \\ P_6 \neq 1 \vee P_7 \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

将粗主干中满足规则式(2)的点转为背景,此时得到的裂缝主干点的八邻域中其余裂缝像素点的数量不超过 2。所提方法对裂缝主干提炼的效果如图 3 所示。所提主干提炼算法的优势在于更为精简,每个主干点的邻域总点数不超过 2,将主干点的邻域分布种类数减少至 16 种,如图 4 所示,精简了数据量的同时便于利用邻域分布类型对主干点进行分类,有利于后续明确地定义裂缝宽度测量。

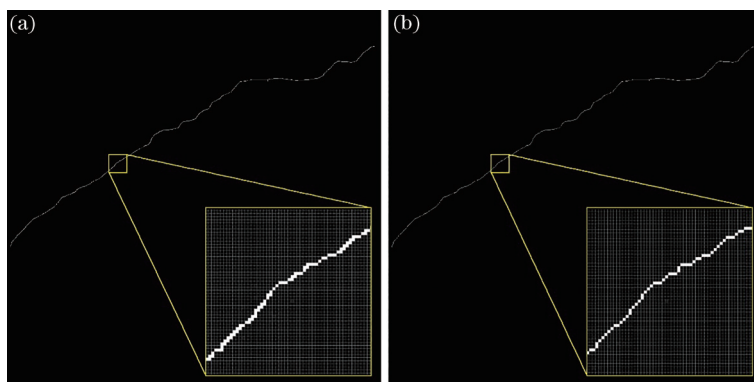


图 3 经典细化算法与所提改进算法对比。(a)经典细化算法;(b)所提主干提炼算法

Fig. 3 Comparison between the classical thinning algorithm and the proposed improved algorithm. (a) Classic thinning algorithm; (b) proposed backbone refining algorithm

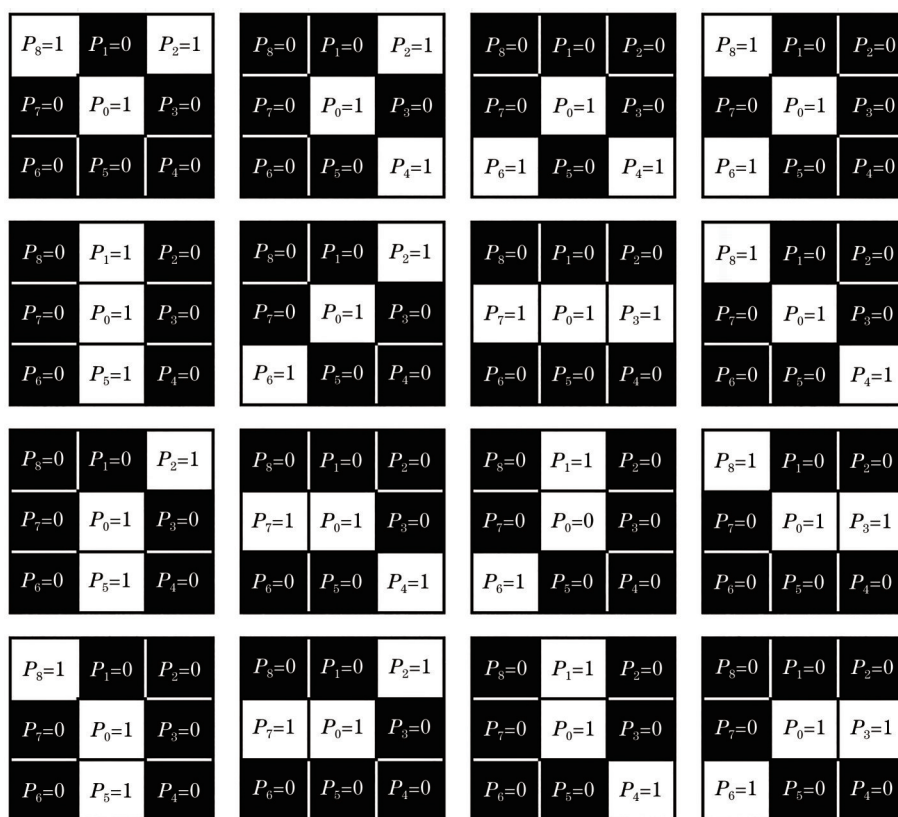


图 4 主干点的 16 种邻域分布类型

Fig. 4 16 types of neighborhood distribution of backbone points

### 2.3 裂缝宽度测量方向判断

经过同一个测量位置  $O$  存在多种测量方案,如图 5 所示,测量方案  $AF$ 、 $BG$ 、 $CH$ 、 $DI$ 、 $EJ$  是位置  $O$  上不同测量方向所得到的宽度测量结果,它们有着较大的差异。根据工程人员在实际中常用的目检方法,沿该处裂缝生长方向的法向测量宽度,显然方案  $BG$  更适合表征裂缝在位置  $O$  的宽度。在判断了测量方向的基础上进行裂缝宽度视觉测量,可使

