

# 利用计算机视觉进行全路径人行桥振动舒适度评估

王翠云<sup>1</sup>, 杜永峰<sup>1,2</sup>, 朱前坤<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学土木工程减震隔震技术研发甘肃省国际科技合作基地, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 针对当前结构振动舒适度评估方法和标准只考虑结构响应而忽略结构主要使用者(人)的感受, 或仅以结构的振动响应代替行人的实际感受来进行振动舒适度评估, 以及传统采集方法不能同时实现结构和人的数据采集的现状, 建立一种基于计算机视觉的激励-传播-感知全路径人行桥振动舒适度评估方法。方法采用计算机视觉技术获取行人激励下人行桥和行人的运动视频, 利用分段光流法和 MMTracking 算法获取二者的振动响应, 通过提取和转换获取相应的行人加速度, 进而以加速度均方根值对人行桥振动舒适度进行评估。为验证方法的可行性和准确性, 在实验室人行桥模型上进行相关试验。结果表明, 基于计算机视觉的方法能够同时实现行人和人行桥响应的非接触测量, 并具有较高的精度, 而全路径人行桥振动舒适度评估方法比常规只将结构振动响应作为或代替行人实时响应来进行振动舒适度评估更加合理。

**关键词:** 振动舒适度评估; 人行桥; 计算机视觉; 全路径; 分段光流法; MMTracking

**中图分类号:** U441<sup>+</sup>2; U448.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2025)01-0204-10

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.01.022

## Human-induced vibration serviceability assessment of footbridges on the full path using computer vision

WANG Cuiyun<sup>1</sup>, DU Yongfeng<sup>1,2</sup>, ZHU Qiankun<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. International Research Base on Seismic Mitigation and Isolation of Gansu Province, Lanzhou University of Technology,  
Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** There are several shortcomings in the assessment of human-induced vibration in walkways, including a focus on structural response rather than pedestrian comfort, the reliance on structural vibration response to evaluate pedestrian comfort, and the limitations of data collection methods. To address these problems, this paper proposes a more comprehensive approach, namely human-induced vibration serviceability assessment of full-path footbridge based on computer vision with source-path-receiver. The proposed method captures video sequences of both the footbridge and pedestrian movements under pedestrian excitation using computer vision techniques, and then utilizes the segmental optical flow method and the MMTracking algorithm to obtain the vibration response of both. The acceleration responses of the pedestrians obtained from the above extractions and transformations are used as an evaluation index for the vibration comfort of the pedestrian bridge in terms of the root mean square value of acceleration. To validate the feasibility and accuracy of this method, experiments were conducted on the pedestrian bridge in the laboratory. The results show that the computer vision technology can accurately and contactlessly capture the pedestrian dynamic information of the footbridge, which is more reasonable than the conventional method which only evaluates the vibration comfort of the footbridge based on the structural vibration response. By addressing the shortcomings of current assessment standards and methods, this approach provides a more comprehensive and accurate means of evaluating the vibration serviceability of footbridges, considering both the structural response and the actual experience of pedestrians.

**Keywords:** vibration serviceability assessment; footbridge; computer vision; full path; segmented optical flow method; MMTracking

近年来,随着经济的发展,人们对建筑美学的追求越来越高,同时各种新型、轻质、高强材料的应用

也使土木工程结构造型更加新颖,质量更加轻柔,跨度和高度也不断增加。然而,这些新发展也带来了

收稿日期: 2023-01-11; 修订日期: 2023-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178291)

一系列问题,比如结构阻尼的降低和自振频率的减小。人行桥在行人荷载作用下更容易引起结构的大幅振动,从而引发振动舒适度问题<sup>[1-6]</sup>,比如英国伦敦千禧桥<sup>[7]</sup>。目前,已有众多专家学者开始关注人致振动舒适度问题<sup>[8-10]</sup>。

FENG等<sup>[10]</sup>对不同人行桥在多种场景中的振动加速度进行采集,并通过问卷调查记录相应场景下行人的振动舒适度,通过对这两种数据的分析,发现行人舒适度与人行桥最大加速度之间存在关联,并提出了一种考虑行人舒适度的人行桥人致振动舒适度评估方法。GÓRSKI等<sup>[11]</sup>采用环境振动试验方法对全玻璃纤维增强复合材料(GFRP)斜拉桥进行了振动舒适度评估。BAYAT等<sup>[12]</sup>采用低成本设备对一座历史悬索桥的结构进行了无创测量和数值研究,通过采用最新指南推荐的简化程序,在多行人负载下进行了结构的振动舒适度评估。陈得意等<sup>[6]</sup>基于集值统计原理,将行人主观反应随机性、个体差异性和变异性考虑在内,建立了人行桥振动烦恼率模型,在此模型基础上提出了人行桥竖向和侧向振动舒适度分析方法,并在实际桥梁上对该方法进行了验证。芮佳等<sup>[13]</sup>通过测试环境激励、人群激励下甘肃省体育馆悬吊楼盖的振动模态,以楼盖的峰值加速度作为评价指标对悬吊楼的振动舒适度进行评估。以上研究基于传统试验和有限元模型,在评估时仅考虑结构峰值加速度,且传统试验通过布设传感器采集结构振动响应,存在堵塞交通、安装时间长、劳动强度大、结构和人体的振动分量不易分离等缺点。DONG等<sup>[14]</sup>利用计算机视觉方法进行人行桥振动舒适度评估,这种方法具有非接触、长距离、低成本、节省时间和易于使用等优点,但只考虑了结构单点振动响应,而没有考虑到人行桥全场振动响应。目前各国振动舒适度评定标准和规范主要有欧洲规范1(2008)的英国国家附件(NA)、瑞典的Bro2004规范、HiVoSS指导方针和ISO标准<sup>[15]</sup>。这些规范主要采用以下两种方式解决人行桥结构的人致振动问题:避开敏感频率和限制结构振动加速度。其中,避开敏感频率法是在结构设计时尽量使结构的固有频率远离行人步频,以此避免人致振动事故发生,当该方法使用受限时,则需要对结构的振动加速度峰值进行验算,以此判断结构振动舒适度是否满足规定要求。以上方法只是简单地使用结构在人体运动时的时域响应,对结构的加速度峰值或加速度均方根值进行限制,或者使用结构的频率加权响应(一般是加速度)计算振动剂量值(VDV),以此来评估结构的振动舒适度<sup>[4]</sup>,但这些研究均只考虑了结构的振动响应,而没有考虑到人行桥主要使用者(人)的感受。ZHU等<sup>[16]</sup>将人的感受考虑在内,建

