doi：10.3969/j.issn.1002-0268.2023.07.019

基于计算机视觉的公路栈桥位移识别方法

王晓琰[1]，杨黎明[1]，杨 康[2]，李 峰[*1]
（1. 甘肃五环公路工程有限公司，甘肃 兰州 730050；2. 兰州理工大学，甘肃 兰州 730050）

摘要：为破解传统接触式位移传感器在实际工程中受到可达性差和设备架设等问题的制约，利用基于HSV阈值分割和Sobel边缘检测算子改进的分段光流算法实现了结构位移的远距离、非接触鲁棒测量，并结合背景点降噪技术开发了1套基于计算机视觉的位移信息遥测系统。首先，对采集到的图像进行了HSV阈值处理，将目标颜色提取出来，结合高斯滤波器和Sobel边缘检测算子提取了目标的边缘特征向量。利用分段光流算法对边缘特征进行了识别和追踪，从而获取了目标的像素位移。为了减少干扰，引入背景点降噪技术，以得到结构的真实位移变化。为验证该系统的性能，进行了2组试验。其次，在实验室中以1座简支钢-玻璃人行桥作为试验对象，与激光位移计所测数据进行对比分析，验证了系统在室内环境下的测量精度。然后，在兰州市某跨黄河贝雷梁钢栈桥上进行了室外试验，与挠度仪所测数据进行了对比分析，结合背景点降噪技术验证了系统在室外环境下的工作性能。结果表明：在实验室环境下，该系统的位移测量最大误差为0.87%；在室外环境下，未经背景点降噪处理时，位移测量的最大误差为3.18%，经过背景点降噪后，位移测量误差减少至1.85%。试验验证了改进的分段光流算法结合背景点降噪技术的有效性，可以有效地减少相机抖动等因素引起的测量误差。

关键词：桥梁工程；位移遥测系统；分段光流法；背景点降噪；计算机视觉

中图分类号：U446.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-0268（2023）07-0149-07

A Method for Recognizing Displacement of Highway Trestle Based on Computer Vision

WANG Xiao-yan[1], YANG Li-ming[1], YANG Kang[2], LI Feng[*1]
（1. Gansu Wuhuan Highway Engineering Co., Ltd., Lanzhou Gansu 730050, China;
2. Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China）

Abstract: To overcome the constraints of poor accessibility and equipment installation of traditional contact displacement sensors in practical engineering, long-range, non-contact robust measurement of structural displacement is realized by using the improved segmented optical flow algorithm based on HSV threshold segmentation and Sobel edge detection operator, and a computer vision based displacement information telemetry system is developed by using background point denoising technology. First, HSV thresholding is performed on the acquired images to extract the target color, and the edge feature vector of the target is extracted by using Gaussian filter and Sobel edge detection operator. The edge features are identified and tracked by using the segmented optical flow algorithm to obtain the pixel displacement of the target. To reduce interference, the background point denoising technique is introduced to obtain the true displacement variation of the structure. Two sets of experiments are conducted to verify the performance of the system. Second, taking a simply supported steel-glass pedestrian bridge as the experimental object in the laboratory, the experimental data are compared and analyzed with the data measured by laser displacement meter to verify the measurement accuracy of the system in indoor environment. Then, the outdoor test on a Bailey beam steel

收稿日期：2023-04-20
基金项目：甘肃省通运输厅揭榜挂帅制科研项目（202102）
作者简介：王晓琰（1980-），男，甘肃临潭人，高级工程师.（316116039@qq.com）
[*]通讯作者：李峰（1986-），男，甘肃兰州人，硕士研究生，高级工程师.（1092698685@qq.com）

trestle crossing the Yellow River in Lanzhou City is conducted, the experimental data are compared and analyzed with the data measured by bridge deflectometer, and the working performance of the system in outdoor environment is verified by singing background point denoising technology. The result shows that (1) in the laboratory environment, the maximum displacement measurement error of the system is 0.87%; (2) in the outdoor environment, the maximum error of displacement measurement is 3.18% without background point denoising, while the displacement measurement error is reduced to 1.85% after background point denoising. The experiment verified the effectiveness of the improved segmented optical flow algorithm method combined with the background point denoising technique, which can effectively reduce the measurement error caused by camera shake and other factors.

