

图像处理技术在桥梁裂缝宽度识别中的应用研究

文 / 张慧健 上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司深圳分公司

摘要：本文系统研究了基于数字图像处理技术的桥梁混凝土表面裂缝宽度非接触识别方法。通过搭建高分辨率图像采集系统，获取桥梁结构关键区域的表面图像，并采用图像增强、边缘检测、形态学处理与裂缝参数提取算法，实现对裂缝宽度的自动识别与精确量化。针对某三跨连续梁桥典型裂缝区域，布设10个测点，采集超过50组图像数据，系统评估图像处理算法在不同光照条件、背景噪声及表面污染等复杂环境下的稳定性与准确性。研究表明，该技术对裂缝宽度的识别平均误差不超过0.03 mm，最大误差控制在0.05 mm以内，识别精度达到92%以上，具备显著工程适用性，可为桥梁结构健康监测与状态评估提供可靠技术支撑。

关键词：图像处理技术；裂缝宽度识别；桥梁检测；边缘检测

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.064

引言

混凝土桥梁作为交通基础设施的重要组成部分，在长期动荷载、环境侵蚀与材料老化等多因素耦合作用下，易出现表面裂缝^[1]。裂缝宽度作为衡量结构损伤程度的关键指标，其发展态势直接关系到桥梁的整体安全性、适用性与耐久性。传统裂缝检测方法主要依赖人工目视检查或接触式测量工具，如裂缝显微镜、卡尺等，不仅效率低下、主观性强，且难以实现大规模、连续性的监测^[2]。此外，高空、临水等恶劣检测环境进一步限制了传统方法的实施。随着数字图像采集与处理技术的迅速发展，基于机器视觉的结构外观损伤识别方法因其非接触、高效率、可重复性好等优势，日益受到工程界的关注^[3]。尤其在高端光学传感器、高性能计算平台和智能图像处理算法的支持下，图像处理技术已能够实现裂缝的自动识别、精准定位与参数定量提取，显著提高了检测结果的客观性与准确性。本文结合某实桥工程，开展图像处理技术在裂缝宽度识别中的系统应用研究，旨在验证该技术在工程条件下的可行性与可靠性，并为桥梁智能检测与养护决策提供理论依据与技术参考。

一、工程概况

本研究以某高速公路上的三跨连续梁桥为工程背景，该桥全长185 m，桥跨布置为中跨70 m、边跨2×57.5 m，桥面宽12.5 m，设计荷载等级为公路-I级。主体结构采用C50混凝土预制箱梁，桥墩为钢筋混凝土矩形截面墩。该桥自通车运营以来已使用超过15年，近年来在定期检查中发现桥墩顶部、箱梁跨中下缘及支座附近区域出现多条竖向与斜向裂缝。现场初步测量显示，裂缝宽度范围在0.1 mm至0.5 mm之间，部分裂缝伴有白色钙

化物析出及轻微渗水现象，显示结构存在一定的环境侵蚀与应力超限问题。裂缝分布呈现一定规律性，多集中于结构弯矩与剪力组合作用较大的区域，体现出典型荷载作用下混凝土结构的损伤特征。为准确掌握裂缝的发展状况，需对其进行定期、精确的宽度监测。传统人工检测方法难以满足高频次、高精度及大数据量的检测需求，因此引入图像处理技术实现自动化、高精度裂缝识别与测量，具有重要的工程实用价值。

二、图像处理技术应用方法

（一）设备与参数配置

图像采集系统由高分辨率工业相机、光学镜头、辅助照明单元、稳固三脚架及计算机控制平台组成。相机选用型号为Basler acA2500-20gc的2000万像素CMOS传感器，支持RAW原始格式输出，确保图像信息无压缩保存。镜头选用Nikon AF 50 mm f/1.8D定焦镜头，有效抑制图像边缘畸变，提高裂缝图像的几何保真度。照明系统由两组高显色指数LED白光光源组成，发光强度连续可调，对称布置于相机两侧，与相机光轴成约45°夹角，以最大限度地消除阴影、反光等干扰，增强裂缝与背景之间的对比度。图像采集过程中，相机垂直对焦于待测混凝土表面，物距固定为0.5 m，在该配置下图像分辨率可达0.02 mm/像素，满足裂缝宽度的亚毫米级测量需求^[4]。拍摄参数设置为：光圈f/8，曝光时间1/200 s，ISO感光度200，确保在自然光与人工光源混合条件下仍能获取亮度均匀、细节清晰的图像。所有采集图像均经标定板进行畸变校正与尺度标定，以消除镜头畸变和透视误差对测量结果的影响。