其接近于人工方法。

本文提出了一种基于主干双尺度特征的裂缝宽度测量方向判断方法,该方法结合了宏观尺度上的裂缝主干斜率信息和微观尺度上的裂缝主干点邻域信息,当裂缝上某处的宏观与微观信息相匹配时,即认为该处测量方向可判断,并得到测量方向。对于宏观与微观信息不匹配的点,则放弃测量。

在宏观尺度上,采用最小二乘法进行  $n$  次多项



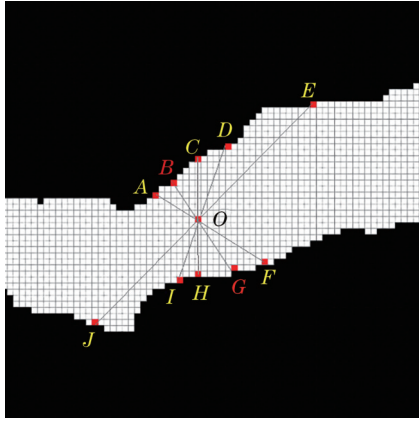


图 5 裂缝在同一处上的不同测量方式  
Fig. 5 Different measurement methods of cracks at the same place

式曲线拟合,将主干拟合成多项式函数  $v=f(u)$ 。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & u_1 & \cdots & u_1^n \\ 1 & u_2 & \cdots & u_2^n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & u_m & \cdots & u_m^n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{U} \times \mathbf{W}$$

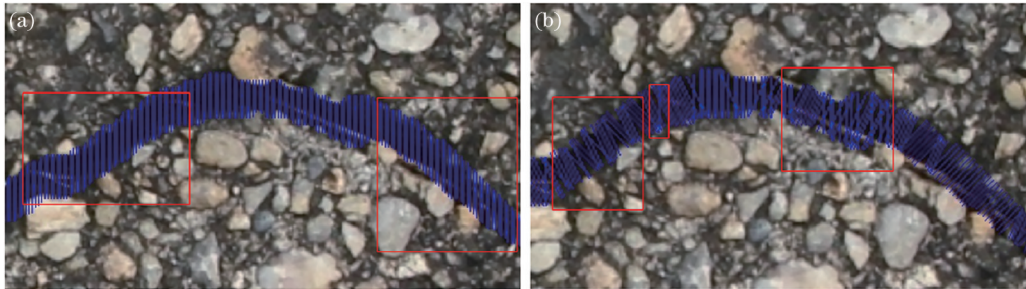


图 6 仅采用单一尺度特征的测量方向判断。(a)斜率特征;(b)邻域分布类型特征  
Fig. 6 Judgment of measurement direction using only a single scale feature. (a) Slope feature; (b) neighborhood distribution type feature

本文定义了 8 种测量方向,每种方向之间间隔 22.5°。在宏观和微观层面对主干上的任一点判断

式中:  $(u_m, v_m)$  为主干点在图像坐标系上的坐标值;  $\mathbf{W}$  为多项式函数的各项系数矩阵;  $m$  为参与多项式曲线拟合的主干点数量;  $n$  为曲线最高次项,  $n=9$ 。

使用最小二乘法求解矩阵  $\mathbf{W}$ :

$$\mathbf{W} = (\mathbf{U}^T \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^T \mathbf{V}. \quad (4)$$

对函数进行一阶求导,可以得到主干上任意一点的斜率  $dv$ , 作为宏观尺度上的测量方向依据,第  $j$  个主干点的斜率为

$$dv_j = \sum_{i=1}^n w_{n-i} u_j^{n-i-1}. \quad (5)$$

在微观尺度上,主干点的八邻域分布类型只有 16 种,数量较少,可根据八邻域分布类型对主干点进行微观尺度上的分类,从而得到微观尺度上的测量方向依据。

仅采用宏观尺度上的斜率或微观尺度上的邻域分布类型作为测量方向的判断依据时,都会产生较多明显的方向误判结果,如图 6 所示。因此将两种尺度上的特征融合,以提高测量方向判断的准确性。

