

文章编号: 2095-2163(2021)08-0112-06

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

融合多特征因素的像素级裂缝检测

谢丹, 贺福强, 何昊, 纪家平

(贵州大学机械工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 针对道路或墙面等混凝土建筑结构裂缝视觉检测方法中, 裂缝实际宽度被拓宽, 引起测量误差, 且对比度低的浅层裂缝信息易被丢失等问题, 提出了一种融合多特征因素的像素级裂缝检测方法。该方法通过分析裂缝的结构特点和纹理信息, 提出基于纹理各向异性的像素级灰度、强度和梯度特征的裂缝识别方法, 利用图像像素最小路径中最小权重与最大权重的比值作为波动因子, 通过像素本身的灰度信息与周围环境的差异性, 并结合最小路径上的纹理结构, 来确定裂缝与背景之间的分割线。根据 PI、PG 和 FFA 的像素特征, 采用融合多特征因素检测裂缝。实验表明: 该算法检测复杂环境下的沥青道路或墙面裂缝表现出良好的鲁棒性, 可快速、准确地检测出裂缝。

关键词: 混凝土; 裂缝检测; 图像分割; 特征融合

Pixel level crack detection based on fusion of multi feature factors

XIE Dan, HE Fuqiang, HE Hao, JI Jiaping

(School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

[Abstract] In view of the problems that the actual width of cracks is widened, the measurement error is caused, and the shallow crack information with low contrast is easy to be lost in the visual detection method of concrete building structure cracks such as road or wall, a pixel level crack detection method integrating multi feature factors is proposed. Firstly, by analyzing the structural characteristics and texture information of cracks, a crack recognition method based on pixel level gray intensity and gradient features with different texture orientations is proposed. Then, the ratio of the minimum weight to the maximum weight in the minimum path of image pixels is used as the fluctuation factor, and the difference between the gray information of pixels and the surrounding environment is analyzed, The segmentation line between the crack and the background is determined by combining the texture structure on the minimum path. Finally, according to the pixel features of PI, PG and FFA, multi feature factors are fused to detect cracks. The experimental results show that the algorithm has good robustness in detecting asphalt road or wall cracks in complex environment, and can detect cracks quickly and accurately.

[Key words] concrete; crack detection; image segmentation; feature fusion

0 引言

混凝土建筑结构中裂缝所产生的危害极大, 主要有渗漏危害、碳化危害以及腐蚀危害等^[1]。例如: 中国柘溪大头坝、江苏无锡桥梁、意大利斯塔弗大坝坍塌等^[2]。为了减少此类事故的发生, 工程中常利用监测采集手段, 捕捉裂缝信息, 根据检测到的信息, 及时研究混凝土裂缝的成因, 并修补危害性较大的裂缝^[3]。

目前, 许多基于图像处理的自动裂缝无损检测方法已被提出, 并应用于工程检测中。由于裂纹与背景之间存在明显的强度差异, 强度阈值分割是最常用的方法。文献[3]中提出, 利用形态滤波器预处理图像, 通过基于熵的阈值分割检测确定裂缝; 文献[4]中提出移动平均自适应阈值分割方法, 通过

全局尺度的图像灰度均值与局部裂缝的线性关系, 确定自适应阈值实现裂缝的分割。从特征检测上来说, 文献[5]中, 通过分析裂缝轮廓的长度和曲率, 初步判别裂缝边缘, 随后采用模板搜索方法检测真实裂缝。文献[6]中通过对裂缝脊边缘特性分析, 采用高斯函数及导数, 检测脊边缘的原理进行推导, 基于最小生成树算法连接断裂裂缝。上述算法的优点是检测快速, 在良好的条件下, 检测结果一般合理可靠。但在光照条件不均匀、纹理背景复杂的情况下, 噪声仍然是要面临的艰巨挑战。

