



引文格式:李清泉,陈睿哲,涂伟,等.基于惯性相机的大跨度桥梁线形形变实时测量方法[J].武汉大学学报(信息科学版), 2023,48(11):1834-1843.DOI:10.13203/j.whugis20230006

Citation:LI Qingquan, CHEN Ruizhe, TU Wei, et al.Real-Time Vision-Based Deformation Measurement of Long-Span Bridge with Inertial Sensors[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(11):1834-1843.DOI:10.13203/j.whugis20230006

# 基于惯性相机的大跨度桥梁线形形变 实时测量方法

李清泉<sup>1,2,3</sup> 陈睿哲<sup>1,2,3</sup> 涂伟<sup>1,2,3</sup> 陈智鹏<sup>1,2,3</sup> 张博琛<sup>1,2,4</sup>  
严爱国<sup>5</sup> 殷鹏程<sup>5</sup>

1 深圳大学广东省城市空间信息工程重点实验室,广东 深圳,518061

2 深圳大学自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室,广东 深圳,518061

3 深圳大学建筑与城市规划学院,广东 深圳,518061

4 深圳大学土木与交通工程学院,广东 深圳,518061

5 中铁第四勘察设计院集团有限公司,湖北 武汉,430063

**摘要:**大跨度桥梁线形形变测量对桥梁结构健康安全监测与评估具有重要意义。水准测量、连通管等形变测量方法测量频率低、成本高,单相机形变测量方法测量距离越远测量精度越差,难以满足大跨度桥梁线形形变高精度测量需求。提出了一种集成惯性传感器和视觉测量的大跨度桥梁线形形变实时测量方法,使用相机高频拍摄桥梁测量靶标图像,同时利用惯性传感器纠正因相机振动带来的测量误差,通过多惯性相机串联延伸视觉测量的范围,采用联合解算获取大跨度桥梁线形形变,并研制了相应的测量设备,应用于某特大桥梁健康监测系统中。实验结果表明,所提方法的均方根误差为 0.38 mm。在桥梁实验验证中,惯性相机测量大跨度桥梁线形形变与静力水准测量结果高度一致,相关系数均优于 99.90%,相互较差为 4.94 mm。所提方法能高精度实时测量大跨度桥梁线形形变,具有良好的工程价值。

**关键词:**惯性相机;视觉测量;动态精密工程测量;桥梁形变

中图分类号:P258

文献标识码:A

收稿日期:2023-03-26

DOI:10.13203/j.whugis20230006

文章编号:1671-8860(2023)11-1834-10

## Real-Time Vision-Based Deformation Measurement of Long-Span Bridge with Inertial Sensors

LI Qingquan<sup>1,2,3</sup> CHEN Ruizhe<sup>1,2,3</sup> TU Wei<sup>1,2,3</sup> CHEN Zhipeng<sup>1,2,3</sup> ZHANG Bochen<sup>1,2,4</sup>  
YAN Aiguo<sup>5</sup> YIN Pengcheng<sup>5</sup>

1 Guangdong Key Laboratory of Urban Informatics, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China

2 Key Laboratory for Geo-Environmental Monitoring of Great Bay Area, Ministry of Natural Resources, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China

3 School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China

4 College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China

5 China Railway Siyuan Survey and Design Group, Wuhan 430063, China

**Abstract: Objectives:** The deformation measurement of long-span bridge alignment is of great significance to the assessment of bridge health and safety. The traditional deformation measurement methods of long-span bridge alignment, such as sensor and close range vision measurement, have shortcomings such as high measurement cost and limited measurement frequency, which are difficult to meet the requirements of high-precision measurement of deformation of long-span bridge alignment. **Methods:** Combined with dynamic

基金项目:深圳市科技创新委员会技术攻关项目(JSGG20201103093401004)。

第一作者:李清泉,博士,教授,主要从事动态精密工程测量研究。liqq@szu.edu.cn

通讯作者:涂伟,博士,副教授。tuwei@szu.edu.cn

precision engineering measurement and machine vision technology, this paper proposes a method for measuring the deformation of long-span bridge alignment based on inertial cameras. The camera is used to take high-frequency images of bridge measurement targets. At the same time, the inertial sensors are used to correct the measurement errors caused by camera movement. The deformation of long-span bridge alignment is calculated through inertial cameras in series mode, and the corresponding measuring equipment is developed and applied to the health monitoring system of a super large bridge. **Results:** The precision experiment results show that root mean square error of the proposed method is 0.38 mm. In engineering applications, the deformation of bridge alignment trend measured by the inertial camera is highly consistent with the static leveling results. The correlation coefficient is better than 99.90%, and the mutual difference is 4.94 mm. **Conclusions:** The proposed method can measure the linear deformation of large span bridges with high accuracy and real-time, and has good engineering value.

**Key words:** inertial camera; vision measurement; dynamic precise engineering surveying; deformation of bridge alignment

近年来,中国交通基础设施建设进展迅速,已建成多座世界级大跨度公路和铁路桥梁<sup>[1]</sup>。桥梁在自身重力、风、温度和移动荷载等共同作用下会产生形变。受温度和移动荷载等因素影响,桥梁轴线的空间形状即桥梁线形不断发生变化,主要体现在竖直方向的线形形变,称为桥梁线形形变<sup>[2-3]</sup>。在运营过程中,桥梁线形形变直接关系到桥梁的安全运营。若长期发生超限形变则会导致桥梁结构损伤,引起桥梁崩塌等严重的安全事故<sup>[4]</sup>。随着公路、铁路速度标准的提高,为满足平顺性、运行安全和乘客舒适性要求,在桥梁设计规范中逐步增强了对大跨度桥梁线形形变的控制<sup>[5-7]</sup>。因此,对大跨度桥梁线形形变进行实时测量尤为重要,它可以快速评估桥梁健康安全,及时对桥梁结构损伤进行预警,辅助相关部门完成检查和养护<sup>[8-9]</sup>。

