

复杂环境下混凝土桥梁裂缝宽度检测算法

王兴

福建林业职业技术学院建筑工程系,福建 南平 353000

摘要:为提高桥梁裂缝宽度的检测精度,提出复杂环境下混凝土桥梁裂缝宽度检测算法。根据图像的灰度转换,调整裂缝的灰度图;对图像进行归一化处理,增强图像细节特征;在复杂背景下识别裂缝图像,在计算图像灰度直方图的基础上构建灰度累积分布函数,结合灰度图的转换,完成混凝土桥梁裂缝图像的直方图均衡化,采用连续曲线的间距计算原理,设计混凝土桥梁裂缝宽度检测算法,实现混凝土桥梁裂缝的宽度检测。结果表明,此算法在噪声环境、辐射环境下对混凝土桥梁裂缝宽度的检测准确度分别为97.30%、96.57%,为混凝土桥梁的检测质量提供数据支撑。

关键词:裂缝宽度;混凝土桥梁;检测算法;直方图均衡化

中图分类号:U445.7⁺1;U447

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2023)04-0127-06

引用格式:王兴.复杂环境下混凝土桥梁裂缝宽度检测算法[J].山东交通学院学报,2023,31(4):127-132.

WANG Xing. Detection algorithm for crack width in concrete bridge under complex environmental condition [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(4): 127-132.

0 引言

长期运营后的混凝土桥梁因重复冲击载荷、表面腐蚀、温度变化、原有结构被凿槽开洞、次应力、地基基础变形、运输不当、施工不当等原因,易出现裂缝等结构问题,影响桥梁结构的外观与稳定性。裂缝增大,桥梁的抗载能力随之下降,给过往车辆的行驶安全带来严重威胁,一旦桥梁结构破损,易造成严重的人员伤亡和重大的经济损失^[1-3]。修补桥梁裂缝可根据裂缝的宽度或成因,选用压力灌注法、粘贴碳纤维布加固、表面封闭法等方法。因此,需准确测量混凝土桥梁的裂缝宽度,采取合理的应对措施,防止裂缝继续增大。

刘娟红等^[4]采用软件 MATLAB 分析混凝土裂缝的宽度、形状和位置,二值化处理图像信息,可较准确、高效地获取混凝土裂缝的形态和宽度,偏差率为0~12%。冯立滨等^[5]为解决当前监控系统经常发生的错误报警问题,采用新的中位滤波器和非线性自回归神经网络预测某桥梁结构中的4条裂缝,对比计算结果与目标,得到平均偏差,此方法可较好地预测桥梁开裂,降低监控系统的早期预报误报率,均方误差控制在 10^{-5} 以内。Xiang等^[6]提出基于可训练深度卷积神经网络的裂缝识别方法,将空间信道合并注意模块引入编码器-解码器网络中,实现裂缝特征的细化,该方法检测裂缝的准确率为96.55%,但在噪声影响下检测结果有待进一步优化。上述研究均在简单环境下分析桥梁裂缝,对复杂环境下的裂缝特征研究较少。

本文提出复杂环境下混凝土裂缝宽度检测算法,对混凝土桥梁裂缝图像进行灰度变换,对灰度图像进行直方图均衡化处理,在强增处理的裂缝图像上识别噪声、辐射环境中混凝土桥梁裂缝,并检测其宽度,以为后续桥梁维护工作提供准确数据。

收稿日期:2022-06-29

基金项目:2020年福建省中青年教育科研项目(科技类)(JAT201124)

作者简介:王兴(1986—),男,福州人,讲师,工学硕士,主要研究方向为工程结构、BIM技术与应用、工程材料,E-mail:1127637593@qq.com。

1 混凝土桥梁裂缝宽度检测算法设计

1.1 混凝土桥梁裂缝图像识别

在复杂的混凝土施工环境下,对混凝土桥面裂缝的图像数据 $g(x,y)$ 进行数据处理, x,y 为混凝土桥面裂缝图像的横、纵坐标^[7]。用像素点构成混凝土桥面裂缝图像矩阵为:

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_{m1} & g_{m2} & \cdots & g_{mn} \end{bmatrix},$$