(二) 图像采集与处理

在桥梁结构表面选择 10 个典型裂缝区域作为测点，每个测点在多种光照条件下（顺光、侧光、逆光）拍摄 5 张图像，共获取 50 组有效图像数据。图像预处理阶段首先将彩色图像转换为灰度图像，采用限制对比度自适应直方图均衡化（CLAHE）方法增强局部对比度，突出裂缝区域。该方法通过以下公式实现对比度增强：

$$I_{eq}(x, y) = \frac{I(x, y) - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \times 255$$

其中， $I(x, y)$ 为原始图像在像素点 (x, y) 处的灰度值， I_{\min} 和 I_{\max} 分别为局部区域内的最小和最大灰度值。随后使用 5×5 窗口中值滤波器进行噪声抑制，其数学表达式为：

$$\hat{I}(x, y) = \text{median}\{I(x+i, y+i)\}, i, j \in [-2, 2]$$

边缘检测采用 Canny 算子，其梯度幅值和方向计算公式为：

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right)$$

其中， G_x 和 G_y 分别为 x 和 y 方向的梯度值。结合 Otsu 自适应阈值分割算法，其类间方差计算公式为：

$$\sigma^2(k) = \omega_0(\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu_T)^2$$

其中， k 为阈值， ω_0 和 ω_1 为两类像素的比例， μ_0 、 μ_1 和 μ_T 为两类像素的均值和总均值。为进一步区分真实裂缝与混凝土表面纹理、污渍、气泡等伪特征，引入形态学处理操作：先采用闭运算（ 3×3 圆形结构元素）填充裂缝内部微小间断，再通过开运算（ 2×2 方形结构元素）消除孤立噪声点^[5]。最后，利用 Zhang-Suen 骨架提取算法获得裂缝的单像素宽度中心线，作为后续宽度计算的基准。

(三) 裂缝宽度识别算法

裂缝宽度的计算以提取的裂缝边缘和中心线为基础，采用法向投影测量法。具体流程为：沿裂缝骨架线逐像素点计算其法线方向，于法线方向上搜索左右两侧边缘点，计算两点间的欧氏距离作为该位置的裂缝宽度。法

线方向的计算公式为：

$$n = \left(-\frac{\partial s}{\partial y}, \frac{\partial s}{\partial x} \right)$$

其中， s 为骨架线函数。裂缝宽度的计算公式为：

$$w_i = \sqrt{(x_r - x_l)^2 + (y_r - y_l)^2}$$

其中， (x_l, y_l) 和 (x_r, y_r) 分别为法线方向与左右边缘的交点坐标。为提升测量精度，引入基于二次插值的亚像素边缘定位技术，其插值公式为：

$$x_{sub} = s + \frac{1}{2} \frac{I(x-1, y) - I(x+1, y)}{I(x-1, y) - 2I(x, y) + I(x+1, y)}$$

使边缘定位精度达到亚像素级别。每个测量点沿法线方向进行 5 次重复采样，取平均值作为该点的最终宽度值，以降低随机误差。全部图像处理与识别算法在 MATLAB R2021a 平台上编程实现，依托 Image Processing Toolbox 和 Computer Vision Toolbox 提供的函数库，结合自行开发的裂缝特征提取与分类模块，构建了一套完整的裂缝自动识别与参数定量分析流程。为进一步提高裂缝识别的鲁棒性，采用支持向量机（SVM）分类器实现裂缝与非裂缝区域的机器学习判别。从图像中提取多维特征参数构成特征向量，包括灰度均值、标准差、梯度幅值、LBP 纹理特征及 Hu 矩等，经主成分分析（PCA）降维后输入 SVM 模型进行训练与预测，最终输出带有宽度标注的裂缝分布图及详细统计报表。

三、应用效果检测

在全部 10 个测点、50 组图像数据中，图像处理系统均实现了裂缝区域的准确识别与宽度自动测量。将算法识别结果与人工卡尺测量值进行对比分析，结果显示：裂缝宽度识别平均误差为 0.03 mm，最大绝对误差不超过 0.05 mm，平均识别精度达到 92.8%。识别精度的计算公式为：

$$\text{精度} = \left(1 - \frac{|w_{meas} - w_{true}|}{w_{true}} \right) \times 100$$

