

基于图像连通域的桥梁裂缝识别算法应用研究

黄鹏¹,范文哲^{2,3},胡玲玲⁴,吴迪^{2,3}

(1.广州市高速公路有限公司,广东广州 510199;2.广东建科交通工程质量检测中心有限公司,广东广州 512099;
3.广东省交通基础设施智能检测工程技术研究中心,广东广州 528051;4.中山大学,广东广州 510275)

摘要:针对桥梁裂缝识别算法精度不高、应用效果不佳的问题,该文以桥梁表面高精度图像为研究对象,提出一种基于图像连通域特征与最大内切圆计算原理的裂缝识别算法(CIACM)。首先,采用灰度化、匀光滤波和边缘检测等传统图像处理算法将裂缝边缘特征显现;随后,基于连通域特征与最大内切圆计算原理进行裂缝识别,并筛选裂缝最大宽度处。试验结果表明:该算法计算绝对误差不超过0.02 mm,相对误差平均值为2.47%,标准差为1.52%;对于宽度<0.2 mm的细微裂缝,相对误差平均值为4.71%,标准差为1.54%,满足桥梁检测精度要求。研究表明:CIACM算法可有效提升裂缝识别精度,尤其适用于细微裂缝检测,为桥梁表面损伤自动化评估提供了可靠的技术支持。

关键词:桥梁检测;裂缝识别;图像处理;连通域;最大内切圆

中图分类号:U445.7

文献标志码:A

Application of Bridge Crack Recognition Algorithm Based on Image Connected Domain

HUANG Peng¹, FAN Wenzhe^{2,3}, HU Lingling⁴, WU Di^{2,3}

(1. Guangzhou Expressway Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510199, China; 2. Guangdong Traffic Engineering Quality Testing Center of Building Academy Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 512099, China; 3. Guangdong Transportation Infrastructure Intelligent Inspection Engineering Technology Research Center, Guangzhou, Guangdong 528051, China;
4. Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract: To address the issues of low accuracy and poor practical performance in existing bridge crack recognition algorithms, this paper took the high-precision image of a bridge surface as the research object and proposed a crack recognition algorithm based on the characteristics of image connected domain and the calculation principle of the maximum inscribed circle (CIACM). Firstly, traditional image processing algorithms such as graying, uniform light filtering, and edge detection were used to show the edge features of cracks. Then, based on the characteristics of the connected domain and the calculation principle of the maximum inscribed circle, the crack was identified, and the maximum width of the crack was screened. The experimental results show that the absolute error of the algorithm is not more than 0.02 mm; the average relative error is 2.47%, and the standard deviation is 1.52%. For fine cracks with widths <0.2 mm, the average relative error and standard deviation are 4.71% and 1.54%, respectively, meeting bridge inspection precision requirements. The study demonstrates that the CIACM algorithm significantly improves crack recognition precision, particularly for fine cracks, and it provides reliable technical support for the automated assessment of bridge surface damage.

Keywords: bridge inspection; crack recognition; image processing; connected domain; maximum inscribed circle

0 引言

混凝土结构裂缝^[1-2]是桥梁常见病害之一,它的存在严重影响了桥梁的美观性、耐久性和结构安全性。传统的桥梁结构表面裂缝检测方法依赖经验丰富的

检测员人工标记,并通过肉眼识别裂缝长度与宽度,但该检测方法耗时长、安全风险高、人为主观性强^[3]。这些问题促使基于计算机视觉的检测方法及无人机、

收稿日期:2023-09-04(修改稿)

基金项目:国家科技攻关计划项目(编号:G20190130009);国家自然科学基金资助项目(编号:12172388)

作者简介:黄鹏,男,硕士,高级工程师.E-mail:4759456@qq.com

桥检车等机器人检测平台的出现^[4-6]。

图像法采用摄像设备获取桥梁结构外观影像进行分析,适用于桥梁结构外观缺陷自动化检测^[7],通过收集桥梁结构外观可视化数据,利用图像处理技术提取相关缺陷信息以进行桥梁结构检测、分类和评估。工程意义在于通过对桥梁结构进行损伤识别、状态评估与养护决策,实现可预见损坏、可延缓抗力衰减、可恢复功能退化等功能,进而维持桥梁的整个使用周期,确保其安全性。

