文章编号:1674-2974(2024)11-0158-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024117

基于改进LSD的斜拉桥索力非接触鲁棒识别

朱前坤[1†],崔亚歌[1],王宪玉[1,2],杜永峰[1]
(1. 兰州理工大学 防震减灾研究所,甘肃 兰州 730050;
2. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司,甘肃 兰州 730030)

摘 要:拉索是斜拉桥的关键承载构件,其受力状态是评估桥梁安全状态的重要指标,准确测量拉索索力是保障桥梁结构安全的重要环节.基于此,建立一套可实现远距离、无靶标、高精度的斜拉索索力识别系统.该系统利用改进的直线检测(Line Segment Detector, LSD)算法对拉索进行追踪,从而识别拉索的振动信息;再通过模态分解(VMD)离散出斜拉索的有效振动信号,得到斜拉索的频率信息;最后利用振动频率法,从斜拉索的频率信息来估算出斜拉索的索力.在实验室条件下对长细比较大、像素占比较少的钢尺模型以及在大跨度斜拉桥上对斜拉索索力进行识别对比,确定了改进的LSD算法以及该系统对索力识别的精确性及鲁棒性.在钢尺模型试验中,改进的LSD算法识别到的钢尺振动信息与激光位移计对比误差仅为0.63%;在大跨度斜拉桥上的试验中,该系统识别到斜拉索的索力与接触式传感器对比误差小于3.0%.以上两个试验结果表明,本文提出的系统能够在复杂的实际工程现场环境中对斜拉索索力进行高精度识别.

关键词:桥梁工程;索力测量系统;计算机视觉;直线检测;无靶标识别
中图分类号:U448.27 **文献标志码**:A

Robust Non-contact Recognition of Cable Forces in Cable-stayed Bridges Based on Improved LSD

ZHU Qiankun[1†], CUI Yage[1], WANG Xianyu[1,2], DU Yongfeng[1]
(1. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Gansu Province Transportation Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: The cable is a key load-bearing component of cable-stayed bridges, and its stress state is an important indicator for assessing the safety of bridge structures. Accurate measurement of cable forces is crucial to ensure the safety of the bridge. Based on this, this paper establishes a set of cable force identification system for cable-stayed bridges that can achieve long-distance, non-target, and high-precision measurements. The system utilizes an improved line segment detector (LSD) to track the cables and identify their vibration information. The valid vibration signals of the cables are then discretely extracted using the variational mode decomposition (VMD) method to obtain their frequency information. Finally, the cable forces are estimated using the vibration frequency

* **收稿日期**:2023-12-30
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52168041),National Natural Science Foundation of China(52168041);甘肃省重点研发计划资助项目(22YF11GA301),Gansu Province Key Research and Development Program(22YF11GA301)
作者简介:朱前坤(1981—),男,江苏徐州人,兰州理工大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: zhuqklut@qq.com

method based on the cable's frequency information. The accuracy and robustness of the improved LSD and the cable force identification system are confirmed through experiments conducted in the laboratory on a model with a large slenderness ratio and low pixel ratio, as well as cable force identification on a large-span cable-stayed bridge. In the laboratory experiment using a steel ruler model, the improved LSD identified the vibration information of the ruler with an error of only 0.63% compared with the laser displacement sensor. In the experiment on a large-span cable-stayed bridge, the error in the identified cable forces by the system compared with the contact sensors was less than 3.0%. Both experiments demonstrate that the proposed system can accurately identify cable forces in complex engineering field environments.

Key words: bridge engineering; cable force measurement system; computer vision; straight line detection; no target recognition

拉索是斜拉桥的重要传力构件,其受力状态是反映桥梁健康状态的重要标志之一[1]. 因此对运营状态下斜拉桥的拉索索力进行研究至关重要.

目前,工程中主要采用的索力测量方法包括以下几种[2-3]:1)压力表读数法[4],即通过使用张拉拉索的油压千斤顶来获取索力,避免额外设备,简单直观;2)压力传感器法[5-6],利用材料的应力应变关系,将变形转换为可测量的信号,并处理得到索力;3)振动频率法[7-8],通过分析拉索的振动频率,推算出索力与拉索振动频率之间的关系,从而得出索力;4)磁通量法[9-11],利用铁磁性材料的性质,通过磁导率的变化推断应力变化,计算出索力. 前两种方法主要应用于拉索施工过程中的索力测量,第三种方法可用于成桥阶段的索力测量,也是目前测试斜拉桥索力应用最广泛的方法之一. 磁通量法是一种无损索力测量方法,但对拉索会产生磁化效应,且所需设备造价较高.

传统索力测量方法在一定条件下存在使用范围受限、设备昂贵、效率低等缺点,且随着计算机视觉技术的发展,国内外学者利用计算机视觉技术对斜拉桥索力测试开展了大量的研究. Chen 等[12]利用多台摄像机,同时对安装有圆形目标靶点的斜拉索进行数据采集,利用圆形靶点的质心坐标计算目标测点的像素位置,最终成功识别斜拉索的模态信息. Kim 等[13]提出一种多目标对象匹配算法,解决了因斜拉索上粘贴的目标靶点晃动,采集到图像中目标靶点模糊不清的问题,最终得到拉索的固有频率及阻尼比. 晏班夫等[14]在斜拉索上预先布置目标测点,使用摄像机近距离对目标测点进行采集,成功分析出目标测点的响应频率,并以此作为拉索的振动频率,再通过振动频率法估算索力,索力测量误差在2.0%以内. 但以上的研究都需要在斜拉索上安装目标靶点. 在大跨度斜拉桥的斜拉索上安装目标靶点费时费力且危险系数较高.

