第 43 卷 第 10 期
2022 年 10 月

仪 器 仪 表 学 报
Chinese Journal of Scientific Instrument

Vol. 43 No. 10
Oct. 2022

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209367

融合加速度的桥梁位移响应倾斜摄影监测方法*

唐 亮[1],吴 桐[1],刘一军[1],李欣昱[1],余 葵[2]

(1. 重庆交通大学土木工程学院 重庆 400074; 2. 重庆交通大学河海学院 重庆 400074)

摘 要:桥梁的位移响应是结构健康监测和安全状态评估的基础数据。为充分发挥计算机视觉测量结构位移的优势,并提高实测位移的精度,本文提出了一种利用加速度与倾斜拍摄的视觉位移进行数据融合的高精度结构位移监测方法。一方面,通过加速度重构结构动位移,补充结构高频位移分量;另一方面,通过同频带加速度重构位移与视觉位移计算比例因子,减小像素坐标向真实坐标转换的误差。通过室内悬索桥模型实验和室外简支梁现场试验探索了本文方法的有效性。在室内实验中,与线性可变差动变压器位移计测量结果相比,本文方法的归一化均方根误差最大为 2.70%,比传统视觉测量方法降低约 60%。所提出方法可推进计算机视觉在桥梁健康监测领域的进一步应用。

关键词: 桥梁工程;视觉位移监测;数据融合;加速度;比例因子

中图分类号: TH822 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 560.20

A bridge displacement monitoring method by fusing acceleration and tilt photogrammetry-based measurement

Tang Liang[1], Wu Tong[1], Liu Yijun[1], Li Xinyu[1], Yu Kui[2]

(*1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;*
2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Structural displacement response is the basic data for structural health monitoring (SHM) and safety condition evaluation. To make full use of the advantages of vision-based sensors, overcome its shortcomings, and improve the accuracy of structural displacement, an accurate structural displacement monitoring method by fusing tilt photogrammetry-based and accelerometer measurement is proposed in this article. On the one hand, the dynamic displacement at higher frequencies is reconstructed by the measured acceleration. On the other hand, the acceleration reconstructed and vision-based displacements in the same frequency band can be used to calculate the time-domain variable scaling factor, which can reduce the error caused by the conversion from pixel displacement to real displacement. Experimental tests on a self-anchored suspension model bridge and field tests on a simply supported beam bridge are carried out to explore the efficiency of the proposed method. The results of experimental tests show that, compared with the linear variable displacement transducer results, the maximum normalized root mean square error of the proposed method is 2.70% which is about 60% lower than the traditional vision-based approaches. The proposed method can promote the further application of computer vision in the field of bridge structural health monitoring.

Keywords: bridge engineering; vision-based displacement monitoring; data fusion; acceleration; scaling factor

0 引 言

桥梁在运营过程中会受到车辆荷载、风荷载和地震荷载等各种外荷载作用,结构在荷载作用下的位移响应是结构健康监测(structural health monitoring, SHM)和安全状态评估(safety condition assessment, SCA)的重要参数之一。通过监测位移可以获知结构的刚度信息,局部位移的异常可能代表结构局部发生刚度损伤[1-3]。

收稿日期:2022-03-01 Received Date: 2022-03-01

*基金项目:国家自然科学基金(51708068)、重庆市英才团队(CQYC201903204)项目资助

目前用于实际桥梁位移测量的方法主要可以分为接触式和非接触式两大类。接触式传感器主要包括百分表、线性可变差动变压器位移计(linear variable displacement transducer, LVDT)、全站仪和水准仪等。其中,百分表和 LVDT 可以得到实时精确的位移结果,但是需要在桥下搭设测量平台,且需要人工靠近桥梁底面安装传感器,在实际操作中较为繁琐,对于跨水和桥下净空较高的桥梁不适用;全站仪和水准仪的采样频率较低,只能获取结构的静力位移,无法测量在动力荷载下的实时位移响应[4-6]。为了克服接触式传感器的不足,包括全球定位系统(global positioning system,GPS)、激光多普勒测振仪(laser Doppler vibrometer,LDV)、雷达干涉系统和基于计算机视觉的非接触测量方法得到了大量研究。其中,GPS 能够测量结构上点的三维坐标,但由于其有限的采样频率和测量精度,无法测量实时动位移响应[7-9]。LDV 能实现高精度和高频率的测量,但其价格较昂贵,且只能满足单点测量[10-11]。雷达干涉测量可以实现多点的高精度测量,但测量前需要在结构上安装反射面,操作比较复杂[12-13]。

基于计算机视觉的非接触测量方法以其简单方便、低成本、全场测量和远距测量的优势得到了广泛研究和部分应用。其主要原理为利用相机拍摄被测结构物视频,采用目标追踪算法进行图像处理得到测点在图像中的运动轨迹,再通过图像尺度与真实尺度的转换得到结构的真实变形信息[3]。目前,已有大量基于计算机视觉的方法在实际工程中得到了验证。例如,Feng 等[14]利用模板匹配算法,在约 300 m 测距下实时测量了曼哈顿大桥在列车经过时的位移响应,并研究了摄像机振动对测量结果的影响。Luo 等[15]提出了一种多目标点位移追踪算法,并在一座铁路桥和曼哈顿大桥得到了验证。崇爱新等[16]提出了基于双直线约束的编码特征点检测算法,并实现了双目视觉对无缝线路钢轨纵向位移测量。

基于视觉的测量方法有着诸多优点,但通过在实际中的应用,也发现了该方法的一些有待改进之处。首先,测量精度受测距和光照条件影响较大,一方面,要实现在单视域工况下对大型结构的全场高精度测量是不现实的,除非采用较大的测距,但在同等条件下,测量精度会随着测距的增大而降低[17-18];另一方面,由于该方法测量原理是追踪图像特征,特征与背景须有一定的对比度,因此测量精度对光照条件的依赖性也较高[19]。其次,市场上主流相机(民用摄像机、手机摄像头以及监控摄像头)的采样频率约为 20~100 Hz,限制了对高频响应的测量,并且,由于高频位移分量幅值较小,要测量这部分位移也具有一定难度。最后,在测量时对相机的姿态有一定要求,相机需架设在距被测结构较远的固定点,其光轴应与被测目标变形方向垂直,否则在坐标转换后会引起较大的测量误差,该误差会随着相机倾斜角度增加而急剧增大[20]。

相对于位移,加速度测量在实际情况中更加可靠和简单,可通过对加速度进行数值积分来间接测量结构位移[21-22]。但是,由于加速度传感器的超低频响应较差,且数值积分过程会放大低频噪声,在位移计算中引起较大的低频漂移[23-24]。所以,通常认为由加速度计算得到的高频位移分量相较于低频更为可信。为了充分利用加速度测量的优势,研究者们提出将加速度响应与其他低频测量可靠的传感器进行融合以实现优势互补,得到更为准确的位移结果。Ma 等[25]推导了应变与位移的关系,提出了基于有限脉冲响应(finite impulse response,FIR)滤波器将应变转换的低频位移与加速度计算的高频位移进行融合的位移测量方法。Park 等[26]提出利用一对互补滤波器融合计算机视觉位移与加速度位移,并分析了截止频率范围对位移计算精度的影响。Xu 等[27]利用多速率卡尔曼滤波方法分别将 GPS 和视觉位移与加速度进行融合,在一座铁路桥梁上验证了所提出方法的有效性。

在此基础上,本文提出了一种利用加速度响应与倾斜拍摄的视觉位移进行数据融合的高精度桥梁结构位移监测方法。一方面,通过加速度重构结构动位移,补充结构高频位移分量;另一方面,通过同频带的加速度重构位移与视觉位移计算得到时域可变比例因子,能减小在相机倾斜拍摄时由像素坐标向真实坐标转换的误差。在实验室一座自锚式悬索桥缩尺模型上开展不同测距、不同倾角工况下的动载试验,以一民用摄像机为影像采集设备,LVDT 位移传感器和加速度传感器进行同步数据采集,通过对视觉位移和加速度位移数据进行融合并以 LVDT 结果为参考,给出比例因子随时间的变化关系,验证所提出位移计算方法的有效性。同时,也在现场进行了车辆高速通过实桥测试,探索了在环境噪声影响下该方法的适用性。

1　融合加速度响应与倾斜摄影的位移监测方法

所提出的基于融合加速度响应与倾斜摄影测量的高精度位移监测方法大致可以分为 4 个步骤:图像处理、加速度重构位移、时域可变比例因子计算、数据融合。

1.1　基于亚像素模板匹配的目标追踪

常规荷载作用下的结构变形较小,对于中小跨径桥梁而言竖向变形多为毫米级别,对于大跨和特大跨径桥梁多为分米级别,可采用亚像素模板匹配算法进行目标追踪,得到测点在图像坐标中的位移。

