林子力,许芸熙.地震作用下的桥梁位移响应倾斜摄影监测方法[J].华南地震,2025,45(1):132-137. [LIN Zili,XU Yunxi. Oblique Photography Monitoring Method for Bridge Displacement Response Under Earthquake Action[J].South China journal of seismology,2025,45(1):132-137]

地震作用下的桥梁位移响应倾斜摄影监测方法

林子力，许芸熙

（云南省交通规划设计研究院股份有限公司，昆明 650041）

摘要：地震作为一种破坏性极强的自然灾害，往往会给桥梁结构带来严重的影响，例如位移、倾斜等变形，因此为了及时有效地监测和评估桥梁的响应情况，确保桥梁正常运行和人员的安全，提出地震作用下的桥梁位移响应倾斜摄影监测方法。通过最佳桥梁挠度曲线确定位移变化最显著或最具代表性的区域，将该区域作为倾斜摄影监测点位置。采用无人机搭载摄像机的方式采集地震作用下监测点位置桥梁倾斜图像，通过Harris算子提取图像亚像素角点并进行特征描述子生成，结合亚像素模版匹配方法进行在地震作用下的桥梁亚像素级位移跟踪。引入比例因子对桥梁位移响应亚像素级位移数值进行转换，得到准确的地震作用下桥梁位移响应数值，对每幅倾斜摄影图像的桥梁位移响应数值进行融合后得到桥梁位移响应倾斜摄影监测结果。实验结果表明，该方法具备较为准确的亚像素角点提取能力，计算的地震作用下桥梁亚像素级位移响应数值与实际值较为吻合，可有效实现地震作用下桥梁位移响应监测，应用效果较为显著。

关键词：地震作用；位移响应；倾斜摄影；监测方法；目标追踪；角点检测

中图分类号：TH822 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-8662(2025)01-0132-06

DOI：10.13512/j.hndz.2025.01.16

Oblique Photography Monitoring Method for Bridge Displacement Response Under Earthquake Action

LIN Zili，XU Yunxi

（*Yunnan Provincial Transportation Planningand Design Research Institute Co.*，*Ltd.*，*Kunming* 650041，*China*）

Abstract: As highly destructive natural disasters， Earthquakes often have serious impacts on bridge structures， such as displacements， tilt， and other deformations. An oblique photography monitoring method for bridge displacement response under earthquake action was proposed to monitor and evaluate the response of bridges in a timely and effective manner and to ensure the normal operation of bridges and the safety of personnel. Determining the areas with the most significant or representative displacement change through the optimal bridge deflection curve， and these areas were used as the location of the oblique photography monitoring points. Using drones equipped with cameras， oblique images of the bridge at the monitoring points under earthquake action were collected. The sub-pixel corner points of the images were extracetd by the Harris operator， and the feature descriptors were generated. The sub-pixel template matching method was combined for bridge sub-pixel displacement tracking under earthquake action. By introducing a scaling factor， the sub-pixel displacement values

收稿日期：2024-04-01

作者简介：林子力(1989-)，男，高级工程师，主要研究方向为桥梁设计及抗震等。

E-mail：rjashwdft@163.com

of the bridge displacement response were converted to obtain accurate values of bridge displacement response under earthquake action. The displacement response values from each oblique photography image were then integrated to produce the final monitoring results. The experimental results show that this method has a relatively accurate capability for extracting sub-pixel corner points. The calculated sub-pixel displacement response values of bridges match well with the actual values. The method can effectively realize the monitoring of bridge displacement response under earthquake, with significant application effectiveness.

