

基于旋转图像拼接的大跨桥梁施工变形监测技术应用研究

单海涛¹, 张闵书², 杨声¹, 蔡文军¹, 陈晨¹, 赵青¹

(1. 宿迁市公路事业发展中心, 江苏 宿迁 223899; 2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 针对基于图像处理的大跨桥梁施工变形监测中全景拍摄方式的测量难度大、精度低等问题, 提出一种基于旋转图像拼接的桥梁施工变形监测方法。该技术通过旋转拍摄方式获得桥梁的图像, 经过一系列算法处理后拼接成桥梁的等效正视图图像, 并对施工前后的等效正视图图像进行处理, 将图像中测点的位移数据转换为实际变形值, 从而完成桥梁施工阶段的变形监测。将此技术应用在江苏省 268 省道京杭运河大桥主桥施工过程的变形监测, 结果表明, 与水准测量结果相比, 桥梁变形值相对误差在 10% 以内, 满足工程监测要求。

关键词: 桥梁变形; 旋转拍摄; 图像拼接; 位移监测

中图分类号: U446

文献标识码: A

Research on the Application of Deformation Monitoring Technology in Long Span Bridge Construction Based on Rotating Image Mosaic

SHAN Haitao¹, ZHANG Minshu², YANG Sheng¹, CAI Wenjun¹, CHEN Chen¹, ZHAO Qing¹

(1. Suqian Highway Development Center, Suqian 223899, Jiangsu, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: A bridge construction deformation monitoring method based on rotation image stitching is proposed to solve the difficulties and low accuracy of panoramic photography in image processing based deformation monitoring of large-span bridges. This technology obtains the image of the bridge through rotation photography, and after a series of algorithm processing, concatenates it into an equivalent front view image of the bridge. The equivalent front view images before and after construction are processed, the displacement data of the measurement points in the image is converted into actual deformation values, thereby completing deformation monitoring during the bridge construction phase. This technology has been applied to deformation monitoring during the construction process of the main bridge of the Jinghang Canal Bridge on Provincial Highway 268 in Jiangsu Province. The results show that compared with the leveling measurement results, the relative error of the bridge deformation value is within 10%, which meets the requirements of engineering monitoring.

Key words: bridge deformation; rotating shooting; image stitching; displacement monitoring

大跨桥梁在施工阶段过程中, 空间变形控制对施工质量及人员安全至关重要。在施工监控时, 目前常用的变形监控方法包括几何水准测量、三角高程测量等。然而, 这些测量方法需要

在每个主梁节段上预先埋设测量设备, 如水准点、棱镜点等, 导致施工现场操作复杂, 测点设备布置繁琐, 严重拖慢了工程施工进度^[1-3]。

基于计算机视觉和摄影测量原理的摄像测量

收稿日期: 2023-05-31

作者简介: 单海涛, 高级工程师, 本科, 研究方向为公路工程建设管理

基金项目: 国家自然科学基金“基于显示连通贝叶斯网络的桥梁系统可靠性评估与更新”(编号: 51708545); 宿迁市交通运输科技与成果转化项目“大跨桥梁悬臂施工线形智能化监测及预警技术研究”(编号: JSTY [2021] 007 号)

方法在各个领域的应用迅速扩展,这种测量方法效率高、出错率低、实现功能多^[4-9]。利用计算机对相机设备采集的桥梁施工阶段图像进行处理,将图像中测点的位移数据转换为实际变形值,即可完成桥梁施工阶段的变形监测。但要获取桥梁施工阶段的全景图像难度较大,且测量精度不高。因此,本文提出了一种基于旋转拍摄、图像拼接的桥梁变形监测方法,将其应用在江苏省268省道京杭运河大桥主桥施工过程的变形监测,并与水准测量值对比,验证了这种方法在实际施工阶段桥梁变形监测上的可行性。