越来越多的学者们开始研究无标志物的索力识别. Xu 等[15]在人行天桥上进行了试验,成功使用边缘检测和运动估计来识别斜拉索的振动;王邵锐等[1]采用边缘检测对二值化的斜拉索进行振动识别,并最终估算出索力;Jiang 等[16]提出一种基于直线检测的改进算法,并用于电车轨道线的识别,成功在复杂环境下识别出电缆线的振动频率;本课题组提出的分段光流法[17],获取了结构的全场位移,并在实验室环境下,利用人行桥模型试验对该算法进行了验证,并与激光位移计进行对比,位移误差小于1%. 综上,无标志物的检测方法主要有光流法、直线检测法以及特征点检测法. 然而光流法对光照变化过于敏感,直线检测法由于其鲁棒性较差更适用于近距离的检测,特征点检测无法准确提取边缘光滑的斜拉索的特征点. 因此这些方法对无标志物、远距离的斜拉索进行振动识别存在不足[18].

本文提出一种无标志物,可用于远距离检测斜拉索振动,并估算索力的系统. 该系统由改进的LSD算法,配合振动频率法,建立一种方便快捷的索力测量系统.

1　系统原理

本文研究的斜拉桥索力识别系统主要由两部分

组成.第一部分是利用计算机视觉获取拉索位移,采用基于Hough直线检测算法[19]的改进方法.以消费级相机作为采集设备,对采集到的数据,利用简单线搜索(包括垂直子集搜索和直线搜索),然后进行亚像素检测,最终输出拉索像素位移.相机的标定根据边缘与中心标定参数进行线性插值可实现全场的标定[20].最终得到拉索真实位移,并通过VMD技术将实测信号进行分解,求出各分量的频率.第二部分是利用振动频率法,根据第一部分得到的瞬时频率来估算出各拉索索力,系统原理流程图如图1所示.

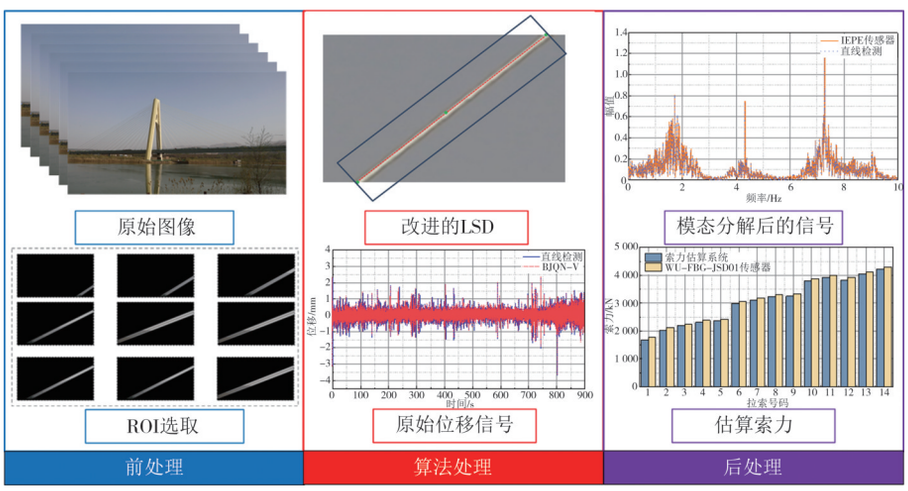


图1 系统原理流程图

Fig.1 System scheme flow chart

1.1 改进的LSD算法

为了在复杂的实际工程现场环境中成功对斜拉索进行高精度检测,本文对原有的Hough直线检测进行改进.在使用该算法对拉索进行检测时,需要注意以下3个前提条件:

1)在所有图像中,假设拉索为直线;

2)在灰度图像中,拉索的图像强度大小基本相同,且与背景有足够的强度差;

3)拉索从左到右穿过整个图像.

1.1.1 简单线搜索

简单线搜索由垂直子集搜索和直线搜索两部分组成,原理流程图如图2所示.指定图像的左上角为坐标原点,$f(x,y)$表示强度值.作为图像组成部分的正方形区域是一个子集,垂直子集搜索的目标是定位图像中可能存在的拉索端点,这是通过在图像的左右两侧上下滑动子集来实现的.在子集内,为每个垂直位置找到最大强度值g_e,如果g_e小于阈值G_{et},则将该子集作为拉索端点的一个候选.阈值G_{et}一般为背景强度和拉索强度的平均值.且由于拉索应覆盖整个候选子集,因此子集尺寸应小于拉索的直径.当左右两侧均找到对应的子集时,则认为是一条直线,即目标拉索.但是,垂直搜索会产生多个候选子集P(左)和P'(右),如图3所示.通过沿搜索线构建搜索窗口来搜索候选点P_m和P_n'之间的搜索线区域,得到最大强度g_l值,然后将其与强度阈值G_{el}进行比较.如果g_l小于G_{el},则认为该线为拉索的精确位置,并获得中心线$r_1 = x\cos\theta_1 + y\sin\theta_1$的坐标$(P_m, P_n')$和系数$(r_1, \theta_1)$.同时为了检测的准确性,搜索窗口的高度应小于接触线的直径.图3中搜索窗口(红色虚线矩形垂直于接触线放置,且像素值略小于接触线像素值)的高度设置为9个像素,而接触线的直径约为11个像素.$r_1 = x\cos\theta_1 + y\sin\theta_1$是Hough变换中使用的线性表达式,其中$r$是原点$O$与线的最近点之间的距离,$\theta$是$x$轴与连接原点$O$与最近点的线之间的角度,坐标系仍为原始的$xOy$坐标系.总之,如果垂直子集搜索和线性搜索的最高强度值g_e和g_l满足式(1)的条件,则将其作为备选对象之一.