Key words: bridge engineering; displacement telemetry system; segmented optical flow method; background point denoising; computer vision

0 引言

基础设施包括民建、公路、桥梁、隧道、管廊等，它们组成了保障社会经济繁荣和人民生活质量的庞杂繁复的基础设施系统。随着这些基础设施服役年限的增长，各类设施都出现了不同程度的病害及老化。根据交通运输部最新发布的统计信息，截至2022年5月，全国公路总里程为528.07万km，公路养护里程为525.16万km，占公路总里程的99.4%[1]。庞大的基数及较高的养护率给公路桥梁的养护管理带来了极大的挑战。在传统的桥梁养护管理中，基于人工检测的结构状态评估扮演了重要角色[2]。然而，人工检测工作量大、主观性强、经济效益不明显，因此传统的桥梁运营状评估方法并不能满足我国日益增长的需求。目前常见的位移传感器分为接触式（如直线位移传感器等）和非接触式（如GPS、激光测振仪、雷达等）传感器[3]。接触式传感器通常精度较好，但需要固定点对传感器固定才能发挥作用。复杂环境下传感器的安装会变得非常困难，在实际应用过程中费时费力，经济代价很高。GPS传感器便于安装，但是精度有限，对于微小位移不敏感。非接触式激光测振仪则精度足够，但是测量距离有限，不适于长距离测量。

近年来，计算机视觉飞速发展，机器视觉已经广泛应用于日常生活，如图像处理、缺陷检测、无人驾驶、3D建模、目标跟踪等。其因远距离、非接触、高精度、耗时少、多点监测等众多优点越来越受到科研和工程人员的关注[4]。Kim等[5]提出了一种基于视觉的监测系统，利用DIC对斜拉桥的拉索张拉力进行评估。朱前坤等[6]利用计算机视觉对人行桥的振动舒适度进行了定量化评估。Feng等[7-8]在UCC和OCM的基础上开发了2套视觉传感器系统并分别在室外环境中验证了其鲁棒性。最近各国学者努力将计算机视觉技术应用于移动端平台上。Min等[9]开发了用于实时位移测量的智能手机应用软件，并进行了振动台试验以研究其适用性。赵雪峰等[10]采用手机摄像头实现了拉索的索力监测。余加勇等[11]开发了搭载在无人机上的智能裂缝识别系统，并在实际工程中进行了验证。

目前，计算机视觉技术在结构位移、损伤、变形等方面的监测应用广泛[12-13]。本研究在已有研究成果的基础上，研究分段光流法在实际工程中的应用。分别在室内外进行一系列对比试验，验证其在实际工程中的工作性能。

1 方案原理

本研究采用一种基于HS光流法的改进算法，即分段光流法，其优势在于可以减少光流的计算量，并提高光流的鲁棒性[14-16]。整个方案采用消费级摄像机作为采集终端，为消除镜头畸变引起的误差，在采集数据前首先对相机进行标定。标定采用文献[15]所述方法，即根据成像边缘与中心的标定参数进行线性插值从而实现对全局的标定。其次，对采集到的图像进行HSV阈值分割，结合边缘检测和高斯滤波器获取目标的边缘特征向量，此处引入的高斯滤波可利用其在时空上平滑的构思对检测到的边缘进行双边平滑[14]，得到更为理想的边缘特征向量。随后，结合现场环境设置合适的阈值，对光流算法中内嵌的双向估计模块得到的双向误差进行限制，以过滤无效光流，从而得到目标光流场。最后，利用背景点进行数学降噪，即利用从图像中识别得到的待测点位移数据减去同一图像背景中某个横向不动点的位移数据，以过滤掉由于风、相机抖动等因素导致的非结构位移振动，最终得到桥梁的实际

