

# 基于机器视觉的公路桥梁变形测量及安全预警

苏子玥<sup>1</sup>, 杜文康<sup>1</sup>, 雷冬<sup>1,2\*</sup>

(1.河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 211100; 2.河海大学 苏州研究院, 江苏 苏州 215100)

**摘要:**公路桥梁结构安全对交通安全运营和区域经济发展起到关键作用,但由于交通荷载的快速增加和复杂变化,桥梁结构变形及安全状况实时监测的需求日益凸显。然而,以接触式传感器为主的结构健康监测系统存在安装施工难、维护更换繁、需要中断交通等局限。为此,该文提出了一种基于机器视觉的非接触式变形测量系统,利用模板匹配和特征点识别方法,实现结构表面标记的识别和关键位置的位移提取,并通过实验室和现场试验对视觉方法的准确性和稳定性开展测试。此外,针对实际桥梁结构运营状况建立相匹配的有限元分析模型,通过动静力学试验设定多级预警阈值,进一步判定结构的安全状况。试验结果表明:①所建立的视觉变形测量系统位移测量误差在5%以内,振动频率误差在1%以内;②基于模板匹配和特征点识别的测量技术能够对结构自有特征进行识别,满足长期性变形监测的需求;③通过多工况下有限元分析,可以为结构长期位移监测设置预警阈值。

**关键词:**公路桥梁;机器视觉;结构动态位移;有限元分析;安全分析

中图分类号:U447

文献标志码:A

## Deformation Measurement and Safety Warning of Highway Bridges Based on Machine Vision

SU Ziyue<sup>1</sup>, DU Wenkang<sup>1</sup>, LEI Dong<sup>1,2\*</sup>

(1.College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China; 2.Suzhou Research Institute, Hohai University, Suzhou, Jiangsu 215100, China)

**Abstract:** The structural safety of highway bridges plays a crucial role in traffic safety operations and regional economic development. Due to the rapid increase and complex changes in traffic loads, the demand for real-time monitoring of bridge's structural deformation and safety conditions has been increasingly prominent. However, the structural health monitoring system, dominated by contact sensors, has limitations such as difficult installation and construction, complicated maintenance and replacement, and the need to interrupt traffic. To this end, a non-contact deformation measurement system based on machine vision was proposed. Template matching and feature point recognition methods were utilized to achieve recognition of structural surface markings and displacement extraction of key positions. The accuracy and stability of visual methods were tested through laboratory and on-site experiments. In addition, a corresponding finite element model was built for the actual operation status of the bridge structure, and the multi-level warning threshold was set through the dynamic and static mechanical experiments to further determine the safety status of the structure. The experimental results show as follows. ① The displacement measurement error of the established visual deformation measurement system is within 5%, and the error of vibration frequency is within 1%; ② Measurement techniques based on template matching and feature point recognition can recognize the inherent features of structures, and meet the needs of long-term deformation monitoring; ③ Through finite element analysis under multiple working conditions, warning thresholds can be set for long-term displacement

收稿日期:2024-08-28(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:12172120);江苏省研究生科研创新计划项目(编号:KYCX23\_0660);苏州市科技展计划项目(编号:SYC2022080)

作者简介:苏子玥,女,硕士研究生.E-mail:ziyuesu@hhu.edu.cn

\*通信作者:雷冬,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:leidong@hhu.edu.cn

monitoring of structures.

**Keywords:** highway bridges; machine vision; structural dynamic displacement; finite element analysis; safety analysis

## 0 引言

现役公路桥梁的安全性问题已经成为桥梁研究领域的重难点,由于桥梁服役年限增长、交通运输量大增加以及维修管养不当等因素,在役公路桥梁会出现不同程度的结构损伤,造成安全性、稳定性以及耐久性下降等问题。目前,现有的桥梁健康监测系统主要应用于大跨径桥梁,而在公路桥梁中占比超过80%的中小桥梁结构仍然依赖于定期的人工检测<sup>[1]</sup>。同时,桥梁形变位移是公路桥梁结构损伤识别及安全性分析的重要参数,当桥梁结构发生明显位移时,其实际受力状态也会相应改变,因此,基于桥梁位移变化的结构力学分析是公路桥梁运营安全评估的重要手段<sup>[2]</sup>。

目前,现有的结构健康监测系统大多以接触式传感器为主,如GPS(Global Positioning System)<sup>[3]</sup>、位移计、静力水准仪等。面向大多数公路桥梁,此类设备的应用仍然存在较多局限:GPS传感器测量精度一般为厘米级,适合于特大型桥梁;位移计通常需要固定支承,大多应用于支座等构件的位移测量;静力水准仪在长期监测过程中由于温度等环境因素常常会出现数据不稳定性,且测量频率较低。此外,由于接触式传感器设备布置的特殊性,存在系统的施工安装难度高、后期维护更换繁、线路铺设工作大、系统建设成本高以及通常需要临时中断交通等问题。

近年来,机器视觉技术发展迅速,在变形测量方面已得到广泛应用,面向多类型场景,能够实现全场非接触测量和实时高精度测量<sup>[4-8]</sup>。JÁUREGUI等<sup>[9]</sup>基于数字近景陆地摄影测量方法测量桥梁垂直挠度;Lee等<sup>[10]</sup>通过数字图像处理技术对柔性桥梁进行实时位移测量;陈伟欢等<sup>[11]</sup>借助工业数码摄像机监测已建成的广州新电视塔塔顶动位移,并与用GPS测量的结果进行比较,两者吻合较好;王翔等<sup>[12]</sup>基于LED灯光斑形心搜索算法实时测量桥梁挠度,但雨雾天气会对测量结果产生较大影响;Feng等<sup>[13]</sup>基于一种鲁棒的目标搜索算法实现不需要目标标记的结