目前,桥梁结构外观裂缝识别技术的研究已经取得了一定的成果。Talab等^[8]采用灰度化和滤波器来消除噪声,并利用Otsu进行裂缝阈值分割。虽然基于图像处理的算法计算效率高,但是对于背景噪声复杂的图像,其阈值分割性能不稳定;Chun等^[9]采用梯度提升决策树设计裂缝检测算法,输入裂缝的颜色、梯度和纹理特征,提出了一种基于图像处理的光梯度增强机自动裂纹检测方法;黄宁宁^[10]采用边缘点线、切线垂直原理进行裂缝识别,发现裂缝边缘的弯曲与拐角会导致识别误差偏大,算法复杂,运算量大。

垂线法是通过拟合曲线来获得裂缝的边缘和中

心线,并以裂缝两侧边缘之间的垂线长度为裂缝宽度。然而,由于裂缝的形状复杂多变,需要不同曲率的曲线进行拟合,因此其准确性受到很大的影响。且桥梁结构表面裂缝形态各异、图像背景复杂、环境噪声干扰大等,采用传统数字图像处理方法识别桥梁裂缝效果不佳,干扰过滤与算法稳定性不足,难以满足工程需求。

为适用于复杂的图像背景、形状各异的裂缝,并能提高识别精度,本文提出了一种基于图像连通域特征^[11]和最大内切圆计算原理的裂缝识别算法(CIACM)。考虑裂缝骨架线走向,对横、纵、斜向裂缝进行边缘轮廓检测,自动计算裂缝平均宽度并筛选出最大宽度位置。

1 桥梁结构图像处理理论及方法

桥梁结构图像处理研究内容主要包括图像预处理与裂缝识别两部分,图像预处理中包含灰度转化、匀光滤波、图像二值化;裂缝识别基于连通域分析与最大内切圆原理,通过骨架提取定位裂缝最大宽度,最终实现裂缝参数的自动化检测。具体技术路线如图1所示。

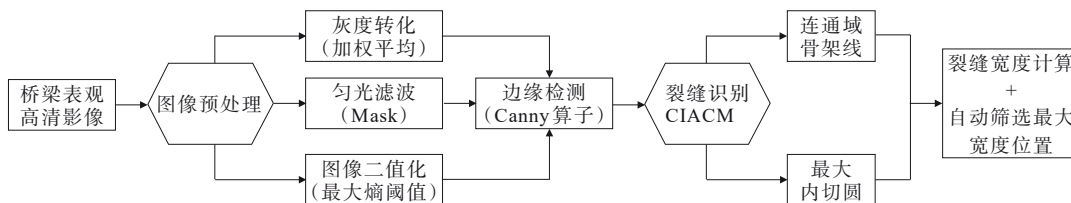


图1 技术路线图

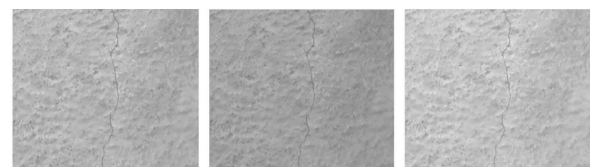
Figure 1 Technical roadmap

当裂缝图像解析度较低时,不仅裂缝边缘可能会出现较为严重的阶梯形状,而且可能出现裂缝边缘不闭合的现象^[12]。桥梁智能检测前端动态采集速度为0.15 m/s,采用ois光学防抖和传感器位移防抖技术。影像传感器按照距离目标物0.8~1.5 m垂直正射布置进行拍摄,图像分辨率为8 000×6 000,获得的RAW图像经过ISP处理后,测量并标定的物像比为0.05~0.09 mm/pix,图像精度可达到0.1 mm以内。