的测量方向相同时,即可得知该点的测量方向。双尺度结合的宽度测量方向判断宏微观匹配规则为

$$\left\{ \begin{array}{l} (dv \geq 5 \vee dv < -5) \wedge [(P_1 + P_5 = 2) \vee (P_6 + P_8 = 2) \vee (P_2 + P_4 = 2)] \rightarrow 0^\circ \\ (-5 \leq dv < -1.5) \wedge [(P_1 + P_4 = 2) \vee (P_5 + P_8 = 2) \vee (P_1 + P_5 = 2)] \rightarrow 22.5^\circ \\ (-1.5 \leq dv < -0.67) \wedge [(P_4 + P_8 = 2) \vee (P_1 + P_4 = 2) \vee (P_5 + P_8 = 2)] \rightarrow 45^\circ \\ (-0.67 \leq dv < -0.2) \wedge [(P_4 + P_7 = 2) \vee (P_3 + P_8 = 2) \vee (P_3 + P_7 = 2)] \rightarrow 67.5^\circ \\ (-0.2 \leq dv < 0.2) \wedge [(P_3 + P_7 = 2) \vee (P_4 + P_6 = 2) \vee (P_2 + P_8 = 2)] \rightarrow 90^\circ \\ (0.2 \leq dv < 0.67) \wedge [(P_2 + P_7 = 2) \vee (P_3 + P_6 = 2) \vee (P_3 + P_7 = 2)] \rightarrow 112.5^\circ \\ (0.67 \leq dv < 1.5) \wedge [(P_2 + P_6 = 2) \vee (P_1 + P_6 = 2) \vee (P_2 + P_5 = 2)] \rightarrow 135^\circ \\ (1.5 \leq dv < 5) \wedge [(P_1 + P_6 = 2) \vee (P_2 + P_5 = 2) \vee (P_1 + P_5 = 2)] \rightarrow 157.5^\circ \end{array} \right. \quad (6)$$

### 2.4 裂缝宽度测量

根据测量方向和主干点定义测量直线  $L_m$ , 寻找距离  $L_m$  最近的裂缝点  $(u_i, v_i)$ , 构成点集合  $P_d$ 。

$$P_d = \left\{ (u_i, v_i) \mid |v_i - (\tan \theta \times u_i + b)| < 1 \right\}, \quad (7)$$

式中:  $\theta$  为用角度表示的测量方向;  $b$  为直线方程的截距, 可通过将主干点的坐标代入方程求得。

集合  $P_d$  包含裂缝上边缘测量点  $P_{mu}$  和下边缘测量点  $P_{md}$ , 如图 7 所示。

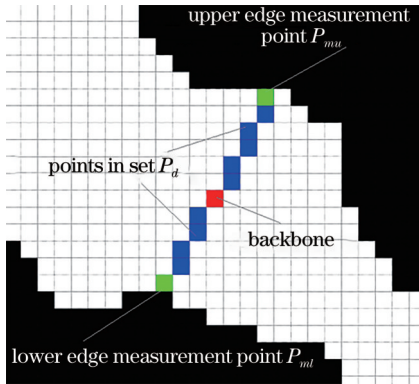


图 7 测量点的查找过程

Fig. 7 Finding process of measuring points

$P_{mu}$  与  $P_{md}$  的取值公式为

$$P_{mu} \begin{cases} (u_{\max}, v_{\min}), & 0^\circ \leq \alpha_i < 90^\circ \\ (u_{\min}, v_{\min}), & 90^\circ \leq \alpha_i < 180^\circ, \end{cases} \quad (8)$$

$$P_{md} \begin{cases} (u_{\min}, v_{\max}), & 0^\circ \leq \alpha_i < 90^\circ \\ (u_{\max}, v_{\max}), & 90^\circ \leq \alpha_i < 180^\circ. \end{cases} \quad (9)$$