位移信息，与桥梁挠度仪所测数据进行对比分析，得出其在实际工程中的工作性能。

1.1　比例因子

要获取图像视频中目标点的位移，首先要建立像素位移和目标位移之间的对应关系，即比例因子。当成像平面垂直于结构物体表面时，竖向位移的比例因子 SF 的计算式为：

$$SF = \frac{d_k}{I_k} \text{ 或 } SF = \frac{d_k}{d_k^i} d_p = \frac{D}{f} d_p, \tag{1}$$

式中，d_k 为待测结构上已知目标点的实际物理尺寸；I_k 为目标点在图像上对应的像素尺寸；$d_k^i = I_k \cdot d_p$，d_p 为像素的大小；D 为相机到目标点的距离；f 为相机焦距。

当相机光轴与物体表面法线方向存在一定角度时，需要对式（1）进行修正。文献［16］给出了小角度时比例因子的简化公式：

$$SF = \frac{D}{f\cos^2\theta} d_p, \tag{2}$$

式中 θ 为相机光轴与目标结构之间的夹角。

利用本研究所提算法计算得到每个测点的像素位移 Δy_p 后，乘以比例因子 SF 即可得到实际桥梁的物理竖向挠度 Δy：

$$\Delta y = SF \cdot \Delta y_p。 \tag{3}$$

1.2　光流的概念

光流法由 Gibson 于 20 世纪 40 年代首次提出，现常用于运动物体的图像分析中。光流是指连续 2 帧图像中目标像素在图像中的坐标变化，根据相邻 2 帧图像拍摄的时间间隔加以分析，即可求得目标像素的运动信息。光流场是由光流的定义引申得出的，它是指图像中所有像素点构成的一种二维瞬时速度场，其二维速度矢量是图像中可见点的三维速度矢量在成像表面的投影[17]。本研究采用基于 HS 光流法的改进算法（即分段光流法），对钢栈桥的结构响应进行全场识别。

1.3　分段光流法

分段光流法是一种基于 HS 光流法的改进算法，HS 算法是由 Horn 和 Schunck 共同提出的一种基于梯度的光流算法。关于 HS 算法，有如下 2 个假设：

（1）运动物体的亮度（灰度）在相邻帧之间保持基本不变。

（2）给定邻域内的速度向量场变化很小。

HS 模型基于亮度恒定，使用线性各向同性平滑项，其主要原理[18]如下。包括全局能量函数：

$$E(u, v) = \frac{1}{2}\int (f_x u + f_y v + f_t)^2 \mathrm{d}x + \lambda \int [(\nabla u)^2 + (\nabla v)^2] \mathrm{d}x, \tag{4}$$

式中，f_x，f_y，f_t 分别为图像中的像素在 x，y 方向和时间 t 上的运动梯度；u 和 v 分别为光流矢量沿 x 和 y 方向的分量；λ 为调节平滑程度的系数；$(\nabla u)^2$ 和 $(\nabla v)^2$ 分别为 u 和 v 的拉普拉斯算子；$\lambda \int [(\nabla u)^2 + (\nabla v)^2] \mathrm{d}x$ 为平滑项，它可使计算得到的光流场变得平滑，以满足 HS 光流法的假设；$\frac{1}{2}\int (f_x u + f_y v + f_t)^2 \mathrm{d}x$ 为用于计算初始光流的数据项，经泰勒展开后得式（5）：

$$f(x + u, y + v, t + 1) - f(x, y, 1) = f_x u + f_y v + f_t = 0。 \tag{5}$$

分段光流法主要包含 2 个步骤。首先是在图像（视频）中设定感兴趣区域（ROI），用来减小分析范围，以更好地定位到待测目标区域，减少计算量，提高效率。其次是对所划定的区域进行光流的计算，并进行分析。由于光流估计需要依赖结构物表面的纹理，而一般的结构物表面缺乏丰富的纹理信息，因此很容易产生错误的光流估计，这将会对分析结果产生很大影响。因此，利用 HSV 阈值对图像进行分割等预处理操作，再利用 Sobel 算子进行边缘检测。当检测到边缘之后，再利用高斯滤波器对边缘进行二维扩展平滑，得到相应的梯度矢量信息。为进一步提升运算效率，利用光流矢量阈值对光流进行阈值过滤。光流阈值可根据测试环境的复杂性对其进行合理选择，通常不超过 2 个像素，效果如图 1 所示，这样在减少光流计算量的同时，还可提高算法的鲁棒性。