本文使用距离0.8 m垂直正射获取的图像样本,物像比为0.05 mm/pix,满足裂缝超限判别的检测需求。采集时会受到大气变化、光照捕捉、设备噪声等环境因素的影响,因而原始图像,存在噪声,干扰裂缝识别。因此,需要通过图像预处理显现裂缝特征,并根据不同图像处理算法筛选出最优路线。

1.1 灰度转化

桥检传感器(BIDS)采集原始图像属于RGB彩色模型,像素由3色通量(红、绿、蓝)组成,各像素RGB分量配置0~255范围的灰度值,直接处理彩色图像的运算量较大。因此,需要将RGB彩色图像转换为灰度图。灰度转化方法^[13]主要包括:最大值法、平均值法、加权平均法。不同灰度化方法对图像的处理效果见图2。



(a) 原始图像 (b) 平均值法 (c) 加权平均值法

图2 不同灰度化方法处理效果

Figure 2 Processing effect of different graying methods

由于桥梁结构表观图像彩色区分度不高,采用平均值法与加权平均法计算图像灰度值,如式(1)、(2)所示:

$$V_{\text{Gray}} = (R + G + B) / 3 \quad (1)$$

$$V_{\text{Gray}} = W_R + W_G + W_B, W_R = 0.299, \\ W_G = 0.587, W_B = 0.114 \quad (2)$$

式中: V_{Gray} 为灰度值,代表黑白图像中点的颜色深度; W_R 、 W_G 与 W_B 代表 R 、 G 、 B 3个色通量的加权值。

由图2可知:RGB原始图像进行灰度转化时,采用加权平均值法比平均值法得到图像的对比度和亮度更突出,裂缝形态更显著。

1.2 匀光滤波

桥梁结构存在于三维空间,光线照射各构件不同部位,其均匀性较差。采集图像中,背景与目标物的灰度值分布区间存在交集,图像二值化处理不能精准、彻底地分离图像内容,无法进行后续计算。分别采用匀光滤波处理^[14]Wallis算法和Mask算法进行光照不一致性消除。在室内设置不均匀光照工况进行测试,对比匀光滤波和二值化结果(图3)。

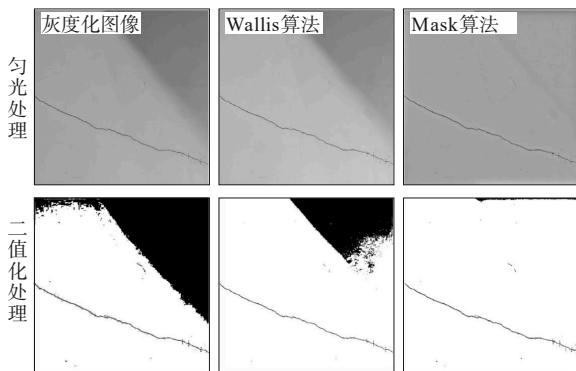


图3 不同匀光滤波及二值化处理结果

Figure 3 Treatment effects of different uniform light filtering and binarization methods

由图3可知:相比Wallis算法,Mask算法处理的图像光照更均匀;对比同一种二值化处理方法设置相同阈值的处理结果,Mask算法消除干扰更多,最大限度地保证裂缝的连续与完整,有助于保证裂缝边缘的检测精度。

1.3 二值化处理

将灰度转化、匀光处理后的裂缝图像分别采用最佳阈值法^[15]与最大熵阈值法^[16]进行二值化处理,通过迭代和阈值分割来获取裂缝图像的最佳处理效果(图4)。

由图4可知:相比最佳阈值法,最大熵阈值法在

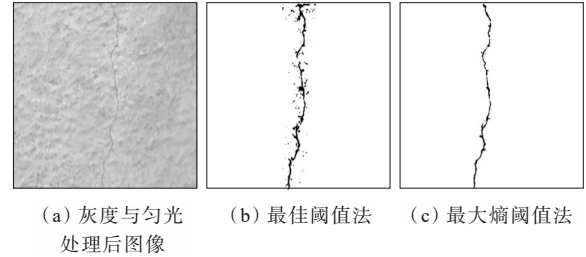


图4 不同二值化方法处理效果

Figure 4 Treatment effects of different binarization methods

不同模拟测试场景下,噪声干扰处理效果更好,输出裂缝目标更清晰,便于进行裂缝边缘检测。

裂缝识别算法包括边缘检测^[17]。边缘是指图像中各像素灰度值呈现阶跃变化或者正态分布变化的像素集合,这些像素集合定义裂缝的轮廓与形状;裂缝宽度计算通过图像空域处理^[18](图像点运算)得到单像素代表的实景尺寸(物像比 ζ),进而计算裂缝宽度。