模板匹配算法主要流程是预先在第一帧图像中截取含有被测目标点的图像子集,即模板。为了减小计算量,通常会根据经验预测模板的运动范围,在图像中选择能包含模板运动范围的图像子集,即感兴趣区域(region of

interest, ROI),然后用模板在后续图像序列的 ROI 中进行相关运算,模板匹配的优劣通过计算归一化相关系数进行衡量,其定义为[3]:

$$\alpha(i,j)=\frac{\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}(M_{i,j}(m,n)-\overline{M}_{i,j})(T(m,n)-\overline{T})}{\sqrt{\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}(M_{i,j}(m,n)-\overline{M}_{i,j})^2}\sqrt{\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}(T(m,n)-\overline{T})^2}} \tag{1}$$

式中:$\alpha(i,j)$ 为归一化相关系数;$T(m,n)$ 为从第一帧图像中所选择的模板;$\overline{T}$ 为模板 $T(m,n)$ 上所有像素点的灰度平均值;$M_{i,j}(m,n)$ 为待进行相关系数计算图像的 ROI 区域;$\overline{M}_{i,j}$ 为模板 $T(m,n)$ 盖住 $M_{i,j}(m,n)$ 部分的图像子集上所有像素点的灰度均值;(i,j) 为模板平移的坐标;M 和 N 分别为模板的宽度和高度。$\alpha(i,j)$ 的取值范围为 $-1\sim1$,达到最大时表明匹配为最佳。

传统模板匹配法得到的结果为像素级位移,为了得到更高的测量精度,以最佳像素点为中心,设其邻域内 5×5 pixels 的相关系数满足二维高斯分布,以最佳匹配像素点为拟合坐标原点,以其相邻像素点的坐标及相关系数为已知条件,通过最小二乘拟合可得到亚像素级位移。

1.2 基于数据融合的精确位移计算

由加速度计算位移可以通过求解以下优化问题[21]:

$$\min_{u_a}\Pi_E(\boldsymbol{u}_a)=\frac{1}{2}\|\boldsymbol{L}\boldsymbol{u}_a-(\Delta t)^2\boldsymbol{L}_a\boldsymbol{a}\|_2^2+\frac{\mu^2}{2}\|\boldsymbol{u}_a\|_2^2 \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{u}_a$ 和 $\boldsymbol{a}$ 分别表示加速度计算所得位移向量和测量所得加速度向量;$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{L}_a\boldsymbol{L}_c$,$\boldsymbol{L}_a$ 为 $2k+1$ 阶对角矩阵,其首尾元素值为 $1/\sqrt{2}$,其余元素均为 1,$\boldsymbol{L}_c$ 为 $(2k+1)\times(2k+3)$ 阶线性算子,$(2k+1)$ 为一个计算时窗内的数据点数;Δt 为采样间隔;μ 为正则化系数,设采样数据总数为 N,则 μ 可由下式计算:

$$\mu=46.81N^{-1.95} \tag{3}$$

求解式(2)可得:

$$\boldsymbol{u}_a=(\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}+\mu^2\boldsymbol{I})^{-1}\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}_a\boldsymbol{a}(\Delta t)^2=\boldsymbol{C}\boldsymbol{a}(\Delta t)^2 \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{I}$ 为 $(2k+3)$ 阶单位矩阵;$\boldsymbol{C}=(\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}+\mu^2\boldsymbol{I})^{-1}\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{L}_a$ 为系数矩阵。

由于加速度传感器的超低频响应较差,且数值积分过程会放大低频噪声,在位移计算中引起较大的低频漂移,因此认为通过加速度直接得到的结构准静力位移误差较大,需要利用摄影测量补充该部分分量。基于此,Park 等[26]提出了一对互补滤波器 H_L 和 H_H,其幅值之和为 1,相位之和为 0,即:

$$|H_L+H_H|=1,\ \angle(H_L+H_H)=0 \tag{5}$$

利用 H_L 和 H_H 分别对像素位移和加速度位移进行低通和高通滤波,得到测点的准静态像素位移和动力位移:

$$\begin{aligned}u_{Pseudo-static}^{im}(t)&=\sum_{j=-k}^{k}C_L(j+k+1)u^{im}(t+j\Delta t)\\u_{Pseudo-static}^{im}(t)&=\sum_{j=-k}^{k}C_L(j+k+1)u^{im}(t+j\Delta t)\\u_{Dynamic}(t)&=(\Delta t)^2\sum_{j=-k}^{k}C_H(j+k+1)a(t+j\Delta t)\end{aligned} \tag{6}$$

式中:$u_{Pseudo-static}^{im}(t)$ 和 $u_{Dynamic}(t)$ 分别为低通和高通滤波之后的测点的准静态像素位移和动力位移;C_L 和 C_H 分别为滤波器系数;u^{im} 和 a 分别为上采样之后的像素位移和加速度位移。

准静态像素位移通过比例因子转换可得到真实准静态位移:

$$u_{Pseudo-static}(t)=SF(t)\times u_{Pseudo-static}^{im}(t) \tag{7}$$

式中:$SF(t)$ 为时域可变比例因子,其具体计算方法在 1.3 节中给出。

通过对准静态位移和动态位移进行数据融合可得到测点的精确位移 $u(t)$,即:

$$u(t)=u_{Pseudo-static}(t)+u_{Dynamic}(t) \tag{8}$$

1.3 时域可变比例因子计算

在结构位移测量中,比例因子是从图像平面像素位移到真实位移转换的几何参数,当相机光轴垂直于结构平面时(如图 1(a)所示),比例因子 SF 的计算公式[20]为:

$$SF=\frac{H}{h},\text{或 } SF=\frac{F}{f}d_{\text{pixel}} \tag{9}$$

式中:H 为结构平面上已知物体的尺寸;h 为其在图像平面的对应像素数量;f 为相机镜头焦距;F 为相机到结构平面的距离;d_{pixel} 为像素尺寸(单位:mm/pixel)。

当相机光轴与结构平面不垂直,设其与结构平面法线夹角为 θ,如图 1(b)所示。此时比例因子计算公式[20]为:

$$SF_1=\frac{y_A-y_B}{I_A-I_B} \tag{10}$$

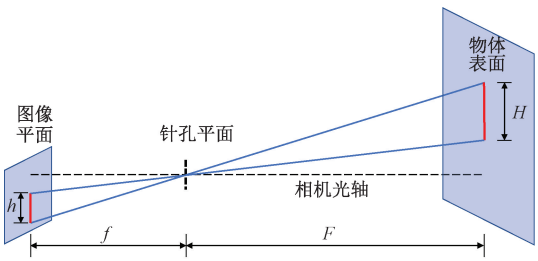
式中:y_A 和 y_B 分别为结构平面上点 A 和 B 的坐标,有:

$$\begin{aligned}y_A&=\frac{Fy_A^i}{f\cos^2\theta-y_A^i\cos\theta\sin\theta}\\y_B&=\frac{Fy_B^i}{f\cos^2\theta-y_B^i\cos\theta\sin\theta}\end{aligned} \tag{11}$$

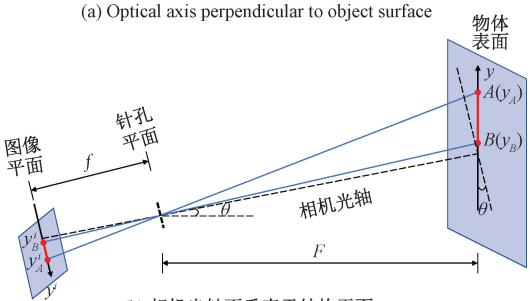
式中:I_A 和 I_B 分别为图像平面的像素坐标,且有 $y_A^i=I_Ad_{\text{pixel}}$ 和 $y_B^i=I_Bd_{\text{pixel}}$。

当倾斜角 θ 很小时,式(10)可进一步化简为:

$$SF_2 = \frac{1}{I_A - I_B}\left(\frac{Fy_A^i}{f\cos^2\theta - y_A^i\cos\theta\sin\theta} - \frac{Fy_B^i}{f\cos^2\theta - y_B^i\cos\theta\sin\theta}\right) \approx \frac{F}{f\cos^2\theta}d_{\text{pixel}} \tag{12}$$