桥梁线形的形变测量方法分为人工静态测量、三维激光扫描、地面雷达和视觉测量等<sup>[10-11]</sup>。人工静态测量指人工操作水准仪等测量仪器,对桥梁各测点进行观测,获取大跨度桥梁线形形变。该方法虽然测量精度高,但是效率低下,时间分辨率低,难以满足实时测量需求。三维激光扫描获取海量桥梁点云信息,通过分析点云的特征计算桥梁线形形变<sup>[12-13]</sup>。该方法测量信息丰富,但是扫描周期长、处理点云的方法复杂,难以满足实时测量需求。地面雷达测量利用合成孔径雷达,测量由桥梁反射的微波信号的相位差,从而计算桥梁线形形变<sup>[14-15]</sup>。该方法测量精度高,但设备昂贵,测量距离有限,远距离测量需配备角反射器。

随着图像传感器的不断发展,基于视觉的形变测量方法不断涌现,具有易安装、成本低等特

点,广泛应用于桥梁、隧道、管道等多类工程中<sup>[16-18]</sup>,如管道检测胶囊机器人<sup>[19-20]</sup>、无人机识别桥梁裂缝等<sup>[21-22]</sup>。针对大跨度桥梁,视觉测量方法利用相机拍摄,获取图像数据,进行特征点提取和匹配,利用时间基线视差法计算特征点的像素位移,并将像素位移转换为物理位移,解算特征点形变值<sup>[23-24]</sup>,包括远距离视觉测量、无人机视觉测量和近景摄影测量等。

远距离视觉测量是指在离桥梁较远的稳定区域安装相机远程拍摄桥梁,利用插值亚像素等算法提升图像分辨率,随后通过掩模、特征点检测、匹配等算法,完成对桥梁结构多个测点位置信息的识别,计算图像坐标系下的形变量,最后根据转换系数解算出物理坐标系下的多个测点形变量,从而得到桥梁的线形形变<sup>[25-26]</sup>。该方法可实现在远距离外对大跨度桥梁线形形变的高精度实时测量,但基准目标选取位置处于测点附近,对桥梁现场环境要求严苛,在大跨度桥梁中难以选择合适的基准目标。

无人机视觉测量方法是采用无人机搭载视觉传感器,拍摄桥梁测点上的标志物以及远处投影的静止激光光斑,利用自适应感兴趣区域等算法完成标志物和光斑的近似定位,然后使用自适应二值化等算法进行图像分割,通过拟合椭圆精准识别标志物和光斑的几何中心位置,最后由标志物相对于光斑的位移经过缩放因子换算可得到测点的物理位移。通过使用多架无人机进行协同测量,实现对大跨度桥梁线形形变的高精度测量<sup>[27-28]</sup>。该方法测量精度高,但是光斑和标志物位置识别的算法性能无法满足实时测量的要求。

近景摄影测量将相机布设于桥墩等稳定结

构处,通过拟合椭圆等算法进行多测点识别处理,从而得到多个测点在像片中的形变,再根据像片与现实世界的几何关系解算出桥梁线形形变。其中,准确识别测点是测量精度的关键,因此近景摄影测量会通过桥梁布设高识别度的标志物来完成测点的追踪,如布设主动光源等<sup>[29-30]</sup>。该方法具有实时测量、精度高等优点,但是为确保测量精度,测量距离一般不超过200 m。由于大跨度桥梁跨径大,多数相机将置于桥梁主梁处,当移动荷载作用于桥梁时,极易引起相机振动,从而带来测量误差,故传统的近景摄影测量无法适用于大跨度桥梁线形形变测量。

动态精密工程测量指的是测量平台或测量对象处于运动状态下的精密工程测量。近年来,动态精密工程测量凭借自动化、动态化、智能化等优点被广泛应用于各类工程测量中,为大跨度桥梁线形形变测量提供了一种新思路<sup>[31-32]</sup>。相机布设位置不再局限于稳定结构处,同时无需借助基准目标,利用惯性传感器即可纠正相机振动带来的测量误差<sup>[33-34]</sup>。本文提出了一种集成惯性传感器和视觉测量的大跨度桥梁线形形变实时测量方法,使用相机高频拍摄桥梁测量靶标图像,同时利用惯性传感器纠正因相机振动带来的测量误差,通过多惯性相机串联延伸视觉测量的距离,联合解算获取大跨度桥梁线形形变。本文研制了相应的惯性相机测量设备,并在某特大铁路桥进行了实验验证。实验结果表明,该方法能够实现大跨度桥梁线形形变的高精度、实时测量,不仅确保测量精度和静力水准仪高度一致,而且显著提高了测量效率。

## 1 大跨度桥梁线形形变测量方法

### 1.1 基于惯性相机的桥梁线形形变测量原理

基于惯性相机的桥梁线形形变实时测量方法原理如图1所示。惯性相机采用多相机串联模式布设将多个惯性相机沿桥梁轴线安装,在相邻两个惯性相机间布设多个测量靶标,通过相机镜头采集靶标图像,惯性传感器采集相机俯仰角等惯性数据;识别靶标图像信息,提取靶标像素坐标;根据相机惯性数据和靶标像素坐标,通过形变模型计算出各测点形变,进而得到大跨度桥梁线形形变。

### 1.2 惯性相机

惯性相机集成惯性传感器和相机,利用惯性传感器获取相机平台的位姿信息,相机捕捉测量

靶标图像。本文采用的惯性相机结构如图2所示,包括相机、惯性传感器和数据处理单元等。惯性相机整体呈矩形,两端搭载的高频红外相机负责采集靶标图像,采用刚体连接,同时矩体内部搭载的高精度三轴陀螺仪惯性传感器,负责监测记录相机位姿变化。惯性相机采样频率设置为10 Hz,多台惯性相机测量同步误差为20 ms,惯性传感器与相机拍摄同步误差为10 ms,满足实时测量需求。

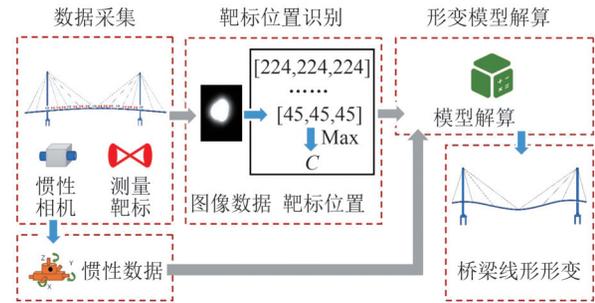


图1 基于惯性相机的大跨度桥梁线形形变实时测量原理图

Fig. 1 Schematic of Real-Time Vision-Based Deformation Measurement of Long-Span Bridge with Inertial Sensors