立了人行桥全路径振动舒适度研究,但缺少试验研究。CAO等<sup>[9]</sup>利用智能手机和互联网,结合微信小程序,采集行人调查问卷和振动数据,对所获得的数据库进行统计分析,探讨了振动发生场所、人群生理特征、振动方向以及受测者状态对振动舒适度感受的影响,在此基础上提出了针对不同性别、年龄和BMI指数人群的振动舒适度限值的相关建议值,为结构振动舒适度设计和评价提供了参考依据。WANG等<sup>[17]</sup>研究了不同行为状态的行人对简支支撑的钢-玻璃人行天桥模型的影响,提出了一个可以预测行人-结构耦合系统竖向动力响应的理论模型,为人与结构的相互作用和人行桥的振动舒适度评估提供了参考。在评估当前结构振动舒适度时,若要同时考虑结构和人的响应,仅使用单个类别传统传感器几乎很难实现,因此可考虑使用计算机视觉技术。HU等<sup>[18]</sup>利用计算机视觉技术,将行人行走时所处位置(即脚底处)结构振动作为行人振动响应对人行桥的振动舒适度进行评估。相比于仅以结构峰值响应作为评估标准,这种方法更趋合理。然而,该方法仍与行人真实感受存在差异。另外,在实际使用中,为使行人的感受更加接近实际情况,需要人工布设足够多的测点来进一步提高行人实时位移的准确性,这需要较大工作量,而且存在布设难度较大的情况。

综上所述,针对结构振动舒适度评估方法和标准只考虑结构响应而忽略结构主要使用者(人)的感受,或者虽然考虑了人的感受,但仍以结构的响应代替人的响应对振动舒适度进行评估,以及传统采集方法不能同时采集结构和人的振动信息的现状,提出一种基于计算机视觉的激励-传播-感知全路径人行桥振动舒适度评估方法。该方法利用计算机视觉技术实现完全非接触式获取人行桥的全场振动特性和行人的运动特性,从而评估人行桥的振动舒适度。

## 1 全路径振动舒适度评估框架

行人在人行桥上行走时,会对人行桥产生激励,使其发生振动。当行人的步频接近人行桥的固有频率时会引起结构的共振,产生较大变形,从而影响行人的感受。行人会根据实际感受调整自己的行为,进而改变人行桥的受力和运动状态。这种激励-传播-感知的过程就称为行人作用的全路径<sup>[16]</sup>。基于计算机视觉的激励-传播-感知全路径人行桥振动舒适度评估方法包括硬件系统、算法识别系统和振动舒适度评估三部分。硬件系统包括计算机和图像采集系统(摄像机)等设备,这些设备需要满足算法所

需的图像质量和计算能力,从而提供可靠的数据支持,在此不作详细介绍。算法识别系统主要包括基于深度学习的行人追踪系统和人行桥全场位移追踪系统。该方法基本组成示意图如图1所示。

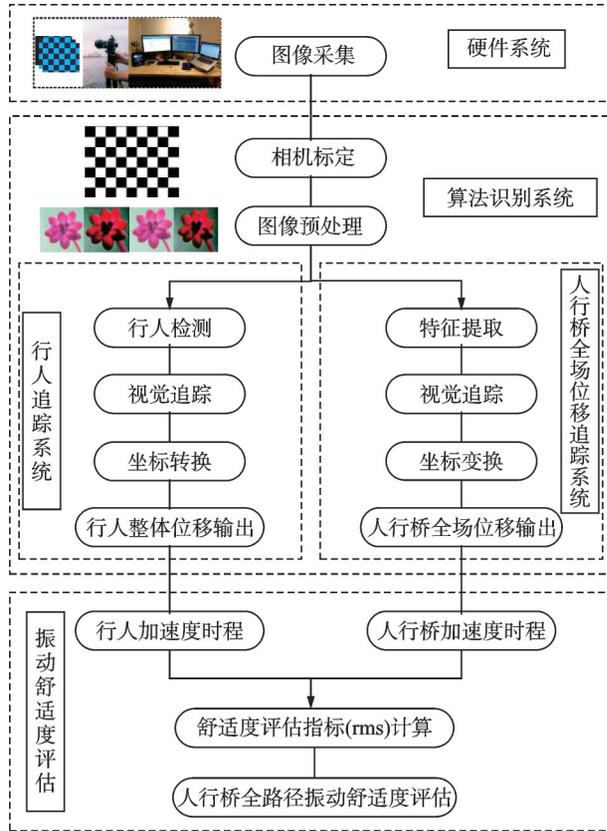


图1 方法基本组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of basic composition of method

### 1.1 行人追踪系统

本文采用了香港中文大学多媒体实验室(MMLab)旗下开源组织OpenMMLab开源的MMTracking一体化视频目标感知平台中的多目标跟踪算法来进行行人追踪。算法框架采用ByteTrack<sup>[19]</sup>模型,该模型结合了YOLOX<sup>[20]</sup>检测器和BYTE<sup>[19]</sup>数据关联方法,是一种基于Tracking-by-Detection<sup>[21]</sup>范式的目标追踪方法。原理<sup>[20]</sup>可表述如下:首先,使用YOLOX检测器检测视频中的行人,并获得其检测框。接下来,采用BYTE数据关联方法对检测结果进行处理。在第一次匹配中,将高分检测框和追踪轨迹进行匹配。然后,使用卡尔曼滤波对追踪物体的运动轨迹进行预测,获得预测轨迹结果得到的检测框,并与没有匹配的高分检测框和低分检测框进行二次匹配。在二次匹配中,采用预测框和检测框之间的IoU作为相似度,并使用匈牙利算法进行匹配。这样,由于遮挡而被视为背景过滤的真实物体得以保留,遮挡鲁棒性得到提高,有效缓解了由于人像重叠导致的目标丢失和

轨迹碎片化问题。此外,由于采用高效的检测模型和数据关联策略,目标不需要使用ReID模型提取外观特征,从而进一步提升了跟踪性能。ByteTrack算法流程图如图2所示。