近年来, 一些研究人员专注于像素分类, 以实现裂纹分割。在文献[7]中, 提出了基于自由形式各向异性(FFA)的像素级裂纹检测方法; 文献[8-9]中选择端点的最小路径, 以代价函数为约束条件检测裂纹。该方法提高了实时性和抗干扰性能, 通过

作者简介: 谢丹(1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像处理与模式识别; 贺福强(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 机器视觉与模式识别。

收稿日期: 2021-05-10

哈尔滨工业大学主办 ◆ 专题设计与应用

将像素与其周围的上下文信息相结合,像素级检测算法在裂缝的一般拓扑纹理中表现出鲁棒性和可用性。然而,受自然环境因素影响的基础设施裂缝,往往伴随着渗水、混凝土表面剥落等情况。由于裂纹与这些扰动具有相似的强度值,因此在特征提取时,则会有大量的错误区域信息被带入。事实上,如何实现高效、全局、准确的自动裂纹检测,仍然是一个艰巨的挑战。

本文提出了一种基于最小路径的像素级裂纹检测方法。通过分析不同尺度裂纹的特征,成功地将全局尺度裂纹的连通性和像素级像素特征的差异结合起来。优化了 FFA 方法,提出了一种融合多特征的像素级裂纹检测算法。

1 基于纹理测度的 FFA 裂缝检测

裂缝是不规则连续线状结构,根据整体建筑结构表面破损程度的差异,不同位置上的裂缝呈现不同的灰度强度,且裂缝具有一定的方向性。图像背景周边与裂缝主导方向上有明显的对比度差异,这种局部范围内,主导方向上纹理特征的显著性为检测裂缝目标提供了强有力的依据^[10]。文献[11]中提出基于图形理论自由搜索不同方向上的最小路径(如图 1),利用自由形式路径上的纹理特征,凸显裂缝主导方向上的显著性。根据纹理自由形式各向异性原理(Free-Form Anisotropy, FFA)可知,在自由形式路径上裂缝主导方向的纹理特征,能突出显现裂缝的特征信息。

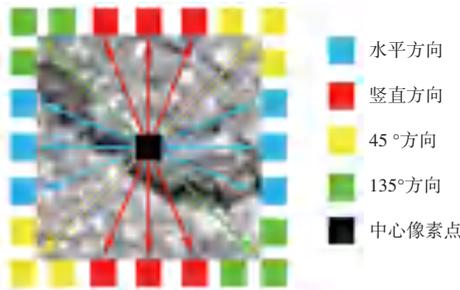


图 1 自由形式路径方向上纹理特征提取

Fig. 1 Texture feature extraction in free form path direction

利用 FFA 裂缝检测原理,不同纹理测度对图像中的裂缝结构进行检测,实验结果如图 2 所示。其中,Ground Truth 为根据裂缝真实宽度绘制的裂缝提取图。从图中可见,FFA 对图像背景噪声有一定的抑制作用,提高了背景与裂缝的对比度。但在此次裂缝检测实验中也发现,FFA 在增强裂缝结构的同时,融入了裂缝边缘周边的背景像素点,拓宽了裂