构位移测量;Kim等<sup>[14]</sup>采用图像匹配和异常检测相结合的方法,研究设计了基于标记的结构位移测量模型;谢鹄等<sup>[15]</sup>基于边缘检测方法测量拉索振动,提高了测量效率;Chu等<sup>[16]</sup>利用图像透视变换和边缘检测,提出了一种基于跟踪变形轮廓结构整体变形监测方法;张杰等<sup>[17]</sup>利用Otsu对桥梁图片进行二值化分析,基于特征点质心位移变化获得桥梁位移变化;Du等<sup>[18-19]</sup>利用智能手机和监控相机实现了短距离和远距离的桥梁位移测量;章洋等<sup>[20]</sup>基于智能手机对农村公路路面破损存在的误检、漏检及破损无法量化问题,提出了一种新的检测方法。综上所述,目前在基于机器视觉的桥梁结构变形测量算法及系统研究方面已取得了许多成果,但仍然侧重于应用场景的拓展和测量算法探索,而对视觉测量算法在长期性监测过程中稳定性和准确性研究较少,尤其是缺少基于机器视觉的结构安全监测系统。此外,由于长期性监测技术应用不足,大多数公路桥梁在运营期也难以积累连续性的位移数据,导致通过有限元分析对桥梁实际工况的模拟难度较大,无法为桥梁结构的变形监测提供相对应的预警报警数值。因此,开展视觉测量算法的长期性应用和基于有限元模拟的结构安全预警研究均为基于机器视觉的公路桥梁安全监测系统应用的关键问题。

本文依托苏州葑门桥建立基于机器视觉的桥梁结构长期性安全监测系统,融合多种视觉测量算法,通过对结构自有汉字标题的识别并实时计算出结构在运营状态下的动态响应,实现了视觉测量算法的长期性应用。同时,基于有限元分析,对多工况下的结构荷载状态进行模拟,进而建立结构在运营状态下的变形预警阈值<sup>[21]</sup>,为公路桥梁长期性管养提供有益支撑。

## 1 基于机器视觉的桥梁变形测量

机器视觉技术作为一种融合图像处理、传感器、计算机软硬件等多方面的新兴技术,能够实现非接触式全场变形测量,节省大量人力物力。如图1所示,本文提出的基于机器视觉的桥梁位移测量方法,

首先是通过摄像设备获取桥梁结构实时视频,然后利用模板匹配方法对目标区域进行标记定位,进而利用特征点识别方法完成特征匹配,提取目标区域像素位移,最后通过位移标定得到桥梁真实位移。

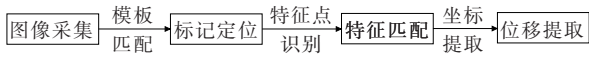


图1 视觉测量算法步骤

Figure 1 Steps of visual measurement algorithm

### 1.1 基于模板匹配方法的目标定位

模板匹配是一种根据预先选取的模板在目标图像中寻找相同位置的定位方法,目前比较常用的模板匹配方法包括平方差匹配、标准平方差匹配、相关匹配、标准相关匹配等。前期多次试验已证明,归一化相关匹配方法能够满足匹配精度的要求。如图2

所示,模板匹配具体过程为:先将模板图像左上角的坐标与目标图像左上角坐标重合,基于归一化相关系数匹配计算函数进行相关性计算,计算过程如式(1)所示;然后不断滑动模板,使模板图像左上角顶点遍历目标图像中的每一个像素点,当匹配计算结果为1时,说明该匹配位置将是最佳匹配,该区域为模板图像在目标图像中的具体位置。



图2 模板匹配方法示意图

Figure 2 Template matching method

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} [T(x', y') \cdot I(x + x', y + y')] - \frac{1}{\omega \cdot h} \cdot \sum_{x', y'} T(x', y') \cdot \sum_{x', y'} I(x + x', y + y')}{\sqrt{\sum_{x', y'} T^2(x', y') - \frac{1}{\omega \cdot h} \left( \sum_{x', y'} T(x', y') \right)^2} \cdot \sqrt{\sum_{x', y'} I^2(x + x', y + y') - \frac{1}{\omega \cdot h} \left( \sum_{x', y'} I(x + x', y + y') \right)^2}} \quad (1)$$

式中: $R(x, y)$ 为图像相关性计算结果; $T$ 为模板图像; $I$ 为目标图像; $x'$ 和 $y'$ 为模板图像中的坐标位置; $x$ 和 $y$ 为目标图像中的坐标位置; $\omega$ 和 $h$ 分别为模板图像的宽和高。

### 1.2 基于特征点识别方法的特征匹配

目前,SIFT(Scale Invariant Feature Transform)<sup>[22]</sup>、SURF(Speeded Up Robust Features)<sup>[23]</sup>等特征检测算法已广泛应用于图像特征点提取中,图像特征提取是图像处理极为重要的一环,为了保证桥梁图像特征提取的准确性、稳定性和高效性,采用SURF<sup>[23]</sup>方法进行特征点检测,该方法根据SIFT算法进行改进,在特征识别过程中具有更高的计算效率和鲁棒性。SURF算法主要包含Hessian矩阵的构建、尺度空间构建与特征点定位、选取特征点主方向与构造特征描述3个方面。

构建Hessian矩阵是SURF方法的关键。在构造Hessian矩阵前需要对图像进行高斯滤波,然后将高斯滤波处理后的图像进行二阶求导,得到图像中某个像素点 $x$ 处的Hessian矩阵 $H(x, \sigma)$ :

$$H(x, \sigma) = \begin{pmatrix} L_{xx}(x, \sigma) & L_{xy}(x, \sigma) \\ L_{xy}(x, \sigma) & L_{yy}(x, \sigma) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $L_{xx}$ 、 $L_{yy}$ 、 $L_{xy}$ 为高斯二阶微分在点 $(x, y)$ 处与原

图像中点 $(x, y)$ 的灰度值的卷积; $\sigma$ 为尺度。

当Hessian矩阵判别式 $\det(H)$ 在某一点取局部极值时,可以将该点作为关键点:

$$\det(H) = L_{xx}L_{yy} - L_{xy}^2 \quad (3)$$

为了提高图像计算速度,该算法采用近似处理,将高斯滤波器更换为盒式滤波器:

$$\det(H) = D_{xx}D_{yy} - (0.9D_{xy})^2 \quad (4)$$

式中: $D_{xx}$ 、 $D_{yy}$ 、 $D_{xy}$ 为盒式模板与图像的卷积;系数0.9是用来平衡近似处理所产生的误差。

在构建尺度空间时,SURF算法是通过不断改变盒式滤波器的模板尺寸大小来得到多尺度响应的金字塔图像。根据非极大值抑制方法,得到的关键点与尺度空间中周围邻域以及上下两层尺度空间的像素点,并进行比较,如图3所示,共有 $26(8+9+9)$ 个像素点,然后利用3次线性插值方法可精准定位特征点。