(a) 相机光轴垂直于结构平面
(a) Optical axis perpendicular to object surface



(b) 相机光轴不垂直于结构平面
(b) Optical axis non-perpendicular to object plane

图 1　比例因子计算图示

Fig. 1　Scaling factor determination

由上式可知,要准确计算比例因子,必须测量相机到物体表面的距离,或测量图像中对应尺寸在结构中的实际尺寸。然而,在真实情况下很难准确测量相机到物体表面的距离和结构的尺寸。根据式(9)和(12),当相机位置和焦距固定后,比例因子对一次测量而言为常数。当相机倾斜时,如图 2 所示,过相机焦点 O 作结构投影面的垂线交于点 P,连接图像平面与焦点并延长与结构投影面相交于点 Q,连接图像平面中各像素点边缘与点 O 并延长与结构投影面依次相交于点 Q、Q_1、…、Q_{i-1}、Q_i、…、Q_{n-1}、Q_n,设线段 PQ 的长度为 $\Delta\lambda$,线段 QQ_1、…、$Q_{i-1}Q_i$、…、$Q_{n-1}Q_n$ 长度依次为 λ_1、…、λ_i、…、λ_n,$\angle QOQ_1$、…、$\angle Q_{i-1}OQ_i$、…、$\angle Q_{n-1}OQ_n$ 大小依次为 α_1、…、α_i、…、α_n。则根据几何关系可得到如下表达式:

$$\tan(\alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_{i-1}) = \frac{(i-1)}{f}d_{\text{pixel}} \tag{13}$$

$$\tan(\alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_{i-1} + \alpha_i) = \frac{i}{f}d_{\text{pixel}} \tag{14}$$

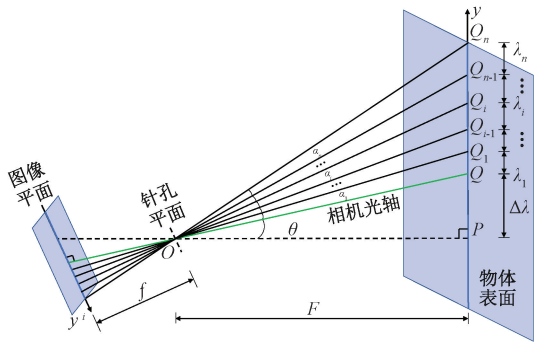


图 2　图像中各像素点对应实际尺寸

Fig. 2　Actual size of each pixel in the image

由式(13)和(14)求反三角函数并相减可得:

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{i \cdot d_{\text{pixel}}}{f}\right) - \arctan\left(\frac{(i-1) \cdot d_{\text{pixel}}}{f}\right) \tag{15}$$

另外,根据三角函数关系有:

$$\tan(\theta + \alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_{i-1}) = \frac{\Delta\lambda + \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_{i-1}}{F} \tag{16}$$

$$\tan(\theta + \alpha_1 + \alpha_2 + \cdots + \alpha_{i-1} + \alpha_i) = \frac{\Delta\lambda + \lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \lambda_{i-1} + \lambda_i}{F} \tag{17}$$

由式(16)和(17)可得任意像素点所对应的实际结构尺寸为:

$$\lambda_i = F \cdot (\tan(\theta + \alpha_1 + \cdots + \alpha_{i-1} + \alpha_i) - \tan(\theta + \alpha_1 + \cdots + \alpha_{i-1})) \tag{18}$$

根据式(18)可求解图像中每个像素点在结构表面所对应的实际尺寸。当相机内参数和外参数一定时,越靠近结构投影面边缘的点比例因子越大;并且,当相机倾斜角度越大时,比例因子的变化越剧烈。以本文试验采用的 Sony FDR AX-700 摄像机为例,假设拍摄距离为 1.5 m,焦距设置为 30 mm,利用上述公式计算了在倾斜角度分别为 30°、45°、60°和 75°时,比例因子随该像素点到图像中心点的距离的关系,如图 3 所示。可以看到,相机倾斜摄影测量目标点的竖向挠度时,由于目标点在结构表面的竖向位置会随时间而改变,则比例因子也是时域可变的。

为了得到在测量过程中比例因子随时间的变化,进而精确计算被测结构的变形,本文提出了融合加速度响应和倾斜摄影的时域可变比例因子概念。

根据 1.1 节中所述的目标追踪算法得到被测目标在图像平面的像素位移 $u_{im}^f(t_{im})$,同时根据 1.2 节中所述位移重构算法,由加速度计算得到测点的位移 $a(t)$。通常情况下,相机的采样频率约为 25~100 Hz,而加速度的采

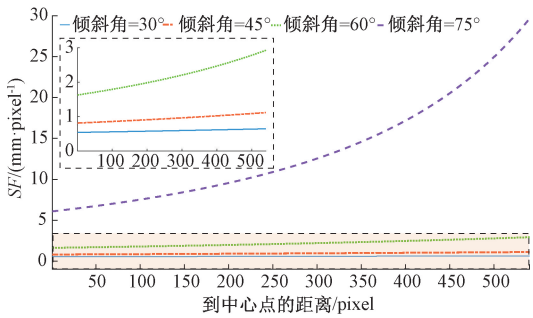


图 3 比例因子与到中心点距离的关系

Fig. 3 Relationship between the SF to the distance to the center point

样频率在 200 Hz 以上,因此需要对像素位移进行上采样,并对其进行低通滤波使其采样频率保持为原相机的采样频率以避免发生频率混叠现象,得到与 $a(t)$ 信号采样时间间隔一致的像素位移 $u_{im}(t)$。另外,由于相机与加速度传感器的信号可能在时间上有延迟,所以还需要对二者进行时间同步。通过计算二者的互相关系数实现时间同步,互相关系数的计算公式为:

$$R_{xy}(\tau)=\lim_{T\to\infty}\int_0^T x(t)y(t+\tau)\mathrm{d}\tau \tag{19}$$

式中:$R_{xy}(\tau)$ 为互相关系数,T 为随机信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的测量时间,τ 是两组信号的时间差,当 $R_{xy}(\tau)$ 达到最大值时,对应的 τ 即为两组信号的时间差。

由于像素位移与加速度位移存在重复频带成分,因此,对两组信号进行带通滤波,下截止频率 f_c^l 设置为加速度传感器频响范围下限或被测结构基频,上截止频率 f_c^h 设置为相机采样频率的 1/10 ~ 1/2,得到同频率成分位移信号 $u_{im}^f(t)$ 和 $u_a^f(t)$,则时域可变比例因子 $SF(t)$ 可由下式计算:

$$SF(t)=\frac{u_a^f(t)}{u_{im}^f(t)} \tag{20}$$

2 自锚式悬索桥缩尺模型动载试验

2.1 实验概况

在实验室桃花峪黄河公路悬索桥 1/30 缩尺模型上开展了动力荷载试验以研究所提出方法的适用性。模型桥跨径为 5.333 5+13.533+5.333 5 =24.200 m,桥面宽 1.2 m,两边跨分别设置 10 对吊索,中跨设置 29 对吊索,间距均为 0.45 m。北索塔和南索塔高分别为 3.87 和 3.96 m。模型加劲梁每 0.45 m 设置一道厚 2 mm 的横隔板,横隔板与钢箱梁焊接连接。钢箱梁上铺设了共 52 块 C30 桥道板(1.16 m×0.45 m×0.2 m)作为配重。

在模型桥主跨 L3/8 和 L/2 位置分别布置 1 个追踪目标点,1 个 LVDT 位移传感器和 1 个轴向压电式加速度传感器,测点编号从左至右依次为 P1 和 P2。传感器采样频率均设置为 500 Hz,配合江苏东华测试公司的动态采集仪 DH 5902N 进行位移和加速度响应采集。影像采集采用索尼 FDR AX-7004K 摄像机,帧率设置为 100 fps,分辨率为 1 920×1 080 pixels。模型桥及试验布置如图 4 所示。

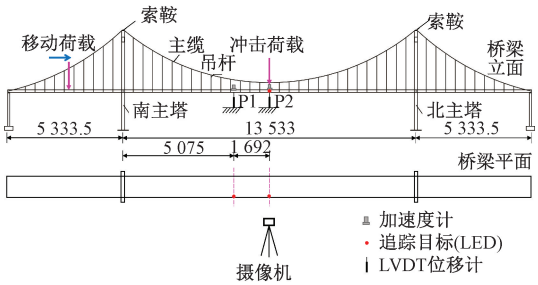


图 4 模型悬索桥及实验布置

Fig. 4 The suspension bridge model and test setup

在摄像机不同倾斜角和不同测试距离下共进行了 11 个工况的动载试验,具体工况说明如表 1 所示。每一工况实验过程中用三脚架将摄像机固定,利用数字倾角测量仪测量相机倾斜角后,保持其空间位置与角度不变,为防止手动拍摄带来的扰动,采用蓝牙遥控器控制拍摄。试验现场照片如图 5 所示。

