

基于高速视觉感知的吊索结构振动测试技术与应用

张 杨¹, 许庆剑¹, 金剑森², 齐兴军²

(1. 济南先投城市发展投资集团有限公司, 山东 济南 250000; 2. 山东建筑大学, 山东 济南 250000)

摘要: 大型结构中吊索得到广泛应用, 其大跨度、低刚度的特性使其易受环境激励引发显著振动, 从而威胁结构安全与耐久性。针对此问题提出并验证了一种融合高速视觉感知与深度卷积神经网络(DCNN)的非接触式振动位移高精度测量方法。该方法核心在于利用高速摄像机采集吊索振动的连续图像序列, 并通过预训练的DCNN模型自动学习图像序列中的时空特征, 直接映射输出物理位移。选取某高速铁路大跨度连续梁拱桥的吊索为研究对象进行现场实测。在吊索表面设置标志物, 采用高速摄像机记录其振动视频。视频数据经预处理后, 输入基于改进ResNet-18架构的DCNN模型进行预测, 模型输出的像素位移通过现场标定转换为物理位移。实测结果表明: 该方法成功获取了两根吊索清晰的竖向振动位移时程曲线, 振动幅值范围分别为-1.6~1.2 mm和-3.2~2.4 mm, 并识别出其一阶固有频率为1.9~2.0 Hz。与传统传感器同步测量结果对比, 该方法的平均相对误差为6.15%, 显著优于传统图像算法模板匹配和光流法, 具有广阔应用前景。

关键词: 吊索结构; 高速视觉感知; 深度卷积神经网络; 结构振动测量

中图分类号: U446.1; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0049-06

Vibration Testing Technology and Application of Sling Structures Based on High-Speed Visual Perception

ZHANG Yang¹, XU Qingjian¹, JIN Jianmiao², QI Xingjun²

(1. Jinan Xiantou Urban Development and Investment Group Co., Ltd., Jinan 250000, China; 2. Shandong Jianzhu University, Jinan 250000, China)

Abstract: The sling is widely used in large-scale structures. And the characteristics of its long span and low stiffness make it prone to significant vibration caused by environmental excitation, thereby threatening the safety and durability of the structures. Aiming at the problem, a non-contact high-precision vibration displacement measurement method integrating high-speed visual perception and deep convolutional neural network (DCNN) is proposed and verified. The core of this method lies in using a high-speed camera to collect a continuous image sequence of sling vibration, and automatically learning the spatiotemporal features in the image sequence through a pre-trained DCNN model directly to map and output the physical displacement. The sling of a long-span continuous beam arch bridge in a high-speed railway is selected as the research object for on-site measurement. The markers are set on the surface of the sling, and the high-speed cameras are used to record its vibration video. After the video data is preprocessed, it is input into the DCNN model based on the improved ResNet-18 architecture for prediction. The pixel displacement output by the model is converted into physical displacement through on-site calibration. The measured results show that this method has successfully obtained the clear vertical vibration displacement time history curves of two slings. The vibration amplitude ranges are -1.6~1.2 mm and -3.2~2.4 mm respectively, and it is identified that its first-order natural frequency is 1.9 ~ 2.0 Hz. Compared with the synchronous measurement results of traditional sensors, the average relative error of this method is 6.15%, which is significantly better than the template matching and optical flow methods of traditional image algorithms, and has broad application prospects.

Keywords: sling structure; high-speed visual perception; deep convolution neural network; structural vibration measurement

0 引 言

吊索作为连接不同建筑功能单元的重要结构型式, 在大型公共建筑、交通枢纽及商业综合体中应用广泛。然而, 其结构特性(如跨度大、刚度相对较低)

收稿日期: 2025-08-20

作者简介: 张杨(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事城市道桥等项目管理工

使其极易受到人群荷载、风荷载以及环境激励等因素的影响,产生显著振动。持续的或过大的结构振动不仅影响其使用舒适性,更对吊索的结构健康状况构成严重威胁,加速材料疲劳,甚至可能诱发损伤累积,进而显著缩短其使用寿命。因此,对吊索结构振动进行准确、高效的监测与评估,对于保障结构安全、延长服役寿命具有重要意义。