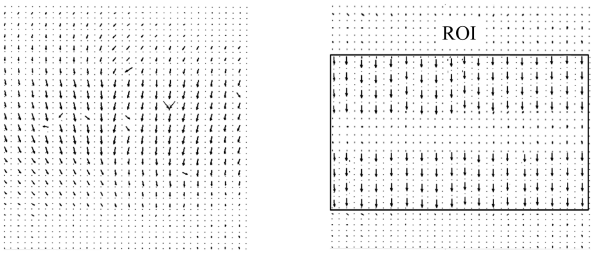

图 1　光流场

Fig. 1　Optical flow field

1.4　误差分析

为便于分析对比，本研究所有试验中均采用统一的误差衡量方式，即归一化均方根误差 *NRMSE*，

具体公式为：

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\%, \quad (6)$$

式中，n 为数据点个数；x_i 为本研究方法所测数据；y_i 为用于对比的方法所测数据；$y_{\max}$ 和 $y_{\min}$ 分别为用于对比的方法所测数据的最大值和最小值。

2 室内对比试验

室内外试验比例因子均采用 D 和 f 进行确定。

在对实桥测量之前，先在实验室环境下利用激光位移计进行对比验证。实验室环境下选取的试验模型是 1 座长 10.1 m、宽 1.6 m 的简支钢-玻璃组合桥。考虑最不利因素，将激光位移计架设在桥的跨中位置。

2.1 试验设备

试验采用的相机视频分辨率为 1 080 P，帧数选择 50 fps，相机焦距为 25 mm。为了达到较好的试验效果，以便后期数据处理对比，将激光位移计的采样频率设置为 50 Hz，与相机进行同步采样。实验室条件下所用的设备型号如表 1 所示。由相机型号可计算得到式（1）~（2）中 d_p 的数值，为 0.005 36 mm/pixel。

表 1 实验室使用的设备型号及数量

Tab. 1 Types and quantities of equipment used in laboratory

设备	型号	数量
相机	佳能 5D4	1
激光位移计	HG-C1100	1
数据采集仪	DH5921	1
竖向加速度传感器	941B	3
16 通道数据采集分析仪	INV	1

2.2 试验工况

由于实验室的桥为简支钢-玻璃组合桥，为产生较明显的位移，试验中采用 5 人在桥上自由行走激励的方式，桥上行走的试验人员均为健康的成年人。由于该工况设置的相机光轴垂直于结构外表面，故进行比例因子计算时无需考虑设备光轴与目标结构之间的夹角。考虑到研究团队已完成在不同距离、不同俯仰角等试验工况设置下的算法验证，且由于篇幅原因，这里不再进行相关赘述。

在实验室环境下，将分段光流法分析的结果与激光位移计采集到的位移进行对比，可以发现 2 种方法所得位移的变化趋势、峰值基本一致。视觉方法和激光位移计所识别到的位移误差为 0.87%，效果较为理想。经背景点降噪后的误差为 0.83%，测量误差仅减少了 0.04%，降噪效果相对不明显，如图 2 所示。