特征点主方向的确定是利用Haar小波转换得到的。以特征点为中心,在半径为 $6\sigma$ 的圆形区域中,选取角度为 $60^\circ$ 的扇形,并使用Haar小波转换计算其Haar小波响应值,便可得到1个特征矢量;然后旋转扇形使扇形遍历所有圆形区域,在形成的一系列特征矢量中找到模值最大的矢量,该矢量便为特征点的主方向。在特征点附近选取1个小方格,方格大小



为 $4 \times 4$ ,每个小方格选取25个采样点,通过计算区域内的Haar小波响应值,可产生1个 $4 \times 4 \times 4$ 即64维的描述子。

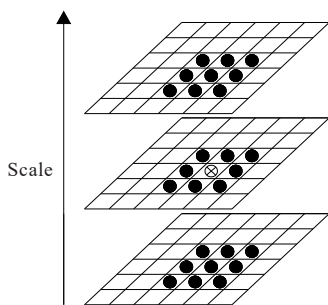
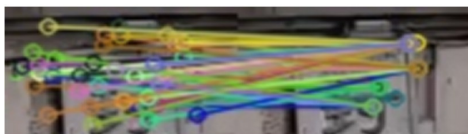


图3 特征点定位

Figure 3 Location of feature points

当前已有较多的匹配搜索算法,本文采用FLANN (Fast Library for Approximate Nearest Neighbors)<sup>[24]</sup>特征匹配算法,该算法库所包含随机k-d树算法、优先搜索k-means树算法和层次聚类树算法,可在短时间内提高特征匹配的准确率。由于环境噪声干扰、图像复杂度以及图像灰度差异较大等因素,通过FLANN算法完成匹配的特征点对中,容易出现较多的错误匹配点。因此,采用PROSAC (Progressive Sampling Consensus)<sup>[25]</sup>方法可进一步剔除误匹配点,该方法采用半随机方法,根据评价函数值对特征点进行降序排列,筛选出评价函数值高的点对,确保得到更加准确的空间位移,特征点匹配结果如图4所示。



(a) 图像初匹配结果(FLANN)



(b) 剔除误匹配结果(PROSAC)

图4 特征点匹配结果

Figure 4 Matching results of feature points

### 1.3 结构真实位移计算

基于模板匹配和特征点识别方法完成目标区域的特征点匹配后,需要计算初始图像与每一帧图像中目标区域内正确匹配点对的坐标差值的均值,得到每一帧图像中目标区域的像素位移 $dy_{(j)}$ :

$$dy_{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{(j)}^i - y_{(1)}^i)}{n} \quad (5)$$

式中: $y_{(j)}^i$ 和 $y_{(1)}^i$ 分别为第 $j$ 张和第1张图像中第 $i$ 个点对的 $y$ 坐标; $n$ 为2张图像中正确匹配点对的数量。

通过位移标定系数可将像素位移转换为结构真实位移。目前常见的位移标定方法主要包括位移视差法、尺度因子法、全投影矩阵法等。其中,位移视差法主要用于测量物体二维平面位移,该方法方便简单,且桥梁在长期运营过程中大多产生竖向面内位移,因此,采用位移视差法完成桥梁位移标定。根据桥梁某一构件实际测量尺寸 $D$ 以及与变形测量点对应的该构件的像素距离 $d$ ,由图上距离与实际物理距离成线性关系可得到转换系数 $f$ 为:

$$f = \frac{D}{d} \quad (6)$$

式中:转换系数 $f$ 为图像单个像素对应的实际距离,单位为mm/pix。

将桥梁变形测量目标区域在每一帧图像中的像素位移 $dy_{(j)}$ 乘以转换系数 $f$ ,便可得到每一帧图像中测量目标区域真实的物理位移 $Dy_{(j)}$ ,即:

$$Dy_{(j)} = f dy_{(j)} \quad (7)$$

## 2 模型试验——视觉测量算法精度验证

将江苏省沿海高速连盐段灌河大桥按1:70等比例尺寸缩小的模型作为试验所用模型桥梁,该模型桥梁总长度9.1 m,为双塔双索面三跨斜拉桥。试验内容为桥梁位移测量和探究结构激励响应2个部分,试验设备包括智能手机、笔记本电脑、位移计、激光多普勒测振仪、应变仪以及激振锤等,设备相关参数如表1所示。通过模型桥梁试验,将视觉测量算法与传感器测量结果进行对比,验证视觉方法的可靠性。

表1 试验设备参数

Table 1 Experimental equipment parameters

试验设备	设备参数	型号
智能手机	采样频率:60 Hz	HONOR70
位移计	量程:0~50 mm	DH5G103
激光多普勒测振仪 (LDV)	采样频率:100 Hz	Laser Doppler Vibrometer
应变仪	采样频率:0~100 Hz	DH5920

## 2.1 桥梁位移测量试验

形变位移是桥梁结构受力状态分析以及安全评估的重要参数,图5为位移测量试验布置图,其试验结果如图6所示。本次试验在模型桥梁跨中位置设置黑白标记点,将手机固定在三脚架上,位移计安装在标记点正下方,通过控制小车上的铁块数量对桥梁进行加载,然后利用滑轮和电机让小车从桥梁一侧出发进行一次往返运动,回到初始位置。