表 1 悬索桥缩尺模型试验工况表

Table 1 The test scenarios of the scaled suspension bridge model

工况编号	荷载类型	倾斜角度/(°)	测量距离/m	测量目标
1-1	跨中冲击荷载	0	0.5	P2
1-2	跨中冲击荷载	31.5	0.5	P2
1-3	跨中冲击荷载	50.0	0.5	P2
1-4	跨中冲击荷载	70.0	0.5	P2
1-5	跨中冲击荷载	25.0	1.5	P2
2-1	移动荷载	0	0.5	P1
2-2	移动荷载	25.0	0.5	P1
2-3	移动荷载	45.5	0.5	P1
2-4	移动荷载	64.9	0.5	P1
2-5	移动荷载	71.8	0.5	P1

2.2 加速度重构动位移

冲击荷载试验过程中,首先由一人在跨中站定,将传感器数据平衡清零,然后开始数据采集,通过行人在跨中进行跳跃激励桥梁振动并自由衰减;移动荷载试验过程中,首先由一人在模型桥南侧边跨跨中站定,将

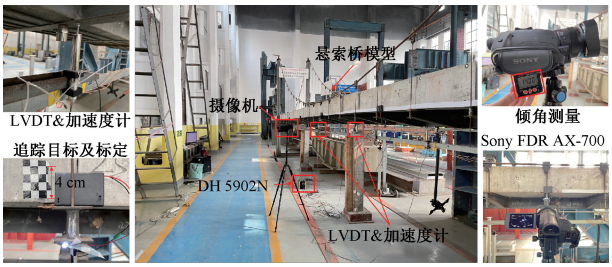


图 5　模型悬索桥试验照片

Fig. 5　The suspension bridge model test photos

传感器数据平衡清零,然后开始数据采集,行人快速跑步通过桥梁后停止在模型桥北侧边跨端头。由于冲击试验过程中模型桥未受到移动荷载作用,可认为位移响应结果中未包含准静力位移,因此,冲击荷载作用工况中可直接利用加速度信号通过式(4)计算得到动位移,与 LVDT 实测结果进行比较。对于移动荷载作用工况,其位移结果主要由准静力位移和动力位移两部分组成。将采集的加速度信号根据式(4)计算得到动位移,同时对 LVDT 和加速度重构位移进行高通滤波,设置截止频率为结构的基频,对二组信号的高频分量进行比较。分别以工况 1-1 和 2-1 为例说明加速度重构结构动位移方法。

图 6 和 7 分别为工况 1-1 和 2-1 下 LVDT 实测位移与实测加速度计算动位移的对比结果。从图中可以看出,两种工况下实测位移与加速度重构位移结果几乎一致。为了定量分析加速度重构位移的误差,以 LVDT 测得位移为参考,利用归一化均方根误差(NRMSE)来评估加速度重构动位移误差,其计算公式为:

$$\mathrm{NRMSE}=\frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2}}{\max(y_i)-\min(y_i)}\times 100\% \tag{21}$$

式中:n 为测量数据的总数,x_i 和 y_i 分别为加速度重构动位移和 LVDT 得到的第 i 个位移值。各工况误差计算结果如图 8 所示。由图 8 可知,在冲击荷载和移动荷载工况下,实测加速度计算动位移与 LVDT 误差均小于 0.80%,表明利用实测加速度重构结构动位移能达到较高的精度。

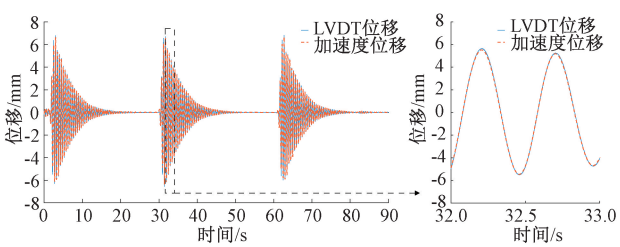


图 6　工况 1-1 位移结果对比

Fig. 6　Comparison of the displacement results of scenario 1-1

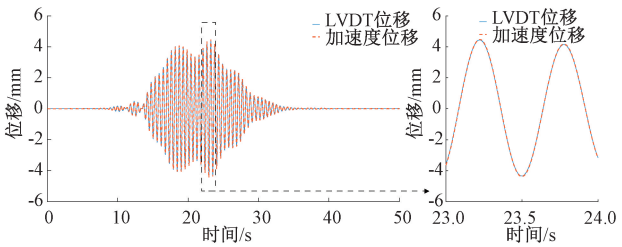


图 7　工况 2-1 位移结果对比

Fig. 7　Comparison of the displacement results of scenario 2-1

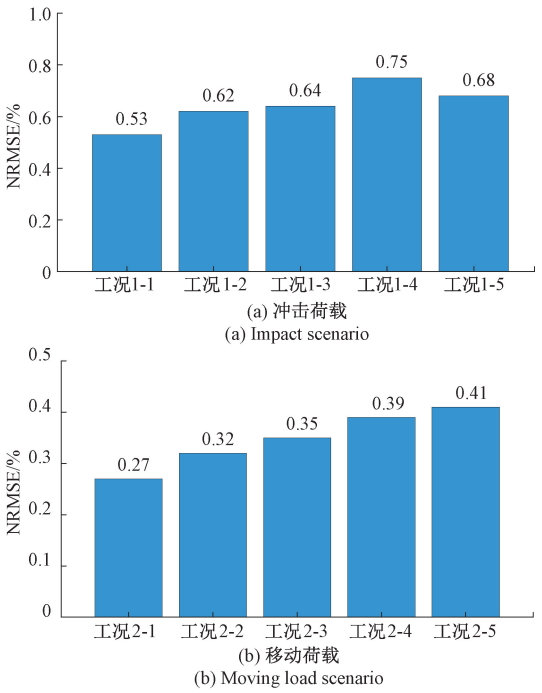


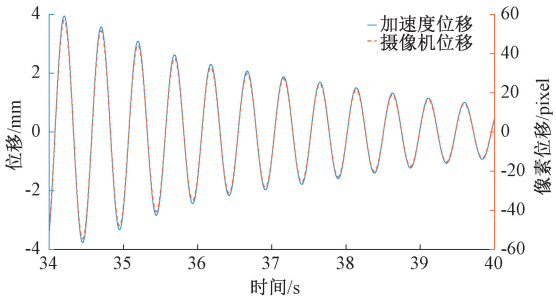
图 8　各工况 NRMSE 结果

Fig. 8　The NRMSEs of each scenario

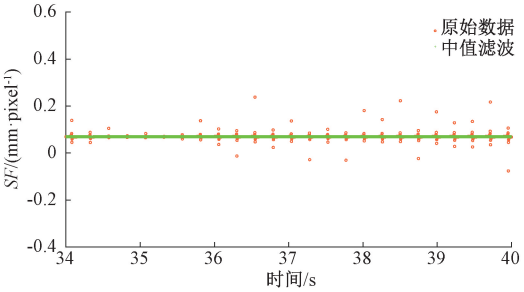
2.3　比例因子分析

将视觉位移信号进行上采样,使其采样间隔与加速度信号一致,为 0.002 s,然后对两组信号利用式(19)计算时间延迟并进行信号同步,再分别对两组信号进行带通滤波。为消除加速度信号的低频漂移并防止混频,设置下截止频率为模型桥的基频,即 1.7 Hz,上截止频率为摄像机采样频率的 1/10,即 10 Hz。根据式(20)计算各工况的实测比例因子,利用三倍标准差准则剔除异常数据后,对其进行中值滤波得到振动平衡位置的比例因子。

冲击荷载工况的 SF 计算结果如图 9~13 所示。从图 9(b)可以看出,当倾斜角度为 0°时,SF 在一个振动周期内变化范围较小,对比图 9(a)可知,在平衡位置附近 SF 变化较剧烈,是由于该位置附近位移趋近于 0,计算式分母较小;当倾斜角度为 31.5°时(图 10(b)),总体而言,SF 的变化范围大于倾斜角度为 0°(图 9(b))的工况,



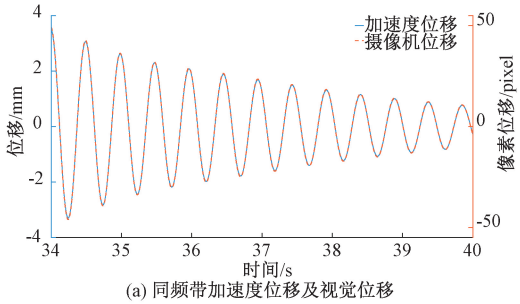
(a) 同频带加速度位移及视觉位移
(a) The acceleration-based and vision-based displacements in the same frequency band