传统的结构振动测量方法(如接触式加速度传感器、应变片或激光位移计等)虽较为成熟,但在实际应用中常面临布设复杂、成本较高、难以实现全场多点测量或受现场环境限制等挑战。近年来,基于计算机视觉的非接触式测量技术因其具有测量便捷、全场覆盖、不影响结构自身特性等优势,展现出巨大的应用潜力,尤其是在高速视觉感知技术取得显著进步的背景下。

本文针对吊索结构振动监测的实际需求与技术瓶颈,以一座桥梁的典型吊索为研究对象,重点探索基于高速视觉感知的结构振动位移测量方法。首先,介绍高速视觉感知测量系统的构成及其核心测量原理。在此基础上,提出并深入研究一种基于深度卷积神经网络(deep convolutional neural network, DCNN)的振动位移测量新方法,并详细阐述该方法的总体测量框架与关键环节的实现技术。研究旨在通过深度学习的强大特征提取与非线性映射能力,直接从高速视频序列中高精度地识别和量化结构振动位移响应。最终,通过实验验证该方法的实际应用效果。

1 高速视觉感知测量系统

1.1 测量系统构成

基于高速视觉感知的测量系统由高速摄像机、加速度传感器、数据采集系统、笔记本电脑、户外电源等部分构成(见图1)。高速摄像机为高速视觉感知测量系统的核心设备,其内部包含光学镜头、存储器、传感器、控制器等部分。由于实际的测量环境较为复杂,测量对象、测量环境、测量距离等因素都会对高速摄像机的拍摄效果产生影响,因此光学镜头的参数至关重要,需要选用采样频率较高的摄像头以保证可以测量高速运动的测量对象。除高速摄像机外,户外光源、加速度传感器、数据采集卡、笔记本电脑、户外电源等都为高速视觉感知测量系统的辅助采集系统。数据采集卡、加速度传感器和笔记本电脑主要用于对加速度信号的采集、存储和处理,户

外光源用于弥补光照条件差造成的图像质量较低的问题,而户外电源是保证高速视觉感知测量系统在进行户外实验时的必要条件。



图1 高速视觉感知测量系统

1.2 测量原理

三维立体的测量是将对象投影至二维平面的测量过程,因此三维立体图像与二维平面图像之间存在映射关系。高速视觉感知测量系统实现的是三维立体图像到像素坐标系之间的映射和转换,由于三维立体坐标系和像素坐标系之间需要经过高速摄像机坐标系和二维平面坐标系的转换,因此实现完整的坐标映射需要进行3次转换:一是三维立体坐标系至高速摄像机坐标系的转化,这是利用高速摄像机将三维立体的位置进行描述的过程;二是高速摄像机坐标系至二维平面坐标系的转化;三是二维平面坐标系至像素坐标系的转化。

2 基于深度卷积神经网络的振动位移测量

基于深度卷积神经网络(deep convolutional neural network, DCNN)的振动位移测量,是一种结合计算机视觉与深度学习的非接触式测量技术。其核心原理是利用DCNN对图像序列中物体的振动特征进行自动提取与映射,最终实现从图像像素变化到物理位移的精确计算。以下从技术流程和核心机制两方面详细阐述其原理。

2.1 技术流程

基于DCNN的振动位移测量本质是一个“图像序列→特征提取→位移映射”的端到端过程,主要包括数据采集与标注、网络模型构建、模型训练和位移预测4个阶段,具体流程如下。

(1) 数据采集与标注

使用高速相机(或普通相机配合高帧率模式)拍摄振动物体的连续图像序列(视频),记录物体在振动过程中的动态变化。为提高精度,通常会在物体表面设置标记点(如反光贴纸、色块),或直接利用物体自身的显著特征(如边缘、轮廓)作为跟踪目标,同步采集物体的真实振动位移作为“标签”。可通过激

光干涉仪、加速度传感器(积分得到位移)等高精度设备记录物理位移,并与图像序列的时间戳对齐,形成“图像帧-真实位移”的配对数据集。

(2)网络模型构建

设计深度卷积神经网络结构,使其能够从图像序列中提取振动相关的时空特征(空间上的位置变化+时间上的动态趋势),并将这些特征映射为物理位移。典型网络结构包含以下核心模块:

- a. 入层:接收振动物体的图像序列(单帧或多帧连续图像),输入格式为像素矩阵(如尺寸为 $H \times W \times C$ 的图像, H 、 W 分别为高度和宽度, C 为通道数)。
- b. 特征提取层:由多个卷积层、池化层和激活函数组成。卷积层通过滑动窗口(卷积核)提取图像的局部特征(如标记点的边缘、轮廓、灰度变化);池化层降低特征维度并增强鲁棒性;激活函数(如ReLU)引入非线性,使网络能学习复杂特征。对于视频序

列,可采用3D卷积层(同时卷积空间和时间维度)或2D卷积+循环层(如LSTM)捕捉时空关联(例如“前一帧标记,点位置→当前帧位置”的变化趋势)。

c. 映射层:由全连接层或卷积层组成,将提取的高维特征映射为具体的位移值(如沿 x 、 y 轴的位移分量),输出为连续数值。

(3)模型训练和位移预测

利用标注好的数据集(输入图像序列+对应真实位移)训练网络,通过优化算法调整参数,使网络学会“图像特征→物理位移”的映射关系,包含以下两个部分:一是采用回归任务常用的损失函数(如均方误差MSE、平均绝对误差MAE),计算网络预测位移与真实位移的差异;二是通过反向传播算法,根据损失函数的梯度调整网络各层权重(卷积核参数、全连接层权重),最小化预测误差,直至模型收敛。整体流程见图2。

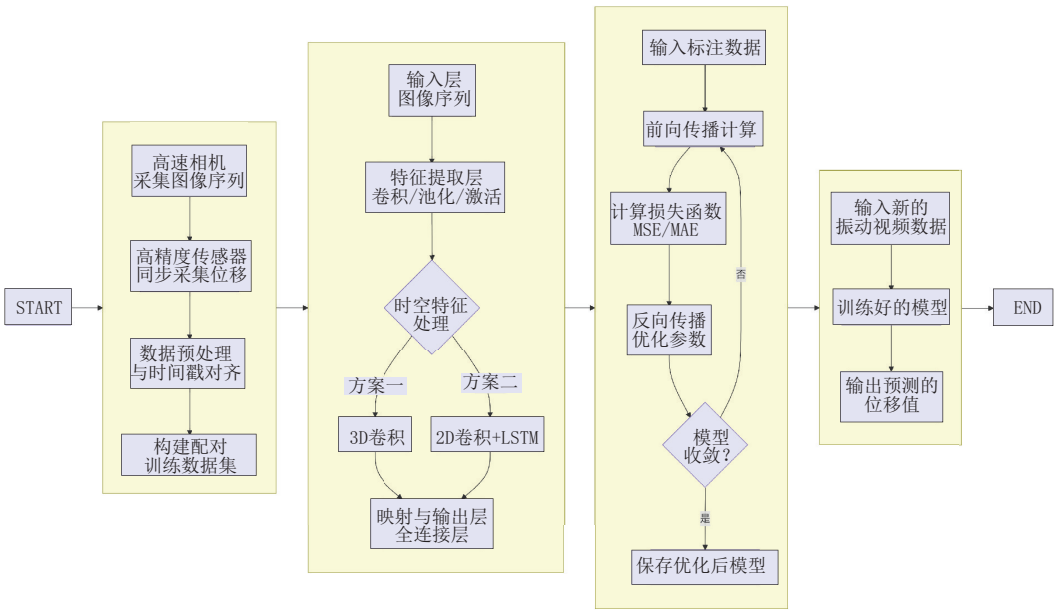


图2 高速视觉感知测量技术流程图

2.2 核心机制

DCNN实现振动位移测量的关键在于自动学习图像中与位移相关的有效特征,并克服传统方法的局限性(如人工设计特征的繁琐、对环境干扰的敏感),具体机制如下。

(1)特征的自动学习

传统振动测量(如基于模板匹配的图像处理)依赖人工设计特征(如标记点的灰度值、几何形状),易受光照变化、背景噪声影响。DCNN通过多层卷积操作,能自动学习更鲁棒的高层特征(如“标记点在图像中的相对位置变化”“物体边缘的运动轨迹”),无需人工干预。例如:对于带标记点的振动物体,网络