$$\begin{cases} g_e < G_{et} \\ g_l < G_{el} \end{cases} \tag{1}$$

1.1.2 亚像素检测

在对拉索进行简单线搜索后,可以获得中心线的坐标(P_m, P_n'),但此时的精度只能达到像素级别,不能满足实际工程的需求.因此,必须使用亚像素精度来识别拉索的运动.为了在亚像素级别上检测到拉索,有两种算法可供选择:中心线检测算法和边缘检测算法.尽管这两种方法具有类似的检测精度,但

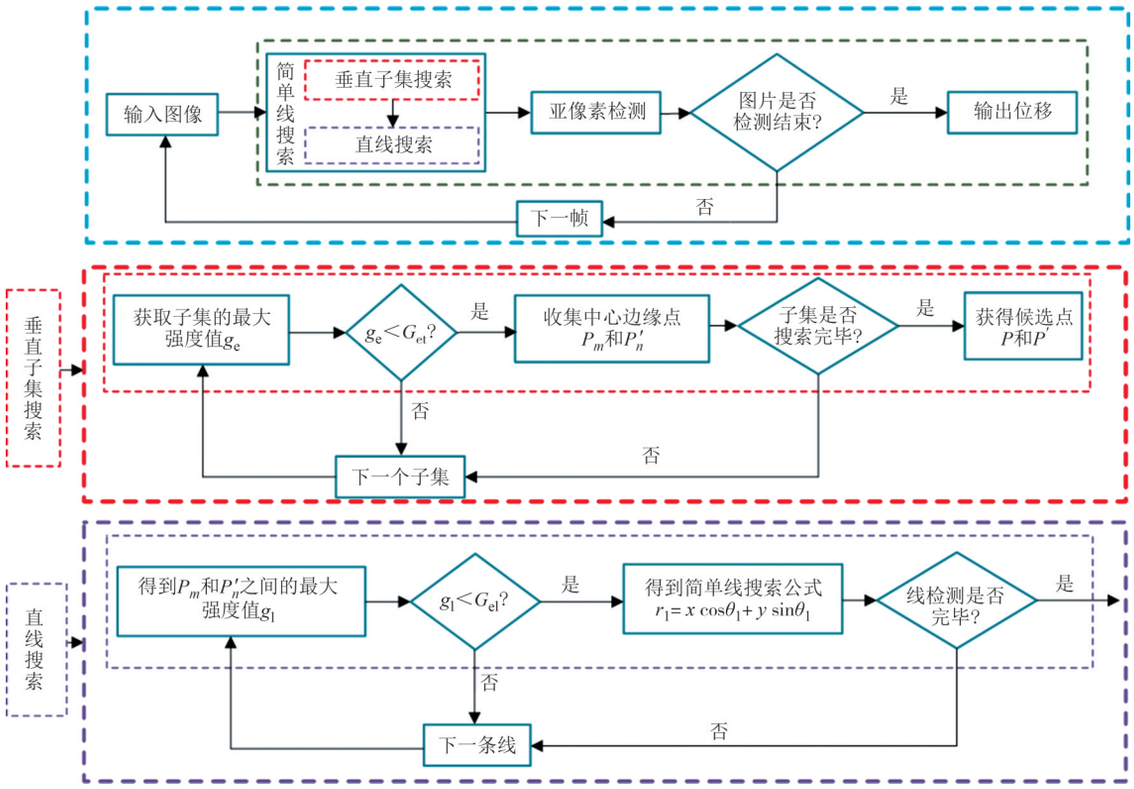


图 2　简单线搜索原理流程图

Fig.2　Flow chart of simple line search principle

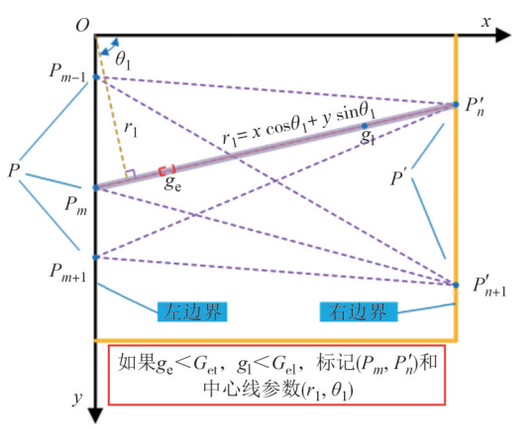


图 3　直线搜索

Fig.3　Straight line search

是中心线检测算法的计算量较小,更适合大规模数据项目.因此在该算法中使用中心线检测技术用于亚像素检测.采用双三次插值来确定亚像素强度值.它的主要目标是通过使用插值来接近拉索的上下边界,从而确定目标区域的中心点.基本计算过程如下:

1)寻找垂直搜索范围.搜索范围以端点为中心且应包含导线的上下边缘(图 4 中的红色区域表示完全被线覆盖的子像素子集).

2)采用双三次插值法来获得单元格子集的强度值.通过设置0.5像素的垂直步长和0.5像素的分辨率,进行垂直和左右搜索亚像素子集,来找到顶部和底部边缘.与简单线搜索标准类似,当搜索到的最大强度值 $g_e < G_{et}$ 时,认为该子集完全被一条直线覆盖,并选择该子集的中心线端点作为候选点(图 4 中的黄色矩形所示).