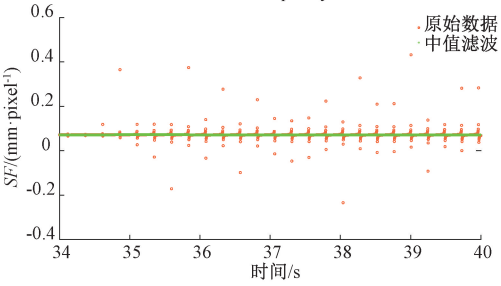
(b) 对应比例因子计算
(b) The corresponding SFs

图 9 工况 1-1 比例因子计算

Fig. 9 The SF results of scenario 1-1



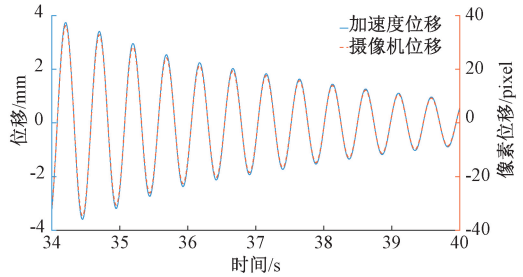
(a) 同频带加速度位移及视觉位移
(a) The acceleration-based and vision-based displacements in the same frequency band



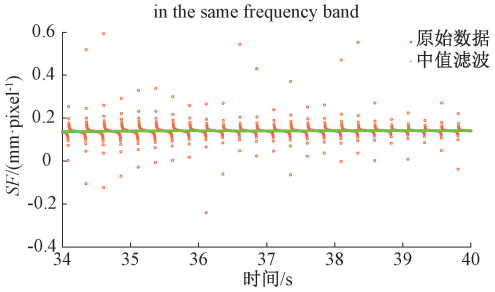
(b) 对应比例因子计算
(b) The corresponding SFs

图 10 工况 1-2 比例因子计算

Fig. 10 The SF results of scenario 1-2



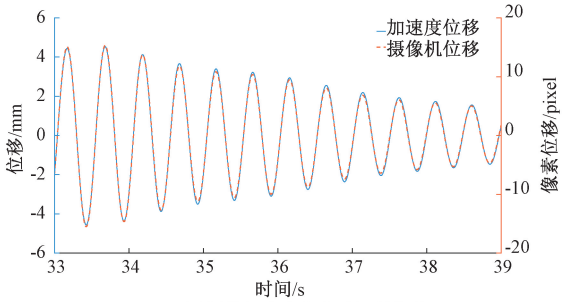
(a) 同频带加速度位移及视觉位移
(a) The acceleration-based and vision-based displacements in the same frequency band



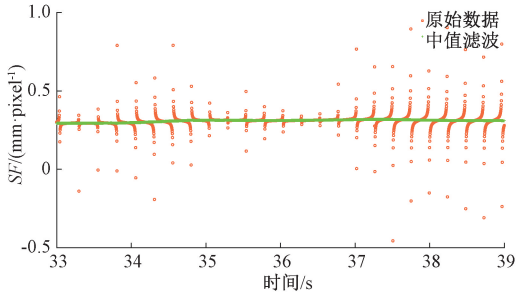
(b) 对应比例因子计算
(b) The corresponding SFs

图 11 工况 1-3 比例因子计算

Fig. 11 The SF results of scenario 1-3



(a) 同频带加速度位移及视觉位移
(a) The acceleration-based and vision-based displacements in the same frequency band

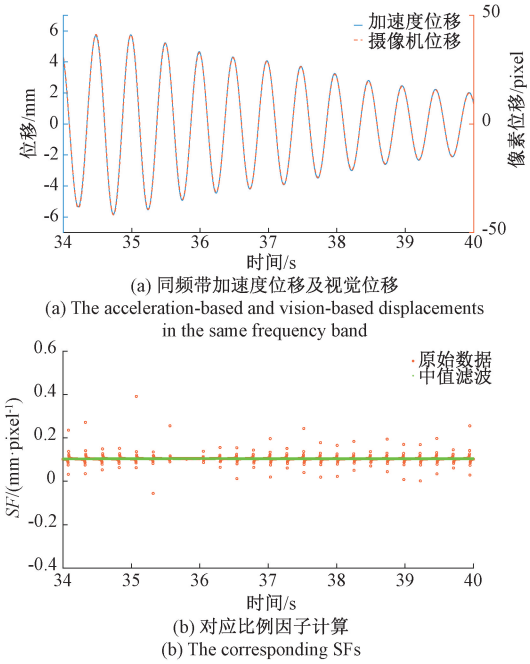


(b) 对应比例因子计算
(b) The corresponding SFs

图 12 工况 1-4 比例因子计算

Fig. 12 The SF results of scenario 1-4

并且,对比图 10(a)可知,在峰值点附近的 *SF* 变化幅度较小,越接近平衡位置,*SF* 变化幅度越大。当倾斜角度为 50°时(图 11(b)),总体而言,*SF* 的变化范围已明显大于倾斜角度为 0°(图 9(b))和倾斜角度为 31.5°时(图 10(b))的工况,对比图 11(a)可知,从峰值点到平衡位置,*SF* 近似于指数型变化。当倾斜角度为 70°时(图 12(b)),*SF* 的变化范围已远远大于前 3 种工况,对

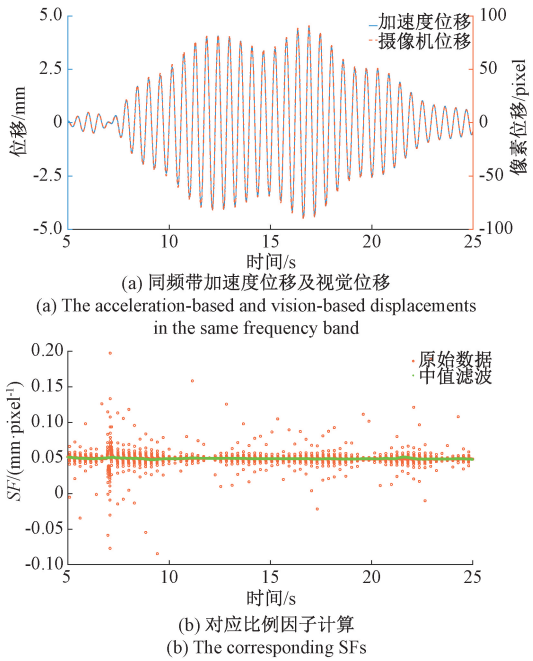


(a) 同频带加速度位移及视觉位移
(a) The acceleration-based and vision-based displacements in the same frequency band

(b) 对应比例因子计算
(b) The corresponding SFs

图 13　工况 1-5 比例因子计算

Fig. 13　The SF results of scenario 1-5



(a) 同频带加速度位移及视觉位移
(a) The acceleration-based and vision-based displacements in the same frequency band

(b) 对应比例因子计算
(b) The corresponding SFs

图 14　工况 2-1 比例因子计算

Fig. 14　The SF results of scenario 2-1

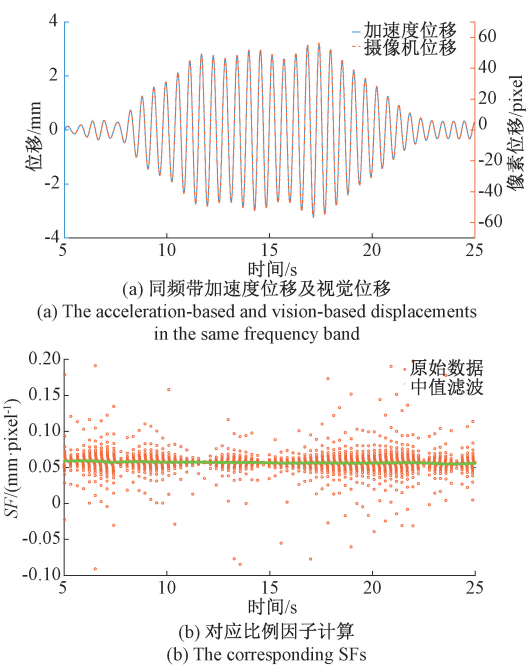
比图 12(a)可知,从峰值点到平衡位置,*SF* 近似于指数型变化,变化非常剧烈。同时,对比图 10(b)和图 13(b)可以看出,当倾斜角度接近时,且测距与焦距的比值接近时,比例因子的变化范围大致相似。

另外,由于在冲击荷载作用工况中桥梁未受到准静力荷载作用,即桥梁振动的平衡位置不变的,从图 9~13 可以看到,尽管随着倾斜角度的增加,实测比例因子的波动范围更加剧烈,但其波动的平衡位置并未发生变化,大致保持为直线。