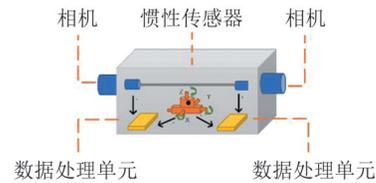


图2 惯性相机

Fig. 2 Inertial Camera

数据处理单元采用嵌入式系统,通过对原始图像处理,识别靶标位置。靶标识别是惯性相机形变测量的基础,惯性相机获取靶标图像后,需要对原始图像数据进行处理,识别靶标位置。首先进行靶标区域识别,通过提前标定靶标图像区域范围,绘制感兴趣区;然后利用中值滤波对区域内的图像进行降噪,将某一像素一定邻域范围内的像素依据灰度级排列,以中间值作为输出对象,从而消除异常像素值<sup>[35]</sup>;最后利用加权像素值最大点位置作为测量靶标位置进行识别。加权像素值最大表示该位置为最亮区域,计算式为:

$$C = \text{Max} \left[ \sum_{u=1}^s \frac{h_v^u}{255} \cdot h_v \right] \quad (1)$$

式中,Max[]为取最大值函数;C为加权像素值最大点的竖直方向像素坐标;v为像素点,v=1,2,...,z;z为区域内像素点数目;h<sub>v</sub>为v点的像素值;h<sub>v</sub><sup>u</sup>为以v点为中心3×3正方形区域内的各

点像素值; $u$ 为像素序号。

### 1.3 形变模型解算

形变模型解算融合惯性测量数据和相机形变测量数据,建立桥梁线形形变模型,获得高精度的桥梁线形形变值。受桥梁形变的影响,相机的姿态不断变化,其俯仰角的变化对桥梁线形形变测量误差影响最大,但惯性传感器轴系与相机像空间轴系未必平行,因此提前通过标定得到相机姿态变化与惯性传感器采集数据的转换关系,形变测量中以此修正惯性数据,记作 $\alpha$ ,输入至形变模型中。首先,将多个惯性相机观测的 $C$ 与 $\alpha$ 按照时间排序、同步并串联,输出初始数据 $R_t \in \{C_{Ait}, \alpha_{At}, C_{Bit}, \alpha_{Bt}, \dots, C_{Hit}, \alpha_{Ht}, \dots\}$ ,其中 $C_{Ait}$ 代表 $t$ 时刻 $A$ 相机观测 $i$ 号测量靶标垂直方向的像素坐标; $\alpha_{At}$ 代表 $t$ 时刻 $A$ 相机的俯仰角;然后选取桥梁稳定时段内 $R_t$ 的平均值作为基准值 $R_0$ ;最后计算 $R_t$ 相对基准的变化量 $\Delta R_t$ ,代入观测方程,求解靶标位置形变量,从而得出相较于稳定时段的大跨度桥梁线形形变。

大跨度桥梁线形的实时形变主要受温度、移动荷载等因素影响,其中温度等自然环境引起的大跨度桥梁线形形变属于持续形变,而移动荷载引起的是瞬时形变。当温度等自然环境因素相对稳定时(如凌晨时段),短时间内引起的大跨度桥梁线形形变可以忽略不计,故选取一天中自然环境稳定、无移动荷载时段内的初始数据 $R_t$ ,计算得到基准数据 $R_0 \in \{\bar{C}_{Ait}, \bar{\alpha}_{At}, \bar{C}_{Bit}, \bar{\alpha}_{Bt}, \dots, \bar{C}_{Hit}, \bar{\alpha}_{Ht}, \dots\}$ ,其中 $\bar{C}_{Ait}$ 代表稳定时段内 $C_{Ait}$ 的均值; $\bar{\alpha}_{At}$ 代表稳定时段内 $\alpha_{At}$ 的均值。 $R_0$ 计算式为:

$$R_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_t^j \quad (2)$$

式中, $n$ 代表稳定时段内的数据量; $R_t^j$ 代表稳定时段内某一时刻的初始数据。计算得到相对稳定时段的变化量 $\Delta R_t \in \{\Delta C_{Ait}, \Delta \alpha_{At}, \Delta C_{Bit}, \Delta \alpha_{Bt}, \dots, \Delta C_{Hit}, \Delta \alpha_{Ht}, \dots\}$ ,其中 $\Delta C_{Ait}$ 代表 $C_{Ait}$ 相较于 $\bar{C}_{Ait}$ 的变化量; $\Delta \alpha_{At}$ 代表 $\alpha_{At}$ 相较于 $\bar{\alpha}_{At}$ 的变化量。则有:

$$\Delta R_t = R_t - R_0 \quad (3)$$

图 3 为小孔成像原理,由图 3 可知,靶标像点、光心、靶标三点共线,其物像关系式为:

$$\frac{y}{\Delta C \cdot d} = \frac{L}{f} \quad (4)$$

式中, $y$ 为物理形变量; $\Delta C$ 为像素形变量; $L$ 为相机与靶标的水平距离; $f$ 为相机焦距; $d$ 为像元大小。

式(4)成立条件为相机始终保持静止,相机和靶标变化如图 4 所示,其中 1、2 代表稳定时段

的靶标;1'、2'代表形变后的靶标; $B$ 、 $B'$ 分别代表稳定时段和位姿发生变化的惯性相机。由图 4 可知,当桥梁线形发生形变时,由于相机安装位置也在桥梁,该形变会传递至相机,从而导致相机位姿发生变化引起测量误差,因此,需要构建方程将误差纠正。