如图 8 所示, 裂缝上的每一条线代表所在位置的裂缝宽度测量方案。

使用双目视觉系统进行宽度视觉测量, 安装时相机视轴垂直于大坝表面, 测量前需对相机进行双

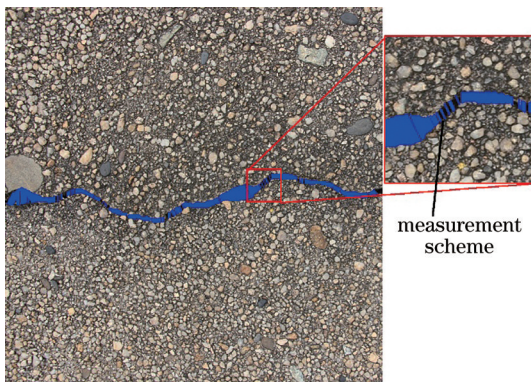


图 8 一段裂缝的可测量点及其测量方案

Fig. 8 Measurable points of a section of crack and its measurement scheme

目标定, 矫正相机的畸变, 并进行两相机之间的外极线矫正, 使左右图像行对齐。利用模板匹配获取右图像上对应于左图像左上、左下、右上、右下四处  $50 \times 50$  的图像块。对每个图像块的中心构建四维向量  $\mathbf{u}_{Bi} = [u_{Li} \quad v_{Li} \quad u_{Li} - u_{Ri} \quad 1]^T$ ,  $(u_{Li}, v_{Li})^T$  表示左图像上图像块中心点在图像坐标系下的坐标,  $u_{Li} - u_{Ri}$  表示同一图像块中心点在左右图像上的视差值  $d$ 。利用三角测量原理  $\mathbf{C}_B = \mathbf{Q} \times \mathbf{u}_B$  获取四个图像块中心在相机坐标系下的齐次坐标形式  $\mathbf{C}_{Bi} = [X_{Ci} \quad Y_{Ci} \quad Z_{Ci} \quad W_i]^T$ ,  $\mathbf{Q}$  为重投影矩阵, 通过相机的双目标定获得,  $W$  是一个常数。取四个深度值的平均值  $\bar{Z}$  表示相机光心距离大坝表面的平均深度。计算  $P_{mu}(u_{mu}, v_{mu})$  和  $P_{md}(u_{md}, v_{md})$  两测量点代表的裂缝宽度  $W_c$ ,

$$W_c = \frac{\bar{Z}}{f_x \cdot f_y} \sqrt{f_y^2 \cdot (u_{mu} - u_{md})^2 + f_x^2 \cdot \pi (v_{mu} - v_{md})^2}, \quad (10)$$

式中:  $f_x, f_y$  为相机的内参数之一, 分别表示透镜的物理焦距与成像装置  $x$  和  $y$  方向上每个单元尺寸的乘积, 通过相机标定获得。

## 3 实验结果与分析

实验地点为广东省广州市从化区的凤凰水库大坝, 该水库大坝有着较为明显的裂缝, 样本较为丰富。实验现场如图 9 所示。对于裂缝主干提炼算法, 设置精简率实验以说明该算法在精简数据量上的性能; 对于裂缝宽度测量方向的方法, 提出两个评估标准, 即方向判断的召回率与方向误差。

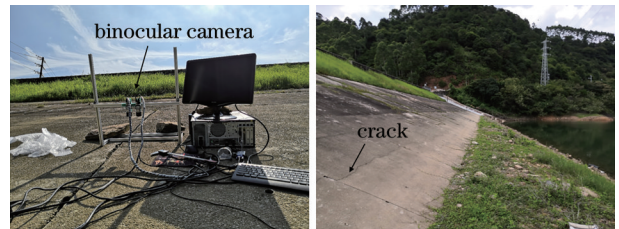


图 9 实验设备与环境

Fig. 9 Test equipment and environment

### 3.1 裂缝主干提炼算法的精简性能评估实验

对比了同一段裂缝上应用主干提炼算法所得的主干点总数  $S_B$  与应用 Zhang-Suen 图像细化算法所得的骨架点总数  $S_S$ , 以此衡量所提裂缝主干提炼算法相比于 Zhang-Suen 图像细化算法的精简性能。设裂缝主干提炼算法相对于 Zhang-Suen 图像细化

算法的精简率为  $R_e$ ,

$$R_e = \frac{S_s - S_B}{S_s} \times 100\% \quad (11)$$

以随机选取的 65 张裂缝图像作为本节实验的样本,所得结果的统计如图 10 和表 1 所示。

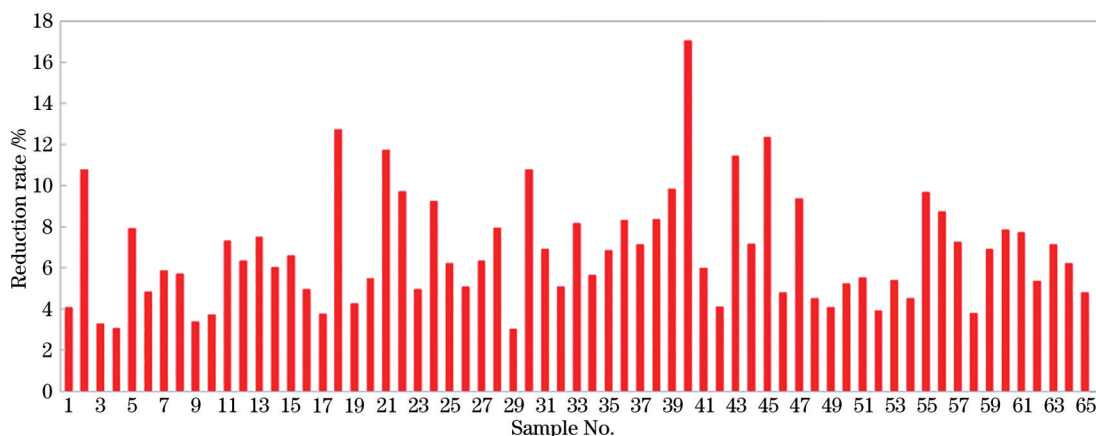


图 10 精简率结果

Fig. 10 Reduction rate result

表 1 宽度测量误差的平均值与标准差

Table 1 Average value and standard deviation of width measurement error

Parameter	Mean	Median	Maximum	Minimum	Standard deviation
Reduction rate /%	6.75	6.20	17.04	3.01	2.69