Keywords: Earthquake action; Displacement response; Oblique photography; Monitoring methods; Target tracking; Corner detection

0　引言

桥梁作为交通运输的关键节点，其安全稳定运行对于保障人民生命财产安全和社会经济的正常运转至关重要。然而，地震往往对桥梁结构造成严重破坏[1-2]。因此，如何在地震发生时对桥梁的位移响应进行及时、准确的监测，从而评估桥梁的安全状态并采取相应的防护措施，一直是土木工程领域的研究热点问题。在地震作用下，桥梁的位移响应是评估其安全状态的关键指标之一。位移响应的大小和方向直接影响桥梁结构的稳定性和安全性。目前也有很多学者研究桥梁位移响应倾斜摄影监测方法，如周云等[3]提出桥梁有限元逆向建模监测方法，该方法利用无人机搭载摄影机拍摄桥梁倾斜图像后，使用有限元软件建立桥梁模型，在该模型中通过调节参数，得到桥梁倾斜监测结果。高江华等[4]提出高速公路桥梁形变监测方法，该方法建立了高速公路桥梁数值模型，并利用最小二乘积求解高速公路桥梁数值模型，得到桥梁变形监测结果。Rishikesh N等[5]提出基于物联网的桥梁监控方法，该方法通过采集桥梁实时图像后，运用物联网将图像数据传输到用户端内，再运用图像处理技术获取桥梁位移监控结果。Buss G等[6]提出雨棚桥的安装和监测方法，该方法运用传感器采集桥梁位移数据，运用大数据分析技术得到桥梁位移响应结果。

倾斜摄影技术利用无人机搭载高分辨率相机从多角度拍摄目标，获取丰富纹理和三维信息，具有高效、高精度和非接触性优势。因此，提出地震作用下的桥梁位移响应倾斜摄影监测方法。通过桥梁挠度曲线确定关键监测点，采用无人机搭载摄像机捕捉地震下的桥梁倾斜图像，利用Harris算子提取亚像素角点并匹配，转换得到精确位移响应数值，融合数据得到桥梁位移响应的倾斜摄影监测结果。

1　桥梁位移响应倾斜摄影监测方法

1.1　桥梁位移倾斜摄影监测位置确定

使用无人机搭载摄影机拍摄桥梁倾斜摄影图像，此时摄影拍摄角度对桥梁位移响应监测影响较大，如果拍摄角度或位置不当，得到的桥梁倾斜图像无法清楚呈现桥梁位移情况[7]，因此在利用无人机拍摄桥梁倾斜图像时，需要确定倾斜摄影监测点，其详细过程如下：

假设桥梁的长度为Z，桥梁位移响应的监测位置为x，监测时刻为t_0，则此时桥梁的挠度值$y_m(x, t_0)$计算公式如下：

$$y_m(x,t_0) = Z \cdot A(x)\delta_j(x)\sum_{j=1}^{k-1} x_j \tag{1}$$

$$A(x) = (x - x_1)(x - x_2) \tag{2}$$

式(1)、(2)中，k表示摄像机数量；$\delta_j(x)$表示基函数；P_j表示第j个摄像机拍摄的桥梁倾斜图像，x_j表示第j个摄像机的监测位置。

对公式(1)进行求导，则该公式可改写为：

$$A(x) = \delta_j(x)\sum_{j=1}^{k-1} P_j(t_0) = \tan\theta(x_j, t_0) \tag{3}$$

式(3)中，θ表示桥梁倾斜角。

虽然在地震作用下，桥梁位移响应较大[8]，但桥梁的倾斜角变换却较为微小，依据桥梁倾斜角则有：

$$\tan\theta(x_i, t_0) \approx \theta(x_i, t_0) \tag{4}$$

通过公式(3)可知，目前对桥梁位移响应监测的未知参数为$k-1$个，所以无法获取桥梁位移响应监测的准确位置，但可以计算最佳监测位置，即$P_j^*(t_0)$，其表达公式如下：

$$\varphi(\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_{k-1}) = \delta_j(x)\sum_{j=1}^{k} P_j^*(t_0) \tag{5}$$