式中 g_{mn} 为像素的亮度级别。

为有效识别图像信息,对图像信息进行灰度值转换^[8],公式为:

$$g = 0.12R + 0.6G + 0.05B,$$

式中: R,G,B 分别为裂缝图像中的红色、绿色、蓝色色调值。

对图像信息进行灰度转换后,存在无法识别的无效区域,需调整混凝土桥梁裂缝图像^[9-10],调整函数为:

$$g = \begin{cases} \alpha g, & 0 \leq g < u \\ \beta(g - u) + g_u, & 0 \leq g < v \\ \gamma(g - v) + f_v, & 0 \leq g < w \end{cases},$$

式中: u,v,w 分别为桥梁裂缝的长度、宽度、形状特征, α,β,γ 为灰度值转换系数。

分析混凝土桥梁裂缝的灰度图像特征后,经过灰度值的转变,对混凝土桥梁的裂缝图像进行归一化处理,采用图像模板 b 分析混凝土桥梁裂缝的灰度强度^[11-13]

$$Q = b\chi,$$

式中 χ 为裂缝的灰度系数。

分析桥梁裂缝的影像特点,提取裂缝信息,以此数据为基础测量桥梁裂缝,各参数的约束关系公式为:

$$1/\rho + 1/\xi = 1/b,$$

式中: ρ 为混凝土桥梁裂缝的纹理密度, ξ 为锐化处理后的图像纹理密度。

识别混凝土桥裂缝纹理特征的公式为:

$$F = 1/b + (\rho + \xi)^2 g + Q. \quad (1)$$

根据混凝土桥梁裂缝图像的灰度转换,分析和处理混凝土桥梁的裂缝图像后可进行有效识别。

1.2 混凝土桥梁裂缝图像的直方图均衡化

在图像中像素平均分布的情况下,混凝土桥梁裂缝图像所含信息最多,灰度级良好。直方图均衡化是采用灰色转换功能将原有的直方图转换为均匀分布的平坦直方图,增强局部的对比度,不影响整体的对比度^[14-16]。

采用均衡化方法对混凝土桥梁的裂缝图像进行灰度校正处理^[17-20],能更好地平滑图像的灰度直方图,且间隔更大,对比程度更高,图像细节更清楚,也更突出灰度。对混凝土桥梁裂缝图像进行直方图均衡处理,可分为3个步骤。

1) 原始图像灰度直方图的计算。计算原始图像的灰度直方图,第 k 个灰度级的混凝土桥梁裂缝图像 H_k 在整幅图像灰度级 Ω 中的占比^[17]

$$P(H_k) = N_k / \Omega, k = 0, 1, 2, \dots, 255,$$

式中 N_k 为 H_k 中包含的总像素数。

2) 裂缝图像的灰度变换。根据步骤1建立初始图像的灰度累积分布函数 $\delta_k = \sum_{j=0}^k P(H_k)$, 根据式(1)结果求出混凝土桥梁裂缝图像的灰度变换表, 灰度变换计算公式为:

$$V_k = 255\delta_k / N_k + 0.5, \quad (2)$$

式中: δ_k 为 H_k 在整个直方图均衡化过程中的灰度级转换, 取均衡值为 0.5。

3) 灰度图像的直方图均衡化。由式(2)得到灰度转换表, 将新的灰阶代替混凝土桥面裂缝的各灰阶^[18], 实现混凝土桥梁裂缝的直方图均衡。直方图均衡化后图像的对比结果如图1所示。