3)当选择了所有候选点后,将连续且相邻的候选点视为一个区域(图 4 中的黄色区域),并选择该区域的中心点作为单个候选点,例如 $P_{center1}(x_{avel1}, y_{avel1})$ 和 $P_{center2}(x_{avel2}, y_{avel2})$,如图 4 所示的红色实心矩形块.因此,这两个单个候选点之间的直线是中心线 $r_2 = x\cos\theta_2 + y\sin\theta_2$. 中心线的中点被选为唯一的跟踪点 $P_{track}(x_k, y_p)$. 可以根据跟踪点的运动来识别拉索的振动.

1.2　数据处理

对于本文提出的改进的LSD算法,在检测到斜拉索后,取线段的中点作为监测点,并通过计算获取图像的第 1 帧的坐标 $(x^1_{track}, y^1_{track})$ 与第 i 帧的坐标 $P_{track}(x^i_k, y^i_p)$ 之间的差值来识别拉索的位移响应,如式(2)所示:

$$\Delta d = \left(x^i_k - x^1_{track}, y^i_p - y^1_{track}\right) \tag{2}$$

基于得到的拉索的数据,使用变分模态分解

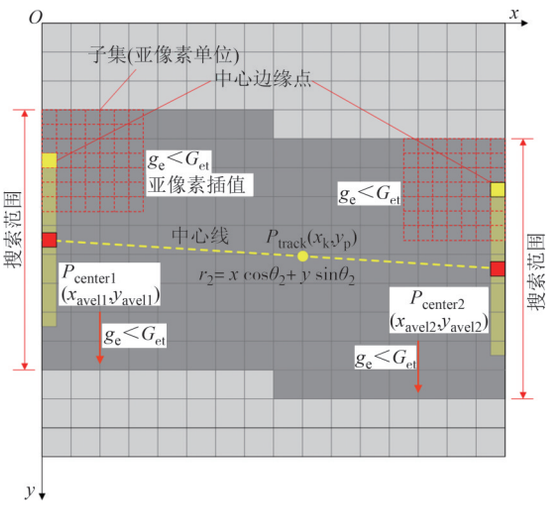


图 4 中心线亚像素检测

Fig.4 Centerline subpixel detection

(VMD)来计算拉索的模态参数. 然后利用傅里叶变换来确定拉索的频率,根据拉索的物理特性计算索力. 在使用振动频率法估算拉索受力时,应考虑拉索刚度的影响. 索力的计算公式如式(3)所示:

$$T=\frac{4mL^2f_n^2}{n^2}-EI\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \tag{3}$$

式中:m 为拉索质量,L 为拉索长度,f_n 为拉索的 n 阶频率,EI 为拉索的刚度.

拉索会随时间的推移,因腐蚀和疲劳效应逐渐退化,导致其实际刚度与设计值产生偏差,因而难以直接获取其实际刚度. 为解决这个问题,使用拉索各阶频率来计算索力,从而避免计算索力时对拉索刚度的依赖. 因此,将式(3)转化为基于拉索的一阶和二阶频率来计算索力,如式(4)所示:

$$T=\frac{mL^2}{3}\left(16f_1^2-f_2^2\right) \tag{4}$$

如果使用拉索的二阶和三阶频率来计算索力,如式(5)所示:

$$T=\frac{mL^2}{45}\left(81f_2^2-16f_3^2\right) \tag{5}$$

为了减小误差,在获取拉索的自振频率后,应选择更低阶的频率来消除弯曲刚度,并计算索力.

2 试验研究

2.1 实验室条件下的验证

在对实桥测量之前,首先在实验室环境下使用接触式设备——激光位移计,对该算法的位移测量结果进行对比验证. 实验室环境下选取的试验模型是一根长 40 cm 的钢尺,为方便进行位移对比,选择将激光位移计对准钢尺 20 cm 刻度处. 对钢尺施加一个初始位移,使其做自由衰减的简谐振动,用相机和激光位移计进行同步采样(尽可能同步采集,若无法保证同步采集,则在数据处理时根据其波形及峰值点进行加工以保证同步). 实验室现场布置图如图 5 所示.

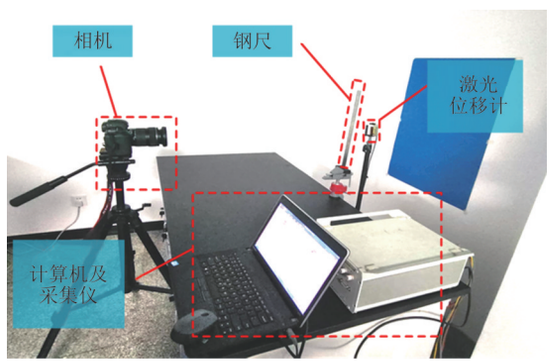


图 5 实验室现场布置

Fig.5 Laboratory layout

2.1.1 试验设备

本次实验采用的相机型号为佳能 5D4,视频分辨率为 1 080 p,帧率为 50 帧/s. 为便于后期数据处理对比,将激光位移计的采样频率也设置为 50 Hz,与相机同步采样. 实验室条件下所用到的设备具体型号及数量如表 1 所示.