式(5)中，φ表示桥梁位移响应监测的未知参数集合。通过求解公式左右两侧，可确定$P_j^*(t_0)$数值，以$P_j^*(t_0)$为基础进一步推导出最佳桥梁挠度曲线，其表达公式如下：

$$\tilde{y}_m(x,t_0)=Z\cdot A(x)\delta_i(x)\sum_{j=1}^{k}P_j^*(t_0) \tag{6}$$

式(6)中，$\tilde{y}_m(x,t_0)$表示最佳桥梁挠度曲线。

对公式(6)进行求解，确定位移变化最显著或最具代表性的区域。这些区域是桥梁在受载后变形最为明显的位置，也是位移倾斜摄影监测的重点，因此将其作为桥梁位移响应倾斜摄影监测位置，在该位置长期拍摄地震作用下桥梁位移图像，用于后续的桥梁位移响应监测。

1.2 基于亚像素模版匹配的桥梁亚像素级位移跟踪

利用无人机搭载摄影机按照上述获得的最佳监测位置拍摄桥梁倾斜图像，并采用亚像素模版匹配技术对图像中的桥梁目标进行精确追踪。这种方法能够非接触式地获取桥梁的位移数据[9]，为桥梁安全监测提供有效手段。

1.2.1 基于Harris算子提取亚像素角点

拍摄的桥梁倾斜图像内的角点具备较强的几何意义，可用于测量和表示目标几何形状。在追踪倾斜图像内的监测目标时，需要先提取桥梁倾斜摄影图像内的亚像素角点[10]。使用Harris算子实现倾斜图像内亚像素角点的提取，详细过程如下：

令X、Y表示坐标轴方向，(x,y)表示桥梁倾斜图像移动小窗口中心，该窗口在坐标轴方向上的移动量分别为u和v，I表示图像灰度函数，则此时桥梁倾斜图像的灰度变化量$E(x,y)$计算公式如下：

$$E(x,y)=\sum\tilde{y}_m(x,t_0)w_{x,y}(I_{x+u,y+v}+I_{x,y})^2 \tag{7}$$

式(7)中，$w_{x,y}(\cdot)$表示窗口函数。将公式(7)转换成二次项，则该公式可改写为：

$$E(x,y)=[u,v]O\begin{bmatrix}u\\v\end{bmatrix} \tag{8}$$

式(8)中，O表示实对称矩阵，其表达公式如下：

$$O=w_{x,y}\begin{bmatrix}I_x^2 & I_xI_y\\ I_xI_y & I_y^2\end{bmatrix} \tag{9}$$

式(9)中，I_x、I_y分别表示坐标不同方向上的梯度。

通过分析公式(9)可知，该实对称矩阵的特征值是自相关函数的一阶曲率，当矩阵内不同方向上的梯度曲率值均足够高[11-12]，则其对应的点即为桥梁亚像素角点，其表达公式如下：

$$C_{\mathrm{RF}}=E(x,y)\det(O)-\alpha\cdot\mathrm{trace}^2(O) \tag{10}$$

式(10)中，C_{RF}表示桥梁亚像素角点；$\det(\cdot)$表示行列式函数；α表示常数，取值为0.05；$\mathrm{trace}^2(O)$表示实对称矩阵O的迹。

当公式(10)计算得到局部最大值时，其对应的点即为桥梁亚像素角点。

1.2.2 特征描述子生成

在提取桥梁亚像素角点的基础上，生成桥梁目标追踪的特征描述子，其核心思想为：以桥梁亚像素角点作为中心，依据其周围的图像梯度变化数据，建立区域性特征描述子，其实现步骤如下：

第一步：将公式(10)的角点作为原点，按照坐标轴方向建立主坐标系，角点的梯度方向作为主方向。

第二步：选取参数为8*8的窗口，其中每个窗口内均具备9个像素。将主坐标系按照x轴方向旋转，使主坐标系的主方向与描述子的主方向重合[13]，计算8*8的窗口中心像素的加权幅值和方向，其表达公式如下：

$$m(x,y)=C_{\mathrm{RF}}\left[\left(\Phi(x+1,y)-\Phi(x-1,y)\right)^2\right]^{1/2}+\left[\left(\Phi(x,y+1),-\Phi(x,y-1)\right)^2\right]^{1/2} \tag{11}$$

$$\theta(x,y)=\tan^{-1}\left(\frac{\Phi(x,y+1),-\Phi(x,y-1)}{\Phi(x+1,y)-\Phi(x-1,y)}\right) \tag{12}$$