1 基于旋转图像拼接的位移算法研究

1.1 旋转图像投影变换方法

将图像映射到另一个平面上的方法称为投影变换。投影变换是仿射变换的延伸,其特点是变换后图像的形状能够保持不变。投影变换的校正原理与仿射变换类似,首先建立原图像与校正图像之间的投影变换矩阵,然后计算其投影变换参数,最后将图像映射到指定平面。

对图像进行投影变换操作时,一般以正射图像作为基准图像,以相邻图像重叠区域同名点为约束,将其他旋转图像向基准图像投影变换。旋转图像向基准图像变换的示意图见图1。图中 P_2 为基准图像, P_1 、 P_3 为旋转图像,实线部分为拍摄原始图像,虚线为变换后的旋转图像。

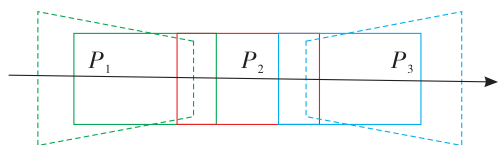


图1 旋转图像投影变换示意图

以基准图像 P_2 所在空间坐标系建立系统坐标系 S_2-xyz , P_1 、 P_3 绕 y 轴向 P_2 投影的旋转角设为 φ_1 、 φ_3 ,以 y 轴为主轴的转角系统 $\varphi-\eta-w$ 中 $\varphi_2=\eta_2=w_2=0$ 。本文拍摄方式为绕 y 轴拍摄以获得横向更大的视场范围,因此旋转图像 P_1 、 P_3 的转角 $\eta_2=w_2=\eta_3=w_3=0$ 。

同名点在基准图像和旋转图像上的位置关系如图2所示^[10]。图2中, S 为摄站位置, P 为实际获取的原始图像, P_0 为原始图像向基准图像投影后的变换图像; a 为原始图像上任意一个测点,坐标 (x, y) ; a_0 为 a 在投影图像上的同名点,坐标 (x_0, y_0) 。根据相机坐标系共线条件方程可

以得到测点 a 在投影变换前后的坐标关系式:

$$\begin{cases} x_0 = -f \frac{a_1 x + a_2 y - a_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \\ y_0 = -f \frac{b_1 x + b_2 y - b_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \end{cases} \quad (1)$$

式中, f 为焦距, a_i 、 b_i 、 c_i ($i=1, 2, 3$)为旋转矩阵中的各参数。对于旋转拍摄,相机焦距在标定完成后就不再变化,故式(1)中 f 为定值。引入旋转图像 P_1 、 P_3 中的旋转角 φ_i 即可得到投影到基准图像的变换关系式:

$$\begin{cases} x_0 = -f \frac{x \cos \varphi + f \sin \varphi}{x \sin \varphi - f \cos \varphi} \\ y_0 = -f \frac{y}{x \sin \varphi - f \cos \varphi} \end{cases} \quad (2)$$

式中, φ 为旋转图像向基准图像的转角。根据式(2)即可将不同旋转角的旋转图像逐一向基准图像投影,消除透视效应的影响。

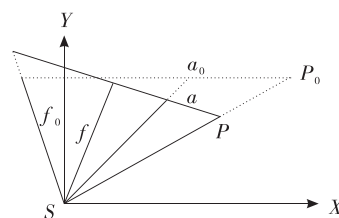


图2 同名点在基准图像和旋转图像上的位置关系

1.2 相对定向

相对定向是遥感技术中常用的处理方法,其主要目的是统一拍摄图像视角,以便形成完整测量图像。相对定向主要包括以下步骤:特征点提取、同名点匹配、改正数计算、校正、拼接等。旋转图像的相对定向理论上应根据拍摄前设定角度进行,但是实际拍摄时相机的转角可能与设定存在微小偏差,且相机的投影中心和旋转轴并不完全重合,这就可能使得图像拼接产生几个像元的误差,超出摄影测量的误差允许范围。因此,旋转图像在投影变化之后还需要进行精确的相对定向,消除相机旋转过程中微小偏差的影响。