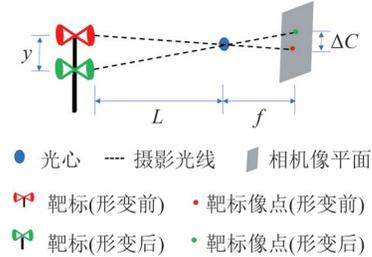


图 3 小孔成像原理

Fig. 3 Principle of Pin-hole Imaging

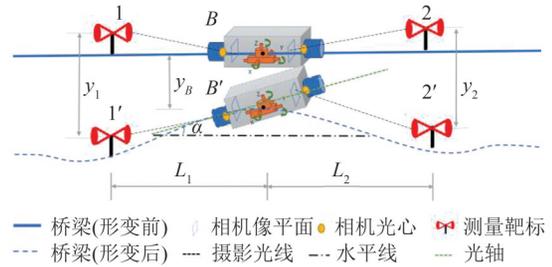


图 4 相机和靶标变化

Fig. 4 Change of Camera and Targets

首先,相机位姿变化包括竖直方向位移和俯仰角变化,基于几何关系的原理,相机位移引起的靶标像素变化 $\Delta C_0$ 可由相向运动关系进行剔除,计算式为:

$$\Delta C_0 \cdot k = y_1 - y_B \quad (5)$$

式中, $y_1$ 、 $y_B$ 分别代表 1 号测量靶标和 B 相机的物理形变量; $k$ 为像素距离转为物理距离的缩放因子。

此时由于相机俯仰角变化导致像平面发生旋转,应将位移量分解到旋转后的像平面竖直方向上,记作 $\Delta C_d$ 、 $\Delta \alpha_B$ 为 B 相机俯仰角变化,由几何关系可得:

$$\Delta C_d \cdot k = (y_1 - y_B) \cdot \cos(\Delta \alpha_B) \quad (6)$$

其次,相机俯仰角引起的靶标像素位移变化 $\Delta C_a$ 可由几何关系原理进行纠正,如图 5 所示。当相机俯仰角发生变化时,静止的测量靶标在图像平面中也会出现位移,由图 5 可得该变化与相机俯仰角变化呈非线性关系,计算式为:

$$\Delta C_a \cdot k = L \cdot \sin(\Delta \alpha_B) \quad (7)$$

综上,可得到在 $t$ 时刻单个惯性相机观测单个测量靶标的观测方程:

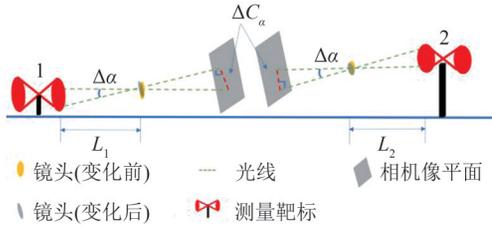


图5 相机俯仰角变化误差

Fig. 5 Camera Pitch Angle Change Error

$$\Delta C_t \cdot k = (y_m - y_N) \cos(\Delta \alpha_t) \pm L \sin(\Delta \alpha_t) \quad (8)$$

式中,  $\Delta C_t$  为  $t$  时刻靶标在像平面中竖直方向的像素位移量;  $\Delta \alpha_t$  为  $t$  时刻相机俯仰角变化;  $\Delta C_t$ 、 $\Delta \alpha_t$  由式(3)可得;  $k$ 、 $L$  由标定得出;  $m$  为靶标序号;  $N$  为惯性相机序号; 物理形变量  $y$  为待求解值。

式(8)为单个惯性相机的观测方程, 将多个惯性相机观测方程联立, 即可构建测量误差方程。多惯性相机观测图如图6所示。



图6 多惯性相机观测图

Fig. 6 Multi-Inertial Camera Observation Map

图6中共有  $N$  个惯性相机, 每个惯性相机左右两侧各观测3个靶标, 其观测方程为:

$$\begin{cases} \Delta C_{A1t} k_{A1} = (y_1 - y_A) \cos(\Delta \alpha_{A1t}) - L_{A1} \sin(\Delta \alpha_{A1t}) \\ \Delta C_{A2t} k_{A2} = (y_2 - y_A) \cos(\Delta \alpha_{A2t}) - L_{A2} \sin(\Delta \alpha_{A2t}) \\ \Delta C_{A3t} k_{A3} = (y_3 - y_A) \cos(\Delta \alpha_{A3t}) - L_{A3} \sin(\Delta \alpha_{A3t}) \\ \Delta C_{A4t} k_{A4} = (y_4 - y_A) \cos(\Delta \alpha_{A4t}) + L_{A4} \sin(\Delta \alpha_{A4t}) \\ \Delta C_{A5t} k_{A5} = (y_5 - y_A) \cos(\Delta \alpha_{A5t}) + L_{A5} \sin(\Delta \alpha_{A5t}) \\ \Delta C_{A6t} k_{A6} = (y_6 - y_A) \cos(\Delta \alpha_{A6t}) + L_{A6} \sin(\Delta \alpha_{A6t}) \\ \Delta C_{B4t} k_{B4} = (y_4 - y_B) \cos(\Delta \alpha_{B4t}) - L_{B4} \sin(\Delta \alpha_{B4t}) \\ \Delta C_{B5t} k_{B5} = (y_5 - y_B) \cos(\Delta \alpha_{B5t}) - L_{B5} \sin(\Delta \alpha_{B5t}) \\ \Delta C_{B6t} k_{B6} = (y_6 - y_B) \cos(\Delta \alpha_{B6t}) - L_{B6} \sin(\Delta \alpha_{B6t}) \\ \Delta C_{B7t} k_{B7} = (y_7 - y_B) \cos(\Delta \alpha_{B7t}) + L_{B7} \sin(\Delta \alpha_{B7t}) \\ \Delta C_{B8t} k_{B8} = (y_8 - y_B) \cos(\Delta \alpha_{B8t}) + L_{B8} \sin(\Delta \alpha_{B8t}) \\ \Delta C_{B9t} k_{B9} = (y_9 - y_B) \cos(\Delta \alpha_{B9t}) + L_{B9} \sin(\Delta \alpha_{B9t}) \\ \vdots \\ \Delta C_{N(m-2)t} k_{N(m-2)} = (y_{(m-2)} - y_N) \cos(\Delta \alpha_{Nt}) + \\ \quad L_{N(m-2)} \sin(\Delta \alpha_{Nt}) \\ \Delta C_{N(m-1)t} k_{N(m-1)} = (y_{(m-1)} - y_N) \cos(\Delta \alpha_{Nt}) + \\ \quad L_{N(m-1)} \sin(\Delta \alpha_{Nt}) \\ \Delta C_{Nmt} k_{Nm} = (y_m - y_N) \cos(\Delta \alpha_{Nt}) + L_{Nm} \sin(\Delta \alpha_{Nt}) \end{cases} \quad (9)$$