式(11)、(12)中，$m(x,y)$表示桥梁倾斜摄影图像窗口中心像素的加权幅值；$\theta(x,y)$表示桥梁倾斜摄影图像窗口中心像素的方向角数值；$\Phi(x,y)$表示高斯曲面函数。

第三步：从桥梁亚像素角点出发，计算邻域窗口的中心像素梯度方向，使用近似判断方式判断邻域窗口中心像素属于哪个方向后，利用公式(11)、(12)计算邻域窗口中心像素加权幅值数值后，对相同方向上的像素加权幅值累加后，得到桥梁亚像素角点的直方图。

第四步：在第三步的基础上，以每个邻域窗口中心为原点，重复第三步骤，可得到邻域窗口在8个方向上的像素加权幅值，将该幅值转换成向量表示形式后，可得到32维的桥梁倾斜图像内的目标特征描述子。

1.2.3 桥梁亚像素级位移跟踪

在获取到32维桥梁倾斜图像内的目标特征描述子后，追踪到不同桥梁倾斜图像内桥梁目标。

假设D_i、S_i分别表示两幅不同桥梁倾斜图像内第i个特征描述子，使用欧式距离作为两幅不同桥梁倾斜图像内特征描述子的相似性度量，则两者之间的特征描述子欧式距离表达公式如下：

$$d(D_i,S_i)=\sqrt{\sum_{j=1}^{32}(d_{ij}-s_{ij})^2} \tag{13}$$

式(13)中，$d_{ij}\in D_i$，$s_{ij}\in S_i$。

当公式(13)结果小于Threshold时，则表示当前两幅不同桥梁倾斜图像内的桥梁在地震作用下的位移响应未发生变化[14]，反之则发生变化。由此可得到在地震作用下，桥梁的亚像素级位移跟踪结果，具体的计算公式如下：

$$Z=L\left(\frac{m(x,y)e(x,y)-I(x,y)}{\theta(x,y)}\right),\quad d(D_i,S_i)>\text{Threshold} \tag{14}$$

式(14)中，L表示亚像素模版匹配函数。

1.3　基于地震波加速度的桥梁位移响应数值计算方法

通过1.2小节得到的桥梁亚像素级位移跟踪结果后，对所有的亚像素级桥梁位移响应数值进行融合处理。在地震作用下，地震波呈现加速度状态[15]，依据地震波的加速度，可计算到当前桥梁倾斜摄影监控下的位移，其表达公式可转换成以下优化问题：

$$\min_{u_a}\prod\nolimits_E(u_a)=\frac{Z\left\|Qu_a-(\Delta t)^2Q_a a\right\|_2^2+\mu^2\left\|u_a\right\|_2^2}{2} \tag{15}$$

式(15)中，u_a表示地震作用下桥梁加速度情况下的位移向量；a表示地震波加速度向量；Q_a表示地震波加速度向量的对角矩阵；$Q=Q_aQ_c$，其中Q_c表示线性算子；μ表示正则化系数。

求解公式(14)，设$B(\Delta t)$表示时间系数矩阵，则有：

$$u_a=(Q^TQ+\mu^2I)-Q^TQ_aB(\Delta t)^2 \tag{16}$$

式(16)中，T表示正态分布；I表示阶数为$(2k+3)$的单位矩阵。

为获得更加准确的地震作用下桥梁位移响应倾斜摄影监测结果，引入比例因子对桥梁位移响应亚像素级位移数值进行转换，即可得到准确的地震作用下桥梁位移响应数值，其表达公式如下：

$$U(t)=\text{SF}(t)\cdot u_a \tag{17}$$

式(17)中，SF(t)表示像素转换比例因子。

利用公式(17)得到准确的地震作用下桥梁位移响应数值后，对所有桥梁位移响应数值进行融合处理，得到最终地震作用下桥梁位移响应数值，其表达公式如下：

$$U'(t)=U(t)\cdot u_a \tag{18}$$

经过公式(18)，实现地震作用下桥梁位移响应倾斜摄影监测结果。这有助于及时发现桥梁结构潜在的安全隐患，并能在桥梁出现早期预警信号时迅速作出响应。通过对桥梁损坏、裂缝等问题的提前发现与修复，能够有效避免潜在的安全风险。