(a) 模型桥梁总体布置

(b) 试验其他仪器布置

图5 位移测量试验布置

Figure 5 Layout of displacement measurement experiment

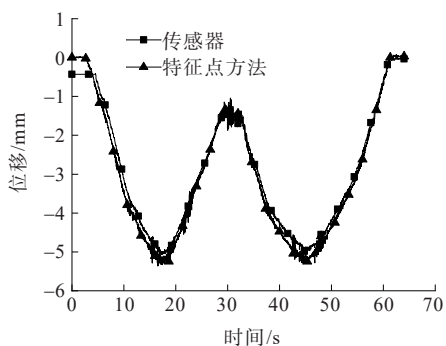


图6 标记点位移测量试验结果对比

Figure 6 Comparison of experimental results for measuring displacement of marked points

从图6可以看出:大约第17 s和第45 s时,加载小车正好两次经过桥梁跨中标记点位置,且位移结果曲线均出现较明显的峰值,特征点方法测量得到的位移结果和传感器测量结果基本一致,两次峰值位置的位移相对误差均保持在5%以内,这也验证了视觉测量方法的准确性和有效性。

## 2.2 桥梁冲击激励测量试验

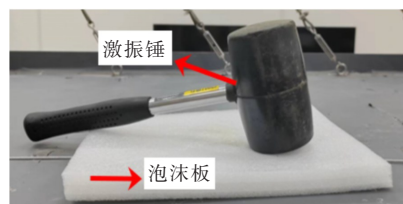
在位移测量试验的基础上,进一步开展桥梁结构冲击激励测量试验,图7为试验布置图,激振仪器包括激振锤和泡沫板。本次试验将激振锤快速作用在距离跨中汉字标记点约0.5 m位置,激励锤与桥面之间放置一块泡沫板,确保激励效果比较明显。

图8为视觉方法和传感器(LDV)测量两种方法的计算结果。

当激振锤作用于泡沫板以后,激励响应信号均呈现衰减趋势。利用快速傅里叶变换方法对时域数据进行卷积,通过提取结果中较大的峰值来估计整体振动频率,如图8(b)、(d)所示,两种测量方法的频域结果也基本一致,前3阶振动频率能够一一对应,且相对误差控制在1%以内。



(a) 冲击激励试验总体布置



(b) 激振仪器布置

图7 冲击激励测量试验布置

Figure 7 Layout of impact excitation measurement experiment

## 3 现场试验——视觉测量算法稳定性验证

### 3.1 试验桥梁概况

试验桥梁为坐落于江苏省苏州市的葑门桥,该桥位于葑门路与莫邪路交叉口的西侧,是一个孔径为32.0 m的双曲拱桥,如图9所示。

该桥总长度为44.8 m,横向布置为0.4 m(栏杆)+1.5 m(人行道)+7.0 m(车行道)+1.5 m(人行道)+0.4 m(栏杆),桥面全宽10.8 m。葑门桥桥龄较大,设计荷载为汽车-20级。

图10(a)为葑门桥地理位置平面图,图中黄色圆圈标注点为摄像头安装位置;图10(b)为摄像头具体安装示意图。

将摄像头架设于葑门桥南侧的西岸小区围墙,高度2.2 m(相对于地面),采集葑门桥行驶车辆实时运营情况,本次试验采用的是商业相机,相机型号为KEDACOM(IPC186),为满足长期监测及安全评估的需求,根据现有检测资料及采样定理设置摄像机采样频率为25 Hz,分辨率为1 280×720。选取桥梁

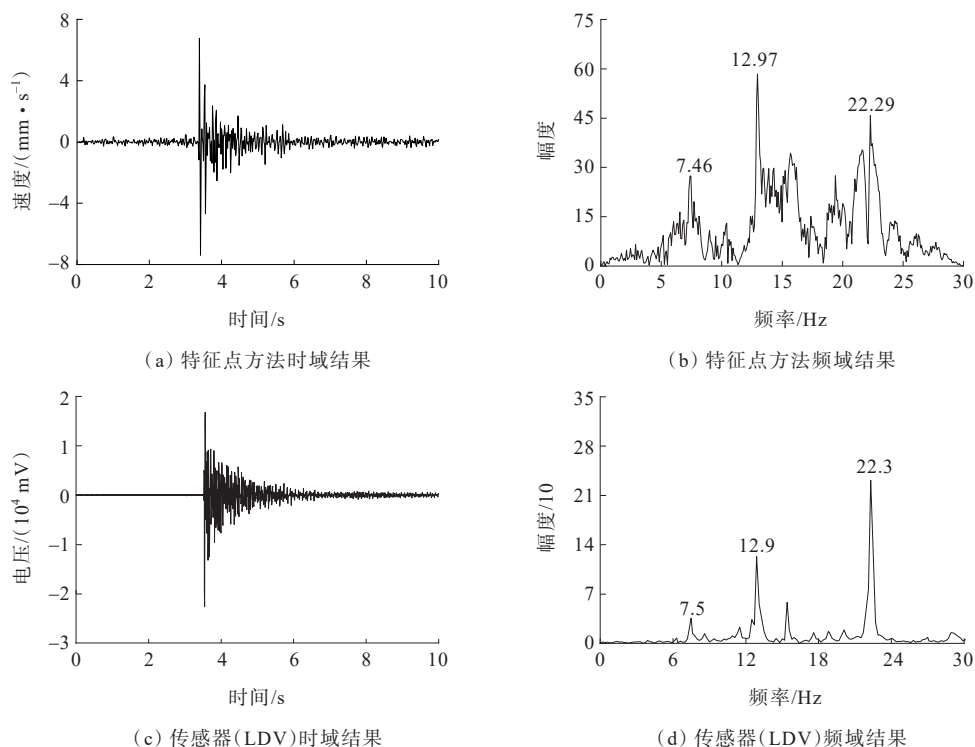


图8 特征点方法和传感器测量计算结果

Figure 8 Calculation results of feature point method and sensor measurement



图9 葑门桥

Figure 9 Fengmen bridge



(a) 葑门桥地理位置平面图



(b) 摄像头具体安装示意图

图10 试验现场布置情况

Figure 10 Layout of experimental site

主拱圈跨中位置的3个汉字(葑、门、桥)作为标记点。

### 3.2 试验结果分析

利用摄像头获取结构的实时状况视频,将视频分解为图像,利用模板匹配方法确定标记点位置,设定感兴趣区域,然后基于特征点方法匹配识别目标区域,最后通过位移标定可以同时得到3个标记点真实位移。从图11所示的3个标记点特征匹配效果可以看出:采用SURF方法能够在短时间内提取到较多的特征点,标记点初匹配结果存在较多的一对多、倾斜匹配等错误匹配,但通过PROSAC算法进行误匹配剔除后,错误匹配能够被有效去除,以保证位移测量结果的准确性。