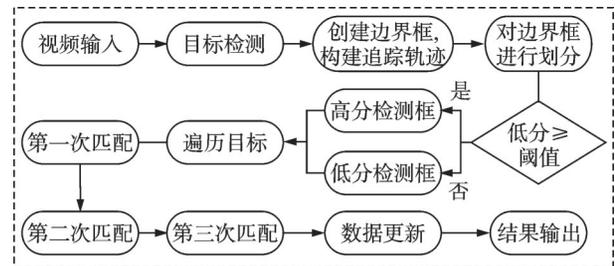


图2 ByteTrack算法流程图

Fig. 2 Flow chart of ByteTrack algorithm

本文采用两个评价标准来评估算法性能:目标检测中的 $mAP$ 和 $Recall$ ,以及多目标跟踪中的 $MOTA$ 和 $IDF1$ 。目标检测中的 $mAP$ 是所有类别的平均精度求和后除以类别总数,用于衡量目标跟踪检测的精度, $Recall$ 用于评估检测器对所有待检测目标的检测覆盖率。多目标跟踪中的 $MOTA$ 是衡量单摄像头多目标跟踪准确度的一个指标,与 $MOTA$ 不同, $IDF1$ 计算时考虑了ID信息,是衡量追踪器追踪效果的第一默认指标。在评估算法性能方面,本文考虑了目标检测和多目标跟踪两个关键指标,从不同角度评估算法的性能表现。各指标定义如下:

$$mAP = \frac{1}{|Q_R|} \sum_{q \in Q_R} AP(q) \quad (1)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$MOTA = 1 - \frac{FN + FP + \Phi}{T} \quad (3)$$

$$IDF1 = \frac{2IDTP}{2IDTP + IDFP + IDFN} \quad (4)$$

式中, $AP(q)$ 为某个类别 $q$ 的平均精度; $|Q_R|$ 为目标检测中的类别总数; $TP$ 表示所有被分为正样本的目标被预测为正确目标的数量; $FP$ 和 $FN$ 分别表示所有被分为负样本的目标被预测为正确目标和错误目标的数量; $T$ 为所有帧真正目标数的总和; $\Phi$ 为所有帧的目标跳变数。 $IDTP$ 、 $IDFP$ 和 $IDFN$ 分别为式(1)中考虑了ID信息的 $TP$ 、 $FP$ 和 $FN$ 。

算法训练在Linux16.04系统服务器上进行,环境配置如表1所示。训练集为MOT17数据集的一半和CrowdHuman数据集,测试集为MOT17数据集的另一半和CrowdHuman数据集。训练参数如下:训练批大小(batch size)为2,图像大小为(800, 1440),训练轮次(epoch)为80轮。所用学习率 $lr$ 和 $epoch$ 均为超参数。

表 1 环境配置

Tab. 1 Environment configuration

项目	型号/版本
系统	Linux16.04
显卡	Nvidia Quadro P5000
CPU	Intel(R) Xeon(R) Bronze 3204
Python	3.7.10
CUDA	10.1
CUDNN	7.6.3

在本文的训练过程中,损失函数变化如图 3(a)所示,从图中可以看出,损失函数开始时呈现逐步下降的趋势,至 69 轮达到最小值后出现了跳变,又继

续缓慢下降;图 3(b)显示,初始学习率设置为 0.002,在第 69 轮之后,学习率趋于稳定,接近于 0;图 3(c)为各评估指标变化图,从图中可以看出,Recall、mAP 在第 69 轮之前缓慢减小,在此之后同时发生跳变。以上现象的产生是因为在训练过程中为了避免过拟合并提高模型的泛化性能,代码在最后 10 个 epoch 的训练阶段关闭了数据增强方式,加入了正则项<sup>[19,22-24]</sup>。MOTA 和 IDF1 最大值分别为 0.785 和 0.801。

为验证 MMTTracking 多目标追踪算法对行人追踪的有效性,在教室内进行相关试验。试验中,行人身体腰部布置了多功能蓝牙加速度传感器,并利用摄像机拍摄了行人在随机、1.8、2.0、2.2 Hz 四种步频下行走的视频序列。以行人竖向加速度均方根误差 RMSE (root mean square error) 作为算法追踪效果的评价指标, RMSE 定义如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^* - y_i)^2} \quad (5)$$

式中,  $y_i^*$  和  $y_i$  分别表示由视觉方法和传感器得到的行人竖向加速度;  $N$  为数据点的总数目。RMSE 值越小表示算法的追踪效果越好。

试验现场布置图及试验结果详见图 4,限于篇幅,仅显示行人步频为 2.0 Hz 的计算结果。表 2 列出了该试验各工况下的 RMSE 值。图 4(b) 为 MMTTracking 算法追踪得到的行人行走时的位移时程,行人水平向位移均匀增加,与实际情况相符。

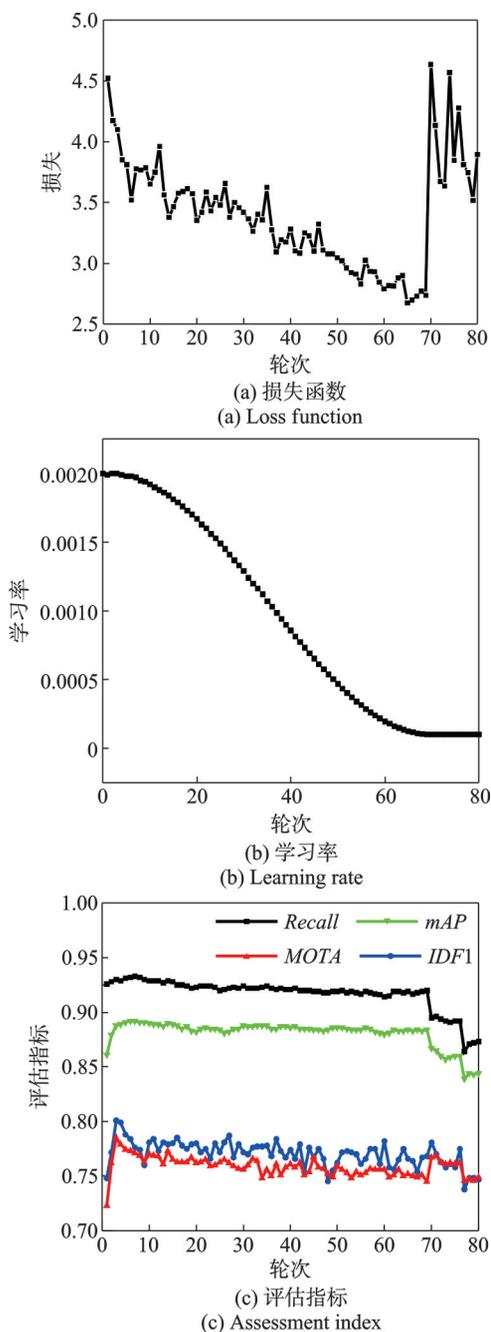
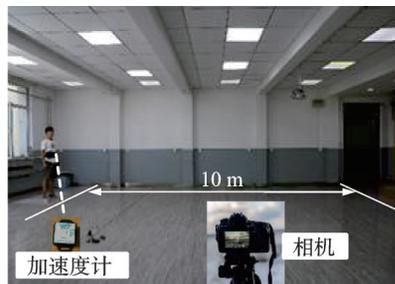
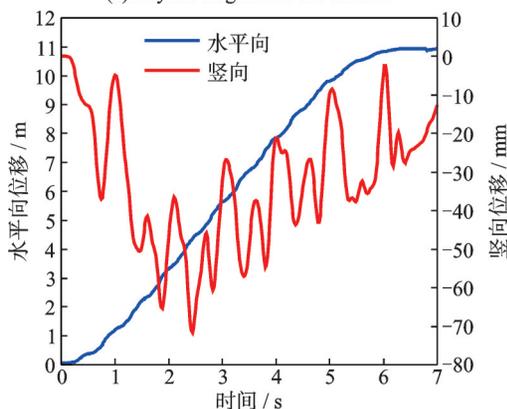