2　实验分析

以某双塔斜拉桥作为实验对象，其全长为929 m，其中主体桥段长达760 m。该桥地理位置位于地震多发区域，在地震作用下，该桥梁出现不同程度位移响应，运用本文方法在该桥梁区域发生地震后，对该桥梁的位移响应倾斜展开监测，其中无人机为六旋翼无人机，搭载的摄像机型号为Zenmuse X7，该型号摄像机采用Super 35尺寸的传感器，拥有2400万像素。它能够拍摄最高6K fps30、3.9K 59.94fps CinemaDNG无损视频图像。为了获得桥梁的全方位视图，采用五个不同的倾斜角进行拍摄，包括垂直向下的一个视角(0°)和四个倾斜视角(例如：±45°和±60°)，拍摄距离设置为100 m，在该距离下GSD值为5cm/pixel，比例因子为1。为了消除相机畸变的影响，在拍摄前对相机进行了畸变校正，以确保图像的准确性。此外，该无人机还配备了机械稳定器，在风力较小、气流稳定的时段进行拍摄，以最大程度减少无人机自身抖动对图像质量的影响。摄像机拍摄图像的时间间隔为2 s。

获取到桥梁倾斜摄影图像后，对其进行角点检测是获取地震作用下亚像素级位移的基础，以该桥梁底部边缘以及与其连接的桥墩区域作为实验对象，使用本文方法检测该实验目标区域角点，检测结果如图1所示。

分析图1，可以清晰地看到本文方法所检测的桥梁倾斜摄影图像角点与实际角点位置曲线完全吻合。这一结果充分证明了本文方法在检测桥梁倾斜摄影图像角点方面具有极高的精度。这种高精度检测为后续计算地震作用下桥梁的亚像素级位移响应提供了坚实的角点基础。同时，这一结果也从侧面反映出本文方法在监测地震作用下桥

梁位移响应方面的卓越效果。综上所述，本文方法不仅提高了桥梁倾斜摄影图像角点检测的准确性，也为地震作用下桥梁位移响应的监测提供了有效手段。

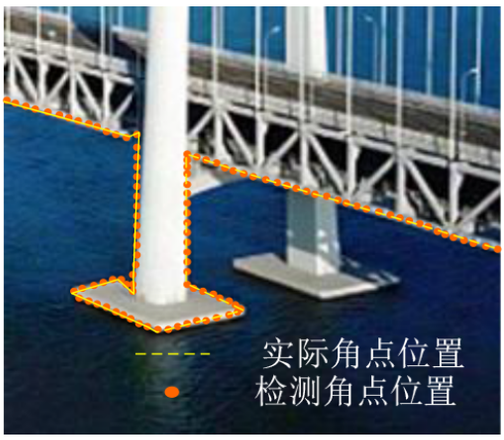

图1 桥梁倾斜摄影图像角点检测结果

Fig.1 Corner detection results of bridge oblique photography images

以该桥梁在地震作用下的位移响应作为研究对象，观察桥墩柱亚像素级位移响应数值的变化情况，在实验过程中添加位移传感器采集地震作用下该桥梁的位移情况，位移传感器的位置为图1中对应角点的位置。将本文监测结果与与位移传感器获取值进行对比分析。测试结果如图2所示。