1.4 边缘检测

目前边缘检测的主要误差为:边缘定位误差、噪声误判为边缘及丢失有效边缘^[19]。为减少误差,选择合适的边缘检测算法来进行裂缝特征检测至关重要,利用图像空间域锐化中的梯度算子法进行边缘检测,选择Roberts算子、Sobel算子及Canny算子^[20]进行测试,对比结果如图5所示。

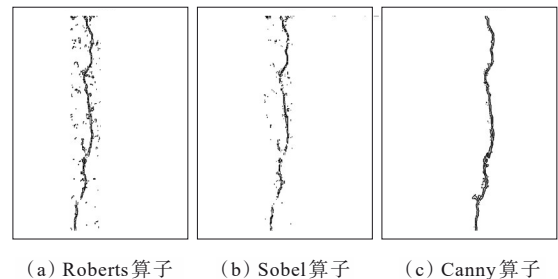


图5 不同边缘检测算子处理效果对比图

Figure 5 Comparison of processing effects of different edge detection operators

由图5可知:Roberts算子和Sobel算子虽然裂缝边缘定位误差较小,但裂缝边缘完整性较差,丢失部分有效边缘信息,且Roberts算子受到噪声干扰下误判较多;而Canny算子保证了裂缝轮廓完整性且噪声干扰的消除效果较好,适用于裂缝边缘检测。

2 桥梁裂缝识别算法

2.1 裂缝识别算法

图像经过以上算法处理后,进行裂缝宽度计

算^[21],连通域是指具有相同像素值且位置相邻目标像素点组成的区域。

本文利用正交骨架法^[22]计算裂缝的骨架线,找出内切圆骨架线上的圆心像素点坐标,计算包含此裂缝水平方向的最小矩形,轮廓内切圆的半径 R 最大不超过该最小外接矩形最小边长的 $1/2$,计算各位置的实际裂缝宽度 d ,筛选出裂缝最大宽度 d_{max} 。相较于垂线法,本方法无须对裂缝边缘与中心线做截断处理。

连通域精细化操作是指通过亚像素分割处理,将所有像素在原位置分割为 4 个像素,从而使提取的裂缝边缘更加平顺和细致,如图 6 所示。连通域精细化操作 n 次,像素数量变为原来的 2^{n-1} 倍,连通域精细化^[23]操作使得裂缝行列方向的像素数均为偶数,由于计算机图像识别最小单元为单个像素,故程序提取中心线位置偏离于理论位置 0.5 像素,如图 7 所示。

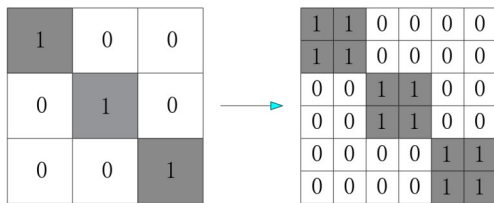


图 6 连通域精细化(亚像素分割, 3×3 均值滤波算子卷积)

Figure 6 Connected domain refinement (sub pixel segmentation, 3×3 mean filter operator convolution)

则通过式(3)计算各点裂缝宽度:

$$d = \frac{\zeta(2R + 1)}{2^{n-1}}, d_{max} = \max\{d_1, d_2, \dots, d_n\} \quad (3)$$

式中: d 为正交骨架线各点的裂缝宽度检测值; ζ 为图像物像比; R 为骨架线上圆心点到裂缝边缘轮廓各点距离的最小像素值 (pix); n 为连通域精细化操作次数; d_{max} 为该段裂缝的最大宽度。