图 3 训练结果

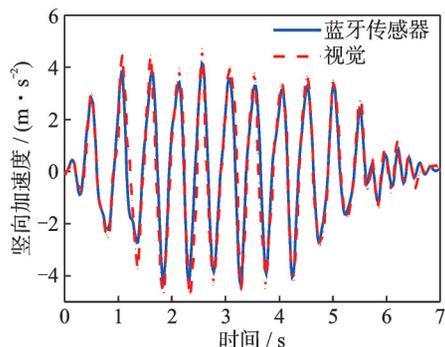
Fig. 3 Training results



(a) 试验现场布置图  
(a) Layout diagram of the test site



(b) 行人位移时程  
(b) Displacement time-history of pedestrian



(c) 行人竖向加速度时程对比

(c) Comparison of vertical acceleration time-history of pedestrian

图 4 MMTtracking 算法验证试验

Fig. 4 Validation tests for the MMTtracking algorithm

表 2 行人竖向加速度 RMSE 值

Tab. 2 Vertical acceleration RMSE values of pedestrian

工况	RMSE/(m·s <sup>-2</sup> )
随机	0.593
1.8 Hz	0.118
2.0 Hz	0.563
2.2 Hz	0.270

图 4(c) 为行人竖向加速度时程对比, 由图可见, 两种方法得到的行人加速度趋势相同, 且表 2 中数据显示四种步频下行人 RMSE 最大值为 0.593 m/s<sup>2</sup>。由试验数据可知, 基于计算机视觉的多目标追踪方法可作为一种传统行人加速度传感器的替代方法, 且具有较高的精度。

## 1.2 人行桥位移识别系统

当前结构位移测量技术可利用传统位移传感器、全自动全站仪、全球定位系统测量法和基于计算机视觉的结构位移测量方法。与传统方法相比, 基于计算机视觉的位移测量方法具有成本低、适用范围广、节约人力和时间、多点测量、非接触、高精度等优点。近年来, 这种位移测量方法在位移监测领域受到广泛关注<sup>[25-26]</sup>。利用计算机视觉技术实现桥梁位移识别, 常用的目标追踪算法有模板匹配、特征点匹配、光流法、基于形状的匹配和基于深度学习的目标跟踪。模板匹配原理简单、应用广泛, 但是精度一般, 而光流法可以在亚像素精度下识别出物体。光流法是在图像亮度不变的假设条件下, 通过时域上相邻帧间每个像素的运动矢量计算移动物体运动信息的一种方法, 依据其原理可分为: 基于相位、基于梯度、基于能量、基于匹配等方法<sup>[26-31]</sup>。

目前的光流技术主要有 LK 光流法、HS 光流法和金字塔光流法。LK 光流法虽然可以对各种场景下图像像素点坐标进行追踪, 但不适用于运动速度较快的场景, 而且属于稀疏光流法, 不适用于全场光

流追踪, 精度较低。传统 HS 光流法在实现大运动光流全场计算方面表现出色, 但在计算全场位移时计算过程复杂, 抗干扰能力差, 容易产生错误的光流估计, 从而降低了精度。因此本文采用了一种改进的 HS 光流法(分段光流法)<sup>[30]</sup>对人行桥位移进行追踪。该方法通过设定阈值过滤光流矢量, 减少了光流计算量, 提高了计算效率和光流的鲁棒性。限于篇幅, 对该算法不作详细介绍。图 5 为算法流程图。

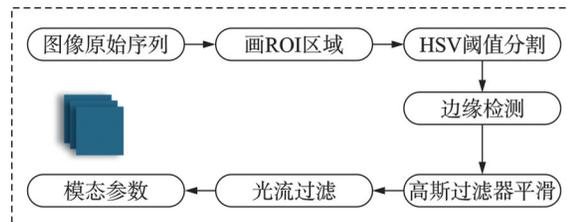


图 5 分段光流法流程图

Fig. 5 Flow chart of segmented optical flow method

## 1.3 激励-传播-感知全路径人行桥振动舒适度评估

振动舒适度是由人对于振动的主观感受来体现的, 人作为具有独立意识的可以运动的个体, 由于生理特征(性别、年龄、身高、体重)以及个体行走方式、步态、身体部位的不同, 在不同场景以及生理、心理状态下对于相同振动的感受阈值存在显著差异<sup>[9, 32]</sup>。但在当前研究中, 针对不同振动场景下人的振动限值的研究较少。同时, 有关振动舒适度的相关规范和标准一般均以结构的响应如峰值加速度、加速度均方根值(rms)、振动剂量值作为舒适度评估标准<sup>[9, 30-34]</sup>。文献[18]中将行人所在位置处结构的实时位移(以下简称结构跟随位移)作为行人的实际感受, 对人行桥振动舒适度进行评估, 这种方法比传统方法更加合理, 但仍不能代替行人的真实感受。本文在此基础上, 建立了基于计算机视觉的激励-传播-感知全路径人行桥振动舒适度评估方法。该方法利用计算机视觉技术采集行人激励下人行桥和行人的视频信息, 对视频序列进行处理后, 得到由分段光流法计算的人行桥全桥位移时程、由 MMTtracking 算法追踪的行人行走全程的位移时程(以下简称行人实时位移时程)和结构跟随位移时程, 经转换得到以下三种加速度时程信息: ①人行桥跨中加速度时程; ②结构跟随加速度时程; ③行人实时竖向加速度时程。将相应的 rms 值共同作为人行桥全路径振动舒适度评估指标, 评估时: ①、②对应的 rms 值按照 ISO 2631-1-1997 规范<sup>[34]</sup>中的 6.1 条基本评价法进行评估; ③对应的 rms 值按照文献[9]中被试者振动限值的建议值进行评估。二者振动限值均包