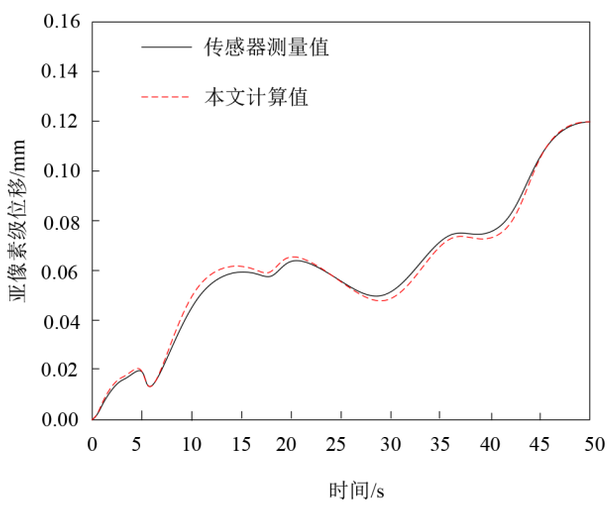

图2 亚像素级位计算测试结果

Fig.2 Sub-pixel level calculation test results

分析图2，可以观察到随着地震时间的推移，该桥梁桥墩在地震作用下的亚像素级位移呈现出波动上升趋势。这种波动是由于地震波自身的起伏特性所导致的，桥墩随着地震波的传播而上下或水平方向移动。随着地震波持续时间的增加，桥墩的位移也呈现出增加的趋势。值得注意的是，本文所计算得出的位移数据与位移传感器实际采集的数值相接近，这进一步印证了本文方法在计算地震作用下桥梁桥墩亚像素级位移方面的有效性。综上所述，本文方法在计算地震作用下桥梁桥墩的亚像素级位移方面具有较高的准确性和可靠性，能够为桥梁结构安全监测提供有力支持。

测试在地震波加速度不同情况下，该桥梁桥墩的水平方向位移和垂直方向位移。地震波加速度如图3所示。不同方向位移如图4所示。

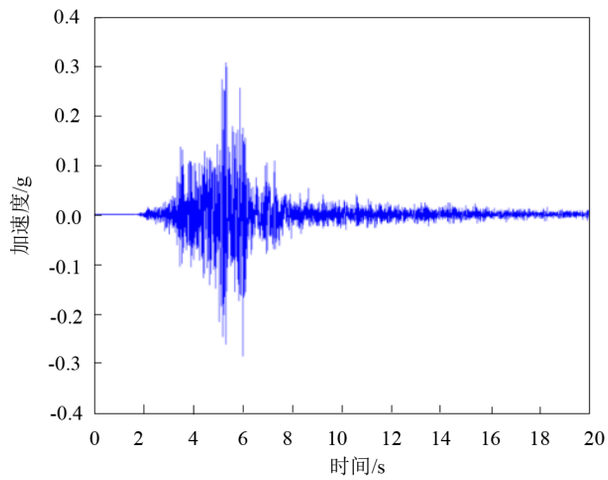

图3 地震波加速度

Fig.3 Seismic wave acceleration

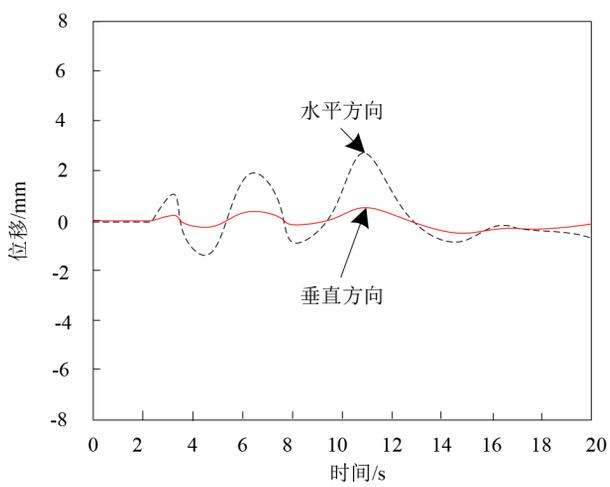

图4 不同方向桥梁倾斜摄影监测结果

Fig.4 Monitoring results of bridge oblique photography in different directions

分析图4可知，地震波加速度在时间超过4 s之后开始呈现大幅度波动趋势，说明此时作用到桥梁上的地震波可以使桥梁发生不同程度位移。在该地震波作用下，垂直方向位移较小，这是因为地震波包括纵波和横波，纵波导致地面上下振