式中, 下标  $A$ 、 $B$ 、 $N$  为惯性相机序号, 数字及  $m$  为测量靶标序号。假设有  $N$  个惯性相机且  $N > 1$ , 每个惯性相机左右两侧各观测  $M$  个测量靶标, 共计  $M \times (N + 1)$  个靶标, 联立可得  $2N \times M$  个方程, 共有  $2N + M \times (N + 1)$  个未知数, 当  $M \geq \frac{2N}{N-1}$  时, 方程个数大于等于未知数, 方程可解。

方程可通过构建目标函数利用最小二乘法求解, 其中使用相机识别靶标位置时, 识别精度与测量距离成负相关关系, 在构建目标函数时采用测量距离定权, 计算式为:

$$\begin{cases} F(N, m) = (y_m - y_N) \cos(\Delta \alpha_{Nt}) \pm \\ \quad L_{Nm} \sin(\Delta \alpha_{Nt}) - \Delta C_{Nmt} \cdot k_{Nm} \\ \delta = \frac{1}{q} \sum_{p=1}^q \frac{\bar{L}_N}{L_{Nm}} F_p(N, m)^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\delta$  为目标函数;  $q$  为观测方程个数;  $p$  为观测方程序号;  $\bar{L}_N$  为  $N$  相机观测最远靶标的距离。

综上, 将多惯性相机观测方程联立即可解算出的惯性相机和测量靶标相较于稳定时段的形变量  $y_A, y_1, \dots, y_m$ , 作为桥梁各点的线形形变, 通过拟合获得整体的桥梁线形形变。即可得出在某一时刻大跨度桥梁整体线形相较于稳定时段的变化情况, 从而实现大跨度桥梁线形形变高精度、实时测量。

## 2 大跨度桥梁线形形变测量实验与分析

在室外场地和某特大桥上, 使用前述大跨度桥梁线形形变测量方法开展实验验证, 以验证本文方法的精度及有效性。

### 2.1 精度验证

精度验证实验中模拟桥梁形变测量现场测点的分布, 等比例还原惯性相机和测量靶标的布设位置, 以验证方法精度。模拟实验布设如图7所示, 实验场地全长 112 m, 等间距 7 m 布设测量仪器, 共计 5 个惯性相机, 12 个测量靶标。其中, 部分测量靶标选用可调节的活动测量靶标, 通过调节带刻度的升降台, 控制靶标位置。实验中多次调节靶标下降, 并由实验人员使用重物敲击仪器装置平台, 达到振动相机和靶标的效果, 通过多名人员协同振动从而模拟移动荷载过桥时的场景。

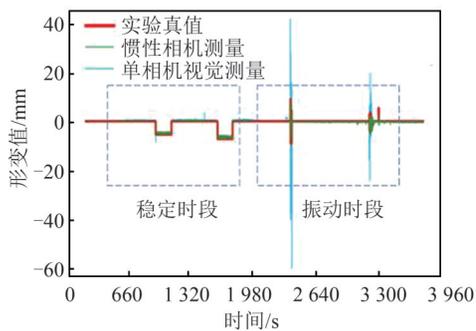
按上述方法进行惯性相机形变测量和单机视觉测量, 依据实验环境分为稳定和振动两个

时段,通过活动测量靶标刻度获得稳定时段的靶标变化真值,激光位移传感器测量振动时段的靶标变化真值,单相机视觉测量直接测量靶标相对位移,3个活动测量靶标的时序测量结果和真值如图8所示。

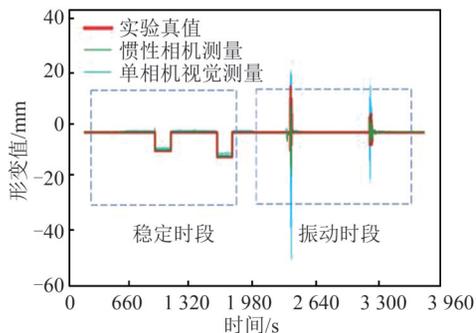


图7 模拟实验布置图

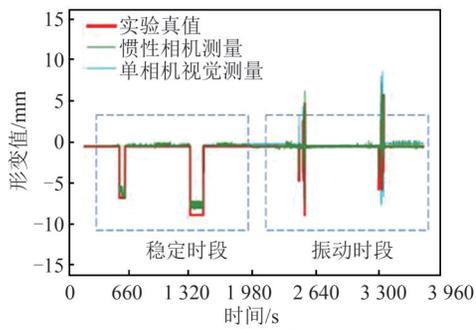
Fig. 7 Layout of Simulation Experiment



(a) 4号靶标



(b) 7号靶标



(c) 8号靶标

图8 惯性相机和单相机视觉测量结果

Fig. 8 Results of Inertial Camera and Traditional Visual Measurement

从图8中可以看出,在稳定时段,惯性相机和单相机视觉测量结果和真值具有较好的一致性。但是当相机振动时,单相机视觉测量结果与真值差异较大,惯性相机测量方法更贴近真值。对上

述模拟大跨度桥梁线形形变测量的实验结果进行统计分析,将惯性相机测量、单相机视觉测量的结果与真值进行比较,计算相关系数和均方根误差(root mean square error, RMSE),实验结果见表1。

表1 模拟实验统计信息

Tab. 1 Simulation Experiment Statistical Information

实验环境	测量靶标	相关系数/%		RMSE/mm	
		惯性相机测量	单相机视觉测量	惯性相机测量	单相机视觉测量
稳定时段	4	99.65	99.80	0.38	0.42
	7	99.44	98.96	0.38	0.61
	8	99.65	99.58	0.25	0.59
振动时段	4	74.52	48.17	0.37	0.62
	7	83.31	55.22	0.38	2.34
	8	76.32	43.74	0.40	3.58

由表1可以看出,在稳定时段中,两种方法测量的结果一致,与真值的相关系数均优于98.90%,其中惯性相机与单相机视觉的测量结果RMSE均值分别为0.34 mm、0.54 mm,惯性相机精度优于单相机视觉测量。当相机振动时,惯性相机与单相机视觉测量结果差异明显,且惯性相机测量结果显著优于单相机视觉测量。惯性相机测量结果RMSE均值为0.38 mm,较之单相机视觉测量结果2.18 mm,精度提升1.80 mm。这是因为单相机视觉测量未考虑相机振动所带来的误差影响,而惯性相机测量则通过惯性传感器将其误差改正,从而测量精度优于单相机视觉测量。综上,在本文模拟实验中,惯性相机测量精度优于单相机视觉测量,验证了本文方法的精确性。