表 1 试验使用设备具体型号及数量

Tab.1 The specific type and quantity of equipment used in the test

设备	型号	数量
相机	佳能 5D4	1
钢尺	40 cm	1
激光位移计	HG-C1100	1
16 通道数据采集仪	INV 采集分析仪	1

2.1.2 数据分析

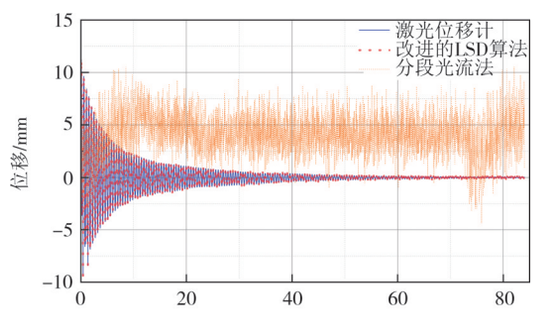
试验中的误差均以归一化均方根误差(Normalized Root Mean Square Error, NRMSE)进行量化,具体公式为:

$$E_{NRMS}=100\%\times\frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-y_i\right)^2}}{y_{max}-y_{min}} \tag{6}$$

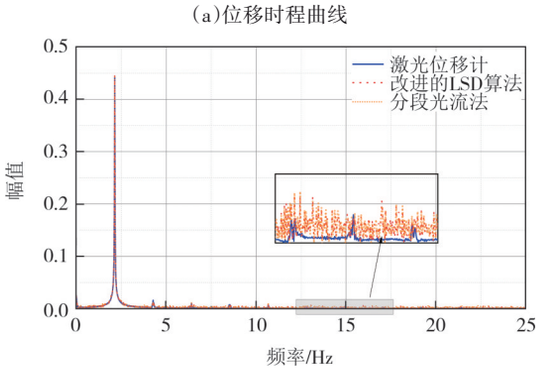
式中:n 为数据样本的数量,x_i 为第 i 个样本的真实值,y_i 为第 i 个样本的预测值,y_{max} 为数据的最大值,y_{min} 为数据的最小值.

在实验室条件下利用相机采集图像,利用改进的 LSD 算法和分段光流法分别处理采集到的图像得到位移数据,与激光位移计采集到的位移数据进行

对比.具体如图6所示.图6(a)为钢尺振动的位移时程曲线,由图可知,对于钢尺的位移时程曲线来说,改进的LSD算法在处理钢尺振动追踪方面表现较好,其最大识别误差为0.63%,结果较为理想;但分段光流法在处理这类自身纹理不明显、长细比较大的杆件追踪方面难度较大.图6(b)为钢尺振动的功率谱分析,由图可知,在频域内,无论是改进的LSD算法还是分段光流法都能找到该钢尺的基频,然而,以激光位移计的结果为参照,分段光流法在时域范围内的误差明显大于改进的LSD算法.



(a)位移时程曲线



(b)功率谱分析

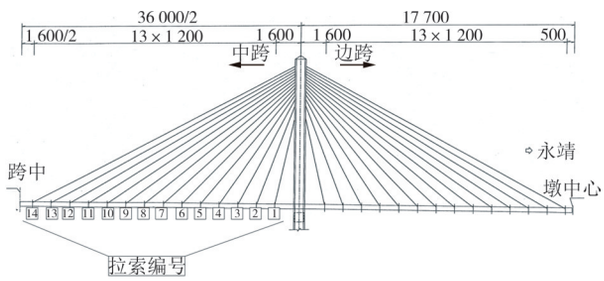
图6　实验室数据的对比分析

Fig.6　Comparative analysis of laboratory data

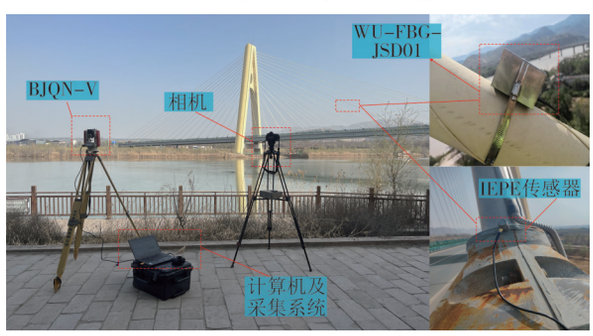
分段光流法在时域内无法准确识别钢尺的位移,但在频域内仍能识别其动力响应.这是因为光流法对光照变化过于敏感,钢尺振动时产生的虚影影响了位移追踪.此外,未改进的LSD算法对长细杆件的识别效果较差,尤其在识别长细比大、像素占比小的物体时,鲁棒性较差,因此未在文中展示相关结果.基于此,提出了改进的LSD算法针对复杂环境的实际工程现场的大跨度斜拉桥斜拉索进行检测.

2.2　实桥测量

为了进一步验证该系统的可行性,利用采集设备对一座大型斜拉桥的拉索进行采集,并完成斜拉索的振动识别以及索力估算.对兰州河口特大斜拉桥进行现场测量,如图7所示.该桥是兰州(新城)至永靖沿黄河快速通道的重点桥梁工程,主桥跨径布置为(77+100+360+100+77) m.斜拉索采用直径7 mm镀锌低松弛平行钢丝束,桥上每侧共56根斜拉索,两侧共112根斜拉索,斜拉索标准间距12.0 m.



(a)斜拉桥示意图及拉索编号(单位:cm)



(b)试验现场仪器布置

图7　特大斜拉桥试验现场布置

Fig.7　Test site layout of large cable-stayed bridge

2.2.1　试验安排

采用基于树莓派和IEPE传感器[21]组成的便携式加速度传感器吸附在拉索上进行数据采集,同时利用桥梁挠度仪与相机进行同步采样.将分析得到的数据与河口特大斜拉桥上安装的WU-FBG-JSD01型光栅光缆接触式传感器得到的数据进行对比,来验证改进的LSD算法的准确性.