将相机在旋转拍摄时其投影中心与旋转轴存在的三个位移偏差量设为 ΔS_x 、 ΔS_y 、 ΔS_z ,主光轴的三个角度偏移量设为 $\Delta \varphi$ 、 $\Delta \omega$ 、 $\Delta \kappa$,这六个参数在每次相机旋转时都会发生变化,因此在图像拼接前需要考虑每幅旋转图像向基准图像的相对定向。为消除该误差的影响,可根据特征匹配时获得的高精度同名点,结合光束平差法获得旋转图像的精确相对方位元素,完成旋转图像向基准图

像的精确相对定向。

1.3 变形计算方法

对于单相机二维测量,拍摄图像在经过相机畸变校正后,即可通过桥梁变形前后的对应特征点计算桥梁的变形变化。主要计算步骤:①根据事先布置的标志点或者视场内已有实际尺寸的参照物计算单像素对应的实际距离;②寻找桥梁变形前后对应特征点并解算其像素坐标,计算纵向坐标差;③还原像素坐标差值在世界坐标系中的实际距离,结合多个测点的实际变形形成桥梁的变形曲线。

2 京杭运河大桥主桥变形监测

2.1 依托工程概况

江苏省268省道京杭运河大桥位于宿迁洋河新区,主桥为 $(97+150+90)$ m变截面连续箱梁。桥宽15.0 m,组成为0.5 m(防撞护栏)+14 m(行车道)+0.5 m(防撞护栏)。箱梁0#块长13 m,主梁施工采用悬臂浇筑,共分为19个悬浇节段,其中1~6#块长度3.0 m,7~11#块长度3.5 m,12~19#块长度4.0 m,合龙段长度2 m。边跨支架现浇段长分别为21.0 m及14.0 m。

2.2 数据采集方案

2.2.1 现场布置

施工阶段桥梁变形监测主要是测量翼缘部分变形值,然而顶板施工时翼缘部分的钢筋裸露在外,边缘不平整、坑洼较多,不便布置测点。结合现场施工情况,在裸露钢筋上绑扎红色反光带作为测点,通过计算反光带上下边缘在图像中的像素位移量得到各测点实际变形值。此外,每节段布置三个标志点作为变形计算参考值,标志点为 $8\text{ cm}\times 8\text{ cm}$ 的矩形阵列,各标志点间实际距离需在图像采集前完成测量。

2.2.2 数据采集

主桥采用悬臂浇筑法施工,数据采集的时间节点为浇筑前后,采集方式为水准测量、旋转拍摄,采集节段为4#块、6#块、14#块和15#块。水准测量通过水准仪和水准尺测量两点高差。本次测量以桥墩位置为已知高程点,测量浇筑节段标高。水准仪放在桥墩和待测节段中间位置,分别读取水准尺在两个位置读数,即可计算待测节段与桥墩位置相对高差。水准测量结果见表1。

旋转拍摄采用相机拍摄与实时监测的方式,即浇筑前后图像采集及浇筑过程中的实时监测。

表1 水准测量结果

	4#块	6#块	14#块	15#块
浇筑前标高/m	34.755	35.096	33.741	35.498
浇筑后标高/m	34.746	35.081	33.725	35.494
变形值/mm	-9	-15	-16	-4

浇筑前后采集的图像通过算法校正后保存到本地,留作后续通过后期算法处理得到完整变形曲线。浇筑过程中的实时监测将变形最大的悬臂端作为测量区域,将浇筑节段端部选定为模板区域以获得其实时变形值。浇筑节段由于无法布置测点,故变形计算时只采集浇筑节段前一个节段至桥墩位置图像。现场拍摄相机为佳能EOS77D,拍摄过程中焦距固定为200 mm,相机转角通过云台控制,现场监测如图3所示。



图3 监测系统采集现场图

2.3 数据处理及分析

2.3.1 旋转图像处理及分析

旋转图像的处理方式为采集图像进行投影变换及相对定向后拼接得到等效正射图像。桥墩位置拍摄图像为基准图像,以4#块浇筑前后变形计算为例展示图像处理过程。4#块浇筑时,图像采集节段为桥墩中心位置至3#块,图4为采集原图及校正图像。拼接效果如图5所示。