图12(a)给出了5 min内标记点“葑”的位移时程曲线,位移为正表示标记点产生竖直向下的位移;图12(b)为3个位移峰值时刻对应的桥面车辆行驶情况。

由于正常行驶中的汽车荷载属于一种冲击荷载,对桥梁位移的影响会存在一定程度的波动,在分析位移计算结果时可暂时不考虑负值。当标记点出现位移峰值时,对应的标记点位置往往会有车辆驶过,基于实测位移变化便可判断桥面车辆行驶情况:前100 s内标记点的位移变化幅度较大,说明这段时



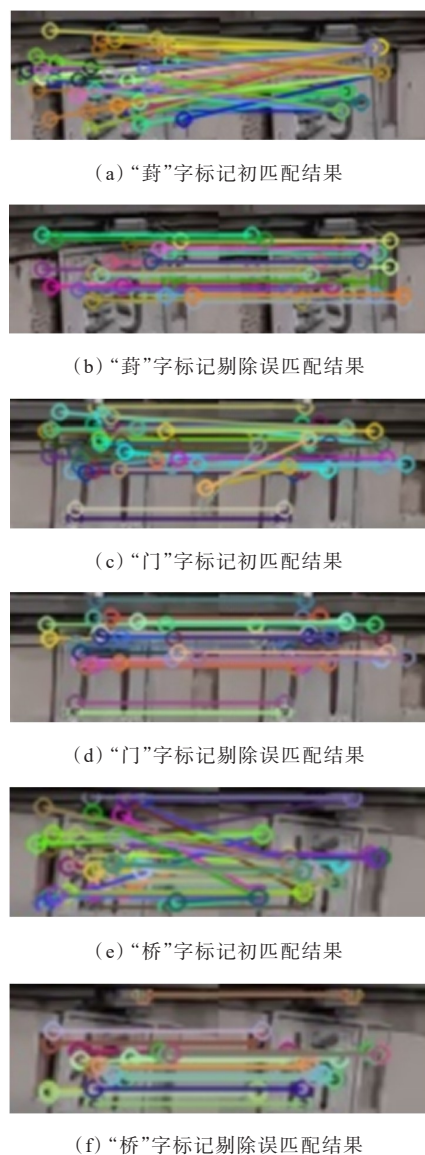
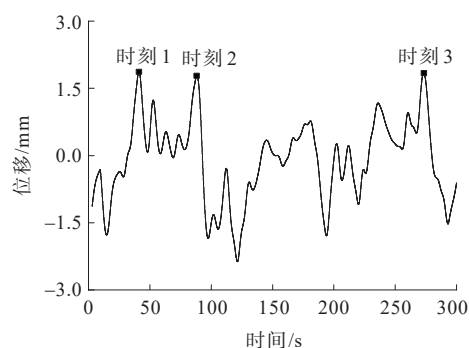


图 11 3 个标记点特征点匹配效果图

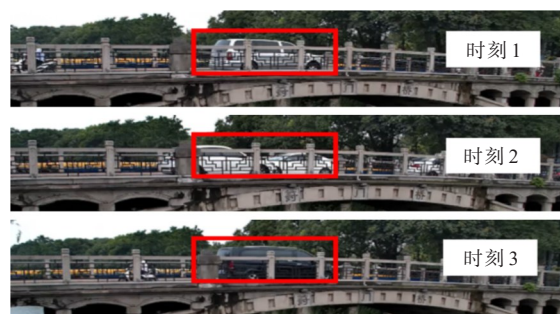
Figure 11 Matching effect of feature points for three marked points

间内车流量较大;从第 100 s 到第 120 s,标记点几乎没有产生向下的位移,说明这段时间几乎没有车辆通过。从拍摄视频中也可以看到:这段时间桥面车辆均已堵在桥梁东岸;从第 150 s 开始,标记点位置渐渐有比较零散的车辆驶过;从第 250 s 到第 270 s,车流量较之前稍大;第 270 s 以后,标记点处几乎没有车辆通行。

通过基于机器视觉方法测得的标记点位移可以判断桥面车辆行驶情况,当标记点位移出现明显峰值时,说明此时标记点位置正好有车辆驶过,选取 3 个标记点分别在 3 种车况下的对应峰值位移,从位移计算结果来看,桥梁 3 个标记点的位移变化比较符合实际情况(图 12~14),说明基于机器视觉的桥梁位



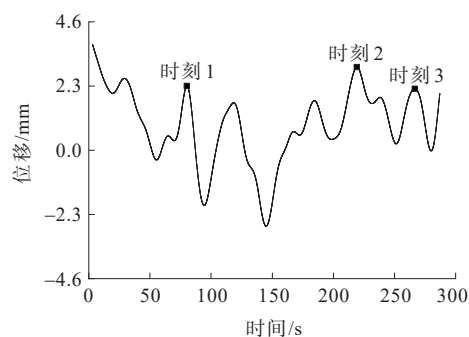
(a) 标记点“葑”位移时程图



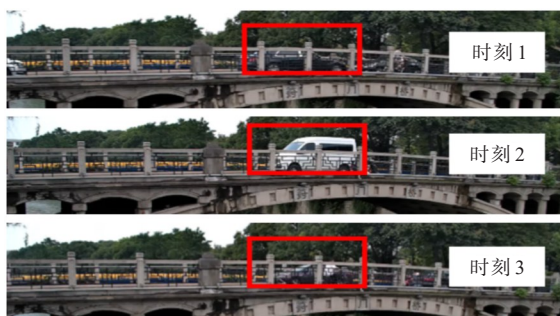
(b) 3 个峰值时刻对应车况

图 12 标记点“葑”位移实时测量结果

Figure 12 Real-time displacement measurement results of marked point “feng”