为了达到较好的试验效果,对试验仪器的选择及试验环境有如下要求:相机的选择与实验室条件下相同,因为距离较远,选用长焦镜头,以保证能采集到清晰可用的图像,本试验中采用型号为腾龙A022(150~600 mm)的变焦镜头.对于试验环境,相机应架设在视野开阔、无遮挡物影响的地点方便数据采集.同时,桥梁挠度仪的采样频率也设置为50 Hz,与相机进行同步采样(包括采集设备到拉索的距离及仰角尽量保持相同,以减少误差).为降低光照及水汽对试验结果的影响,数据采集应尽量选择在多云天气,避免在逆光方向进行.试验中所用设备具体型号如表2所示.

表2 工程现场使用设备具体型号及参数表

Tab.2 Specific models and parameters of the equipment used in the project site

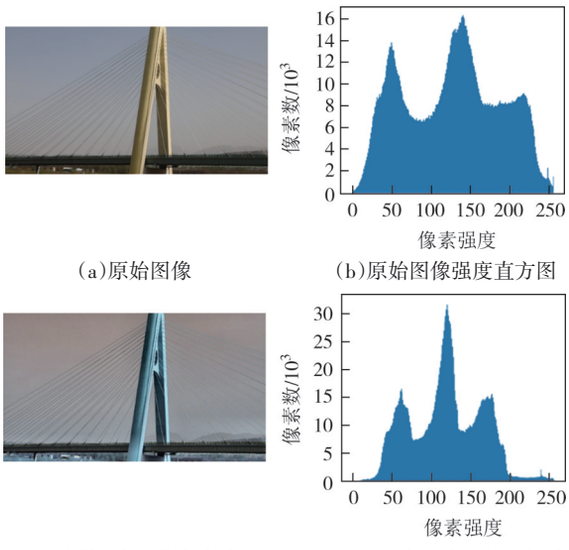
设备	型号	参数
相机	佳能5D4	分辨率1 080 p
桥梁挠度仪	BJQN-V	精度:100 m±1 mm
镜头	腾龙A022	焦距:150~600 mm
激光测距仪	XR850	—
树莓派传感器	IEPE传感器	CT1050LC型
光栅光缆传感器	WU-FBG-JSD01	—

2.2.2 数据分析

在实际工程现场进行数据采集时,由于环境嘈杂和逆光效应,图像可能出现模糊或失真现象.因此,在进行数据分析之前,需对图像进行前处理.前处理的内容包括应用滤波降噪技术和图像增强技术,以提高数据分析的准确性和可靠性.本文利用CLAHE(Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization)算法对采集数据进行图像增强.

在使用改进的LSD算法对大跨度斜拉桥的索力进行估算时,面临的主要挑战是斜拉索作为长细杆件,远距离采集时其在图像中的像素占比较小,并且与背景的强度差异较小,导致斜拉索难以识别.在前处理阶段,采用CLAHE算法对原始图像进行图像增强处理,旨在加大背景与拉索的强度差,使改进的LSD算法更易准确检测到拉索的振动.图像增强前后对比如图8所示.

在对采集到的图像序列进行图像增强后,需手动选择ROI(Region of Interest)区域,图9(a)为选出的斜拉索,图9(b)为代码运行中得到的帧间效果图.

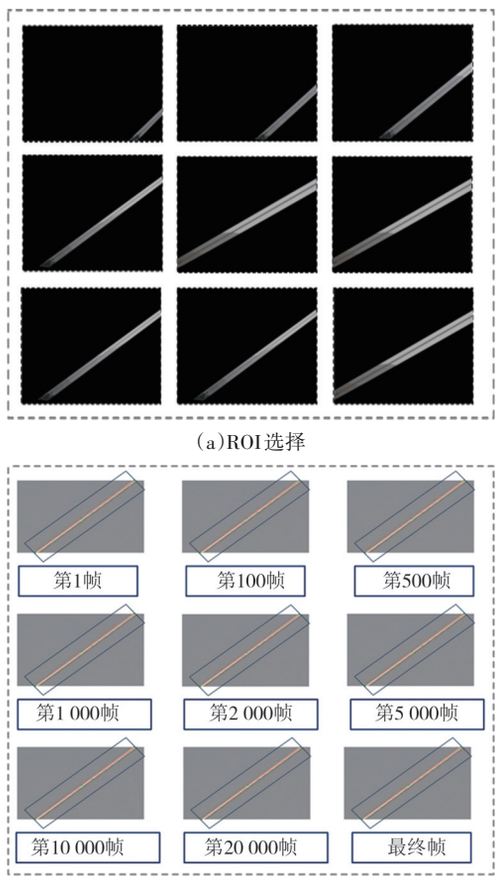


(a)原始图像 (b)原始图像强度直方图

(c)图像增强后效果图 (d)增强后强度直方图

图8 图像增强前后对比

Fig.8 Contrast before and after image enhancement



(a)ROI选择

(b)帧间效果图

图9 斜拉索识别

Fig.9 Stay cable identification

图像数据经过前处理后,利用改进的LSD算法得到位移,与桥梁挠度仪输出位移进行对比,结果如图10所示.由于测量时该桥处于运营状态,多种外部因素可能对桥梁挠度仪的数据采集造成干扰,其中尤为显著的是遮挡物(如大型运输车辆等)可能导致检测目标暂时消失,进而引发错误的运动估计.因此在试验过程中将桥梁挠度仪的测点尽可能设置在不会被遮挡物影响的位置.改进的LSD算法,由于其特殊的检测原理,能够显著减少因遮挡物导致的问题.

经过VMD以及FFT得到拉索的前两阶频率,与传感器采集到的加速度数据经过FFT得到的频率进行对比.具体对比图如图11所示.其最大识别误差为2.46%.