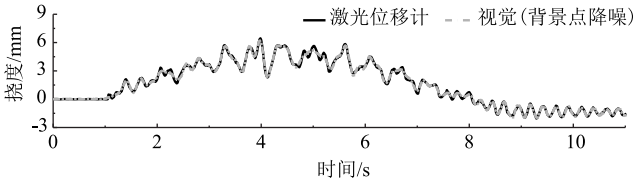

图 2 实验室条件下的位移时程曲线

Fig. 2 Displacement-time curves under laboratory condition

2.3 误差分析

实验室环境下分析得到的位移数据和激光位移计所测数据基本吻合，误差较小，最大误差只有 0.87%。这得益于以下几点：

（1）由于周围环境较为简单，无明显振源，环境因素造成的误差较小，因此背景点降噪效果并不明显。

（2）结构物表面的测点与相机距离较近，在相同配置的相机下，其精度会更高。

（3）相机与简支钢-玻璃桥基本垂直，二者之间倾角很小，比例因子近似所带来的误差较小。

3 实桥测量

室外试验对象选择位于甘肃省兰州市的某跨黄河钢栈桥。钢栈桥上部结构采用连续贝雷梁与型钢组合结构，下部结构采用钢管桩基础。钢栈桥设计总长为 210 m，标准跨径为 12 m，通航孔处主跨为 21 m，考虑最不利条件选取通航孔作为研究对象。为保证分析数据时的方便，在采集数据前，将摄像机与桥梁挠度仪同步架设，架设于同一位置、同一高度，确保设备到目标点的距离、仰角一致。在采集过程中，共设置 5 个桥梁挠度仪观测点，分别位于 1/8 跨、1/4 跨、1/2 跨处。在数据采集前，需先对桥上各观测点进行测距，得到其仰角及距离。桥梁挠度仪及摄像机距观测点的距离及仰角如表 2 所示。

表 2 仪器至观测点的距离及仰角

Tab. 2 Distance and elevation angle from instrument to observation point

观测点	距离/m	仰角/(°)
1	77.7	
2	76.7	
3	73.8	3.61
4	72.1	
5	71.0	

3.1　试验设备

室外试验相机型号与实验室使用的相机型号相同，镜头选择腾龙 A022 变焦镜头（150～600 mm），为了实现对通航孔上部整个跨度图像的同步采集，焦距选择 150 mm。为了达到较好的试验效果，以便后期处理数据时进行对比，桥梁挠度仪 BJQN-V 的采样频率设置为 50 Hz，与相机进行同步采样。激光测距仪型号为 XR850。

3.2　试验工况

经过现场统计，为了得到较为明显的桥梁振动响应，以便对比观察，选取桥梁正常工作中最常见的 2 种荷载较大的车型（即自卸车和半挂车）作为工况。考虑到结构的承载力，只进行了单车加荷工况的测试。为了克服相机成像及树木遮挡等问题，现场设备的架设（包括距离与仰角）已进行多方面的考虑，以获取足够视野内的结构振动图像，故本节不再重复进行不同距离、不同仰角等工况的现场测试试验。

3.3　数据分析

由于该桥跨黄河而建，位于主体结构桑园子特大桥附近，现场数据采集时难免会受到施工机械的影响，且由于采集位置位于河谷地带，水流、风对于数据采集有极大的影响。处理数据时先通过高斯滤波器对图像进行平滑处理，然后采用滤波器对分段光流法分析得到的数据进行平滑处理。对于该多跨简支钢栈桥，考虑到结构的特性，桥梁支座处的沉降相较于车辆引起的桥梁挠度变化是微小的，如图 3 所示。因此，在进行桥梁真实位移计算时暂时忽略由于支座沉降产生的微小位移量，仅通过利用背景不动点降噪技术得到桥梁相对于真实世界的实际位移信息。将分段光流法分析得出的（未经背景点降噪）数据与桥梁挠度仪解析出的数据进行对比，由于篇幅原因，这里仅展示了自卸车经过时引起的桥梁支座沉降位移的变化，如图 3 所示。