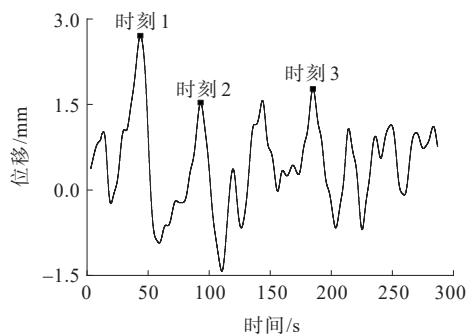
(a) 标记点“门”位移时程图



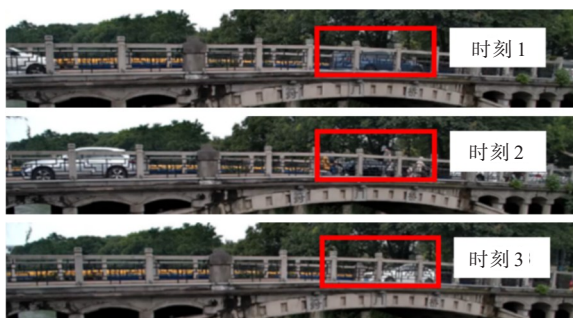
(b) 3 个峰值时刻对应车况

图 13 标记点“门”位移实时测量结果

Figure 13 Real-time displacement measurement results of marked point “men”



(a) 标记点“桥”位移时程图



(b) 3个峰值时刻对应车况

图14 标记点“桥”位移实时测量结果

Figure 14 Real-time displacement measurement results of marked point “qiao”

移测量方法计算精度较高,可以同时多个标记点的位移进行测量,计算速度较快,大大节约了测量成本。

## 4 基于动静荷载有限元分析的结构安全预警

### 4.1 葑门桥有限元模型构建

由于葑门桥横向拱波较平坦,可将其简化为直梁,为了更准确地描述桥梁内部结构之间的联系与传力,拱上立柱与主拱、腹拱之间均采用刚性连接,拱上填料与主拱之间采用弹性连接,所建有限元模型如图15所示。通过对有限元模型进行静载和动载试验,得到其计算结果,便可以作为桥梁受力分析与安全评估的依据。

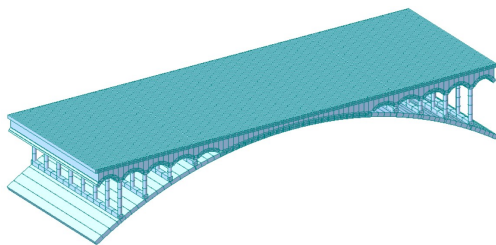


图15 葑门桥有限元模型

Figure 15 Finite element model of fengmen bridge

### 4.2 动静荷载试验分析

#### 4.2.1 考虑冲击系数的静荷载分析

汽车荷载作用于节点上时是一种瞬间作用后又随即消失的冲击荷载,由于车辆的动力冲击作用会使桥梁产生动态增量,在计算桥梁位移时,需要根据《城市桥梁设计荷载标准》(CJJ 77—2011),得到荷载冲击系数 $\mu$ :

$$\mu = \frac{20}{80 + L} \quad (8)$$

式中: $L$ 为桥梁跨径(m)。

冲击系数是连接桥梁静载试验与动载试验的中间纽带,将车辆对桥梁结构的冲击作用简化为静力学方法,以车辆静载效应乘以动力放大系数(以 $1+\mu$ 表示)表征活载作用在桥梁上的动力效应。对“葑”“门”“桥”3个标记点分别施加4种不同大小的节点荷载(集中荷载),得到位移结果如表2所示。

表2 考虑冲击系数的位移结果

Table 2 Displacement results considering impact coefficient

节点荷载 大小/kN	标记点“葑” 位移/mm	标记点“门” 位移/mm	标记点“桥” 位移/mm
20	0.93	1.03	0.93
30	1.39	1.54	1.39
40	1.85	2.06	1.85
50	2.32	2.57	2.32

从表2可以看出:3个标记点的位移均随荷载增大而逐渐变大,在相同大小的荷载作用下,桥梁主拱圈跨中标记点“门”的位移明显偏大,而跨中两侧标记点“葑”“桥”的位移基本相同,这与桥梁实际位移分布情况基本一致,符合拱结构跨中刚度较两侧小的特点。

#### 4.2.2 移动荷载时程分析

现行标准规范中使用的冲击系数是为了方便计算而采用的中间变量,与实际要求有较大差异。车辆行驶速度、路面平整度、桥梁刚度等都会对桥梁冲击系数存在显著影响,已有研究表明:单个常量力作用时,桥梁不同截面对应的冲击系数并不相同。当汽车以不同速度、不同方式通过桥梁时,在移动车辆荷载作用下,桥梁也将产生不同的响应。因此,不能简单地使用规范规定的冲击系数值,还需要通过移动荷载时程分析得到位移结果并进行比较。

桥梁移动荷载时程分析综合考虑车辆荷载大



小、车速等影响,将有限元模型节点在移动车辆荷载作用下所受的力简化为三角形分布移动荷载,重量为 20 kN 的车辆分别以 3 种速度通过桥面,得到 3 个标记点的时程分析结果如图 16 所示。