括觉察限值和舒适限值,ISO 2631-1-1997 规范<sup>[34]</sup>中觉察限值规定为 0.015 m/s<sup>2</sup>,轻微不适的舒适限值规定为 0.315 m/s<sup>2</sup>;文献[9]中建议觉察限值规定为 0.057 m/s<sup>2</sup>,轻微不适的舒适限值规定为 0.171 m/s<sup>2</sup>。rms 值计算如下:

$$rms = \left( \frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中,  $a_w(t)$  为对结构加速度信号频率加权后的时程信号;  $t$  为时间,  $T$  为总时长, 单位为 s。

## 2 试验和数据分析

### 2.1 试验设计

基于计算机视觉的激励-传播-感知全路径人行桥振动舒适度评估方法在实验室人行桥上进行验证试验。试验模型为简支钢-玻璃组合人行桥, 桥长 10.1 m, 宽 1.6 m。人行桥主梁采用两根 10.1 m 的国产 20a 轻型工字钢, 次梁为六根 1.4 m 的 20a 轻型工字钢, 主、次梁以焊接方式组成钢框架。桥面为双层夹胶钢化玻璃(总厚度为 22 mm)。试验时在人行桥跨中布设激光位移计, 并架设相机采集行走时人行桥全场视频, 整个试验涉及的设备名称、型号及数量如表 3 所示。

表 3 试验设备  
Tab. 3 Test equipments

设备名称	型号	数量
相机	佳能 5D4	1
激光位移计	HG-C1070	1
激光位移计采集系统	DH5911	1
加速度传感器	941B 型竖向拾振器	3
16 通道数据采集仪	INV 采集分析仪	1
加速度计陀螺仪	维特智能 WT901BLE 蓝牙系列	1

试验采用佳能 5D4 相机, 视频分辨率为 1080P (1920 像素 × 1080 像素), 相机帧率设定为 50 fps, 并将行人多功能蓝牙加速度传感器和激光位移计采样频率均设定为 50 Hz, 以保证数据时间间隔一致, 并获得较好的数据处理结果。为验证该方法在人行桥振动舒适度评估方面的适用性, 本试验设计了工况 1~4 和工况 5~8。其中, 工况 1~4 为单人以随机、1.8、2.0、2.2 Hz 步频在人行桥上行走, 从而分析不同步频下行人振动舒适度的差异; 工况 5~8 为多人分别以随机、1.8、2.0、2.2 Hz 步频在人行桥上行走, 考虑实际环境下人行桥多为多个行人行走的情况。工况 1~4 和工况 5~8 之间的差异为行人人数的不同, 从而分析行人数目对于振动舒适度的影响。试验现

场布置图如图 6 所示。

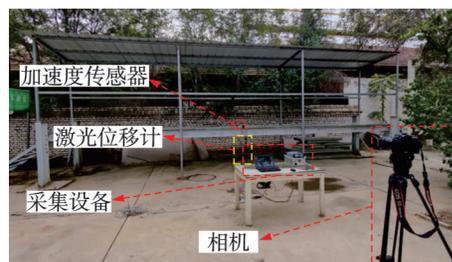
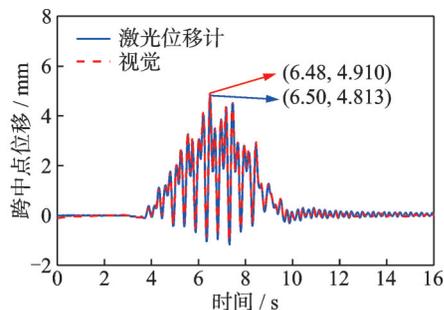


图 6 试验现场布置图

Fig. 6 Layout diagram of the test site

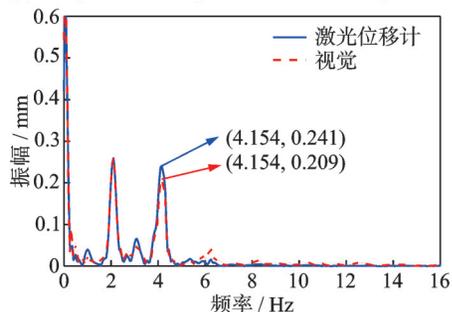
### 2.2 数据分析

限于篇幅, 只展示了单人以 2.0 Hz 步频在人行桥上行走(工况 3)和多人以 2.0 Hz 步频在人行桥上行走(工况 7)时的试验结果。图 7 为工况 3 下人行桥跨中点位移识别结果对比, 图 7(a) 为分段光流法和激光位移计采集的位移时程对比, 图 7(b) 为位移时程傅里叶变换对比。从图 7 中可知, 两种方法得到的跨中位移时程高度重合, 在 6.48、6.50 s 时人行桥跨中点位移达到峰值, 分别为 4.910、4.813 mm, 相对误差为 2.015%。在频域中, 二者识别得到的人行桥基频均为 4.154 Hz。图 8 为工况 7 下人行桥跨中点位移时程对比和傅里叶变换对比。由图 8 可知, 跨中位移时程高度重合, 人行桥跨中点位移均在 5.88 s 时达到峰值, 分别为 5.348、5.550 mm, 相对误差为 3.777%, 人行桥一阶基频识别结果为 4.044、



(a) 跨中点位移时程对比

(a) Comparison of displacement time-history of mid-span



(b) 跨中点位移傅里叶变换对比

(b) Comparison of displacement Fourier transform of mid-span

图 7 工况 3 下跨中点位移识别结果对比

Fig. 7 Comparison of displacement identification results of mid-span under working condition 3