缝的宽度。从图 3 中可以看出,当裂缝主导方向上出现干扰情况时,FFA 测度会将地面或墙面图像(非裂缝处)①误检为裂缝②。

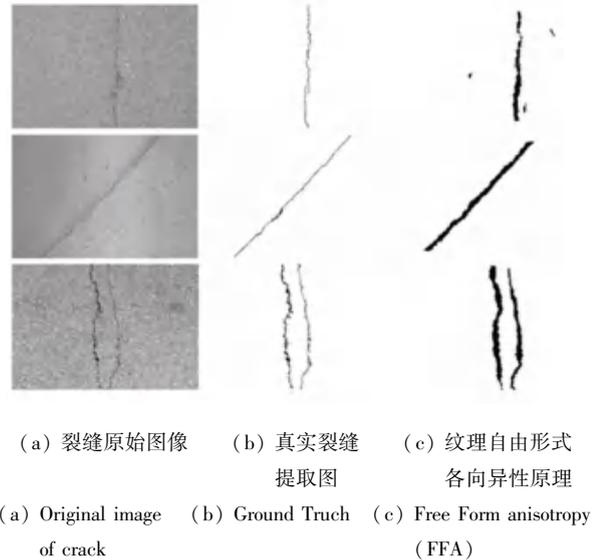
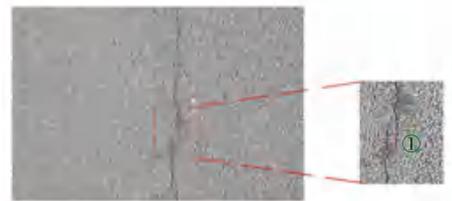


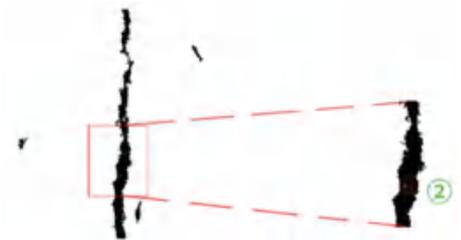
图 2 FFA 描述裂缝结构

Fig. 2 FFA describes the fracture structure



(a) 沥青马路裂缝细节图

(a) Asphalt road crack details



(b) FFA 裂缝检测细节图

(b) FFA crack detection details

图 3 FFA 裂缝检测缺陷

Fig. 3 FFA crack detection defect

在描述裂缝结构的过程中,FFA 测度出现融入裂缝边缘背景非裂缝点情况的主要问题,在于该方法忽略了裂缝点本身显著的灰度强度特征,以及裂缝边缘梯度变化,只考虑了图像像素点各方向最小路径上纹理一致性程度。为了准确地检测出裂缝点,本文提出结合邻域信息的最小路径像素级裂缝

检测方法,实现了融合裂缝的灰度强度特征测度 PI ,以及边缘梯度特征测度 PG 的多特征描述裂缝特性的方法。

2 基于最小路径的像素级裂缝检测方法

2.1 像素灰度强度特征 PI 测度

裂缝检测中最突出、最易识别的特征之一就是灰度强度。裂缝的灰度强度与图像背景的灰度强度存在明显差异,但仅靠图像灰度强度差异,对识别裂缝有一定的局限性,需要提高像素点在局部范围内的辨别度。若将周围环境的纹理与像素本身的灰度特性相结合,以更广阔的视野来描述像素点的灰度强度特征,可提高像素点在局部范围内的辨别度。根据 FFA 纹理测度方法可知,在不同方向上最小路径的权值差异,反映了图像像素中周围区域的灰度强度变化程度。当 FFA 测度越大时,该点不同方向上的纹理结构差异则越大,灰度强度变化越明显;反之,说明该点周边区域纹理相似,灰度强度比较均匀。本文提出采用像素点最小路径中最小权值和最大权值的比率作为波动因子,调节像素点灰度强度特征,增强裂缝点与背景点之间的对比度。

在基于自由形式纹理各向异性方法上,搜索像素点各方向上长度为 d 的延伸路径,路径中心为其中心像素点。将同一方向上的延伸路径合并,得到各方向上长度为 $2d-1$ 的最小路径,记为 P_j 。其中, j 表示方向,分别取值为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 。储存最小路径 P_j 上各像素点 x_j^i (其中, i 为最小路径 P_j 上第 i 个像素) 的灰度值。计算 P_j 中最小权值与最大权值的比值,并作为中心像素 x_j^d 的调节系数,得到像素级灰度强度特征 PI :

$$PI = P_j(x_j^d) \times \frac{\min(\sum_{i=1}^{2d-1} P_j(x_j^i))}{\max(\sum_{i=1}^{2d-1} P_j(x_j^i))},$$

$$j \in P\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}. \quad (1)$$

裂缝点的纹理各向异性的一致性程度低,图像灰度权值最小处延伸路径方向与裂缝生长方向一致,而灰度权值最大处延伸路径沿着图像背景方向生长。由公式(1)计算可得,裂缝点本身灰度强度低,则裂缝点的波动因子远小于1,导致强度缩减;背景点纹理各向异性一致性程度高,则其波动因子趋近于1,调节后其强度值基本保持不变,且裂缝和背景的分度度更为明显。