移动荷载下比例因子的实测结果如图 14~18 所示。可知,与冲击荷载工况相同,随着倾斜角度的增加,比例因子的波动范围逐渐增大,另外,从图 14~18 中可知,不同于冲击荷载工况,由于移动荷载工况中存在准静力荷载,即桥梁振动的平衡位置不再保持为直线,且随着倾斜角度的增加,平衡位置的变化范围也逐渐增加。

2.4　融合加速度和倾斜摄影的位移响应结果

根据 1.2 节中所述,将准静态像素位移与振动平衡位置处的比例因子相乘,并与加速度计算所得动位移相融合,可得到测点在不同工况下融合后的实际位移时程曲线。同时将像素位移与式(10)计算所得比例因子相乘,可得到传统视觉位移测量结果。图 19~23 为移动荷载工况下,采用本文所提出融合方法、传统视觉测量方法与 LVDT 测量结果的对比。由于冲击荷载工况中未包含准静态位移,因此本节中仅分析移动荷载工况的位移结果。



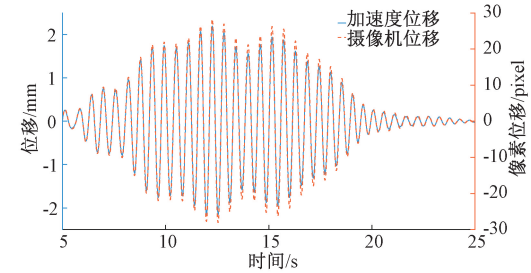
(a) 同频带加速度位移及视觉位移
(a) The acceleration-based and vision-based displacements in the same frequency band

(b) 对应比例因子计算
(b) The corresponding SFs

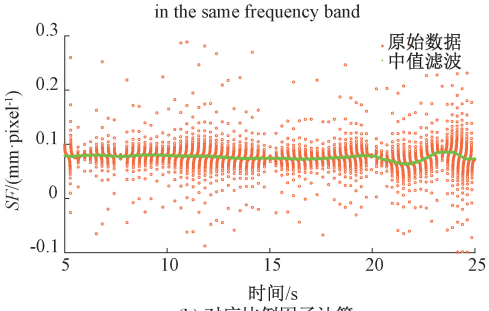
图 15　工况 2-2 比例因子计算

Fig. 15　The SF results of scenario 2-2

以 LVDT 测得位移为参考基准,利用绝对峰值误差(APVE)和归一化均方根误差(NRMSE)来评估所提出的位移测量方法峰值误差和总体误差,其中 NRMSE 的计



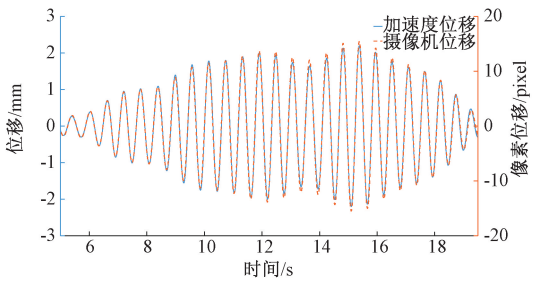
(a) 同频带加速度位移及视觉位移
(a) The acceleration-based and vision-based displacements in the same frequency band



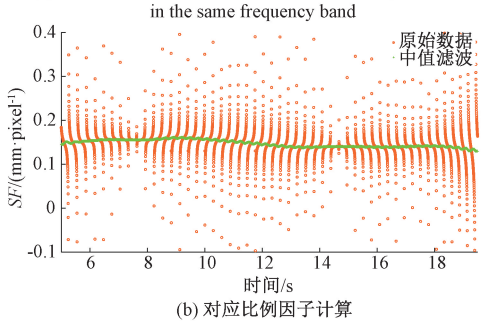
(b) 对应比例因子计算
(b) The corresponding SFs

图 16 工况 2-3 比例因子计算

Fig. 16 The SF results of scenario 2-3 (tilt angle 45.5°)



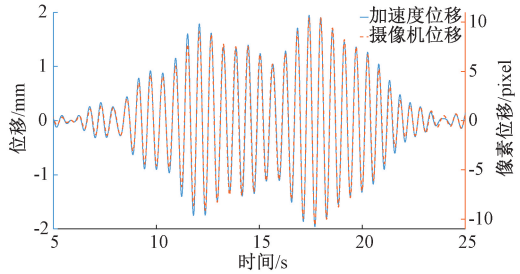
(a) 同频带加速度位移及视觉位移
(a) The acceleration-based and vision-based displacements in the same frequency band



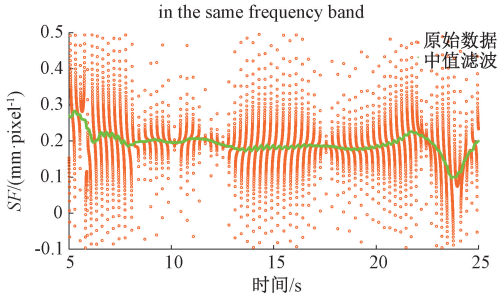
(b) 对应比例因子计算
(b) The corresponding SFs

图 17 工况 2-4 比例因子计算

Fig. 17 The SF results of scenario 2-4



(a) 同频带加速度位移及视觉位移
(a) The acceleration-based and vision-based displacements in the same frequency band



(b) 对应比例因子计算
(b) The corresponding SFs

图 18 工况 2-5 比例因子计算

Fig. 18 The SF results of scenario 2-5

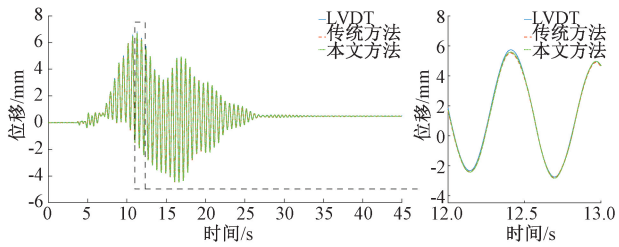


图 19 工况 2-1 位移对比

Fig. 19 Comparison of displacement results of scenario 2-1

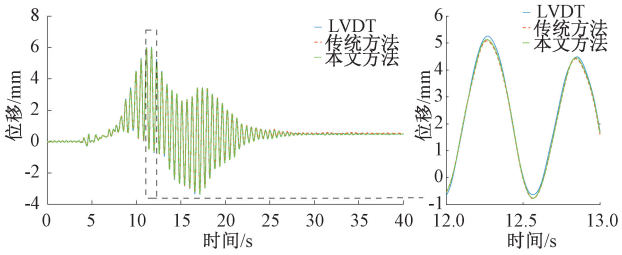


图 20 工况 2-2 位移对比

Fig. 20 Comparison of displacement results of scenario 2-2

算公式为式(21),APVE 计算公式为:

$$APVE = \left| \frac{\max(|x_i|) - \max(|y_i|)}{\max(|y_i|)} \right| \times 100\% \quad (22)$$

式中:x_i 和 y_i 分别为由比例因子计算方法和 LVDT 得到的第 i 个位移值。误差计算结果如图 24 所示。

从图 19~23 可以看出,本文所提出的方法与 LVDT 的测量结果在各工况下的位移测量中均基本一致。当摄像机正对目标结构表面及倾斜角度较小时(图 19 和 20),采用本文方法和传统方法的位移结果均与 LVDT 高度吻合,两种误差结果均较小,其中总体误差在 1.0% 以内;随着倾斜角度的增加,传统方法的测量误差随之增大。当