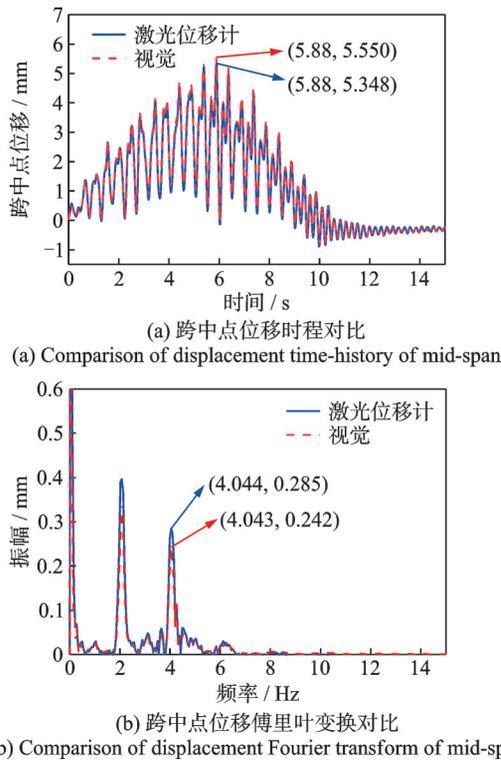


图8 工况7下跨中点位移识别结果对比  
Fig.8 Comparison of displacement identification results of mid-span under working condition 7

表4 跨中点位移峰值结果对比  
Tab.4 Comparison of displacement peak results of mid-span

工况	激光位移计/ mm	分段光流法/ mm	差值/ mm	相对误差/ %
1	3.903	3.966	0.063	1.614
2	3.670	3.810	0.140	3.815
3	4.813	4.910	0.097	2.015
4	5.426	5.710	0.284	5.234
5	5.776	5.975	0.199	3.445
6	5.877	6.040	0.163	2.774
7	5.348	5.550	0.202	3.777
8	7.190	7.326	0.136	1.892

4.043 Hz。表4为8种工况下人行桥跨中点位移峰值结果对比,由表可知,跨中点峰值位移最大误差为5.234%。由以上数据可知,分段光流法追踪人行桥位移具有较高精度。

图9为工况3的结构跟随加速度和行人实时竖向加速度时程对比。由图9可知,两种方法得到的加速度趋势基本相似,行人在6.56和8.26 s对达到加速度峰值,分别为0.28和0.209 m/s<sup>2</sup>,二者差值为0.075 m/s<sup>2</sup>,但行人起步时刻和加速度峰值出现时间会存在一个时间差,即出现延迟现象,例如加速度峰值出现时间相差1.7 s。

图10为工况7试验结果,图10(a)为行人行走时的水平向位移时程,以此显示三人行走的先后顺

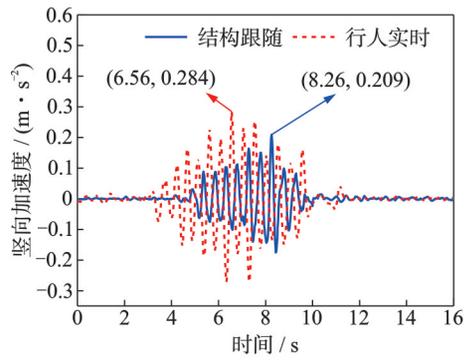
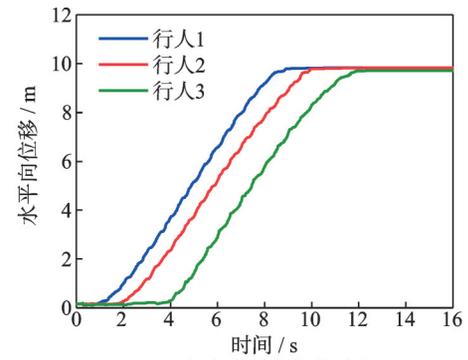
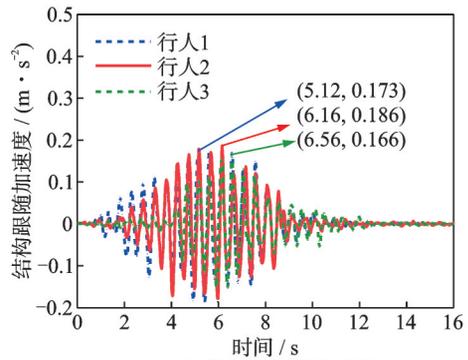


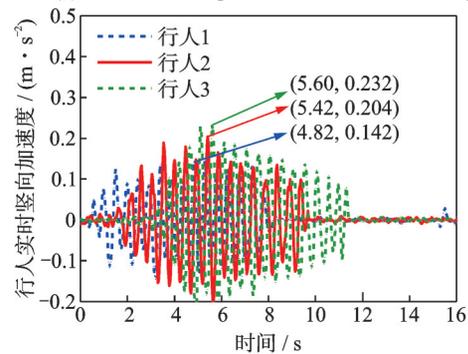
图9 工况3下竖向加速度时程对比  
Fig.9 Comparison of vertical acceleration time-history under working condition 3



(a) Horizontal displacement time-history of pedestrians



(b) Structure correspond acceleration time-history



(c) Real-time vertical acceleration time-history of pedestrians

图10 工况7试验结果

Fig.10 Test results under working condition 7

序;图10(b)为该工况下行人对应的结构跟随加速度时程,由图可知,行人1、2、3分别在5.12、6.16、6.56 s时达到加速度峰值,分别为0.173、0.186、

0.166 m/s<sup>2</sup>;图 10(c)为该工况下行人实时竖向加速度时程,由图可知,行人 1、2、3 分别在 4.82、5.42、5.6 s 时达到加速度峰值,分别为 0.142、0.204、0.232 m/s<sup>2</sup>,二者差值分别为-0.031、0.018、0.066 m/s<sup>2</sup>。由以上数据可知,两种方法得到的行人加速度趋势基本相似,但相较于行人实时加速度,结构跟随加速度所对应的起步时间和加速度峰值时间均会产生不同程度的延迟,此工况下各个行人加速度峰值延迟时间分别为 0.3、0.74、0.96 s。

经分析,上述延迟现象是由于用行人脚底的人行桥响应代替行人的结构跟随加速度而引起的。相对于行人,人行桥此时的响应并不完全是该行人当时在此位置处作用而产生的响应,而是在这步之前,由人行桥上所有行人行走产生的响应。所以行人实时加速度和结构跟随加速度之间会有一个时间差,即出现延迟现象。因此,MMTracking 算法追踪得到的行人实时加速度更接近行人在实际振动场景中的真实感受。