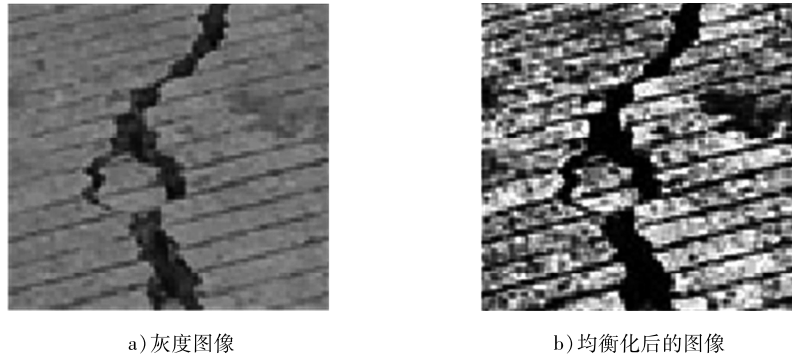


图1 直方图均衡化前、后图像的对比

由图1可知:经直方图均衡化处理后的混凝土桥梁裂缝图像的细节更清晰, 图像特征放大, 有利于后期处理, 此方式更适用于对裂缝图像的灰度增强。

1.3 混凝土桥梁裂缝宽度检测算法

对混凝土桥面裂缝进行直方图均衡处理, 处理后图像仍有多个裂缝时, 可采用人机交互法选择区域。为简化计算, 检测混凝土桥面裂缝宽度时靶区应仅有1个裂缝。计算连续曲线间距, 示意图如图2所示。分别采用 $m(x)$ 、 $n(x)$ 2个连续函数代表裂缝的上、下边界, 裂缝中心点可表示为 $[m(x)+n(x)]/2$, 点A处的裂缝宽度

$$K(x) = K_j(x) \cos \beta(x),$$

式中: $K_j(x)$ 为混凝土桥梁裂缝在竖直方向上的宽度, $\beta(x)$ 为裂缝中点曲线的倾角。

常用 a 行 b 列离散点矩阵表示数码相机拍摄的图像, 二值化处理后的裂缝图像如图3所示。

检测混凝土桥梁的垂直裂缝和斜裂缝的宽度主要分为3步。

1) 逐行扫描整张图片, 对每条裂缝的像素点计数。 $f(i)$ 为第 i 行 ($i \in [1, a]$) 裂缝的像素个数。记录该行每幅混凝土桥面裂缝的像素点坐标 $(i, J(i, j))$, $j=1, 2, \dots, y(j)$ 。

2) 计算每行混凝土桥梁裂缝的中心点坐标

$$\vartheta(i) = \sum_{k=1}^{y(j)} JN_k / y(i)。$$

将桥梁裂缝图像的所有坐标 $(i, \vartheta(i))$ 相连, 得到混凝土桥梁裂缝的核心线。

3) 确定混凝土桥梁的裂缝宽度, 第 i 行的混凝土桥梁裂缝宽度

$$\gamma_i = \phi y(j) \cos \beta_i,$$

式中: ϕ 为混凝土桥梁裂缝图像的像素点, β_i 为第 i 行处混凝土桥梁裂缝的中心点倾斜角^[19]。

可逐个扫描混凝土桥梁的横向裂缝和斜向裂缝, 连接各像素点纵轴的中点获得裂缝宽度。在待测部

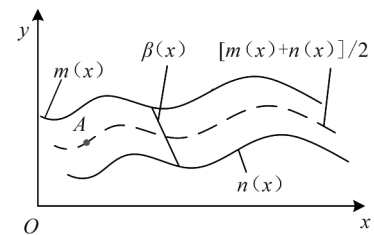


图2 计算连续曲线间距示意图



图3 二值化处理后的裂缝图像

位,一般采用某段的平均宽度作为最大裂缝宽度,可很好地解决裂缝区域的非规律化问题,确保实测数据的稳定性。

2 试验分析

2.1 采集混凝土桥梁裂缝参数

验证复杂环境下混凝土桥梁裂缝宽度检测算法在实际应用中的可行性。噪声环境通常指存在各种干扰和杂音的环境,可能来自机械设备的运行、交通车辆的噪声、人群喧闹等。辐射环境通常指存在放射性、照射性辐射的环境,敏感设备运行时可能受到干扰。选择噪声、辐射环境验证测试方法的准确性。试验过程中,将不同宽度的线冲印在相纸上,模拟混凝土桥梁的裂缝。模拟的裂缝示意图如图4所示。根据图4采集每条裂缝的宽度和弧度,如表1所示。以表1的11条混凝土桥梁裂缝为试验对象。采用接触式裂缝宽度观测装置测量混凝土桥面的裂缝宽度,分别在噪声环境、辐射环境下获取混凝土桥梁的裂缝图像,验证复杂环境下混凝土桥梁裂缝宽度检测算法的精度。接触式裂缝宽度观测装置的测量范围为0.01~6.00 mm,测量精度为0.01 mm。