## 2.2 实验验证

为验证基于惯性相机的大跨度桥梁线形形变测量工程应用效果,在某特大桥展开了实地验证。某特大桥全长1 117.5 m,为混合斜拉双线铁路桥,线间距为4 m。大跨度桥梁线形形变测量主要位于桥梁跨水道部分,惯性相机及测量靶标布置如图9所示,其中A、E相机布置于桥墩处,视为稳定点,不发生相机位移。惯性相机、测量靶标通过钢架焊接于桥梁箱梁中。同时,在桥梁布设静力水准仪,采集频率为1 Hz,用于与本文惯性相机测量的结果进行比较。当火车经过桥梁时,引起位于主梁处的惯性相机振动,图10为某次火车过桥引起C相机的俯仰角变化,最大变化为0.03°。因此,使用形变模型纠正其误差是必要的。

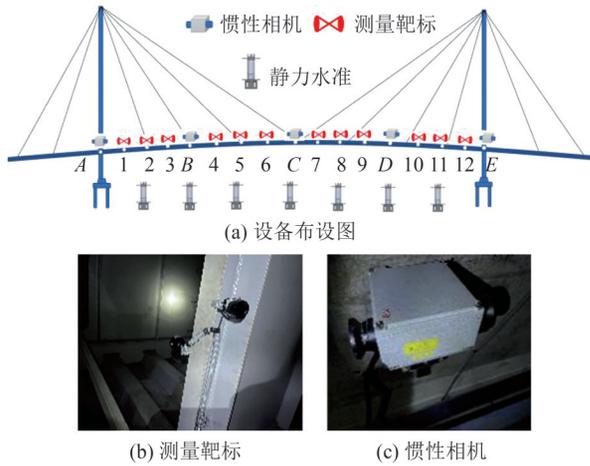


图9 特大桥测量设备布设图

Fig. 9 Layout of Survey Equipments on Super Large Bridge

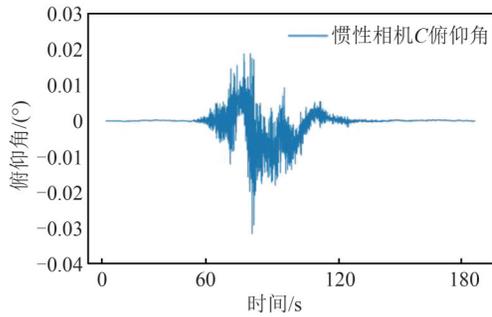


图10 惯性相机俯仰角变化

Fig. 10 Pitch Angle Change of Inertial Camera

因桥梁结构特性,当荷载作用桥梁时,主跨跨中发生的线形变形最大,所以选取桥梁主跨跨中5号、8号测点,以某次火车过桥前后的测量结果作为局部比较,结果如图11所示。由图11可以发现,惯性相机测量和静力水准测量的结果一致。当桥面无火车经过时,两种方法测量的桥梁形变仅出现微小变化。当火车过桥时,桥梁受移动荷载压力发生明显形变,按照火车前进方向,该桥会先上挠后下挠,这是因为火车逐渐接近待测点,由于荷载影响,在火车前方会使桥面向上发生形变,形成局部波峰。当火车通过待测点时,桥面受压引起向下形变,此时该测点达到形变最大值,形成局部波谷。

因静力水准测量结果并非桥梁线形形变真值,故以相互较差 $\epsilon$ 替代RMSE作为二者方法精度比较的指标,计算式为:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{r=1}^T (G_r - S_r)^2} \quad (11)$$

式中, $G$ 代表惯性相机测量结果; $S$ 代表静力水准测量结果; $r$ 代表测量序号; $T$ 代表测量总数。

计算桥梁主跨跨中测点的惯性相机和静力

水准测量结果的相关系数和相互较差,结果见表2。由表2可知,对于主跨跨中5号和8号测点,惯性相机测量结果和静力水准测量值之间高度一致,相互较差分别为4.16 mm和3.67 mm。

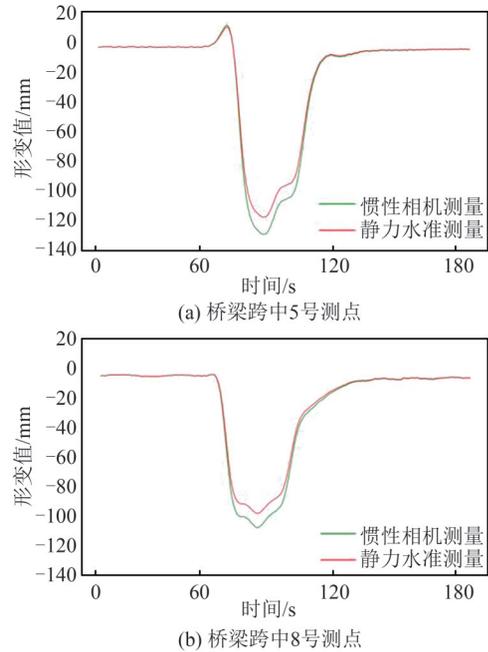


图11 惯性相机和静力水准局部比较结果图

Fig. 11 Local Comparison Results of Inertial Camera and Static Leveling

表2 惯性相机和静力水准局部比较统计信息

Tab. 2 Local Comparative Statistical Information Between Inertial Camera and Static Leveling

测点	相关系数/%	相互较差/mm
5号	99.99	4.16
8号	99.99	3.67

将惯性相机测量获得的桥梁线形和静力水准线形进行比较。图12为某次火车过桥惯性相机和静力水准测量的整体比较结果图,包括火车过桥3个不同时刻的测量结果。由图12可知,惯性相机测量结果和静力水准测量结果一致,其中二者差异主要体现在大跨度桥梁线形形变过大的测点,这是因为静力水准测量原理是连通管,在测量结果中具有一定的滞后性,而惯性相机采样时间可达毫秒级,所以在具体数值中惯性相机与静力水准测量结果有差异。

将3个瞬间惯性相机测量结果与静力水准监测结果信息进行统计,结果见表3。由表3可知,两种测量结果的相关系数均优于99.90%,相互较差最大为9.46 mm,最小为1.33 mm,平均值为4.94 mm。