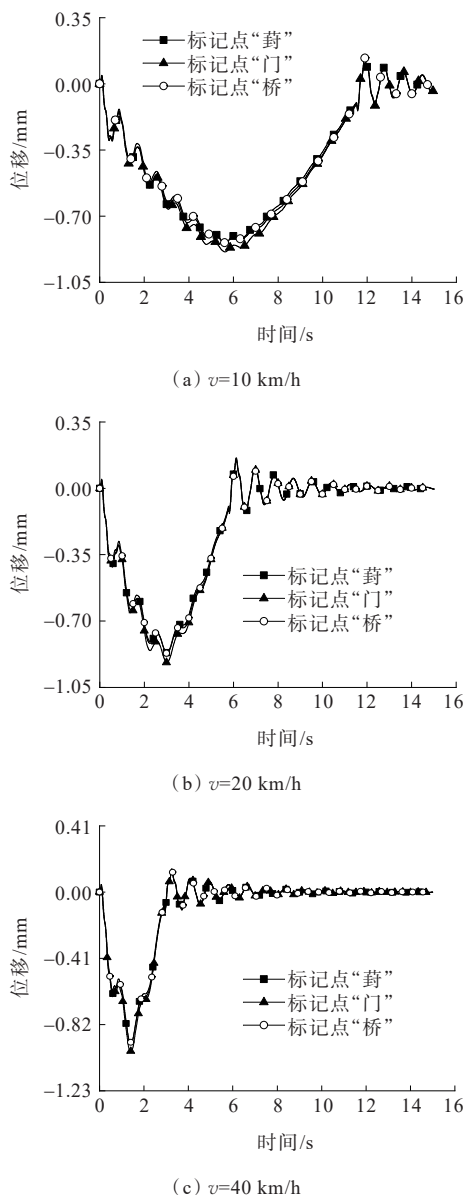


图 16 3 种车速下标记点的时程分析结果

Figure 16 Time history analysis results of marked points under three different vehicle speeds

在 20 kN 的移动车辆荷载作用下,根据图 16 所示的移动荷载时程分析结果,可以分别得到 3 种车速下 3 个标记点位移最大值,3 个标记点的静力位移与 3 种车速下的动位移最大值对比结果如表 3 所示。

由表 3 可知:随着车速增大,结构的动力反应逐渐明显,标记点时程分析的位移逐渐增大。由标记点“门”的时程分析结果可以得出,在同一路面平整

度等级下,当  $v=10$  km/h、20 km/h、40 km/h 时,标记点“门”的位移最大值分别为 0.89 mm、0.92 mm、0.98 mm,对应的冲击系数分别为 1.02、1.06、1.13,计算结果表明:车辆行驶速度越大,桥梁冲击系数越大。而根据规范得到的桥梁冲击系数为 1.18,这样会导致有限元模型位移结果偏大,难以保证后期桥梁预警的准确性和有效性。

表 3 静力分析与时程分析标记点位移结果对比

Table 3 Comparison of displacement results of marked points between static analysis and time history analysis

工况	标记点“葑” 位移/mm	标记点“门” 位移/mm	标记点“桥” 位移/mm
未考虑冲击系数的静力分析	0.79	0.87	0.79
考虑冲击系数的静力分析	0.93	1.03	0.93
时程分析(10 km/h)	0.84	0.89	0.84
时程分析(20 km/h)	0.87	0.92	0.87
时程分析(40 km/h)	0.93	0.98	0.93

在进行有限元模型分析时,施加荷载简化为一个节点荷载,与实际车辆分布情况可能会存在差异,车辆的不同行车方式、行车速度都会对结构响应产生影响,因此,基于有限元分析的桥梁安全预警需要考虑车速、车辆偏载情况等因素的影响。

#### 4.3 基于动静荷载分析的预警指标设定

对于双曲拱桥,不论是从其承载力极限状态或者正常使用极限状态来考虑,桥梁的主拱圈跨中位移都是评价桥梁健康状况的一个重要参数。葑门桥桥龄较老,结构刚度有所下降,经过时间累积会存在安全隐患,难以保障桥梁自身的安全和车辆通行安全。据调查,2022 年 1 月 24 日,苏州市公安局交通管理局发布通告:葑门桥在结构检测中被评定为 D 级,自 2022 年 1 月 30 日起,在葑门桥改造期间,对葑门桥采取限载 5 t 和限高 2.2 m 的临时交通管理措施。

有限元分析中施加的是节点荷载,与桥面车辆实际分布情况存在差异,基于上述葑门桥限高限载措施,且葑门桥为两条车道,考虑偏载、车速等因素,设定节点荷载大小为 100 kN。通过车速  $v=30$  km/h 的移动荷载时程分析结果得到位移预警指标  $Z_1=4.62$  mm,基于考虑冲击系数的有限元静力分析结果得到位移预警指标  $Z_2=5.15$  mm,两者均小于桥梁跨度的 1/800,满足《城市桥梁检测与评定技术规范》(CJJ/T 233—2015)要求。

## 5 结论

本文提出了一种基于机器视觉的公路桥梁变形测量及安全预警方案,得出以下结论:

(1) 提出了一种基于模板匹配和特征点识别相结合的视觉测量算法,利用模板匹配方法实现了目标的自动定位和感兴趣区域的确定,基于特征点识别方法获取关键位置坐标变化,能够实现全场位移实时高精度测量。

(2) 利用桥梁模型开展了结构动态位移和冲击激励测量试验,将视觉测量算法与传感器测量结果进行对比,两者基本一致,跨中位移测量相对误差约为5%,桥梁前三阶振动频率相对误差在1%以内,有效验证了视觉测量方法的准确性。在长期监测过程中,进一步验证了视觉测量算法在复杂环境变化下的稳定性。

(3) 根据设计资料建立现场试验桥梁有限元模型,由于考虑规范所采用的冲击系数会使模型位移偏大,难以保证后期桥梁预警与安全分析的准确性和有效性,基于此,为了进一步得到更加符合实际情况的位移结果,进行3种车速下的移动荷载时程分析,结果表明:在同一路面平整度等级下,车速越大,桥梁冲击系数越大,结构动力效应更明显。

(4) 综合考虑车速、桥梁限载限速等因素,基于移动荷载时程分析结果设置桥梁结构位移一级预警阈值 $Z_1$ ,基于有限元静力分析结果设置位移二级预警阈值 $Z_2$ ,据此可判定监测时段内结构是否处于安全可控状态。