裂缝主干提炼算法所得主干相比于 Zhang-Suen 图像细化算法所得骨架的平均精简率为 6.75%,精简性能良好。另外,值得强调的是,所提裂缝主干提炼算法使得每个主干点的邻域总点数不超过 2,减少主干点邻域分布种类数至 16 种,便于按照邻域分布类型对主干点进行分类。

### 3.2 宽度测量方向判断的召回率

方向判断召回率是指可进行宽度视觉测量的各小段裂缝总长度与图像中裂缝总长度的比值,用

于考察测量算法在裂缝宽度测量任务上的查全性能。用像素点个数统计近似代替裂缝段长度。所提宽度测量方向判断方法得到可测量点的总数  $P_c$ ,统计裂缝主干点总数  $P_s$ ,召回率  $R$  为

$$R = \frac{P_c}{P_s} \times 100\% \quad (12)$$

在 U-net 裂缝分割的测试集上随机挑选 65 个样本及分割结果作为召回率实验的样本。召回率实验结果如图 11 所示,统计结果如表 2 所示。结果表

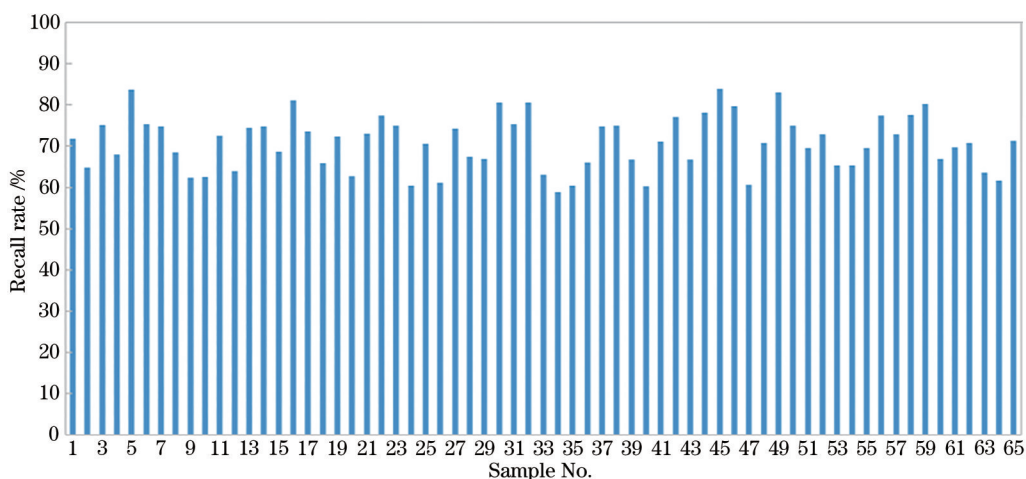


图 11 所提宽度测量方向判断方法的召回率

Fig. 11 Recall rate of the proposed width measurement direction judgment method



表 2 方向判断方法的召回率统计结果

Table 2 Statistical results of the recall rate of the direction judgment method

Parameter	Mean	Median	Maximum	Minimum	Standard deviation
Recall rate / %	70.86	71.12	83.99	58.88	6.50

明,所提宽度测量方向判断方法的平均召回率约为 71%,0.06 的标准差说明其测量具有稳定性,查全性能较好。

### 3.3 宽度测量方向判断的方向误差

方向误差用于评估方向的准确性。在可测量点中随机抽取 10 个主干点  $P_{mi}$ ,记录其位置并在图像上标记出来。邀请三位技术人员,根据取裂缝生长方向的切向作为测量方向的工程经验对图像标

记位置的裂缝进行测量方向判断,并在裂缝两边缘选取像素点  $A(u_A, v_A)$ 、 $B(u_B, v_B)$ ,要求标记点  $P_m$  在线段  $AB$  上或尽量靠近线段  $AB$ 。

使用所提宽度测量方向判断方法判断该标记点  $P_{mi}$  的测量方向,并记录在该方向上的裂缝边缘点  $C(u_C, v_C)$  和  $D(u_D, v_D)$ ,组成向量  $\overrightarrow{AB}$ 、 $\overrightarrow{CD}$ ,并求两向量的锐角夹角  $\theta$ 。用  $\overline{\Delta\theta}$  表示一张裂缝图像的测量方向判断误差,表达式为

$$\overline{\Delta\theta} = \frac{\sum_{i=1}^N \arccos \left[ \frac{|(u_{Bi} - u_{Ai}) \times (u_{Di} - u_{Ci}) + (v_{Bi} - v_{Ai}) \times (v_{Di} - v_{Ci})|}{\sqrt{(u_{Bi} - u_{Ai})^2 + (v_{Bi} - v_{Ai})^2} \times \sqrt{(u_{Di} - u_{Ci})^2 + (v_{Di} - v_{Ci})^2}} \right]}{N}, \quad (13)$$