可自动识别标记点在不同帧中的像素坐标 (x, y) ,并将其变化映射为物理位移。

(2)像素-物理量的转换

图像中的像素变化需要转换为实际物理单位(如mm),这一过程可通过两种方式实现。

a. 预处理标定

通过相机标定(如张正友标定法)获取相机内参(焦距、主点坐标)和外参(与物体的相对0位置),将像素坐标转换为物理坐标(如利用透视投影公式 $d_{物理} = k \cdot d_{像素}$, k 为标定系数),DCNN只需要学习物理坐标与位移的关系。

b. 端到端学习

网络直接学习“像素变化—物理位移”的映射,无需单独标定。例如,训练数据中包含不同距离、不同尺寸物体的振动样本,网络可自动学习像素与物理量的缩放关系。

3 吊索测试实例

3.1 吊索概况

以下介绍具体反演方法及过程。

本次建模研究以新建北京至雄安新区至商丘高速铁路站前工程中XSZQ-11跨黄河南大堤90 m+180 m+90 m连续梁拱为例。主跨180 m,梁全长361.6 m,计算跨度90 m+180 m+90 m,支点至梁端长0.85 m。主梁采用单箱双室、变高度、直腹板箱形截面,中支点处梁高11 m,边跨直线段和跨中直线段梁高为5 m,直线段长度分别为11.3 m和21 m,梁底下缘按二次抛物线变化,拱肋共布设36组吊索,分为东南、西南、东北、西北4个区位,每个区位分为D1~D9共9组吊索,每组两根,共72根。本次测试吊索为东南区位D1组的两根吊索,后文简称1号索以及2号索。连续梁拱的1/2立面布置如图3所示。

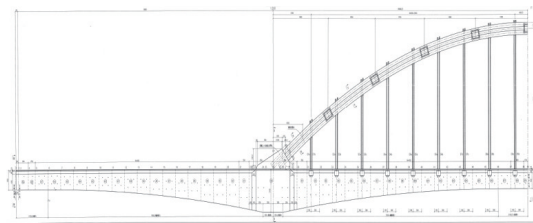


图3 连续梁拱的1/2立面布置图

3.2 现场测试

3.2.1 传感器测量

传感器测试采用泰斯特3828E采集仪,将传感器通过胶泥绑缚在吊杆的测点位置,保证传感器与吊杆的充分接触,随后利用导线对传感器以及采集仪进行连接,设定采样频率100 Hz,将采集档位设置到加速度档,输入正确的传感器灵敏度,设置采样模式为连续采集,进行加速度时程采集,采集时间20 min。

3.2.2 图像识别测量

本次测试主要采用图像识别方式,利用高速摄像机采集目标测点的时程数据,将时程数据导入计算机后采用深度卷积神经网络提取振动相关的时空特征,并将这些特征映射为物理位移。采集过程中选用Nikon D3400高速相机,选取的采样频率为60 fps,视频画质的分辨率为1 920×1 080像素,采集时间为5~10 min,高速相机设备见图4。