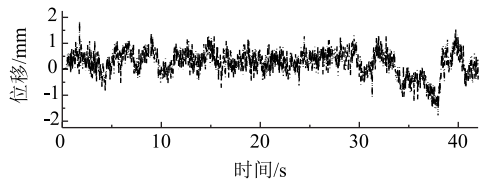

图 3　桥梁支座的沉降位移

Fig. 3　Settlement displacement of bridge bearing

通过对比降噪前分段光流法和桥梁挠度仪的位移数据发现，环境噪声对识别结果的影响较大，钢栈桥的位移识别误差由室内试验的 0.87% 变为 3.18%，具体的误差统计见表 3。虽然识别精度上略有下降，但仍在可允许的范围内。可以看出，存在环境干扰的情况时，改进后的算法依然可以实现对结构振动特性的准确识别，其时程曲线在形状、趋势、峰值上与挠度仪所测数据基本保持一致。进一步分析识别误差发现，在同种工况下，跨中点识别误差相对更小，这是由于跨中点在经过车辆时产生的挠度更大，视觉技术对大位移识别效果较好。同理，对比降噪前后自卸车和半挂车 2 种工况可发现，较重的自卸车各个测点的误差均小于半挂车的误差。经过景点降噪以后，可以较为明显地减少误差，误差最大可减少 1.4%（半挂车 1/8 跨左）。

表 3　降噪前后误差对比

Tab. 3　Comparison of errors before and after denoising

车辆类型	测点位置	最大误差降噪前/%	最大误差降噪后/%
自卸车	1/8 跨（左）	2.03	1.69
	1/4 跨（左）	1.60	1.39
	1/2 跨（跨中）	1.43	0.99
	1/4 跨（右）	1.59	1.51
	1/8 跨（右）	2.21	1.85
半挂车	1/8 跨（左）	3.11	1.71
	1/4 跨（左）	2.14	1.29
	1/2 跨（跨中）	2.08	1.26
	1/4 跨（右）	3.18	1.17
	1/8 跨（右）	2.75	1.51

通过选取视频数据中的背景不动点，分析其由于相机抖动导致的相对位移。最后用目标结构的位移减去背景固定点的相对位移，即可消除此部分相机抖动导致的数据采集误差。降噪前后的挠度分别如图 4～5 所示。对比降噪处理前后的位移信息可以较明显地观察到，经降噪处理之后，分段光流法与桥梁挠度仪的位移信息在形状、趋势、峰值上仍基本保持一致，且降噪后时程曲线变得较为平滑，更加符合实际情况。

3.4　误差分析

由于室外环境比较复杂，风、水流、光线及施工机械造成的振动等，都会引起测量误差，尤其在非接触式的视距测量系统中，其环境噪声对测量精度会造成很大影响，主要集中在以下几点：