2.2 算法效果对比

本研究采用工业相机、通信模组等改装高精度桥检传感器(BIDS),相机参数与采集参数说明见表 1。制定室内准确性验证方案,选择混凝土试块上不同位置、宽度的裂缝进行标注与识别,如图 8 所示。

采用裂缝测宽仪(型号:HC-CK102)测量裂缝各位置的宽度,取 3 次测量的平均值作为实测宽度,对比边缘点线法、切线垂直法、CIACM 3 种算法计算的准确性,对比结果见表 2。

由表 2 裂缝测量结果(仅列出部分结果)对比可

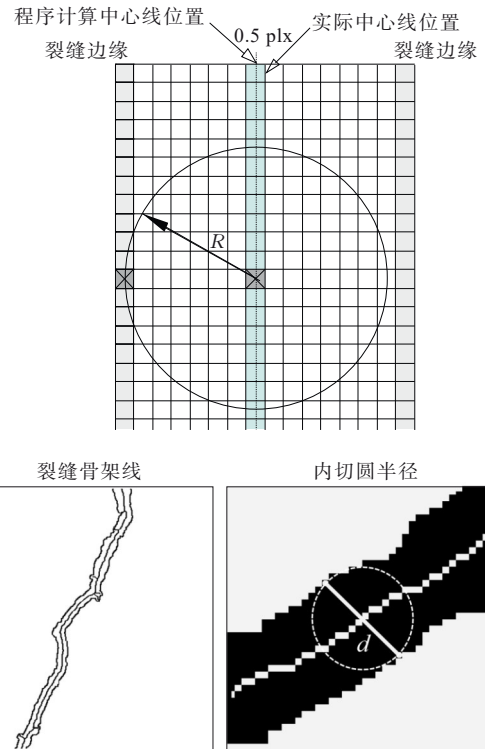


图 7 裂缝宽度识别

Figure 7 Crack width recognition

表 1 相机参数与采集参数

Table 1 Camera parameters and acquisition parameters

图像采集设备名称	桥检传感器(BIDS)
相机像素	5 000 万
图像分辨率	8 000 × 6 000
传感器类型	IMX707Y(CMOS)
传感器尺寸	1/1.56 inch
垂直拍摄距离	0.8 m
物像比 ζ	0.05 mm/pix

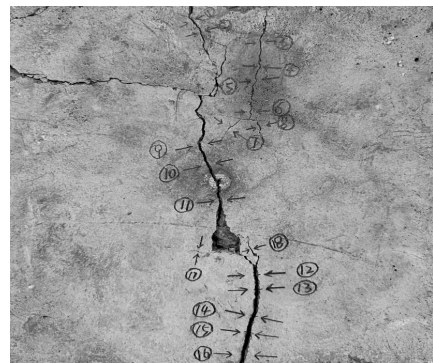


图 8 混凝土试块裂缝样本

Figure 8 Crack sample of concrete test block

以看出:CIACM 算法针对宽度 0.2 mm 以下裂缝,相对误差平均值为 4.71%,低于边缘点线法和切线垂直

表2 裂缝测量结果对比(宽度0.2 mm以下)

Table 2 Comparison of crack measurement results (below 0.2 mm)

序号	实测宽度/ mm	边缘点线法		切线垂直法		CIACM法	
		计算宽度/mm	误差/%	计算宽度/mm	误差/%	计算宽度/mm	误差/%
1	0.060	0.068	+13.33	0.065	+8.33	0.062	+6.67
2	0.080	0.089	+11.25	0.075	-6.25	0.077	-3.75
3	0.100	0.094	-6.00	0.111	+11.00	0.106	+6.00
4	0.160	0.171	+6.88	0.147	-8.13	0.155	-3.13
5	0.200	0.217	+8.50	0.221	+10.50	0.208	+4.00
相对误差平均值/%		9.19		8.84		4.71	
相对误差标准差/%		3.06		1.93		1.54	