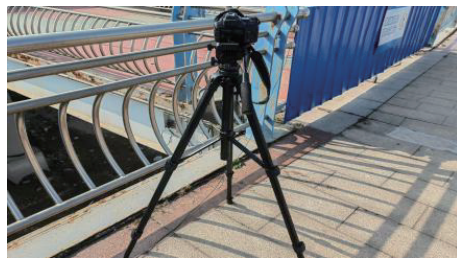


图4 高速相机现场架设图

本次试验为了保证测试的准确性,将绝缘胶带作为不规则标志物粘贴到吊索侧壁上,粘贴保证标志物和侧壁完全贴合,共布置两个不规则测点,测点图像如图5所示。

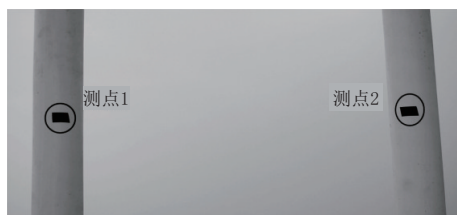


图5 测点位置图

将高速相机镜头摆放在测点前方1 m处,调整相机摆放位置,使得不规则标志物完整出现在屏幕中央,旋转焦距齿轮,确保可以获得清晰的图像,测试前保持相机系统稳定。点击视频录制按钮进行屏幕录制,测试过程中确保装置稳定,采集时间足够后停止采集。将采集的视频序列输入至预训练的深度卷积神经网络(DCNN)模型进行数据处理。具体流程如下:

首先,对数据进行预处理。一是视频分割,将连续视频按帧率(60 fps)拆分为单帧图像序列,共生成18 000帧(5 min);二是图像增强,对每帧图像进行灰度化、直方图均衡化处理,提升标志物与背景的对亮度;三是ROI裁剪,以不规则标志物为中心,截取300×300像素区域作为网络输入,减少计算量。

随后,进行DCNN模型配置。采用改进的ResNet-18架构,移除全连接层,替换为3层卷积+LSTM模块,以捕捉时空特征。将连续5帧图像堆叠为时序输入(300×300×15,单位:像素),输出为下一帧标志物的竖向位移。过程中使用Adam优化器(学习率0.001),损失函数为平滑L1 Loss,批量大小32,迭代200轮。

最终,得到位移时程图(见图6)。

4 结果与误差分析

4.1 测量结果

随基于上述测试流程与数据处理方法得到的时

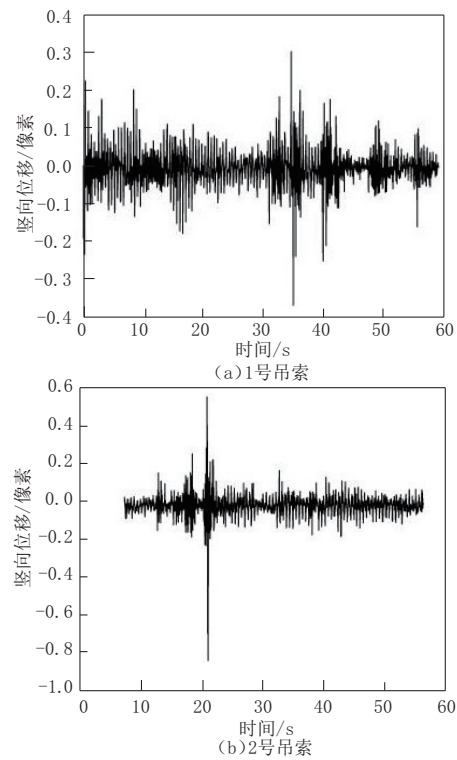


图6 像素-时间位移时程图

程曲线进行像素-物理位移转换,通过现场标定确定比例系数:在测点1 m处放置标准标定板(方格间距10 mm),计算得1像素 $\approx$ 4.12 mm,得到吊索结构振动位移测量结果(见图7)。图7为两根吊索的竖向振动位移时程曲线,横坐标为时间(s),纵坐标为位移(mm)。从图中可以清晰看出,两根吊索在测试时段内呈现出明显的振动特性,振动幅值分别在-1.6~1.2 mm和-3.2~2.4 mm之间波动,振动频率较为稳定,整体呈现出一定的周期性。

为进一步分析吊索的振动特性,对位移时程数据进行频谱分析,结果如图8所示。频谱图的横坐标为频率(Hz),纵坐标为振幅(mm)。从图中可以看出,吊索的主要振动频率集中在1.9~2.0 Hz,该频率为吊索的一阶固有振动频率。

4.2 误差分析

为验证基于深度卷积神经网络的振动位移测量方法的准确性,采用传统传感器对同一吊索测点进行同步测量,将两种方法的测量结果进行对比分析。

表1为吊索测点1在不同时刻的两种测量方法位移数据对比。从表中数据可以看出,基于深度卷积神经网络的测量方法与激光位移计测量结果整体趋势一致,但存在一定的误差,与受力状态相符。