2.2 像素边缘梯度特征 PG 测度

由于裂缝全局灰度不一致以及裂缝周边表皮脱落和渗水等噪声影响,裂缝边缘呈现多种形式,基于单一形式的边缘检测方法识别裂缝结构的效果不佳。通常边缘检测算子(如 Sobel 算子^[12]、Canny 算子^[13]以及 Prewitt 算子^[14]等)对于单一纹理、噪声少、对比度高的图像,识别效果理想。但由于道路或墙面等混凝土建筑结构裂缝周边纹理复杂多变,多种多样的边缘形式,使用常规边缘检测方法检测裂缝边缘,会出现不同程度的偏差。通常检测算子的共性,都是根据少量像素强度变化,描述物体边缘的梯度特征,基于边缘两侧局部邻域像素内的灰度信息确定物体边缘的梯度,其适用范围受到很大局限。

通过延伸式搜索和统计分析,得出自由形式纹理各向异性方向上的纹理结构,更具代表性地反映出像素的特征。本文结合最小路径上的纹理结构,提出像素级的梯度测度,以像素本身灰度信息与周边环境的相似性,来确定裂缝与背景的分割线。像素点最小路径由同一方向上的两条延伸路径合并而成,本文将最大权值路径 P_{\max} 和最小权值路径 P_{\min} 由中心像素 $P(x^d)$ 拆分为4条延伸路径,并进行统计分析,如图4所示。

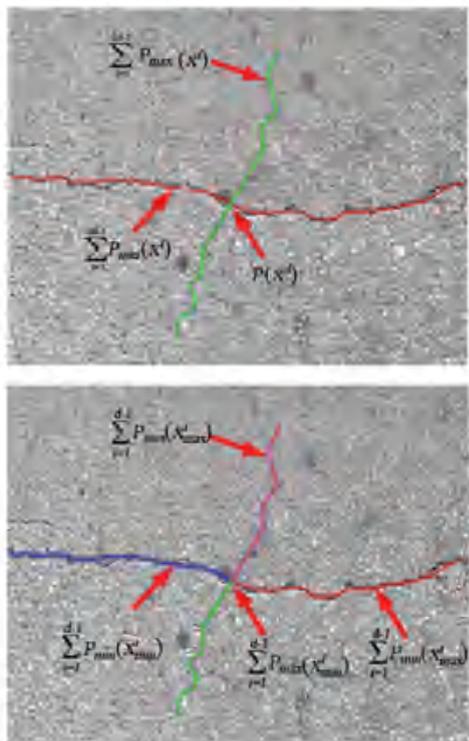


图4 裂缝点的路径示意图

Fig. 4 Path diagram of crack point

由于最大权值路径 P_{\max} 具有抑裂缝性, 最小权值路径 P_{\min} 具有亲裂缝性, 所以裂缝点的 P_{\min} 路径总是沿着裂缝方向, P_{\max} 路径则背驰裂缝, 朝着背景区域生长。根据像素边缘梯度的计算原理, 需将邻域像素灰度差异转化为路径均值与中心像素灰度的相似度。首先, 根据纹理测度 FFA 方法, 搜索出像素点 P_{\max} 和 P_{\min} 方向上长度为 d 的延伸路径, 求出延伸路径上的像素点灰度均值。然后对比延伸路径的均值, 选取 P_{\max} 中较大者和 P_{\min} 中较小者, 最后得出路径均值与中心像素灰度的相似度, 运用公式 (2) 得出像素点的梯度测度 PG :