式中： $N$  表示每张图像的随机采样点数量； $(u_{Ai}, v_{Ai})$ 、 $(u_{Bi}, v_{Bi})$ 、 $(u_{Ci}, v_{Ci})$ 、 $(u_{Di}, v_{Di})$  表示第  $i$  个随机采样点上两向量  $\overrightarrow{AB}$ 、 $\overrightarrow{CD}$  的端点坐标。

随机选取 30 个样本及分割结果作为方向误差实验样本,每个图像中随机选取 10 个测量方向可判

断点进行实验,即  $N=10$ 。对所提方法与文[20-21]中的方法进行比较。图 12(a)为所提方法的实验结果统计,图 12(b)为文献[20-21]中方法的实验结果统计。统计结果如表 3 所示。

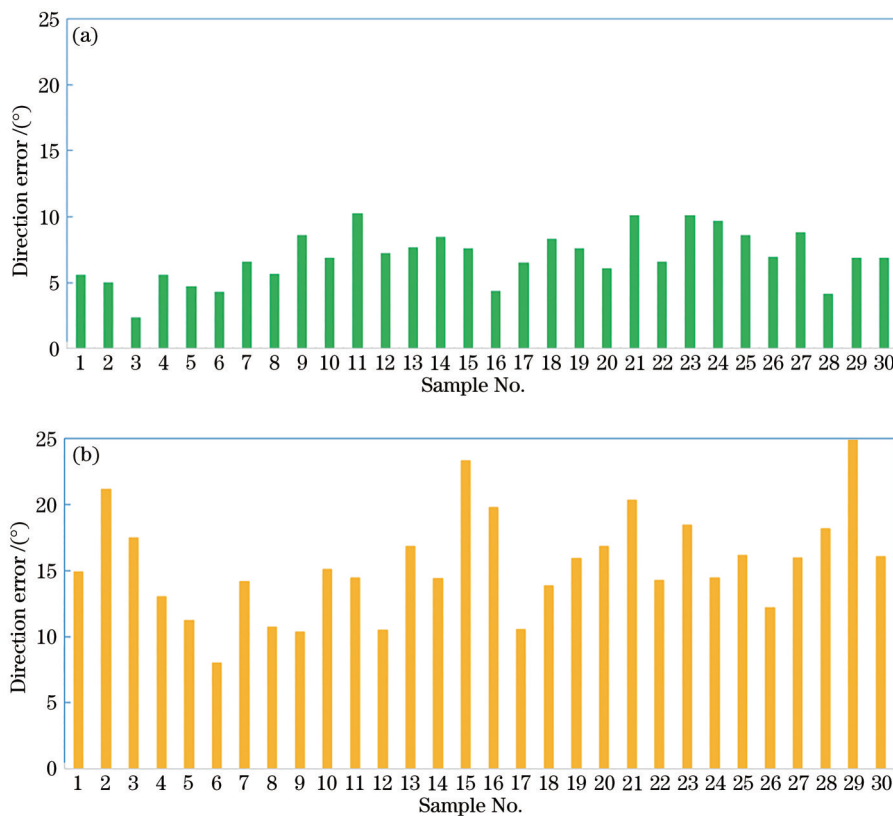


图 12 不同方法的方向误差。(a)所提方法;(b)文献[20-21]中的方法

Fig. 12 Direction error of the different methods. (a) Proposed method; (b) method in Ref. [20-21]



表 3 不同方法的方向误差统计

Table 3 Direction error statistics of the different methods

Method	Direction error / (°)				
	Mean	Median	Maximum	Minimum	Standard deviation
Proposed method	6.89	6.86	10.19	2.31	1.92
Method in Ref. [20-21]	15.44	25.06	25.06	7.99	3.88

结果表明,所提方向判断方法的误差平均值为 6.89°,且最大误差不超过 11°,相比于文献[20-21]中的方法有明显提高。以上实验结果说明,所提宽度测量方向判断方法具有可实用的准确度和稳定性。

### 3.4 野外宽度测量实验

视觉测量实验平台框架采用铝型材搭建,主要设备包括两台 MV-EM510C 工业相机,分辨率为 2456×2058,镜头焦距为 8 mm,相机透镜距大坝表面约为 240 mm,且安装时使视轴垂直于大坝表面。使用精度为 0.01 mm 的数显游标卡尺现场测量裂缝宽度作为对比数据。本文采用张正友标定法进行相机标定,标定完成后进行畸变矫正与外极线矫正。使用所提算法与流程进行处理,在裂缝中选择 5 个可测量点进行宽度测量,并在左相机的实时图像中标示测量位置,再通过使用数显游标卡尺以测内径的方式得到裂缝在该处宽度的标准值,如图 13 所示。使用视觉测量值与标准值进行对比,从而分析所提测量方法的准确度。