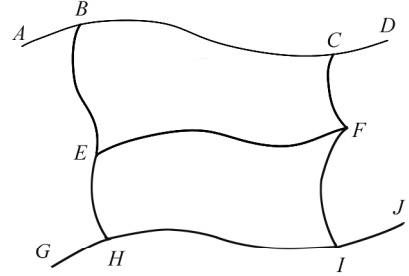


图4 模拟混凝土桥梁裂缝示意图

表1 混凝土桥梁裂缝参数

裂缝编号	AB	BC	CD	BE	EF	FC	EH	FI	GH	HI	IJ
裂缝宽度/mm	1.2	1.2	1.2	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.5	2.5	2.5
弧度/rad	0.84	34.68	15.06	36.15	38.27	18.97	21.04	19.98	9.52	29.85	13.67

2.2 结果分析

噪声环境、辐射环境下混凝土桥梁裂缝图像的宽度检测准确度如表2所示。

表2 噪声、辐射环境下混凝土桥梁裂缝图像的宽度检测准确度

裂缝编号	噪声环境				辐射环境			
	计算宽度/mm	检测宽度/mm	误差/mm	相对误差/%	计算宽度/mm	检测宽度/mm	误差/mm	相对误差/%
AB	1.21	1.25	0.04	3.30	1.21	1.27	0.06	4.96
BC	1.20	1.19	0.06	5.00	1.20	1.15	0.05	4.17
CD	1.20	1.25	0.05	4.17	1.20	1.24	0.04	3.33
BE	1.49	1.46	0.03	2.01	1.49	1.55	0.06	4.02
EF	1.48	1.53	0.05	3.38	1.48	1.53	0.05	3.38
FC	1.50	1.47	0.03	2.00	1.50	1.57	0.07	4.67
EH	2.02	2.08	0.04	1.98	2.02	2.08	0.06	2.97
FI	2.00	1.94	0.06	3.00	2.00	1.94	0.06	3.00
GH	2.48	2.52	0.04	1.61	2.48	2.54	0.06	2.42
HI	2.49	2.54	0.05	2.01	2.49	2.56	0.07	2.81
IJ	2.50	2.53	0.03	1.20	2.50	2.45	0.05	2.00

注:误差为检测宽度与计算宽度之差,相对误差为误差与实测宽度之比。

由表2可知:噪声环境下混凝土桥面裂缝宽度的误差为0.03~0.06 mm,平均相对误差为2.70%,本文算法对混凝土桥梁裂缝宽度的检测准确度为97.30%,能准确检测混凝土桥梁裂缝的宽度,保证桥梁的检测质量;辐射环境下混凝土桥梁裂缝宽度的误差为0.04~0.07 mm,平均相对误差为3.43%,本文算法对混凝土桥梁裂缝宽度的检测准确度为96.57%,比噪声环境低。

本文算法对混凝土桥梁裂缝宽度的检测精度大于95%,满足混凝土桥梁裂缝宽度的检测要求^[20]。

3 结束语

为提高桥梁裂缝宽度的检测准确度,通过灰度转换和归一化处理增强裂缝图像的细节特征,采用灰度直方图和累积分布函数进行图像均衡化处理,设计复杂环境下混凝土桥梁裂缝宽度的检测算法。经过试验测试发现,该算法对混凝土桥梁裂缝宽度的检测精度更高,噪声环境下混凝土桥梁裂缝宽度的检测准确度为97.30%,辐射环境下混凝土桥梁裂缝宽度的检测准确度为96.57%。

下一步研究可考虑混凝土桥梁表面的缺陷,避免桥梁表面缺陷对裂缝宽度检测的影响。

参考文献:

- [1] 钟新谷,彭雄,沈明燕.基于无人机成像的桥梁裂缝宽度识别可行性研究[J].土木工程学报,2019(4):52-61.
ZHONG Xingu, PENG Xiong, SHEN Mingyan. Study on the feasibility of identifying concrete crack width with images acquired by unmanned aerial vehicles[J]. China Civil Engineering Journal, 2019(4):52-61.
- [2] ADEL M, YOKOYAMA H, TATSUTA H, et al. Early damage detection of fatigue failure for RC deck slabs under wheel load moving test using image analysis with artificial intelligence[J]. Engineering Structures, 2021, 246(3):113050.
- [3] 李良福,马卫飞,李丽,等.基于深度学习的桥梁裂缝检测算法研究[J].自动化学报,2019,45(9):1727-1742.
LI Liangfu, MA Weifei, LI Li, et al. Research on detection algorithm for bridge cracks based on deep learning[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(9):1727-1742.
- [4] 刘娟红,孟翔,段品佳,等.基于MATLAB的混凝土裂缝宽度计算方法研究[J].材料导报,2022,36(6):84-89.
LIU Juanhong, MENG Xiang, DUAN Pinjia, et al. Study on calculation method of concrete crack width based on MATLAB[J]. Materials Reports, 2022, 36(6):84-89.
- [5] 冯立滨,冯红耀.混凝土桥梁裂缝宽度监测与预测研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(4):206-208.
- [6] XIANG X, ZHANG Y, SADDIK EL A. Pavement crack detection network based on pyramid structure and attention mechanism[J]. IET Image Processing, 2020, 14(8):1580-1586.
- [7] 廖延娜,李婉.基于卷积神经网络的桥梁裂缝检测方法[J].计算机工程与设计,2021,42(8):2366-2372.
LIAO Yanna, LI Wan. Bridge crack detection method based on convolution neural network[J]. Computer Engineering and Design, 2021, 42(8):2366-2372.
- [8] CUI S, SUN X, LUAN M, et al. Research on crack detection method of ballastless track slab based on infrared thermometer[J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 116(3):103772.
- [9] WANG L, ZHANG J, CHEN W, et al. Short term crack width prediction of CFRP bars reinforced coral concrete[J]. Engineering Structures, 2020, 218:110829.
- [10] LUO J, SHAO X, FAN W, et al. Flexural cracking behavior and crack width predictions of composite(steel+UHPC) lightweight deck system[J]. Engineering Structures, 2019, 194:120-137.
- [11] QIN Z, ZHENG Z, LI Q, et al. Deepcrack: learning hierarchical convolutional features for crack detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 28(3):1498-1512.
- [12] CAO T, WANG W, TIGHE S, et al. Crack image detection based on fractional differential and fractal dimension[J]. IET Computer Vision, 2019, 13(1):79-85.
- [13] RODRIGUEZ G, CASAS J R, VILLALBA S. Shear crack width assessment in concrete structures by 2D distributed optical fiber[J]. Engineering Structures, 2019, 195:508-523.
- [14] ZHANG K G, ZHANG Y T, CHENG H D. CrackGAN: pavement crack detection using partially accurate ground truths based on generative adversarial learning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 22(2):

- 1306–1319.
- [15] FEI Y, WANG K C P, ZHANG A, et al. Pixel-level cracking detection on 3D asphalt pavement images through deep-learning-based CrackNet-V[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 21(1):273–284.
- [16] WANG J K, HE X H, FAMING S, et al. A real-time bridge crack detection method based on an improved inception-resnet-V2 structure[J]. *IEEE Access*, 2021, 9:93209–93223.
- [17] LI G, REN X L, QIAO W T, et al. Automatic bridge crack identification from concrete surface using ResNeXt with postprocessing[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2020, 27(11):2620.
- [18] YU Y, RASHIDI M, SAMALI B, et al. Multi-image-feature-based hierarchical concrete crack identification framework using optimized SVM multi-classifiers and D-S fusion algorithm for bridge structures[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(2):240.
- [19] ZHENG X, ZHANG S L, LI X, et al. Lightweight bridge crack detection method based on segnet and bottleneck depth-separable convolution with residuals[J]. *IEEE Access*, 2021, 9:161649–161668.
- [20] 中华人民共和国交通运输部, 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.

Detection algorithm for crack width in concrete bridge under complex environmental condition

WANG Xing

Department of Architectural Engineering, Fujian Forestry Vocational and Technical College, Nanping 353000, China

Abstract: To improve the detection accuracy of crack widths in concrete bridges in complex environments, a crack width detection algorithm is proposed. Based on the grayscale transformation of images, the grayscale images of cracks are adjusted. The images are normalized to enhance the detailed features. Crack images are identified in complex backgrounds. A cumulative distribution function is constructed based on the calculation of the grayscale histogram of the images. Histogram equalization of concrete bridge crack images is achieved by combining the grayscale transformation. The crack width detection algorithm for concrete bridges is designed based on the principle of calculating the distance between continuous curves which can successfully detect the crack widths in concrete bridges. The results show that detection accuracy of the detection accuracy of crack widths in concrete bridges is 97.30% and 96.57% in noisy and radiated environment, respectively. This algorithm provides data support for improving the detection quality of concrete bridges.

Keywords: crack width; concrete bridge; detection algorithm; histogram equalization

(责任编辑:王惠)