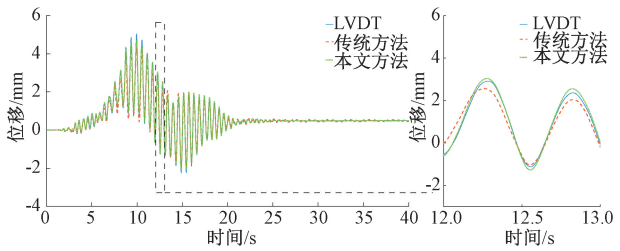


图 21　工况 2-3 位移对比

Fig. 21　Comparison of displacement results of scenario 2-3

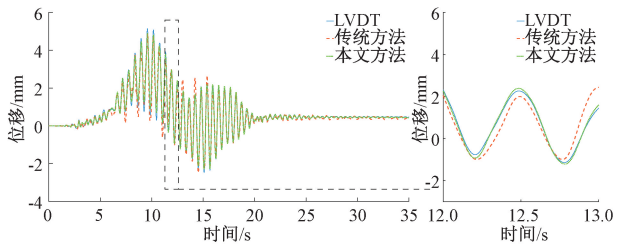


图 22　工况 2-4 位移对比

Fig. 22　Comparison of displacement results of scenario 2-4

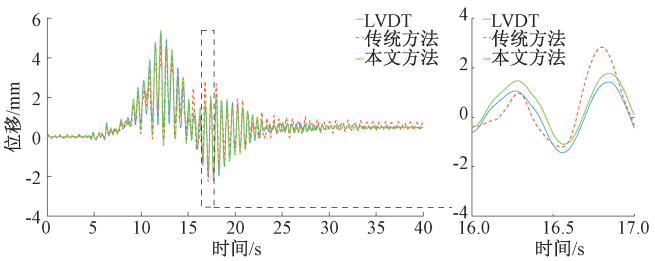


图 23　工况 2-5 位移对比

Fig. 23　Comparison of displacement results of scenario 2-5

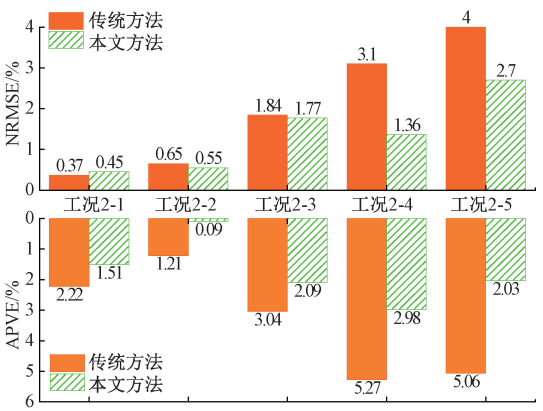


图 24　移动荷载工况误差

Fig. 24　The errors of moving load scenarios

倾斜角度为 71.8°时,传统方法的峰值误差达 5.06%,总体误差达 4.00%;对比于本文方法,最大峰值误差为 2.98%,最大总体误差为 2.70%,误差减小程度分别约为 90% 和 60%。

3　简支梁桥现场试验

3.1　桥梁概况

为了验证所提出方法对于实际桥梁结构的有效性,在一座预应力混凝土简支 T 梁桥开展了现场试验。试验桥梁位于重庆市九龙坡区,该桥跨径为 25.00 m,总宽 11.70 m。

由于陶家镇侧有一采石场,因此频繁有重车通过桥梁。为测量桥梁在车辆荷载作用下的位移,采用前文试验中的索尼 FDR AX-700 4K 摄像机采集桥梁立面的影像数据,帧率设置为 50 fps,分辨率为 1 920×1 080 pixels。摄像机架设在距离试验桥约 10 m 的另一桥梁上,该桥桥面低于试验桥,拍摄时摄像机有约 20°的仰角,以保证使整跨桥梁位于摄像机视场中部。为减小荷载横向分布对测量结果的影响,同时在桥面靠近摄像机侧人行道上,沿桥梁跨径跳蹬至陶家方向 L/2 和 3 L/4 位置分别布置 1 个磁电式加速度传感器(DH 2D001V),采集频率设置为 500 Hz,采集桥梁在荷载作用下的竖向振动加速度,保证影像数据与加速度数据均为同一片 T 梁的响应,试验现场布置如图 25 所示。

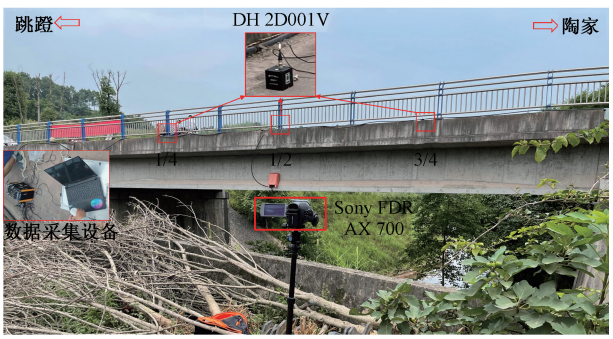
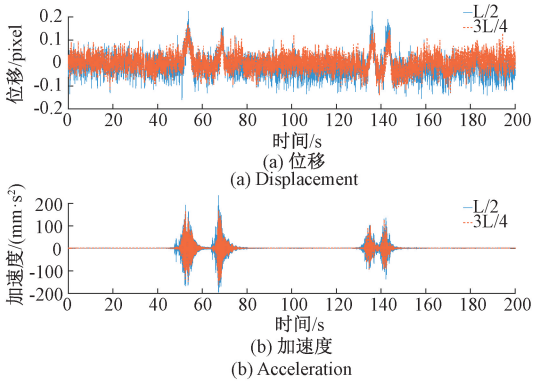


图 25　现场试验布置图

Fig. 25　Field test setup

3.2　重车荷载作用下桥梁位移测量

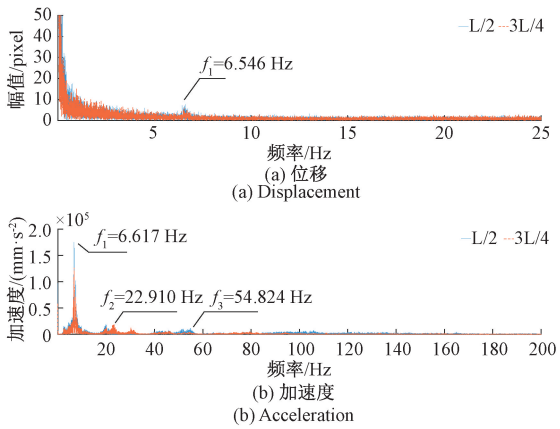
在数据采集过程中,共计 4 辆重车先后高速通过桥梁,由影像分析所得测点位置的像素位移响应及加速度响应如图 26 所示,分别对位移和加速度响应进行 FFT 分析,结果如图 27 所示,从加速度 FFT 图中可以看出,桥梁的前三阶自振频率分别为 $f_1 = 6.617$ Hz,$f_2 = 22.910$ Hz,$f_3 = 54.824$ Hz,而由于摄像机的采样频率仅为 50 Hz,像素位移的 FFT 仅能得到一阶频率;另外,从图中还可以看出,由视觉测量所得一阶位移响应较微弱,在重车荷载作用下,桥梁的最大位移约为 0.2 pixels,因此噪声在结果中的占比相对较高。



(a) 位移
(a) Displacement
(b) 加速度
(b) Acceleration

图 26 桥梁响应

Fig. 26 Bridge responses



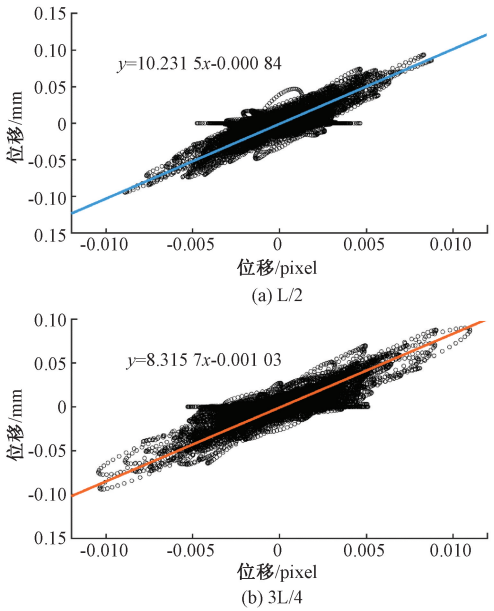
(a) 位移
(a) Displacement
(b) 加速度
(b) Acceleration

图 27 位移与加速度响应 FFT 分析

Fig. 27 FFT of displacement and acceleration

为了得到由像素位移转换为真实位移的比例因子，分别对像素位移与加速度计算位移进行带通滤波，设置截止频率为 2 Hz 和 10Hz。由于像素位移的幅值仅为 0.2 pixels，因此可以忽略同一测点比例因子随时间的变化，利用线性拟合得到各测点的比例因子。以带通滤波后的像素位移为横坐标，加速度计算位移为纵坐标绘制散点图，并进行线性拟合，结果如图 28 所示。进行线性拟合可得 L/2 和 3L/4 位置的比例因子分别为 10.23 和 8.32 pixel·mm^{-1}。

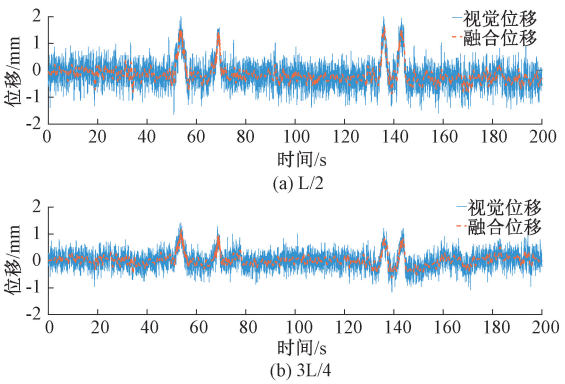
得到测点的比例因子后，对像素位移和加速度计算位移分别进行低通和高通滤波，再利用第 2 节中所述方法对二者数据融合，以得到高精度的位移测量。同时，将原始视觉位移结果直接与比例因子相乘所得与融合后的位移进行比较，如图 29 所示。可以看到，两种结果的趋势大致吻合，均能明显分辨出重车引起的位移，在跨中和 3L/4 截面最大位移约为 2 和 1.5 mm。通过对比可知，融合后的结果在无重车时段波动更小，表明数据融合极大降低了视觉测量结果的噪声。