### 2.3 振动舒适度评估

振动舒适度评估根据本文 1.3 节内容进行,表 5 为 8 种工况下的 rms 值对比。根据 ISO 2631-1—1997 规范<sup>[34]</sup>,8 种工况下跨中加速度 rms 最小值为 0.019 m/s<sup>2</sup>,最大值为 0.081 m/s<sup>2</sup>,评估结果为:行人可以感觉到桥梁振动,但感觉不到不舒适;结构跟随加速度 rms 最小值为 0.022 m/s<sup>2</sup>,最大值为 0.078 m/s<sup>2</sup>,评估结果为:行人可以感觉到桥梁振动,但感觉不到不舒适。由文献[9]中给出的行人振动限值建议值,根据行人实时加速度 rms 值进行舒适度评估,结果为:单人激励下工况 1 和 3,多人激励下工况 5 中行人 3、工况 7 中行人 2 和 3、工况 8 中行人 3 可以感觉到桥梁振动,但感觉不到不舒适;其余各工况中其余行人评估结果为感觉不到振动。

由表 5 数据可知,单人激励下(工况 1~4),除工况 2 中跨中加速度 rms 值等于结构跟随加速度 rms 值外,对应的 rms 值均存在以下规律:跨中加速度 rms 值 < 结构跟随加速度 rms 值 < 行人实时加速度 rms 值。此时,采用结构跟随加速度 rms 值比采用跨中加速度 rms 值作为人行桥振动舒适度评估指标更加合理。但因为二者均以结构响应代替行人的真实响应,相比较于行人实时振动,会出现行人实际已出现舒适度问题,但根据振动舒适度评估标准规定的结构响应阈值,作出行人尚未出现舒适度问题的判断,或与之相反的结论。多人激励下(工况 5~8),工况 5 中 rms 值出现与单人激励下相同的规律,即跨中加速度 rms 值 < 结构跟随加速度 rms 值 < 行人实时加速度 rms 值。但在工况 6~8 中,跨中加速度

rms 值可能会大于、也可能会小于结构跟随加速度 rms 值,二者之间并不存在固定的规律。而对于结构跟随加速度 rms 值和行人实时加速度 rms 值,二者之间也不存在固定规律。这说明多个行人行走于同一人行桥上时,会发生结构响应的叠加,进而影响不同行人的振动感受。在工况 8 中,甚至出现了跨中加速度 rms 值 > 结构跟随加速度 rms 值 > 行人实时加速度 rms 值的现象,这是由于人行桥一阶振型频率为 4.381 Hz<sup>[35]</sup>,此时行人步频为 2.2 Hz,激发了人行桥倍频共振,放大了桥梁响应,而行人是一个复杂的个体,在该工况下运动比较复杂,并不能单纯以结构响应代替行人实际的感受。因此在多人激励下,如果仅考虑以跨中点峰值响应、结构跟随响应和行人实时响应作为振动舒适度评估指标,得到的评估结果对所有行人并不具备普遍适用性。因此在对人行桥振动舒适度进行评估时,应将结构跟随响应和行人实时响应共同作为人行桥振动舒适度评估指标。

表 5 8 种工况下 rms 值对比

Tab. 5 Comparison of rms values under 8 kinds of working conditions

工况	行人标签	跨中加速度 rms/(m·s <sup>-2</sup> )	结构跟随加速度 rms/(m·s <sup>-2</sup> )	行人实时加速度 rms/(m·s <sup>-2</sup> )
1	行人 1	0.019	0.024	0.057
2	行人 1	0.025	0.025	0.046
3	行人 1	0.026	0.044	0.078
4	行人 1	0.045	0.053	0.055
5	行人 1		0.026	0.043
	行人 2	0.026	0.027	0.056
	行人 3		0.022	0.069
6	行人 1		0.030	0.039
	行人 2	0.044	0.051	0.046
	行人 3		0.032	0.055
7	行人 1		0.059	0.053
	行人 2	0.057	0.056	0.068
	行人 3		0.042	0.081
8	行人 1		0.059	0.048
	行人 2	0.081	0.078	0.057
	行人 3		0.069	0.058

## 3 结 论

由以上内容可知,基于计算机视觉的激励-传播-感知全路径人行桥振动舒适度评估方法同时考虑了激励(人)、传播(人行桥)、感知(人)之间的振动响应,以结构响应和行人真实响应共同作为评估指

标开展的人行桥振动舒适度评估更趋合理,根据试验数据可得到以下结论:

(1)试验数据显示,MMTracking多目标追踪算法可作为一种传统行人加速度传感器的替代方法,利用该方法得到的行人实时响应可作为振动舒适度评估指标,而基于计算机视觉的激励-传播-感知全路径人行桥振动舒适度评估方法是可行的。

(2)结构跟随加速度rms值比仅采用人行桥跨中加速度rms值进行振动舒适度评估更为合理,但这种方法实际上仍然是以结构响应作为舒适度评估指标,并不能真正代替行人实时感受,因此应将行人实时响应作为振动舒适度评估指标。

(3)在单人激励下,以行人实时加速度rms值作为评估指标更接近行人实际的振动感受,但在多人激励下,由于结构响应的叠加和行人之间的相互作用,仅分别考虑结构响应或行人实时响应得到的评估结果对所有行人并不具备普遍适用性,因此应该将结构跟随响应和行人实时响应共同作为人行桥振动舒适度评估指标。