$PG =$

$$\frac{\left| P_j(x_{\max}^d) - (\max(\sum_{i=1}^{d-1} P_{\max}(x_{\max}^i), \sum_{i=d+1}^{2l-1} P_{\max}(x_{\max}^i))) / d - 1 \right| + c_1}{\left| P_j(x_{\max}^d) - (\min(\sum_{i=1}^{d-1} P_{\min}(x_{\min}^i), \sum_{i=d+1}^{2l-1} P_{\min}(x_{\min}^i))) / d - 1 \right| + c_2} \quad (2)$$

若检测像素为裂缝邻近区域的背景点, 则该点较大的延伸路径均值与本身灰度相似性高, 较小的延伸路径均值与本身灰度相似性低, 故其梯度测度 $PG \ll 1$ 。若检测像素为裂缝边缘点, 则该点较大的延伸路径均值与本身灰度相似性低, 较小的延伸路径均值与本身灰度相似性高, 故其梯度测度 $PG \gg 1$ 。在实验过程中可得, 裂缝整体的梯度测度具有较高的辨别度, 虽存在个别噪声像素点的干扰, 但整体性能稳定, 检测效果良好。

2.3 融合多特征的裂缝提取

像素级灰度强度特征、像素级边缘梯度测度以及像素点的纹理结构各向异性, 从不同角度有效地描述出裂缝的显著性。强度特征突出了裂缝整体在图像全局内的辨别度, 梯度测度和纹理结构各向异性刻画了裂缝点在局部区域的对比度。为了从复杂背景纹理的桥梁裂缝图像中准确提取出裂缝, 同时兼顾算法的实时性能, 本文将两种裂缝特征描述子进行融合, 取其精华去其糟粕, 结合各描述子的优点对像素点进行检测。根据像素级灰度强度描述子判断像素点与裂缝之间的空间距离, 剔除相隔较远的绝大部分背景点, 减少了算法的运算量。基于像素级边缘梯度测度描述子, 确定裂缝与邻域背景的分界线, 像素点的纹理结构各向异性描述子, 用于抑制孤立噪声点的干扰。像素点检测算法总体框架流程如图 5 所示。

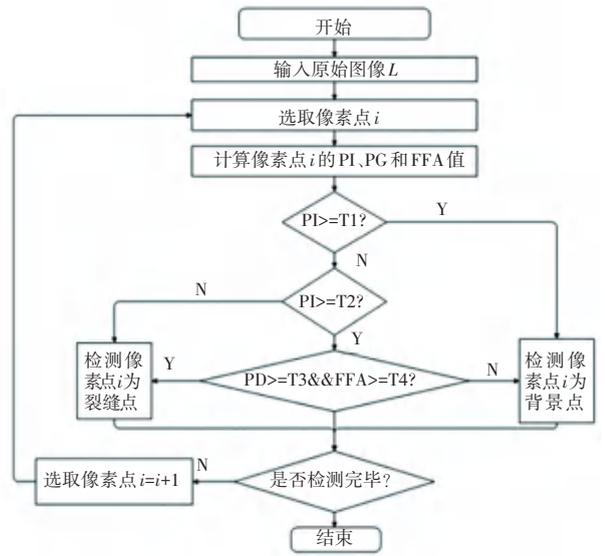


图 5 裂缝检测流程图

Fig. 5 Flow chart of crack detection

3 方法验证

本文提出的最小路径像素级裂缝识别算法由 MATLAB r2020b 软件编程语言实现, 所有实验均在配置为 Intel (R) Xeon (R) CPU E5-1630v4@ 2.80GHz 2.80GHz 和 8GB RAM 的 PC 机上进行。为了客观地评价所提算法的性能, 分别与基于自适应滤波方法 AFM、基于像素级检测方法的 MPS^[12] 和 FFA^[11] 进行了对比实验。实验所使用的裂缝图像来源于沥青马路裂缝 AigleRN 数据集和墙面裂缝 ESAR 数据集。AigleRN 数据集由 38 张分辨率为 991×462 的图像组成, ESAR 数据集由 15 张分辨率为 768×512 的图像组成。这些图像数据集中含有大量的光照不均匀、油斑、渗水、混凝土表皮脱落等噪声, 对裂缝检测算法提出了极大的挑战。