限于篇幅,此处仅展示第4根斜拉索的位移和频率的对比图,分别如图10和图11所示.安装传感

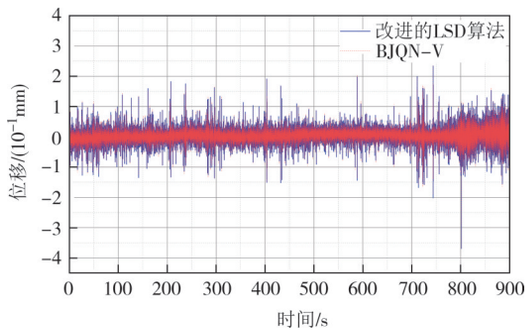


图 10　位移时程曲线

Fig.10　Time displacement curve

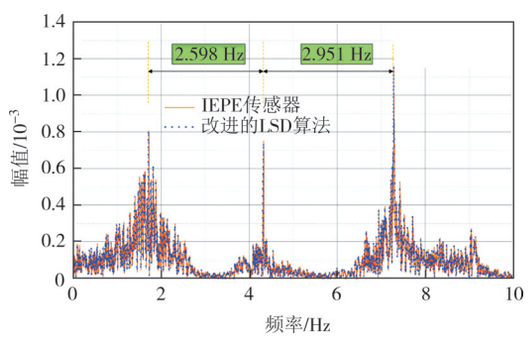


图 11　功率谱分析

Fig.11　Power spectrum analysis

器的主要目的是验证该系统的可行性,且由于河口特大斜拉桥本身安装有健康监测系统,因此本次试验仅对第2、4、6三根斜拉索使用IEPE传感器进行测量.将改进的LSD算法分析所得频率与WU-FBG-JSD01传感器测得的各斜拉索的频率进行对比,结果如表3所示.

在得到斜拉索的频率后,利用式(4)分别估算各斜拉索索力.由于拉索的弯曲刚度、边界条件对短索测量精度影响较大,因此采用索力修正公式修正估算的索力.根据文献[22],取拉索的弯曲刚度 $EI = 0.7EI_1$(I_1为拉索组成材料完全黏结时截面惯性矩),设拉索线性计算的索力 T_0 与实际索力 T 之间具有相关性,可用相关系数 α 修正,即 $T = \alpha T_0$. 对于长度 L 不同的拉索,测量索力与实际索力是非线性关系[1].因此对相关系数 α 进行非线性拟合,得到相关系数 α 与拉索长度 L 之间的函数关系式如式(7)所示:

$$\alpha = 1.000\,38 - \left\{0.530\,36 \times \left[1 + \left(\frac{L}{4.294\,73}\right)^{1.822\,64}\right]^{-1}\right\} \tag{7}$$

各拉索的索力识别结果如图12所示.由图12可以看出,用该索力系统估算出的索力与WU-FBG-JSD01接触式传感器得到的索力基本一致.验证了该系统在实际复杂的工程现场应用的可行性.

表3　斜拉桥各拉索的前两阶频率

Tab.3　First two frequencies of cable-stayed bridge　Hz

索号	改进的LSD算法		WU-FBG-JSD01	
	一阶频率	二阶频率	一阶频率	二阶频率
1	3.356	11.651	3.484	11.762
2	2.581	7.794	2.512	7.628
3	2.142	5.966	2.136	5.917
4	1.716	4.314	1.717	4.314
5	1.600	4.287	1.593	4.285
6	1.311	3.278	1.313	3.275
7	1.191	2.967	1.189	2.967
8	1.112	2.845	1.114	2.849
9	0.954	2.211	0.955	2.216
10	0.890	2.188	0.884	2.188
11	0.873	2.297	0.879	2.305
12	0.819	2.220	0.822	2.120
13	0.719	1.715	0.721	1.697
14	0.661	1.758	0.659	1.728

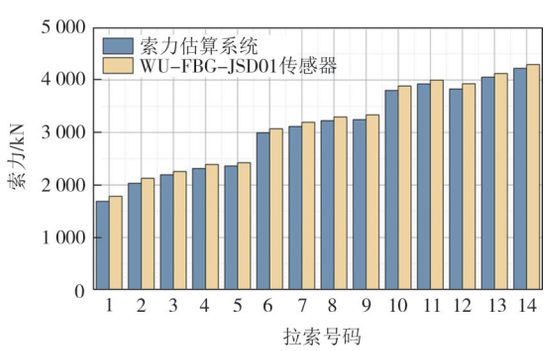


图 12　索力识别

Fig.12　Cable force identification

3　结 语

本文建立了一种基于计算机视觉对斜拉桥拉索振动识别并估算索力的系统.为验证该系统在实际工程环境中的适用性,分别在实验室环境下和大跨度斜拉桥上进行了测试,并得出以下结论:

1)该系统解决了以往算法在实际复杂工程现场中稳定性和适用性不足的问题.改进的LSD算法克服了以往算法对构件本身纹理特性的依赖等问题,可以做到在远距离、非接触、无标志物的条件下对斜拉索进行追踪,并通过VMD分解得到各阶频率,使用振动频率法估算出斜拉索的索力.

2)在实验室环境下使用40 cm的钢尺模型对改进的LSD算法进行了验证.其测量结果与激光位移计测量结果对比最大误差仅为0.63%.由此验证了该

算法对像素占比较小的长细杆件进行高精度识别的可行性.

3)在大跨度的斜拉桥上对该系统进行了验证.改进的LSD算法与BJQN-V得出的位移进行了对比,两者的变化趋势和形状基本一致;与接触式传感器得出的频率进行对比,最大误差不超过3%;对各个斜拉索的索力进行了估算,完全满足实际工程需求.