通过计算,基于深度卷积神经网络的振动位移测量方法的平均绝对误差为0.125 mm,平均相对误

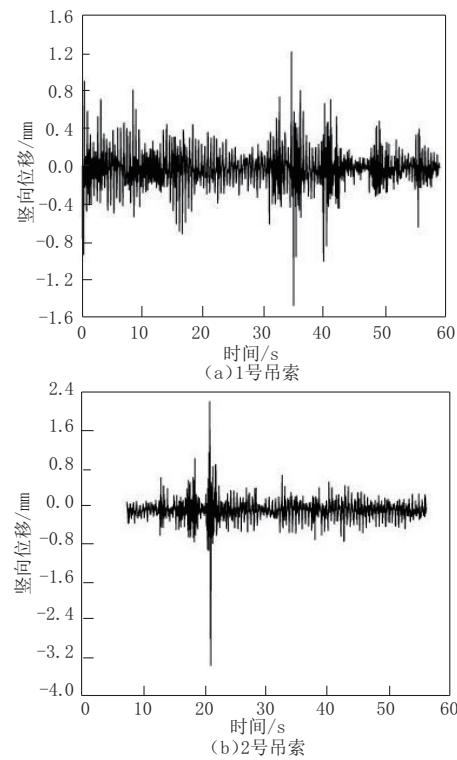


图7 位移转换后竖向位移时程图

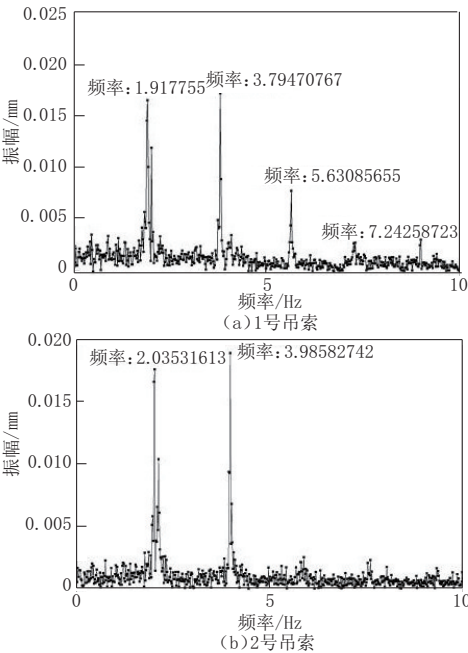


图8 吊索频谱图

表1 两种测量方法位移数据对比表

吊索编号	传感器 测量值/mm	DCNN 测量值/mm	绝对误差/ mm	相对误差/ %
1#索(正峰值)	1.3	1.2	0.1	7.69
2#索(正峰值)	2.3	2.4	0.1	4.35
1#索(负峰值)	1.5	1.6	0.1	6.67
2#索(负峰值)	3.4	3.2	0.2	5.88

差为6.15%。随后,将图像信息放入传统的基于模板匹配处理算法模型以及光流法算法模型中,通过调

试发现其平均相对误差分别为12.3%及8.5%。本文基于深度卷积神经网络的测量误差相较于其他方法明显降低,充分体现了其在吊索结构振动位移测量中的高精度优势。

误差产生的原因主要包括以下几个方面:一是高速摄像机拍摄过程中可能受到环境光线变化的影响,导致图像质量出现微小波动,进而影响特征提取的准确性;二是在像素-物理位移转换过程中,标定板的摆放精度和测量距离的微小变化会引入一定的误差;三是深度卷积神经网络模型本身的泛化能力有限,对于一些极端振动状态的识别可能存在偏差。

5 结 语

本文针对吊索结构振动监测的技术需求,提出了一种基于高速视觉感知与深度卷积神经网络(DCNN)的非接触式振动位移测量方法,并通过现场测试验证了其有效性,主要结论如下:

(1)基于高速视觉感知的测量系统可有效实现吊索结构振动的全场非接触监测。该系统通过高速摄像机捕捉振动图像序列,结合相机坐标转换原理,能够将三维结构振动信息映射至二维像素坐标系,为后续位移计算提供可靠数据基础,克服了传统接触式传感器布设复杂、成本高的局限性。