在 AigleRN 数据集 ESAR 数据集上选取具有代表性的裂缝图像进行对比实验, 图 6 和图 7 展示了各对比算法的可视化测试结果。从图 6 和图 7 中可以直观地观察到, AFM 算法检测到的裂缝边缘区分不明显, 背景噪点难以剔除掉, 对噪声过于敏感, 容易产生较明显的误差; FFA 方法检测部分裂缝邻近区域像素点误判为裂缝点, 导致裂缝宽度增加; MPS 算法的检测结果存在较多毛刺, 对于噪声较为敏感, 裂缝容易断裂, 导致裂缝提取不完整。本文所提算法提取的裂缝结构连续且平滑, 抑制噪声能力强, 能准确区分裂缝与背景, 检测效果好。

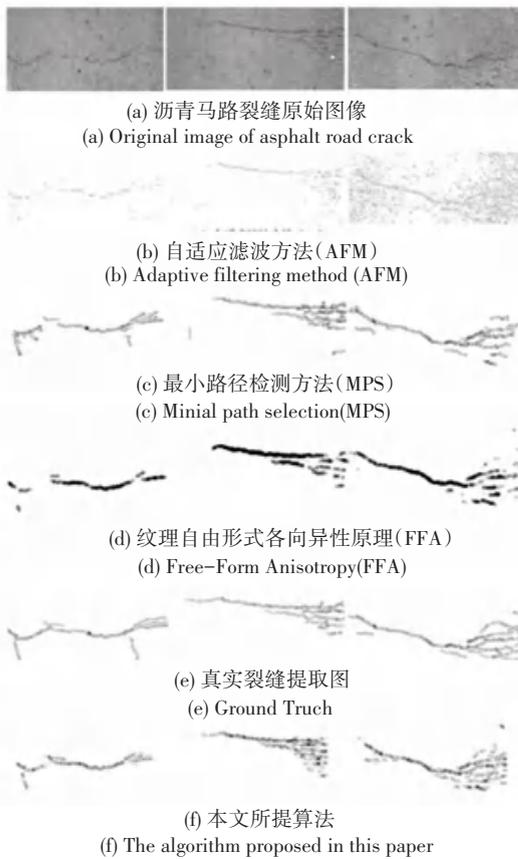


图 6 AigleRN 数据集上的对比实验

Fig. 6 Comparison experiment on aiglern data set

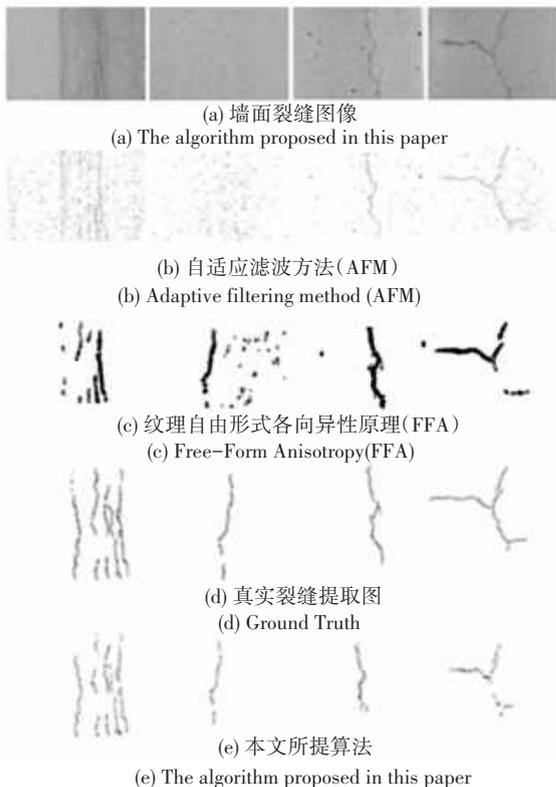


图 7 ESAR 数据集上的对比实验

Fig. 7 Comparative experiment on Esar data set

为客观评估所提算法检测裂缝的有效性,将检测结果与人工标识的 Ground Truth 裂缝图像进行了比较。设:正确检测为裂缝的像素为真阳性(True Positive) TP , 正确检测为背景的像素为真阴性(True Negative) TN , 错误检测为裂缝的像素为假阳性(False Positive) FP , 错误检测为背景的像素为假阴性(False Negative) FN 。则算法检测结果的精确率(Precision)和召回率(recall)可表示为:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (3)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