### 参考文献:

### References:

- [1] 吴海军,陈泓玮,屈浩然.中小跨混凝土梁桥和大跨径桥梁健康监测差异初探[J].中外公路,2021,41(4): 157-163.  
WU Haijun, CHEN Hongwei, QU Haoran. Preliminary study on health monitoring differences between small-to-medium span concrete beam bridges and long-span bridges [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4): 157-163.
- [2] 杨志峰,曾国良,江祥林.基于挠度指标的中小跨径桥梁健康监测系统设计[J].中外公路,2018,38(6): 162-166.  
YANG Zhifeng, ZENG Guoliang, JIANG Xianglin. Study on designing health monitoring system for short-to-medium span bridges based on deflection index[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(6): 162-166.
- [3] BREUER P, CHMIELEWSKI T, GÓRSKI P, et al. Application of GPS technology to measurements of displacements of high-rise structures due to weak winds [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(3): 223-230.
- [4] 韩怡天,冯东明,吴刚.基于机器视觉与无人机的结构位移测量方法[J].振动与冲击,2022,41(19): 1-7.  
HAN Yitian, FENG Dongming, WU Gang. Measurement method of structural dynamic displacement based on machine vision and UAV[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(19): 1-7.
- [5] 叶肖伟,董传智.基于计算机视觉的结构位移监测综述[J].中国公路学报,2019,32(11): 21-39.  
YE Xiaowei, DONG Chuanzhi. Review of computer vision-based structural displacement monitoring[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(11): 21-39.
- [6] DU W K, LEI D, BAI P X, et al. Dynamic measurement of stay-cable force using digital image techniques[J]. Measurement, 2020, 151: 107211.
- [7] 谢海波,朱玮峻,张璧,等.面向高强度螺栓检测的YOLOv5-Ganomaly联合算法研究[J].中外公路,2024,44(4): 171-179.  
XIE Haibo, ZHU Weijun, ZHANG Bi, et al. Research on YOLOv5-Ganomaly joint algorithm for high-strength bolt detection[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(4): 171-179.
- [8] 王平让,黄宏伟,薛亚东.隧道衬砌裂缝机器视觉检测系统研制与应用[J].公路,2022,67(10): 439-446.  
WANG Pingrang, HUANG Hongwei, XUE Yadong. Development and application of machine vision detection system for tunnel lining cracks[J]. Highway, 2022, 67(10): 439-446.
- [9] JÁUREGUI D V, WHITE K R, WOODWARD C B, et al. Noncontact photogrammetric measurement of vertical bridge deflection[J]. Journal of Bridge Engineering, 2003, 8(4): 212-222.
- [10] LEE J J, SHINOZUKA M. Real-time displacement measurement of a flexible bridge using digital image processing techniques[J]. Experimental Mechanics, 2006, 46(1): 105-114.
- [11] 陈伟欢,吕中荣,陈树辉,等.基于数码摄像技术的高耸结构动态特性监测[J].振动与冲击,2011,30(7): 5-9.

- CHEN Weihuan, LYU Zhongrong, CHEN Shuhui, et al. Monitoring dynamic characteristics of a highrise structure based on digital camera technology[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(7): 5-9.
- [12] 王翔, 钟继卫, 王波. 桥梁动态挠度图像识别测试技术研究[J]. 世界桥梁, 2015, 43(3): 59-62.
- WANG Xiang, ZHONG Jiwei, WANG Bo. Study of bridge dynamic deflection identification and testing technique based on image processing[J]. World Bridges, 2015, 43(3): 59-62.
- [13] FENG M Q, FUKUDA Y, FENG D M, et al. Nontarget vision sensor for remote measurement of bridge dynamic response[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(12): 59-62.
- [14] KIM J, JEONG Y, LEE H, et al. Marker-based structural displacement measurement models with camera movement error correction using image matching and anomaly detection[J]. Sensors, 2020, 20(19): 5676.
- [15] 谢鹏, 雷冬, 杜文康, 等. 不同激励下基于边缘检测方法的多根拉索振动频率的同步测量[J]. 实验力学, 2022, 37(1): 41-51.
- XIE Kun, LEI Dong, DU Wenkang, et al. Determination of optimal point for stay-cable vibration measurement by edge detection[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(1): 41-51.
- [16] CHU X, ZHOU Z X, DENG G J, et al. An overall deformation monitoring method of structure based on tracking deformation contour[J]. Applied Sciences, 2019, 9(21): 4532.
- [17] 张杰, 白鹏翔, 杜文康, 等. 基于数字图像方法的桥梁移动荷载识别[J]. 河南科学, 2022, 40(11): 1728-1735.
- ZHANG Jie, BAI Pengxiang, DU Wenkang, et al. Dynamic load recognition of bridge based on digital image method [J]. Henan Science, 2022, 40(11): 1728-1735.
- [18] DU W K, LEI D, HANG Z Q, et al. Short-distance and long-distance bridge displacement measurement based on template matching and feature detection methods[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2023, 13(2): 343-360.
- [19] 杜文康, 雷冬, 杭宗庆, 等. 基于 SURF-PROSAC 法的高铁桥梁位移测量技术研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(9): 3579-3591.
- DU Wenkang, LEI Dong, HANG Zongqing, et al. Deformation measurement technology of high-speed railway bridge based on SURF-PROSAC method[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(9): 3579-3591.
- [20] 章洋, 何莉, 汤青洲, 等. 基于智能手机的农村公路路面破损检测方法[J]. 中外公路, 2023, 43(2): 51-57.
- ZHANG Yang, HE Li, TANG Qingzhou, et al. Detection method of rural road pavement damage based on smart phone[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 51-57.
- [21] 吴海军, 袁光杰, 王涛, 等. 基于中小跨梁桥结构响应特点的阈值设定及应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(9): 54-58, 66.
- WU Haijun, YUAN Guangjie, WANG Tao, et al. Threshold setting and application based on structural response characteristics of small and medium span beam bridges[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(9): 54-58, 66.
- [22] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [23] LI J Y, WANG Y L, WANG Y J. Visual tracking and learning using speeded up robust features[J]. Pattern Recognition Letters, 2012, 33(16): 2094-2101.
- [24] MUJA M, LOWE D G. Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Vision Theory and Applications. February 5-8, 2009. Lisboa, Portugal. SciTePress-Science and Technology Publications, 2009: 1-10.
- [25] LI X Y, LEI T J, ZHAO C, et al. Research on improved image registration algorithm based on PROSAC algorithm [C]//Eleventh International Conference on Digital Image Processing (ICDIP 2019). May 10-13, 2019. Guangzhou, China. SPIE, 2019: 691-697.