法对应的9.19%和8.84%，其标准差为1.54%，均低于另外两种算法；对于宽度大于0.2 mm的裂缝，3种算法计算误差平均值均小于5%。

3 工程验证与比对测试

本研究依托广东省、海南省10条高速公路上100多座桥梁，测试裂缝图像样本来源于空心板、T梁、小箱梁桥梁底板、腹板等，主要分布于腹板跨中竖向裂缝及端侧斜向裂缝。运用裂缝宽度识别算法(CIACM)进行图像处理 and 裂缝识别，图像采集过程、裂缝识别效果与识别结果对比如图9~11所示。



图9 图像采集过程

Figure 9 Image acquisition process

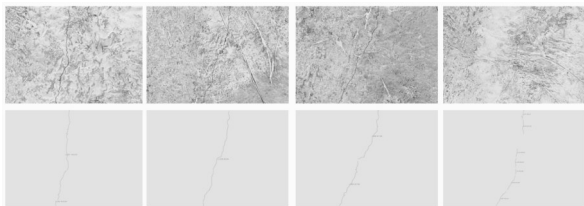


图10 测量对比结果

Figure 10 Measurement comparison results

由识别结果对比可知：实际工程中针对500处裂缝(宽度0.08~0.32 mm)采用CIACM算法进行识别，裂缝宽度识别计算误差最大值约为-0.014 mm，相对误差最大值为5.36%，平均值为2.47%，标准差为1.52%；详细结果见表3和图11，这表明该算法能够满足桥梁裂缝检测的精度要求。

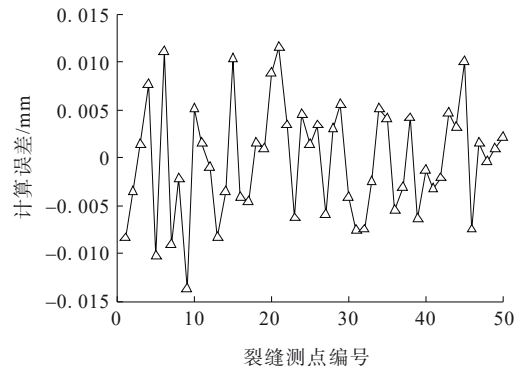


图11 识别结果对比

Figure 11 Comparison of identification results

表3 部分裂缝测量结果对比

Table 3 Comparison of crack measurement results

序号	实测宽度/mm	CIACM法		序号	实测宽度/mm	CIACM法	
		计算宽度/mm	误差/%			计算宽度/mm	误差/%
1	0.30	0.291 6	-0.84	26	0.20	0.203 4	0.34
2	0.30	0.296 5	-0.35	27	0.20	0.194 0	-0.60
3	0.28	0.281 4	0.14	28	0.20	0.203 1	0.31
4	0.28	0.287 6	0.76	29	0.20	0.205 6	0.56
5	0.28	0.269 7	-1.03	30	0.20	0.195 8	-0.42
6	0.26	0.271 1	1.11	31	0.20	0.192 4	-0.76
7	0.26	0.250 9	-0.91	32	0.18	0.172 5	-0.75
8	0.26	0.257 8	-0.22	33	0.18	0.177 5	-0.25
9	0.26	0.246 2	-1.38	34	0.18	0.185 1	0.51
10	0.26	0.265 1	0.51	35	0.18	0.184 1	0.41
11	0.24	0.241 5	0.15	36	0.18	0.174 5	-0.55
12	0.24	0.239 0	-0.10	37	0.16	0.156 9	-0.31
13	0.24	0.231 7	-0.83	38	0.16	0.164 2	0.42
14	0.24	0.236 4	-0.36	39	0.16	0.153 6	-0.64
15	0.24	0.250 4	1.04	40	0.16	0.158 8	-0.12
16	0.24	0.235 8	-0.42	41	0.16	0.156 8	-0.32
17	0.24	0.235 4	-0.46	42	0.15	0.147 9	-0.21