本文将各算法在 AigleRN 数据集和 ESAR 数据集的图片进行了统计。表 1 统计的实验数据分别为各算法(除自适应滤波 AFM 算法外)检测图 6 和图 7 中裂缝图像的检测结果。

表 1 AigleRN 数据集上的实验对比结果

Tab. 1 Experimental comparison results on aiglern data set

	FFA		MPS		Ours	
	P	R	P	R	P	R
1	0.190	0.810	0.728	0.946	0.753	0.725
2	0.262	0.815	0.791	0.889	0.810	0.463
3	0.387	0.863	0.654	0.662	0.916	0.343
4	0.236	0.741	0.368	0.825	0.581	0.473
5	0.305	0.695	0.432	0.472	0.612	0.668
6	0.294	0.706	0.564	0.736	0.876	0.324
7	0.255	0.745	0.658	0.502	0.773	0.328
均值	0.275 6	0.767 9	0.599 2	0.718 9	0.760 1	0.474 9

在对图像进行像素级逐一客观、科学的定量分析中,对比算法在各数据集上的检测结果,从图 8 及图 9 中可以直观地看出,本文所提算法应对多种不同纹理结构的裂缝图像均表现出良好的性能,识别裂缝的精准率更高,检测结果更加接近真实裂缝。为保证裂缝与背景准确划分,但还存在召回率未达到最佳期望值且不稳定的问题,但差距甚微,对于目前裂缝检测算法已有较大提升。