4)该系统实现了远距离高精度的识别,但存在计算速度较慢、无法准确分析斜拉索振型等问题.在后续的工作中,可以引入深度学习对图像进行背景处理,减少运算量,提高运算速度和识别精度.

参考文献

[1] 王邵锐,王犇,程崇晟,等. 基于线形识别的索力测量方法影响因素研究[J]. 中国公路学报,2023,36(2):154-165.
WANG S R, WANG B, CHENG C S, et al. Research on influencing factors of cable force measurement methods based on alignment recognition [J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(2):154-165.(in Chinese)

[2] ZHANG L X,QIU G Y,CHEN Z S. Structural health monitoring methods of cables in cable-stayed bridge: a review [J]. Measurement,2021,168:108343.

[3] ZHAO X F,HAN R C,DING Y B,et al. Portable and convenient cable force measurement using smartphone [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015, 5(4): 481-491.

[4] KUTUKCU B, AYRANCI I. Application of pressure gauge measurement method beyond its limits[J]. Chemical Engineering Research and Design,2019,141:170-180.

[5] LUYCKX G,VOET E,LAMMENS N,et al. Strain measurements of composite laminates with embedded fibre Bragg gratings: criticism and opportunities for research [J]. Sensors (Basel, Switzerland),2011,11(1):384-408.

[6] LOMOV S V, IVANOV D S, VERPOEST I, et al. Full-field strain measurements for validation of meso-FE analysis of textile composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,2008,39(8):1218-1231.

[7] FU Z Q,JI B H,WANG Q D,et al. Cable force calculation using vibration frequency methods based on cable geometric parameters [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2017,31(4):04017021.

[8] 吉伯海,程苗,傅中秋,等. 基于振动频率法的斜拉桥索力测试影响因素[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(7):2620-2625.
JI B H,CHENG M,FU Z Q,et al. Influential factors in cable force measurement of cable-stayed bridges based on vibration frequency method [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2015,46(7):2620-2625.(in Chinese)

[9] MAZAHERI-TEHRANI E, FAIZ J. Airgap and stray magnetic flux monitoring techniques for fault diagnosis of electrical machines:an overview[J]. IET Electric Power Applications,2022,16(3):277-299.

[10] 张卓杰,王荣辉,甄晓霞,等. 平行钢绞线斜拉索索力测试方法评价[J]. 桥梁建设,2016,46(2):42-47.
ZHANG Z J, WANG R H, ZHEN X X, et al. Evaluation of measurement methods for tension of parallel steel strand stay cables [J]. Bridge Construction, 2016, 46 (2): 42-47.(in Chinese)

[11] SHI Y,ZHANG C,LI R,et al. Theory and application of magnetic flux leakage pipeline detection [J]. Sensors, 2015, 15 (12): 31036-31055.

[12] CHEN C C,WU W H,TSENG H Z,et al. Application of digital photogrammetry techniques in identifying the mode shape ratios of stay cables with multiple camcorders[J]. Measurement,2015,75:134-146.

[13] KIM B H,PARK T. Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method [J]. Journal of Sound and Vibration,2007,304(3/4/5):660-676.

[14] 晏班夫,陈泽楚,朱子纲. 基于非接触摄影测量的拉索索力测试[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2015,42(11):105-110.
YAN B F,CHEN Z C,ZHU Z G. Cable force identification based on non-contact photogrammetry system [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42 (11): 105-110.(in Chinese)

[15] XU Y, BROWNJOHN J, KONG D L. A non-contact vision-based system for multipoint displacement monitoring in a cable-stayed footbridge[J]. Structural Control and Health Monitoring,2018,25(5):e2155.

[16] JIANG T J,FRØSETH G T,RØNNQUIST A,et al. A robust line-tracking photogrammetry method for uplift measurements of railway catenary systems in noisy backgrounds [J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2020,144:106888.

[17] 朱前坤,崔德鹏,张琼,等. 利用计算机视觉识别人行桥时变模态参数[J]. 振动工程学报,2023,36(1):52-61.
ZHU Q K, CUI D P, ZHANG Q, et al. Identification of time-varying modal parameters of pedestrian bridges using computer vision[J]. Journal of Vibration Engineering,2023,36(1):52-61.(in Chinese)

[18] WANG W D,CUI D P,AI C B,et al. Target-free recognition of cable vibration in complex backgrounds based on computer vision [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 197: 110392.

[19] KESIDIS A L, PAPAMARKOS N. On the inverse Hough transform [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1999,21(12):1329-1343.

[20] 朱前坤,陈建邦,张琼,等. 基于计算机视觉人行桥挠度影响线非接触式识别[J]. 工程力学,2021,38(8):145-153.
ZHU Q K, CHEN J B, ZHANG Q, et al. A non-contact recognition for deflection influence line of footbridge based on computer vision[J]. Engineering Mechanics,2021,38(8):145-153.(in Chinese)

[21] 朱前坤,刘艺,崔德鹏,等. 结构人致振动舒适度无线评估系统实现与工程实践[J]. 振动工程学报,2023,36(4):1024-1032.
ZHU Q K, LIU Y, CUI D P, et al. Realization and engineering practice of wireless evaluation system for vibration comfort of structures[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(4): 1024-1032.(in Chinese)

[22] 铁摩辛柯 S,杨 D H,小韦孚 W.工程中的振动问题[M]. 胡人礼,译. 北京:人民铁道出版社,1978.
TIMOSHENKO S,YOUNG D H,WEAVER W.Vibration problems in engineering[M]. HU R L, translate. Beijing:People's Railway Publishing House,1978.(in Chinese)