续表3

序号	实测宽度/mm	CIACM法		序号	实测宽度/mm	CIACM法	
		计算宽度/mm	误差/%			计算宽度/mm	误差/%
18	0.24	0.2415	0.15	43	0.14	0.1447	0.47
19	0.22	0.2209	0.09	44	0.14	0.1432	0.32
20	0.22	0.2289	0.89	45	0.14	0.1501	1.01
21	0.22	0.2315	1.15	46	0.14	0.1325	-0.75
22	0.22	0.2234	0.34	47	0.12	0.1215	0.15
23	0.20	0.1937	-0.63	48	0.10	0.0996	-0.04
24	0.20	0.2045	0.45	49	0.10	0.1010	0.10
25	0.20	0.2014	0.14	50	0.08	0.0821	0.21
相对误差平均值/%					2.47		
相对误差标准差/%					1.52		

同时,本算法也存在一定的局限性。复杂结构环境下裂缝整体走向线路中存在发散延伸与多条裂缝交错分布的情况,导致裂缝最大宽度位置多为裂缝交叉位置,干扰裂缝骨架线的提取。

4 结论

(1) 利用加权平均值、Mask和最大熵阈值分别进行图像灰度转化、匀光滤波与图像二值化处理。消除了图像中光照不均匀的影响,裂缝形态突出,噪声处理效果好,裂缝边缘的识别精度更高。

(2) 采用Canny算子进行裂缝边缘检测,裂缝宽度识别算法(CIACM)可以精确识别出裂缝各位置处的宽度,并筛选出最大宽度和位置。该算法对宽度小于0.2mm的裂缝具有更高的计算精度,在工程应用中取得了一定的效果。

参考文献:

References:

- [1] 丁威,俞珂,舒江鹏.基于深度学习和无人机的混凝土结构裂缝检测方法[J].土木工程学报,2021,54(增刊1):1-12.
DING Wei, YU Ke, SHU Jiangpeng. Crack detection method of concrete structure based on deep learning and unmanned aerial vehicle[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(sup 1): 1-12.
- [2] 刘昀.预应力混凝土箱梁桥腹板开裂参数影响分析[J].中外公路,2021,41(5):116-119.
LIU Yun. Parametric study on web cracks of PC box-girder bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(5): 116-119.
- [3] 胡兴意,陈波,刘国强,等.融合BIM与影像建模技术的

桥梁检测方法及其应用研究[J].中外公路,2020,40(1):107-112.

- [4] HU Xingyi, CHEN Bo, LIU Guoqiang, et al. Research on bridge detection method combining BIM and image modeling technology and its application[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(1): 107-112.
- [4] 邵永军,王小雄,任晓辉,等.基于计算机视觉的桥梁裂缝半自动检测方法[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(11):176-179.
SHAO Yongjun, WANG Xiaoxiong, REN Xiaohui, et al. Semi-automatic detection method of bridge cracks based on computer vision[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development(Application Technology Edition), 2019, 15(11): 176-179.
- [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.
WEI Chuntao, YU Junchen, ZHAO Ping, et al. Automatic detection method of small cracks and micro grayscale difference cracks based on adaptive threshold[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(1): 58-63.
- [6] 苏卫国,王景霄.基于YOLO v3深度学习算法的道路裂缝识别模型研究[J].中外公路,2023,43(2):58-63.
SU Weiguo, WANG Jingxiao. Research on road crack recognition model based on YOLO v3 deep learning algorithm[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 58-63.
- [7] 尹恒,王立娟,裴尼松,等.三维激光扫描技术在危旧桥梁健康监测中的应用研究[J].中外公路,2021,41(5):187-192.
YIN Heng, WANG Lijuan, PEI Nisong, et al. Research on application of 3D laser in health monitoring of damaged and old bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(5): 187-192.
- [8] TALAB A M A, HUANG Z C, XI F, et al. Detection crack in image using OTSU method and multiple filtering in image processing techniques[J]. Optik, 2016, 127(3): 1030-1033.
- [9] CHUN P J, IZUMI S, YAMANE T. Automatic detection method of cracks from concrete surface imagery using two-step light gradient boosting machine[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2021, 36(1): 61-72.
- [10] 黄宁宇.基于机器视觉的桥梁表面缺陷检测方法研究与实现[D].重庆:西南大学,2021.
HUANG Ningning. Research and implementation of bridge surface defect detection method based on machine vision[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [11] 雷斯达,曹鸿猷,康俊涛.基于深度学习的复杂场景下混凝土表面裂缝识别研究[J].公路交通科技,2020,37(12):80-88.
LEI Sida, CAO Hongyou, KANG Juntao. Study on concrete surface crack recognition in complex scenario based on deep learning[J]. Journal of Highway and