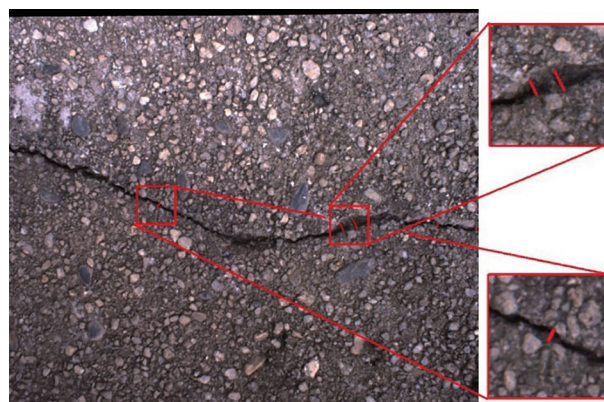


图 13 野外现场测量实验结果

Fig. 13 Field measurement test result

本次实验一共进行了 9 组,视觉测量的宽度值与数显游标卡尺所测的标准值之间的偏差如图 14 所示。各组数据的平均绝对误差  $\bar{\mu}$ 、绝对误差的标准差  $\sigma$  如表 4 所示。

由图 14 和表 3 可知,本实验误差的平均值约为 0.32 mm,平均方差为 0.19 mm,说明视觉测量实验具有一定的准确度。

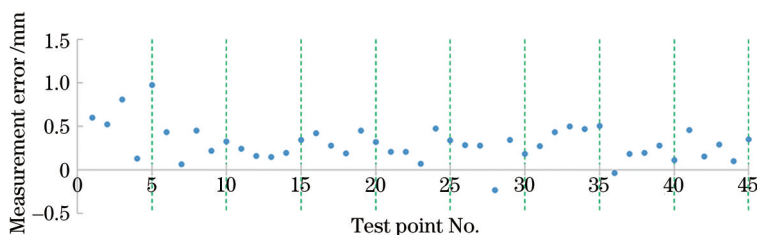


图 14 视觉测量的宽度值与标准值的偏差

Fig. 14 Deviation between width value and standard value of visual measurement

表 4 宽度测量误差平均值与标准差

Table 4 Width measurement error average value and standard deviation

Parameter	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6	Group 7	Group 8	Group 9	Mean
$\bar{\mu}$ /mm	0.61	0.30	0.22	0.33	0.26	0.26	0.43	0.16	0.27	0.32
$\sigma$ /mm	0.32	0.16	0.09	0.11	0.15	0.06	0.10	0.09	0.14	0.19

## 4 结 论

这项研究旨在探索实用的、完整的大坝裂缝宽度视觉测量方法。针对裂缝骨架数据冗余问题,设

计了一种裂缝主干提炼方法,从而稳定地得到更精简的裂缝主干。其特点为主干上各点的八邻域总点数不超过 2,减少了主干数据量以及主干点八邻域分布种类,增强主干对裂缝形状的描述能力。融

合主干宏观尺度下的斜率特征和微观尺度下的邻域分布特征,设计了更准确的裂缝宽度测量方向判断方法,进一步按照测量方向定义裂缝宽度视觉测量方法。为评估测量方法的优劣,增加了测量方向召回率与方向误差两种评估标准,为后续的研究提供技术参考。进行了一系列的实验,验证了所提裂缝主干提炼算法相对于 Zhang-Suen 图像细化算法的良好精简效果;并与文献[20-21]中的方法进行比较,证实所提方法可获得更为准确的宽度测量方向;通过宽度测量实验,证实所提方法具备工程实际应用的前景,提高了结构健康监测与修复的智能化程度。同时,所提方法也可为其他细长不规则目标的径向视觉测量提供参考。

将来,本研究团队将持续关注以下几点研究方向。首先,针对裂缝等建筑结构损伤,研究更快速,轻量化,并具有更稳定更准确分割效果的图像分割方法。其次,在现有框架基础上继续精简视觉测量流程,在提升测量算法效率的同时保证测量算法的鲁棒性、准确性与稳定性。最后,研究裂缝的三维重构,提高测量精度,并研究裂缝深度测量,从而让视觉系统有能力得到更全面的裂缝损伤信息。