(2)提出的基于改进ResNet-18架构(融合3层卷积与LSTM模块)的DCNN振动位移测量方法,展现出优异的测量精度。现场测试结果显示,该方法的平均相对误差仅为6.15%,显著低于传统模板匹配算法(12.3%)和光流法(8.5%),能够满足吊索结构振动监测对高精度的要求。其核心优势在于通过深度学习自动提取鲁棒的时空特征,减少了人工设计特征对环境干扰的敏感性。

(3)该方法在吊索现场测试中表现出良好的适用性。通过数据预处理与像素-物理量转换,可准确识别两根吊索振动的幅值在-1.6~1.2 mm以及-3.2~2.4 mm之间、一阶基频为1.91 Hz和2.0 Hz等关键参数。

(4)本研究构建的“高速视觉采集→DCNN特征学习→位移映射”技术框架,为大型柔性结构的振动

监测提供了新范式。未来,通过优化网络模型泛化能力、提升极端环境下的图像鲁棒性,可进一步拓展其在土木工程结构健康监测领域的应用范围。

参考文献:

- [1] 杨迪雄,李刚,陈浩然.结构振动控制的研究进展与发展趋势[J].力学进展,2010,40(2):147-166.
- [2] 欧进萍.土木工程结构振动控制的现状与展望[J].地震工程与工程振动,1997,17(3):1-13.
- [3] 谢强,李杰.基于视觉测量的结构振动监测技术研究进展[J].振动与冲击,2017,36(19):1-12.
- [4] 郑史雄,潘浩,徐林生.基于机器视觉的桥梁结构振动监测方法研究[J].振动与冲击,2015,34(20):171-176.
- [5] 朱宏平,余波,翁顺,等.基于数字图像相关的结构位移与振动测量方法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2011,39(11):1-6.
- [6] 彭勇波,李秋胜,陈政清.基于计算机视觉的结构振动测量研究进展[J].振动与冲击,2013,32(14):1-9.
- [7] 冯锐,李宏男.基于激光测量技术的结构振动监测研究进展[J].振动与冲击,2016,35(15):1-10.
- [8] 吴斌,欧进萍.基于分布式光纤传感技术的结构振动监测方法[J].土木工程学报,2009,42(11):102-108.
- [9] 李爱群,丁幼亮.土木工程结构健康监测研究的回顾与展望[J].建筑结构学报,2009,30(6):1-20.
- [10] 黄方林,陈政清,曾储惠.基于动力响应的斜拉桥索力识别研究[J].振动与冲击,2004,23(1):78-81.
- [11] 孙利民,李宏男.工程结构健康监测的发展与现状[J].同济大学学报(自然科学版),2006,34(12):1617-1624.
- [12] 何顶顶,李爱群,赵林,等.大跨桥梁结构振动监测技术的研究进展[J].振动与冲击,2012,31(19):1-9.
- [13] 陈祥宝,李勇,王汝敏,等.复合材料结构健康监测技术发展现状[J].航空学报,2014,35(2):305-323.
- [14] 张启伟,宋晓东.桥梁结构健康监测系统的设计与应用[J].同济大学学报(自然科学版),2006,34(6):725-730.
- [15] 王春生,陈艾荣.斜拉桥索力测试的振动法研究进展[J].地震工程与工程振动,2007,27(1):177-182.
- [16] 周智,欧进萍.基于光纤光栅传感技术的土木工程结构健康监测研究进展[J].土木工程学报,2008,41(8):84-90.
- [17] 黄宏伟,范益群,徐凌等.基于分布式光纤传感技术的隧道结构健康监测研究进展[J].岩石力学与工程学报,2010,29(10):1947-1962.
- [18] 赵跃堂,王肇民.利用激光干涉仪测量结构振动的方法研究[J].振动与冲击,1999,18(2):46-49.
- [19] 王海涛,谢强,李杰.基于视觉测量的结构振动监测系统开发与应用[J].振动与冲击,2018,37(12):233-239.
- [20] 刘沐宇,朱宏平.基于图像处理的结构振动测量方法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2005,33(11):93-96.