- Transportation Research and Development, 2020, 37(12): 80-88.
- [12] 张辉霖, 李登华, 丁勇. 面向混凝土裂缝检测的级联神经网络算法研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(8): 134-143.
ZHANG Huilin, LI Denghua, DING Yong. Research on cascaded neural network algorithm for concrete crack detection[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(8): 134-143.
- [13] 顾梅花, 王苗苗, 李立瑶, 等. 彩色图像多尺度融合灰度化算法[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(4): 209-215.
GU Meihua, WANG Miaomiao, LI Liyao, et al. Color image multi-scale fusion graying algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(4): 209-215.
- [14] 晋民杰, 黄智, 韩智强, 等. 基于 Matlab 图像处理方法的桥梁裂缝宽度检测研究[J]. 中外公路, 2017, 37(5): 120-123.
JIN Minjie, HUANG Zhi, HAN Zhiqiang, et al. Research on bridge crack width detection based on Matlab image processing method[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(5): 120-123.
- [15] 刚建华, 鲁明珠. 基于机器视觉技术的激光图像亚像素边缘检测[J]. 激光杂志, 2022, 43(10): 92-96.
GANG Jianhua, LU Mingzhu. Subpixel edge detection of laser image based on machine vision technology[J]. Laser Journal, 2022, 43(10): 92-96.
- [16] 韩晓健, 赵志成. 基于计算机视觉技术的结构表面裂缝检测方法研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增刊 1): 418-427.
HAN Xiaojian, ZHAO Zhicheng. Research on detection method of structural surface cracks based on computer vision technology[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(sup 1): 418-427.
- [17] 位营杰, 师红宇. 基于 Canny 算子的优化研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(8): 77-81.
WEI Yingjie, SHI Hongyu. Research on optimization based on Canny operator[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(8): 77-81.
- [18] 邢笑笑, 李杰. 空域滤波图像去噪算法研究[J]. 电子技术与软件工程, 2022(16): 144-147.
XING Xiaoxiao, LI Jie. Research on denoising algorithm of spatial filtering image[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2022(16): 144-147.
- [19] 段明义, 卢印举, 李祖照, 等. 一种改进的桥梁裂缝图像分割方法[J]. 公路交通科技, 2020, 37(11): 63-70.
DUAN Mingyi, LU Yinju, LI Zuzhao, et al. An improved bridge crack image segmentation method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(11): 63-70.
- [20] 郭运冲, 李孟军, 刘名果, 等. 基于 Canny 算子的建筑裂缝边缘检测改进算法[J]. 计算机仿真, 2022, 39(11): 360-365, 410.
GUO Yunchong, LI Mengjun, LIU Mingguo, et al. Improved algorithm for edge detection of building cracks based on Canny operator[J]. Computer Simulation, 2022, 39(11): 360-365, 410.
- [21] 裴耀东. 基于数字图像处理的桥梁结构裂缝与位移测量研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
PEI Yaodong. Research on crack and displacement measurement of bridge structure based on digital image processing[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [22] 代维康, 雷斌, 蒋林. 基于骨架的路面裂纹最大宽度检测[J]. 无损检测, 2021, 43(11): 31-36.
DAI Weikang, LEI Bin, JIANG Lin. Skeleton-based detection of the maximum width of road crack[J]. Nondestructive Testing Technology, 2021, 43(11): 31-36.
- [23] 徐港, 赵恬悦, 蒋赏, 等. 基于多种连通域特征的结构表面裂缝提取方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(10): 52-55, 68.
XU Gang, ZHAO Tianyue, JIANG Shang, et al. Extraction method of structural surface cracks based on multiple connected domain features[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(10): 52-55, 68.