（1）由于受到室外环境限制，相机和目标之间存在的夹角（角度很小）会造成一定的误差。

（2）相机架设位置距离待测目标较远，在使用相同配置相机的情况下，误差更大。

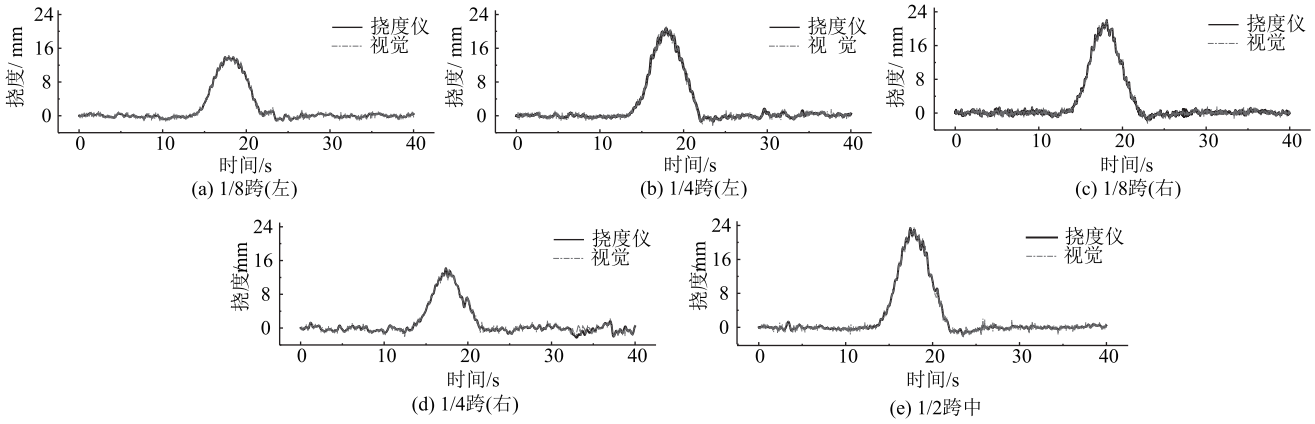

图 4 自卸车位移时程曲线

Fig. 4 Displacement-time curves of dump truck

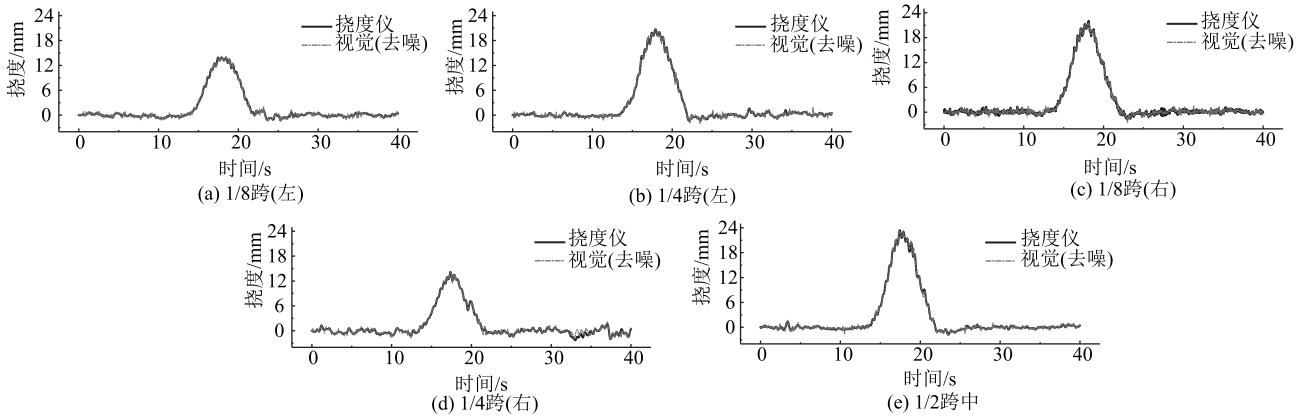

图 5 自卸车位移时程曲线（降噪后）

Fig. 5 Displacement-time curves of dump truck（after denoising）

（3）在室外环境中，相机架设在河谷地带，受到水流和风的影响较大，虽然采用背景点降噪后效果较为明显，但并不能完全抵消其精度损失。

4 结论

本研究以兰州市某跨黄河钢栈桥为实例，验证了分段光流法在实桥测量中的可行性，证明了背景点降噪技术在复杂环境中的实用性。通过对比分段光流法和激光位移计及桥梁挠度仪分别得到的位移时程信息，得到以下结论：

（1）基于 HSV 阈值分割、Sobel 算子边缘检测及高斯滤波改进的分段光流技术实现了复杂环境条件下结构位移的鲁棒、稳定监测，为可达性差的结构的远距离实时位移监测提供了一种新思路。

（2）对于外界干扰较小的情况（即实验室条件下），基于计算机视觉的分段光流技术得到的位移时程与激光位移计所测得的位移时程具有良好的一致性，最大误差仅为 0.87%。

（3）当外界环境较为复杂时（即存在较多干扰的情况下），采用背景点降噪等去燥方式可使降噪后得到的数据更加平滑，与桥梁挠度仪得到的数据基本吻合，最大误差仅为 1.85%，在实际工程中可以借鉴。

参考文献：

References：

[1] 交通运输部. 2021 年交通运输行业发展统计公报[R]. 北京：交通运输部，2022.
Ministry of Transport. Statistical Bulletin on Development of Transport Industry in 2021 [R]. Beijing: Ministry of Transport, 2022.

[2] 孙利民，尚志强，夏烨. 大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望[J]. 中国公路学报，2019，32（11）：1-20.
SUN Li-min, SHANG Zhi-qiang, XIA Ye. Development and Prospect of Bridge Structural Health Monitoring in the Context of Big Data [J]. China Journal of Highway and

Transport，2019，32（11）：1-20.