其中， w_{meas} 为测量宽度， w_{true} 为真实宽度。在不同光照条件下，算法表现出良好的适应性，仅在极端逆光条件下个别测点识别精度略有下降（仍保持在 90% 以上）。此外，研究发现裂缝物理宽度与图像中裂缝区域的灰度梯度值之间存在显著正相关关系（相关系数 $R^2 = 0.89$ ），表明图像特征能够有效表征裂缝的实际尺寸。检测结果如下表所示：

表 1 裂缝宽度识别结果统计表

测点编号	实际宽度 (mm)	识别宽度 (mm)	绝对误差 (mm)	识别精度 (%)	光照条件
1	0.12	0.11	0.01	93.5	顺光
2	0.25	0.23	0.02	93.2	侧光
3	0.38	0.35	0.03	92.6	侧光
4	0.45	0.42	0.03	92.9	逆光
5	0.18	0.17	0.01	94.1	顺光
6	0.32	0.30	0.02	93.2	顺光
7	0.22	0.20	0.02	92.7	侧光
8	0.49	0.45	0.04	91.9	逆光
9	0.15	0.14	0.01	93.8	顺光
10	0.28	0.26	0.02	93.4	侧光

上述数据表明，图像处理技术不仅可实现裂缝宽度的高精度识别，还具备良好的重复性与稳定性，同时能够生成直观的裂缝分布图谱与宽度变化曲线，极大便利了工程师对结构损伤状态的评估与维修决策。

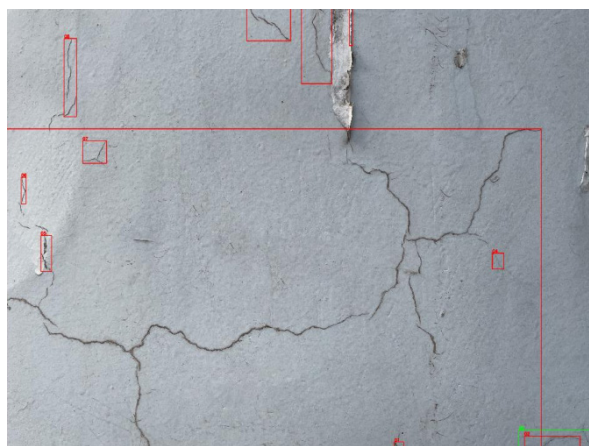


图 1 裂缝分布

结语

本研究通过实桥工程的图像采集与处理分析，验证了数字图像处理技术在混凝土桥梁裂缝宽度识别中的有效性与应用潜力。该技术成功克服了传统检测方法效率低、主观性强等缺点，实现了裂缝参数的非接触、自动化提取与高精度测量，特别适用于大面积、多裂缝的结构外观检测场景。然而，当前方法在极端光照、严重表面污染等复杂条件下仍存在一定局限性。未来研究可进

一步集成深度学习目标检测算法（如 YOLO、Faster R-CNN 等），提升复杂背景下裂缝的识别鲁棒性，并探索与无人机（UAV）、爬壁机器人等智能装备的协同作业，实现桥梁检测的全自动化、智能化与网络化，推动基础设施运维管理向数字孪生与智慧决策方向发展。

参考文献

[1] 刘震, 顾兴宇, 李骏, 等. 探地雷达数值模拟与道路裂缝图像检测的深度学习增强方法 [J]. 地球物理学报, 2024, 67 (6): 2455-2471.

[2] 徐慧洁. 基于图像处理技术的建筑裂缝测量方法分析 [J]. 江西建材, 2023 (7): 165-167.

[3] 唐永, 么学春, 王晨, 等. 基于无人机图像技术和支持向量机 (SVM) 的桥梁裂缝自动识别系统 [J]. 公路工程, 2024, 49 (6): 49-56.

[4] 余加勇, 刘宝麟, 尹东, 等. 基于 YOLOv5 和 U-Net3+ 的桥梁裂缝智能识别与测量 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2023, 50 (5): 65-73.

[5] 张明, 徐建国, 叶宁波, 等. 基于数字图像处理的整孔预制箱梁裂缝识别技术研究 [J]. 公路与汽运, 2023 (4): 139-142.

作者简介: 张慧健, 1997 年 5 月 28 日, 男, 汉, 广东省深圳市福田区, 硕士研究生, 上海市政工程设计研究总院 (集团) 有限公司深圳分公司, 研究方向: 桥梁工程。