#### 参考文献:

- [1] PEDERSEN L, FRIER C. Footbridge vibrations predicted by stochastic load model[C]// Dynamics of Civil Structures, Volume 2: Proceedings of the 36th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics 2018. Springer International Publishing, 2019: 51-57.
- [2] CUEVAS R G, JIMÉNEZ-ALONSO J F, MARTINEZ F, et al. Assessment of the lateral vibration serviceability limit state of slender footbridges including the postlock-in behaviour[J]. Applied Sciences, 2020, 10(3): 967.
- [3] CAO L, CHEN Y F. Formulation of human-structure interaction for vibration serviceability of steel-concrete composite floors[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(3): e2679.
- [4] CAO W J, KOH C G, SMITH I F C. Vibration serviceability assessment for pedestrian bridges based on model falsification[J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(3): 05020012.
- [5] LU P Z, ZHOU Y T, WU Y, et al. Comfort assessment of human-induced vibration of pedestrian bridges based on Stevens annoyance rate model[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2022, 22(5): 2250052.
- [6] 陈得意, 黄仕平, 杜磊, 等. 基于烦恼率模型的人致人行桥振动舒适度分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15609-15616.  
CHEN Deyi, HUANG Shiping, DU Lei, et al. Analysis of pedestrian-induced vibration comfortability of footbridge based on annoyance model[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(36): 15609-15616.
- [7] BELYKH I, BOCIAN M, CHAMPNEYS A R, et al. Emergence of the London Millennium Bridge instability without synchronisation[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 7223.
- [8] GAAWAN S M, EL-ROBAA A S. Pedestrian bridges structure; assessment of comfort and impact of human-induced vibration[J]. Bridge Structures: Assessment, Design and Construction, 2019, 15(1-2): 3-13.
- [9] CAO L, CHEN J. Online investigation of vibration serviceability limitations using smartphones[J]. Measurement, 2020, 162: 107850.
- [10] FENG P, WANG Z Y, JIN F F, et al. Vibration serviceability assessment of pedestrian bridges based on comfort level[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2019, 33(5): 04019046.
- [11] GÓRSKI P, TATARA M, STANKIEWICZ B. Vibration serviceability of all-GFRP cable-stayed footbridge under various service excitations[J]. Measurement, 2021, 183: 109822.
- [12] BAYAT E, MILONE A, TUBINO F, et al. Vibration serviceability assessment of a historic suspension footbridge[J]. Buildings, 2022, 12(6): 732.
- [13] 芮佳, 刘开放, 张举涛, 等. 甘肃省体育馆悬吊楼盖人致振动舒适度现场测试研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(20): 103-109.  
RUI Jia, LIU Kaifang, ZHANG Jutao, et al. Field test and research on human-induced vibration comfort of suspension floor of Gansu Gymnasium[J]. Building Structure, 2021, 51(20): 103-109.
- [14] DONG C Z, BAS S, CATBAS F N. Investigation of vibration serviceability of a footbridge using computer vision-based methods[J]. Engineering Structures, 2020, 224: 111224.
- [15] GONG M, LI Y S, SHEN R L, et al. Glass suspension footbridge: human-induced vibration, serviceability evaluation, and vibration mitigation[J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(11): 5021014.
- [16] ZHU Q K, HUI X L, DU Y F, et al. A full path assessment approach for vibration serviceability and vibration control of footbridges[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2019, 70(6): 765-779.
- [17] WANG Z H, WEN J L, KOU C, et al. Vertical human-structure interaction of a simply-supported steel-glass composite footbridge under both standing and moving pedestrians[J]. Structures, 2023, 47: 1212-1224.
- [18] HU J X, ZHU Q K, ZHANG Q. Global vibration comfort evaluation of footbridges based on computer vision[J]. Sensors, 2022, 22(18): 7077.

- [19] ZHANG Y F, SUN P Z, JIANG Y, et al. ByteTrack: multi-object tracking by associating every detection box[J]. Computer Vision — ECCV 2022. arXiv preprint arXiv:2110.06864, 2021: 1-13.
- [20] GE Z, LIU S T, WANG F, et al. YOLOX: exceeding YOLO series in 2021[J]. arXiv preprint arXiv:2107.08430, 2021.
- [21] SUN Z H, CHEN J, CHAO L, et al. A survey of multiple pedestrian tracking based on tracking-by-detection framework[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2021, 31(5): 1819-1833.
- [22] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. YOLOv4: optimal speed and accuracy of object detection[J]. arXiv preprint arXiv:2004.10934, 2020.
- [23] ZHANG H Y, CISCHE M, DAUPHIN Y N, et al. Mixup: beyond empirical risk minimization[J]. arXiv preprint arXiv:1710.09412, 2017.
- [24] YANG Z H, SINNOTT R O, BAILEY J, et al. A survey of automated data augmentation algorithms for deep learning-based Image classification tasks[J]. Knowledge and Information Systems, 2023, 65(7): 2805-2861.
- [25] NIEZRECKI C, BAQERSAD J, SABATO A. Digital image correlation techniques for non-destructive evaluation and structural health monitoring[J]. Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation, 2018: 1-46.
- [26] 朱前坤, 崔德鹏, 杜永峰. 基于网络摄像机的桥梁挠度非接触识别[J]. 工程力学, 2022, 39(6): 146-155.  
ZHU Qiankun, CUI Depeng, DU Yongfeng. Non-contact identification of bridge deflection based on network camera[J]. Engineering Mechanics, 2020, 39(6): 146-155.
- [27] ZHANG Y G, ZHENG J, ZHANG C, et al. An effective motion object detection method using optical flow estimation under a moving camera[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2018, 55: 215-228.
- [28] KUSHWAHA A, KHARE A, PRAKASH O, et al. Dense optical flow based background subtraction technique for object segmentation in moving camera environment[J]. IET Image Process, 2020, 14(14): 3393-3404.
- [29] ZHAI M L, XIANG X Z, LYU N, et al. Optical flow and scene flow estimation: a survey[J]. Pattern Recognition, 2021, 114: 107861.
- [30] 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 Qiankun, CUI Depeng, 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.
- [31] 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 Qiankun, CHEN Jianbang, 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.
- [32] MORIOKA M, GRIFFIN M J. Absolute thresholds for the perception of fore-and-aft, lateral, and vertical vibration at the hand, the seat, and the foot[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 314(1-2): 357-370.
- [33] BSI. Measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock: BS 6841—1987[S]. London, UK: BSI, 1987.
- [34] ISO. Mechanical vibration and shock—evaluation of human exposure to whole-body vibration—part 1: general requirements: ISO 2631-1—1997[S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1997.
- [35] 马法荣, 朱前坤, 张琼, 等. 静态人群-结构相互作用人行桥模态参数试验[J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48(2): 115-122.  
MA Farong, ZHU Qiankun, ZHANG Qiong, et al. Experimental study on modal parameters of pedestrian bridge with static crowd-structure interaction[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2022, 48(2): 115-122.

第一作者:王翠云(1993—),女,博士研究生。

E-mail: wangcy1233i@163.com

通信作者:杜永峰(1962—),男,博士,教授。

E-mail: dooyf@lut.edu.cn