(a) 图像采集



(b) 校正图像

图4 桥墩中心位置至3#块旋转图像校正过程

在Matlab中通过ginput函数可以获得每幅拼接图中测点上边缘像素坐标,对浇筑前后的测点



图5 桥墩中心位置至3#块拼接效果图

坐标作差即可得到该节段的变形曲线。为提高计算效率,坐标采集时远离悬臂端的测点选取较稀疏,靠近悬臂端的测点选取较密集,且忽略部分边缘不平整的测点,得到桥墩中心位置至3#块在4#块浇筑前后变形曲线如图6所示。

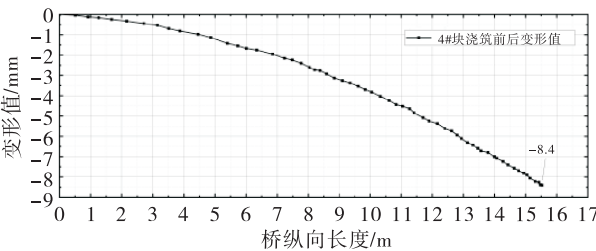


图6 4#块浇筑前后桥纵向变形曲线

2.3.2 误差分析

为验证图像处理方法在现场测试的准确性,将处理结果与水准测量值对比,相对误差见表2。

表2 现场测量误差对照表

	4#块	6#块	14#块	15#块
水准测量 C_1/mm	-9	-15	-16	-4
旋转拍摄 C_2/mm	-8.4	-14.3	-14.6	-3.6
$ C_1 - C_2 = E_1/\text{mm}$	0.6	0.7	1.4	0.4
相对误差 $E_1/C_1/\%$	6.67	4.67	8.75	10.00

对比14#、15#块和4#、6#块计算结果,旋转拍摄的前者误差大于后者,这是由于拍摄前者图像时相机旋转角过大,投影变换和相对定向无法完全消除积累误差,导致拼接图像精度下降。但从表2总体看,本文算法计算的变形值与桥梁实际变形值误差较小,且相对误差均在10%以内,满足实际施工时的监测要求。

3 结论

本文基于图像识别算法,形成了桥梁变形监测的完整算法流程,并开展其实际应用研究。利用相机和无人机,分别采集了江苏省268省道京杭运河大桥主桥4#、6#、14#、15#块浇筑前后的图像数据。对比本文算法处理结果和水准测量结果,验证了该算法在实际变形监测中的良好精度,且桥梁变形值相对误差在10%以内,满足工程监测要求。

参考文献:

[1] PENG X, ZHONG X, 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.

[2] 刘志鹏. 基于数字摄影测量技术的桥梁动态变形监测研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.

[3] REN Z, FANG F, YAN N, et al. State of the art in defect detection based on machine vision[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2022, 9(2): 661-691.

[4] 李祥瑞. 机器视觉研究进展及工业应用综述[J]. 数字通信世界, 2021, (11): 79-80, 146.

[5] 王荣本, 余天洪, 郭烈, 等. 基于机器视觉的车道偏离警告系统研究综述[J]. 汽车工程, 2005, (4): 463-466.

[6] 苑玮琦, 薛丹. 基于机器视觉的隧道衬砌裂缝检测算法综述[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 3100-3111.

[7] 庞娜, 赵启林, 芮挺, 等. 基于机器视觉的桥梁检测技术现状及发展[J]. 现代交通技术, 2015, 12(6): 25-31.

[8] 章世祥, 张汉成, 李西芝, 等. 基于机器视觉的路面裂缝病害多目标识别研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(3): 30-39.

[9] 段峰, 王耀南, 雷晓峰, 等. 机器视觉技术及其应用综述[J]. 自动化博览, 2002(3): 62-64.

[10] 李春梅. 基于近景旋转相机的大幅面影像获取及其超分辨率重建研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.