综上,从数据趋势上看,惯性相机测量结果

与静力水准整体一致,可以很好反映大跨度桥梁线形形变;从数据精确性上看,惯性相机测量精度要优于单相机视觉测量精度;从数据频率来看,惯性相机测量频率高于静力水准,所以基于惯性相机的大跨度桥梁线形形变方法可以更高效、更精准地测量桥梁形变。

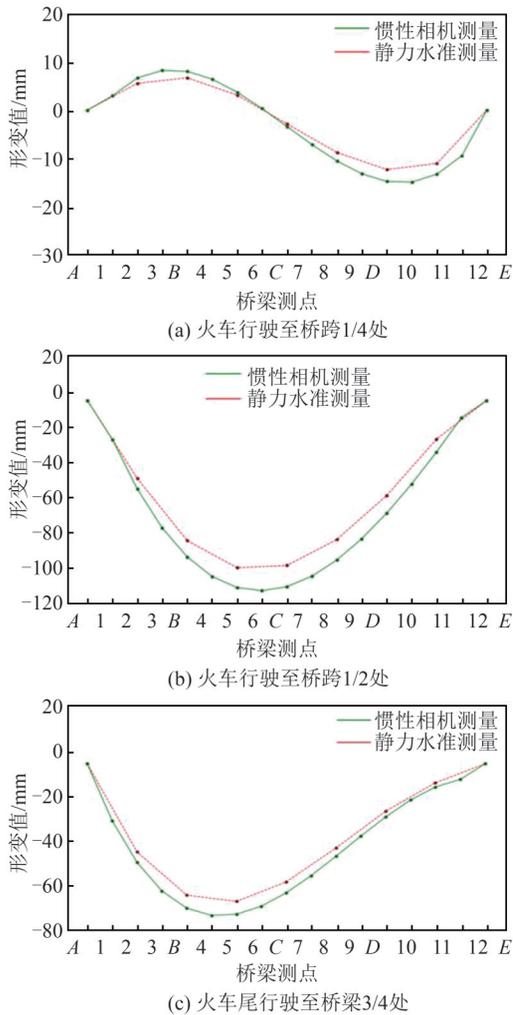


图 12 惯性相机和静力水准整体比较结果

Fig. 12 Overall Comparison Results of Inertial Camera and Static Leveling

表 3 惯性相机和静力水准整体比较统计信息

Tab. 3 Overall Comparative Statistical Information Between Inertial Camera and Static Leveling

时刻	相关系数/%	相互较差/mm
火车行驶至桥跨1/4处	99.99	1.33
火车行驶至桥跨1/2处	99.91	9.46
火车尾行驶至桥梁3/4处	99.98	4.03

### 3 结 语

针对大跨度桥梁,现有的形变测量方法存在成本高、环境受限等不足,因此,本文提出了

一种集成惯性传感器和视觉测量的大跨度桥梁线形形变实时测量方法,使用相机高频拍摄桥梁测量靶标图像,同时利用惯性传感器纠正因相机振动带来的测量误差,通过多惯性相机串联延伸视觉测量的距离,采用联合解算获取大跨度桥梁线形形变。所提方法通过多惯性相机串联进行大跨度桥梁线形形变测量,具有实时测量、高精度等特点,为大跨度桥梁线形形变测量提供了一种新的测量方法。模拟实验结果表明,所提方法与真值相比, RMSE 为 0.38 mm,具有较高的精确性。所提方法在某特大桥成功应用,与传统静力水准相比,大跨度桥梁线形形变测量结果高度一致,相关系数均优于 99.90%,相互较差为 4.94 mm,验证了技术的有效性,具有良好的工程应用价值。

### 参 考 文 献

[1] Zeng Deli. Study on Identification of Load Bearing Capacity of Long Span Bridge[J]. *Bridge Construction*, 2018, 48(5):43-47. (曾德礼. 大跨度桥梁承载能力鉴定研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 43-47.)

[2] Li Jinhua, Zhang Huantao, Chen Shuisheng, et al. Frequency-domain Analysis of Bridge Resonance Based on Moving Load Fourier Spectrum[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(7): 163-170. (李锦华, 张焕涛, 陈水生, 等. 基于移动荷载傅里叶谱的桥梁共振频域分析[J]. 铁道学报, 2022, 44(7):163-170.)

[3] Zhou Y, Xia Y, Fu Y. Analytical Formulas of Beam Deflection Due to Vertical Temperature Difference [J]. *Engineering Structures*, 2021, 240: 112366.

[4] Shi Zhou, Pu Qianhui, Yue Qing. Service Performance Evaluation of High Speed Railway Long Span Bridge Based on Healthy Monitoring[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, 34(1): 67-74. (施洲, 蒲黔辉, 岳青. 基于健康监测的高铁大型桥梁运营性能评定[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(1): 67-74.)

[5] Wei Zhouchun. Analysis on Influence of Long-span High Speed Railway Bridge Deformation on Line Smoothness [J]. *Railway Engineering*, 2022, 62(7): 81-85. (魏周春. 高速铁路大跨度桥梁变形对线路平顺度的影响分析[J]. 铁道建筑, 2022, 62(7): 81-85.)

[6] Chen Kejian, Yang Guojing, Hu Yuzhu. Research on the Creep Control Factors of Railway Long-span Concrete Arch Bridge[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2019, 36(4): 48-53. (陈克坚, 杨国静, 胡玉珠. 铁路大跨度混凝土拱桥徐变变形控