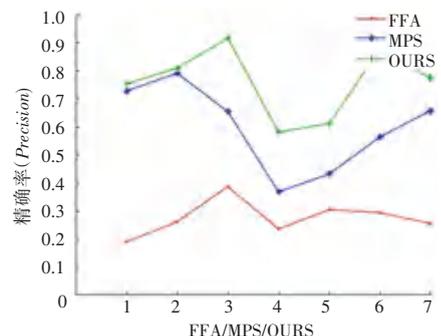


图 8 基于 FFA/MPS/OURS 算法边缘检测的精准率

Fig. 8 Accuracy of edge detection based on FFA / MPS / ours algorithm

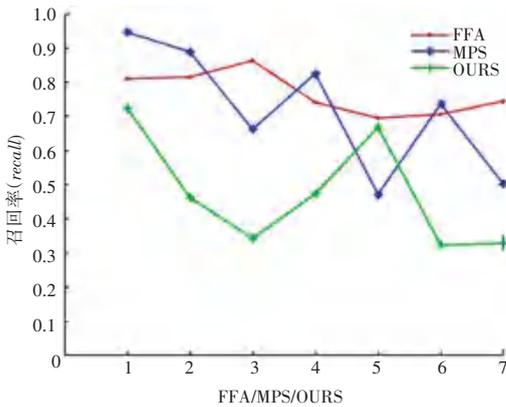


图 9 基于 FFA/MPS/OURS 算法边缘检测的召回率

Fig. 9 Recall rate of edge detection based on FFA / MPS / ours algorithm

4 结束语

为了解决现有裂缝分割算法存在拓宽实际裂缝的宽度引起测量误差、易丢失部分低对比度低浅层裂缝等问题,提出基于纹理各向性的最小路径像素级裂缝识别方法。通过分析裂缝的纹理和结构,提出基于纹理各向性的像素级强度和梯度特征,融合多特征裂缝检测。最后在两个具有挑战性的公共裂缝图像数据集上进行实验验证。实验结果表明:所提算法在保证裂缝检测效果具有较高精确度的前提下,有效提高了检测效率,算法能拥有较高的精准率和较低的召回率,平均精准率能达到 60% 以上,整体性能良好。

参考文献

[1] 赵钟鹏. 道路桥梁施工中的裂缝成因及预防措施[J]. 交通世界, 2017(9): 90-91.

[2] 陆译. 斯塔弗大坝坍塌[J]. 劳动保护, 2007(3): 78-81.

[3] 苏雨. 基于机器学习的某混凝土坝裂缝成因与预警研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.

[4] OLIVEIRA H, CORREIA P L. Automatic road crack segmentation using entropy and image dynamic thresholding [C]// 2009 17th European Signal Processing Conference. IEEE, 2009: 622-626.

[5] 韦春桃, 余俊辰, 赵平, 等. 基于自适应阈值的细小裂缝与微灰度差异裂缝自动检测方法[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 58-63.

[6] 陈从平, 邹雷, 汪卫. 基于轮廓特征的水下混凝土结构表面裂缝检测算法[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(5): 1496-1498.

[7] 王世芳, 车艳丽, 李楠, 等. 一种基于多尺度脊边缘的沥青路面裂缝检测算法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(4): 32-41.

[8] NGUYEN T S, STEPHANE BÊGOT, DUCULTY F, et al. Free-form anisotropy: A new method for crack detection on pavement surface images [C]// 18th IEEE International Conference on Image Processing. Brussels, Belgium, IEEE, 2011: 1069-1072.

[9] AMHAZ R, CHAMBON S, IDIER J, et al. A new minimal path selection algorithm for automatic crack detection on pavement images [C]// 2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). IEEE, 2014: 788-792.

[10] ROLI F. Measure of texture anisotropy for crack detection on textured surfaces [J]. Electronics Letters, 1996, 32(14): 1274-1275.

[11] NGUYEN T S, STEPHANE BÊGOT, DUCULTY F, et al. Free-form anisotropy: A new method for crack detection on pavement surface images [C]// 18th IEEE International Conference on Image Processing. Brussels, Belgium, IEEE, 2011: 1069-1072.

[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] 王小俊, 刘旭敏, 关永. 基于改进 Canny 算子的图像边缘检测算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(14): 196-198, 202.

[14] 张玲艳. 基于 Canny 理论的自适应边缘检测方法研究[D]. 西安: 西北大学, 2009.

[15] AMHAZ R, CHAMBON S, JÉRME IDIER, et al. Automatic Crack Detection on Two - Dimensional Pavement Images; An Algorithm Based on Minimal Path Selection [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(10): 2718-2729.

(上接第 111 页)

[8] HINTON G E, OSINDERO S, TEH Y. A fast learning algorithm for deep belief nets [J]. Neural Computation, 2006, 18: 1527-1554.

[9] HOSANG J H, OMRAN M, BENENSON R, et al. Taking a deeper look at pedestrians [C]// 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Boston, 2015: 4073-4082.

[10] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep Residual Learning for Image Recognition [J]. IEEE, 2016.

[11] SOLOVYEV R, WANG W. Weighted Boxes Fusion: ensembling boxes for object detection models [J]. arXiv, 2019.

[12] IZMAILOV P, D PODOPRIKHIN, GARIPPOV T, et al. Averaging Weights Leads to Wider Optima and Better Generalization [J]. 2018.