### 参 考 文 献

- [1] Dong C Z, Catbas F N. A review of computer vision-based structural health monitoring at local and global levels[J]. *Structural Health Monitoring*, 2021, 20(2): 692-743.
- [2] 王博, 王霞, 陈飞, 等. 航拍图像的路面裂缝识别[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0810004.  
Wang B, Wang X, Chen F, et al. Pavement crack recognition based on aerial image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0810004.
- [3] 王森, 伍星, 张印辉, 等. 基于多尺度小波变换和结构化森林的表面裂纹分割[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815024.  
Wang S, Wu X, Zhang Y H, et al. Surface crack segmentation based on multi-scale wavelet transform and structured forest[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815024.
- [4] 刘芳, 吴志威, 杨安喆, 等. 基于多尺度特征融合的自适应无人机目标检测[J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1015002.  
Liu F, Wu Z W, Yang A Z, et al. Multi-scale feature fusion based adaptive object detection for UAV[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1015002.
- [5] 迟欢. 基于机器视觉的编织袋缺陷在线检测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(20): 201507.  
Chi H. Online detection method of woven bag defects based on machine vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(20): 201507.
- [6] 吴军, 李鑫, 刘少禹, 等. 基于后方定位的飞机蒙皮损伤视觉检测全局三维重建方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1115002.  
Wu J, Li X, Liu S Y, et al. Global three-dimensional reconstruction method for visual detection of aircraft skin damage based on rear positioning[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1115002.
- [7] Chen M Y, Tang Y C, Zou X J, et al. High-accuracy multi-camera reconstruction enhanced by adaptive point cloud correction algorithm[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 122: 170-183.
- [8] 陈明猷, 唐昀超, 邹湘军, 等. 复杂环境下异形多目标识别与点云获取算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 111505.  
Chen M Y, Tang Y C, Zou X J, et al. Multi-shaped targets recognition and point clouds acquisition algorithm in complex environment[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 111505.
- [9] Tang Y C, Li L J, Feng W X, et al. Binocular vision measurement and its application in full-field convex deformation of concrete-filled steel tubular columns[J]. *Measurement*, 2018, 130: 372-383.
- [10] 梁秀满, 刘文涛, 牛福生, 等. 基于机器视觉的浮选气泡体积和表面积测量研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1215009.  
Liang X M, Liu W T, Niu F S, et al. Research on measurement of volume and surface area of flotation bubbles based on machine vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1215009.
- [11] Wang W J, Zhang A, Wang K C P, et al. Pavement crack width measurement based on Laplace's equation for continuity and unambiguity[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2018, 33(2): 110-123.
- [12] Kim H, Ahn E, Cho S, et al. Comparative analysis of image binarization methods for crack identification in concrete structures[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 99: 53-61.
- [13] Zou Q, Zhang Z, Li Q, et al. DeepCrack: learning hierarchical convolutional features for crack detection[J]. *IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2018, 28(3): 1498-1512.
- [14] Zhang A, Wang K C P, Fei Y, et al. Automated

- pixel-level pavement crack detection on 3D asphalt surfaces with a recurrent neural network[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2019, 34(3): 213-229.
- [15] Wang M Z, Cheng J C P. A unified convolutional neural network integrated with conditional random field for pipe defect segmentation[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2020, 35(2): 162-177.
- [16] 李强, 曾曙光, 郑胜, 等. 基于机器视觉的陶瓷瓦表面裂纹检测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(8): 081004.  
Li Q, Zeng S G, Zheng S, et al. Machine vision based detection method for surface crack of ceramic tile[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(8): 081004.
- [17] Qiu S, Wang W J, Wang S F, et al. Methodology for accurate AASHTO PP67-10-based cracking quantification using 1-mm 3D pavement images[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2017, 31(2): 04016056.
- [18] 周颖, 刘彤. 基于计算机视觉的混凝土裂缝识别[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(9): 1277-1285.  
Zhou Y, Liu T. Computer vision-based crack detection and measurement on concrete structure[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(9): 1277-1285.
- [19] Kim H, Lee J, Ahn E, et al. Concrete crack identification using a UAV incorporating hybrid image processing[J]. *Sensors*, 2017, 17(9): 2052.
- [20] 朱苏雅, 杜建超, 李云松, 等. 采用 U-Net 卷积网络的桥梁裂缝检测方法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2019, 46(4): 35-42.  
Zhu S Y, Du J C, Li Y S, et al. Method for bridge crack detection based on the U-Net convolutional networks[J]. *Journal of Xidian University*, 2019, 46(4): 35-42.
- [21] Luo Q J, Ge B Z, Tian Q G. A fast adaptive crack detection algorithm based on a double-edge extraction operator of FSM[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 204: 244-254.
- [22] 雷子毅. 基于深度学习的复杂背景水坝表面裂纹视觉检测[D]. 广州: 华南农业大学, 2020.  
Lei Z Y. Visual detection of dam surface cracks on complex background based on deep learning[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020.
- [23] Zhang T Y, Suen C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns[J]. *Communications of the ACM*, 1984, 27(3): 236-239.