动但破坏力弱，而横波引发地面前后左右晃动且破坏力强。由于横波主要沿水平方向传播并导致建筑物受损，桥梁在水平方向的位移更显著，因此桥梁在水平方向的位移会更大。其次，桥梁作为一种大型建筑结构，其水平刚度通常低于垂直刚度。这意味着在地震作用下，桥梁更容易在水平方向发生变形和位移。综上所述：利用本文方法可有效在地震发生时，对桥梁不同方向上的位移响应进行监测，本文方法具备较为显著的应用效果。

3　结论

在地震作用下的桥梁位移响应监测中，倾斜摄影技术以其高效、精准的特点，为桥梁安全评估提供了新的视角和方法。通过对桥梁的实时监测和精确分析，能够及时了解桥梁在地震作用下的位移响应情况，为后续的灾害预警和应对措施提供关键数据支持。通过本文的研究，深入探讨了倾斜摄影监测方法在地震作用下桥梁位移响应监测中的应用原理、方法流程以及实际效果评估。实践证明，倾斜摄影技术能够准确捕捉桥梁的位移变化，为桥梁的安全监测和灾害应对提供了有力保障。

参考文献

[1] 罗利,罗子圣. 结构健康监测系统在地震作用下大跨度桥梁动力响应分析的应用[J]. 建筑结构,2023,53(S1):2122-2126.

[2] 邓海容,姚凯,徐略勤,等. 斜交连续梁桥地震位移响应及典型参数规律研究[J]. 工程抗震与加固改造,2022,44(01):65-73+64.

[3] 周云,刘鹏,郝官旺,等. 基于无人机倾斜摄影技术的桥梁有限元逆向建模方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2023,50(09):13-23.

[4] 高江华,韩春华,郭健,等. 基于最小二乘积求解的高速公路桥梁形变监测[J]. 计算机仿真,2022,39(12):169-172+234.

[5] Rishikesh N, Sriramu D, Surendran R, et al. Bridge monitoring and alert generation system using IoT [J]. International Journal of Electrical Engineering and Technology, 2022, 12(1):17-24.

[6] Buss G, Ludwig G, Beltrao-Mendes R, et al. Installation and monitoring of a canopy bridge connecting Atlantic Forest fragments containing endangered species in Northeastern Brazil[J].Folia Primatologica,2022,93(12):1-13.

[7] 张昊宇,黄勇,汪云龙,等. 基于倾斜摄影的野马滩大桥震害位移评价[J]. 地震工程与工程振动,2022,42(02):89-103.

[8] 杜文康,雷冬,杭宗庆,等. 基于SURF-PROSAC法的高铁桥梁位移测量技术研究[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(09):3579-3591.

[9] 陈令坤,徐祥,蒋丽忠,等. 基于加速度传感器的检定轻墩铁路桥梁横向位移新方法及振动台试验验证[J]. 工程力学,2022,39(04):76-85.

[10] 雷冬,杜文康,朱国靖,等. 基于机器视觉方法的高铁桥梁监测技术研究[J].铁道工程学报,2023,40(03):45-49.

[11] 黄国平,胡建华,崔剑峰,等. 基于监测数据的钢桁悬索桥梁端位移特性研究[J]. 公路交通科技,2022,39(05):65-73.

[12] 高梓航,王伟华,王铁霖. 基于图像识别的大跨度铁路桥梁钢轨伸缩调节器监测系统与方法研究[J].铁道建筑,2023,63(08):93-97.

[13] 王雨权,管仲国,霍学晋,等. 基于联动迭代及Heaviside函数的铁路桥墩刚度和位移计算方法[J]. 铁道学报,2023,45(03):88-96.

[14] 晏班夫,欧阳康,梁才. 桥梁工程中非接触位移测量技术研究综述[J]. 交通运输工程学报,2024,24(01):43-67.

[15] 高超,王刘祺,倪彤元,等. 基于监控影像的结构位移跟踪监测研究[J]. 计量学报,2023,44(04):514-520.