[3] 曾滨，许庆，徐曼. 预应力拉索激光非接触式动力检测与分析方法研究［J］. 建筑结构学报，2022，43（10）：50-59.
ZENG Bin，XU Qing，XU Man. Research on Laser Non-contact Detection and Analysis Method for Prestressed Cables［J］. Journal of Building Structures，2022，43（10）：50-59.

[4] KHUC T，CATBAS F N. Computer Vision-based Displacement and Vibration Monitoring without Using Physical Target on Structures［M］//Bridge Design，Assessment and Monitoring. London：Routledge，2018：89-100.

[5] KIM S W，JEON B G，KIM N S，et al. Vision-based Monitoring System for Evaluating Cable Tensile Forces on a Cable-stayed Bridge［J］. Structural Health Monitoring，2013，12（5/6）：440-456.

[6] 朱前坤，李宏男，杜永峰，等. 不同行走步速下人行桥振动舒适度定量化评估［J］. 工程力学，2016，33（10）：97-104.
ZHU Qian-kun，LI Hong-nan，DU Yong-feng，et al. Quantitative Evaluation of Vibration Serviceability of Pedestrian Bridge under Different Walking Speed［J］. Engineering Mechanics，2016，33（10）：97-104.

[7] FENG D，FENG M Q. Experimental Validation of Cost-effective Vision-based Structural Health Monitoring［J］. Mechanical Systems and Signal Processing，2017，88：199-211.

[8] FENG D，FENG M Q. Identification of Structural Stiffness and Excitation Forces in Time Domain Using Noncontact Vision-based Displacement Measurement［J］. Journal of Sound and Vibration，2017，406：15-28.

[9] MIN J H，GELO N J，JO H. Non-contact and Real-time Dynamic Displacement Monitoring Using Smartphone Technologies［J］. Journal of Life Cycle Reliability and Safety Engineering，2015，4（2）：40-51.

[10] ZHAO X，RI K，WANG N. Experimental Verification for Cable Force Estimation Using Handheld Shooting of Smartphones［J］. Journal of Sensors，2017，2017：5625396.

[11] 余加勇，李锋，薛现凯，等. 基于无人机及 Mask R-CNN 的桥梁结构裂缝智能识别［J］. 中国公路学报，2021，34（12）：80-90.
YU Jia-yong，LI Feng，XUE Xian-kai，et al. Intelligent Identification of Bridge Structural Cracks Based on Unmanned Aerial Vehicle and Mask R-CNN［J］. China Journal of Highway and Transport，2021，34（12）：80-90.

[12] 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 Xiao-wei，DONG Chuan-zhi. Review of Computer Vision-based Structural Displacement Monitoring［J］. China Journal of Highway and Transport，2019，32（11）：21-39.

[13] 李萍，张劲泉，王磊，等. 基于摄影测量的简支梁桥损伤识别［J］. 公路交通科技，2022，39（8）：1-8.
LI Ping，ZHANG Jin-quan，WANG Lei，et al. Damage Identification for Simple Supported Beam Bridge Based on Photogrammetry［J］. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2022，39（8）：1-8.

[14] 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 Qian-kun，CUI De-peng，ZHANG Qiong，et al. Identification of Time-varying Modal Parameters of Pedestrian Bridges Using Computer Vision［J］. Journal of Vibration Engineering，2023，36（1）：52-61.

[15] 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 Qian-kun，CHEN Jian-bang，ZHANG Qiong，et al. A Non-contact Recognition for Deflection Influence Line of Footbridge Based on Computer Vision［J］. Engineering Mechanics，2021，38（8）：145-153.

[16] FENG D，FENG M Q，OZER E，et al. A Vision-based Sensor for Noncontact Structural Displacement Measurement［J］. Sensors，2015，15（7）：16557-16575.

[17] BHOWMICK S，NAGARAJAIAH S，LAI Z. Measurement of Full-field Displacement Time History of a Vibrating Continuous Edge from Video［J］. Mechanical Systems and Signal Processing，2020，144：106847.

[18] FENG W，JIN Y，LIU W. Displacement Field Determination Using an Iterative Optical Flow Strategy［J］. Measurement Science and Technology，2018，29（7）：075402.