- 制因素研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(4): 48-53.)
- [7] Wang Yingliang, Chen Xingyu, Yang Guojing. Vertical Stiffness Design Method Based on Longitudinal Gradient Control in Service Period for Long-Span Rail-cum-Road Bridge [J]. *Bridge Construction*, 2021, 51(4): 25-30. (王应良, 陈星宇, 杨国静. 基于运营纵坡控制的大跨铁路和公铁合建桥竖向刚度设计方法[J]. 桥梁建设, 2021, 51(4): 25-30.)
- [8] Ni F T, Zhang J, Noori M N. Deep Learning for Data Anomaly Detection and Data Compression of a Long-Span Suspension Bridge[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2020, 35(7): 685-700.
- [9] Chen Ruizhe, Tu Wei, Li Qingquan, et al. The Method of Bridge Deflection Outlier Detection by Fusing Multi-sourced Surveying Data [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(9): 105-110. (陈睿哲, 涂伟, 李清泉, 等. 融合多源测量数据的桥梁挠度异常探测方法[J]. 测绘通报, 2022(9): 105-110.)
- [10] Abu Dabous S, Feroz S. Condition Monitoring of Bridges with Non-contact Testing Technologies[J]. *Automation in Construction*, 2020, 116: 103224.
- [11] Kim M K, Wang Q, Li H. Non-contact Sensing Based Geometric Quality Assessment of Buildings and Civil Structures: A Review[J]. *Automation in Construction*, 2019, 100: 163-179.
- [12] Rashidi M, Mohammadi M, Kivi S S, et al. A Decade of Modern Bridge Monitoring Using Terrestrial Laser Scanning: Review and Future Directions[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(22): 3796.
- [13] Kim D, Kwak Y, Sohn H. Accelerated Cable-stayed Bridge Construction Using Terrestrial Laser Scanning [J]. *Automation in Construction*, 2020, 117: 103269.
- [14] Qin X, Ding X, Liao M, et al. A Bridge-Tailored Multi-temporal DInSAR Approach for Remote Exploration of Deformation Characteristics and Mechanisms of Complexly Structured Bridges[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 156: 27-50.
- [15] Xiong S T, Wang C S, Qin X Q, et al. Time-series Analysis on Persistent Scatter-Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) Derived Displacements of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge (HZMB) from Sentinel-1A Observations [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 546.
- [16] Xu S Y, Wang J, Shou W C, et al. Computer Vision Techniques in Construction: A Critical Review [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021, 28(5): 3383-3397.
- [17] Gong Jianya. Chances and Challenges for Development of Surveying and Remote Sensing in the Age of Artificial Intelligence [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1788-1796. (龚健雅. 人工智能时代测绘遥感技术的发展机遇与挑战[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 1788-1796.)
- [18] Spencer B F, Hoskere V, Narazaki Y. Advances in Computer Vision-based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring[J]. *Engineering*, 2019, 5(2): 199-222.
- [19] Li Qingquan, Zhu Jiasong, Li Hong, et al. Rapid Detection System of Pipeline Based on Floating Capsule Robot[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(10): 126-132. (李清泉, 朱家松, 李虹, 等. 基于漂流式胶囊机器人的管道快速检测系统[J]. 中国给水排水, 2021, 37(10): 126-132.)
- [20] Li Qingquan, Gu Yu, Tu Wei, et al. Collaborative Inspection for the Sewer Pipe Network Using Pipe Capsules[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(8): 1123-1130. (李清泉, 谷宇, 涂伟, 等. 利用管道胶囊进行排水管网协同检测的新方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(8): 1123-1130.)
- [21] Peng X, Zhong X G, Zhao C, et al. A UAV-based Machine Vision Method for Bridge Crack Recognition and Width Quantification Through Hybrid Feature Learning[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 299: 123896.
- [22] Yu Z W, Shen Y G, Shen C K. A Real-time Detection Approach for Bridge Cracks Based on Yolov4-FPM[J]. *Automation in Construction*, 2021, 122: 103514.
- [23] Shao Shuai, Zhou Zhixiang, Deng Guojun, et al. Experiment of Structural Morphology Monitoring for Bridges Based on Non-contact Remote Intelligent Perception Method [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(11): 91-102. (邵帅, 周志祥, 邓国军, 等. 基于非接触远程智能感知的桥梁形态监测试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 91-102.)
- [24] Shajihan S A V, Hoang T, Mechtov K, et al. Wireless Smart Vision System for Synchronized Displacement Monitoring of Railroad Bridges[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2022, 37(9): 1070-1088.
- [25] Pan P, Xing C, Bai J. et al. A Remote Deflection

- Detection Method for Long-Span Bridges Using Adaptive Mask and High-Resolution Camera [J]. *Measurement*, 2022, 201: 111774.
- [26] Luo L X, Feng M Q, Wu Z Y. Robust Vision Sensor for Multi-point Displacement Monitoring of Bridges in the Field [J]. *Engineering Structures*, 2018, 163: 255-266.
- [27] Zhuge S, Xu X P, Zhong L J, et al. Noncontact Deflection Measurement for Bridge Through a Multi-UAVs System [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2022, 37(6): 746-761.
- [28] Han Y T, Wu G, Feng D M. Vision-based Displacement Measurement Using an Unmanned Aerial Vehicle [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2022, 29(10): e3025.
- [29] Tu Wei, Li Qingquan, Gao Wenwu, et al. Monitoring the Dynamic Deflection of Bridges Using Computer Vision [J]. *Journal of Geomatics*, 2020, 45(6): 80-87. (涂伟, 李清泉, 高文武, 等. 基于机器视觉的桥梁挠度实时精密测量方法 [J]. 测绘地理信息, 2020, 45(6): 80-87.)
- [30] Zhu Qiankun, Cui Depeng, Du Yongfeng. Non-contact Identification of Bridge Deflection Based on Network Camera [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(6): 146-155. (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.)
- [31] Li Qingquan, Zhang Dejin, Wang Chisheng, et al. Technology and Applications of Dynamic and Precise Engineering Surveying [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(9): 1147-1158. (李清泉, 张德津, 汪驰升, 等. 动态精密工程测量技术及应用 [J]. 测绘学报, 2021, 50(9): 1147-1158.)
- [32] Li Qingquan, Mao Qingzhou. Progress on Dynamic and Precise Engineering Surveying for Pavement and Track [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1734-1741. (李清泉, 毛庆洲. 道路/轨道动态精密测量进展 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1734-1741.)
- [33] Li Qingquan, Wang Chisheng, Xiong Siting, et al. Generalized Surveying Data Processing: From Geometric Parameters Calculation to Feature Information Extraction [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(11): 1805-1814. (李清泉, 汪驰升, 熊思婷, 等. 从几何计算到特征提取的广义测量数据处理 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(11): 1805-1814.)
- [34] Li Qingquan. *Dynamic Precision Engineering Survey* [M]. Beijing: Science Press, 2021. (李清泉. 动态精密工程测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.)
- [35] Shah A W, Bangash J I, Khan A W, et al. Comparative Analysis of Median Filter and Its Variants for Removal of Impulse Noise from Gray Scale Images [J]. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 2022, 34(3): 505-519.