(a) L/2
(b) 3L/4

图 28 比例因子拟合

Fig. 28 Scaling factor fitting



(a) L/2
(b) 3L/4

图 29 融合位移与视觉位移对比

Fig. 29 Comparison of fusion and vision displacements

4 结 论

传统视觉测量方法中测量误差会随着相机倾斜角度的增大而急剧增大[20]，因此对相机姿态具有较高的要求。实际情况中，相机布设点很难满足理想化相机姿态要求，本文通过将加速度响应融入视觉位移，即使在相机倾斜角度较大的情况下，也能较准确地测量在荷载作用下的桥梁结构位移响应。通过一对互补滤波器将低频像素位移与高频加速度位移进行叠加，可得到与 LVDT 精度相当的结构位移响应测量结果。将该方法在实验室一座自锚式悬索桥缩尺模型和室外一座预应力混凝土简支

T 梁桥上开展了试验研究,得到如下结论:

1)推导了在摄影测量中相机光轴与结构变形方向不垂直情况下各像素点所代表的实际尺寸——比例因子,发现越靠近结构投影面边缘的点比例因子越大;并且,当相机倾斜角度越大时,比例因子的变化越剧烈;

2)将倾斜摄影与加速度测量进行数据融合,一方面,利用同频带加速度位移与像素位移计算时域可变比例因子替代常规方法的常数比例因子,能减小从像素位移向真实位移转换时的误差,并且不需要已知尺寸或测量相机内外参数;另一方面,利用两种信号的高低频互补优势,提高位移测量的精度;

3)以 LVDT 的位移测量结果为参考基准,自锚式悬索桥缩尺模型的试验结果表明,将加速度测量与倾斜摄影融合后,位移测量结果的最大峰值误差和最大总体误差分别为 2.98% 和 2.70%,与传统视觉测量方法相比,误差减小约 90% 和 60%。在实桥上的测量结果表明,在环境噪声较大及车辆荷载高速通过桥梁的情况下,该方法也较大程度提高了视频测量位移响应数据的精度。

本文所提出的方法将加速度响应数据融入视觉测量,得到高精度的位移响应数据,实现了视频非结构化数据与 SHM 结构化数据的融合,最大程度发挥了监测数据价值,可推进计算机视觉在桥梁结构健康监测领域的进一步应用。

参考文献

[1] HAO W, LI A, GUO T, et al. Establishment and application of the wind and structural health monitoring system for the Runyang Yangtze river bridge[J]. Shock & Vibration, 2014, 2014:1-15.

[2] FENG D, FENG M Q. Model updating of railway bridge using in situ dynamic displacement measurement under trainloads[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(12): 1-12.

[3] 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 X W, DONG CH ZH. Review of computer vision-based structural displacement monitoring[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019,32(11):21-39.

[4] PSIMOULIS P A, STIROS S C. Measuring deflections of a short-span railway bridge using a robotic total station[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18: 182-185.

[5] FUKUDA Y, FENG M Q, SHINOZUKA M. Cost-effective vision-based system for monitoring dynamic response of civil engineering structures[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2010, 17:918-936.

[6] KOHUT P, HOLAK K, UHL T, et al. Monitoring of a civil structure's state based on noncontact measurements[J]. Structural Health Monitoring, 2013, 12:411-429.

[7] GENTILE C, BERNARDINI G. An interferometric radar for non-contact measurement of deflections on civil engineering structures: Laboratory and full-scale tests[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2009, 6:521-534.

[8] BROWN C J, KARUMA R, ASHKENAZI V, et al. Monitoring of structures using the global positioning system[J]. Structures & Buildings, 1999, 134.1: 97-105.

[9] MENG X, DODSON A H, ROBERTS G W. Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers[J]. Engineering Structures, 2007, 29: 3178-3184.

[10] XIA H, ROECK G D, ZHANG N, et al. Experimental analysis of a high-speed railway bridge under thalys trains[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 268: 103-113.

[11] PIERACCINI M, PARRINI F, FRATINI M, et al. Static and dynamic testing of bridges through microwave interferometry[J]. NDT E. Int., 2007, 40:208-214.

[12] 郑大青, 胡顺仁, 李双, 等. 大型建筑的有源微波相位雷达位移测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4):44-52.
ZHENG D Q, HU SH R, LI SH, et al. Displacement measurement method using microwave phase radar with active transponder for large buildings[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(4):44-52.

[13] 陈伟民, 李存龙. 基于微波雷达的位移/距离测量技术[J]. 电子测量与仪器学报. 2015, 29(9): 1251-1265.
CHEN W M, LI CH L. Radar-based displacement/distance measuring techniques[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9): 1251-1265.

[14] FENG D, FENG M. Experimental validation of cost-effective vision-based structural health monitoring[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2017, 88: 199-211.

[15] LUO L, FENG M, WU Z. Robust vision sensor for multi-point displacement monitoring of bridges in the field[J]. Engineering Structures, 2018, 163: 255-266.

[16] 崇爱新,尹辉,刘艳婷,等. 基于双目视觉的无缝线路钢轨纵向位移测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019,40(11):82-89.
CHONG AI X, YIN H, LIU Y T, et al. Research on longitudinal displacement measurement method of seamless rail based on binocular vision[J]. Chinese

Journal of Scientific Instrument, 2019,40(11):82-89.

[17] DONG C Z, CELIK O, CATBAS F N. Marker-free monitoring of the grandstand structures and modal identification using computer vision methods [J]. Structural Health Monitoring, 2018, 18 (5-6): 147592171880689.

[18] BUSCA G, CIGADA A, MAZZOLENI P, et al. Vibration monitoring of multiple bridge points by means of a unique vision-based measuring system [J]. Experimental Mechanics, 2014, 54(2):255-271.

[19] BA QERSAD J, POOZESH P, NIEZRECKI C, et al. Photogrammetry and optical methods in structural dynamics-A review [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2017, 86(pt. B):17-34.

[20] FENG D, FENG MQ, OZER E, et al. A vision-based sensor for noncontact structural displacement measurement[J]. Sensors, 2015, 15. 7:16557-16575.

[21] LEE H S, HONG Y H, PARK H W. Design of an FIR filter for the displacement reconstruction using measured acceleration in low-frequency dominant structures [J]. International Journal for Numerical Method in Engineering, 2010, 82:403-434.

[22] HONG Y H, LEE S G, LEE H S. Design of the FEM-FIR filter for displacement reconstruction using accelerations and displacements measured at different sampling rates [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 38: 460-481.

[23] PARK K T, KIM S H, PARK H S, et al. The determination of bridge displacement using measured acceleration [J]. Engineering Structures, 2005, 27: 371-378.

[24] THONG Y K, WOOLFSON M S, CROWE J A, et al. Numerical double integration of acceleration measurements in noise [J]. Measurement, 2004, 36: 73-92.

[25] MA Z, CHUNG J, LIU P, et al. Bridge displacement estimation by fusing accelerometer and strain gauge measurements [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28: e7733.

[26] PARK J W, MOON DS, YOON H, et al. Visual-inertial displacement sensing using data fusion of vision - based displacement with acceleration [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(3): e2122.

[27] XU Y, BROWNJOHN J M W, HESTER D. Long-span bridges: Enhanced data fusion of GPS displacement and deck accelerations [J]. Engineering Structures, 2017, 147(9): 639-651.

作者简介

唐亮,2005 年和 2011 年分别于重庆大学获得学士和博士学位,现为重庆交通大学副教授,主要研究方向为桥梁智能检测监测。

E-mail: tangliang@ cqjtu. edu. cn

Tang liang received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Chongqing University in 2005 and 2011, respectively. He is currently an associate professor at Chonqing Jiaotong University. His main research interests include bridge intelligent inspection and monitoring.

吴桐(通信作者),2016 年和 2020 年分别于重庆交通大学获得学士和硕士学位。现为重庆交通大学在读博士生,主要研究方向为基于计算机视觉的桥梁健康监测和数据融合。

E-mail: wutong@ mails. cqjtu. edu. cn

Wu Tong (Corresponding author) received her B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Chongqing Jiaotong University in 2016 and 2020, respectively. She is currently a Ph. D. candidate at Chonqing Jiaotong University. Her main research interests include computer vision-based bridge health monitoring and data fusion.