

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221111006

基于桥梁自然纹理的全场位移监测方法*

楚玺, 周志祥, 段鑫, 朱伟铸

(深圳大学土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060)

摘要: 结构健康监测系统在桥梁上的测点十分有限, 测试数据不完备导致结构安全状态评价困难。提出一种自然纹理条件下的结构全场位移监测方法。通过尺度不变特征变换算法提取结构表面自然纹理特征点, 将提取的自然纹理特征点作为结构变形前后的点源数据, 通过特征点匹配建立起变形前后特征点的位置关系。进一步, 建立结构变形前后自然纹理特征点相对位置变化数学模型, 提出结构全场位移矢量计算理论。最后, 通过试验梁对方法进行验证, 获得了试验梁的全场位移监测结果。验证结果显示, 结构边缘挠度最大误差4.94%, 平均误差为2.08%, 全场位移矢量最大长度误差0.68 mm, 最大角度误差0.76°, 计算得到的全场位移矢量与结构实际变形一致。

关键词: 桥梁安全; 健康监测; 机器视觉; 特征提取; 全场位移

中图分类号: U446.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-0965-07

Full-field Displacement Monitoring Method Based on Bridge Natural Texture

CHU Xi, ZHOU Zhixiang, DUAN Xin, ZHU Weizhu

(College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: The measurement points for bridge structural health monitoring are limited, and the incomplete test data leads to the difficulty in evaluating the state of structural safety. Hence, a method of structural full-field displacement monitoring under the natural texture is proposed herein. The natural texture feature points on the surface of the structure are extracted by scale-invariant feature transformation (SIFT) algorithm. The extracted natural texture feature points are used as the point source data before and after structure deformation. The correlation between the feature points before and after deformation is established using feature point matching. Furthermore, we analyze the mathematical model of the relative position change of the feature points before and after deformation, and propose a calculation theory for the structure's full-field displacement vector. Finally, the method is verified by the test beam's load test and the test beam's full-field displacement vector monitoring results are obtained. Validation results show that the maximum error of structural edge deflection is 4.94%, and the average error is 2.08%, the maximum length error of the full-field displacement vector is 0.68 mm

* 收稿日期:2022-11-11;修回日期:2023-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51778094;51708068;52208182)、深圳市科技计划重点项目(JCYJ20220818095608018)资助

作者简介:楚玺(1986—),男,副研究员,博士后。主要从事结构健康监测与安全评价方面的研究。E-mail:chuxi@szu.edu.cn

通讯作者:周志祥(1958—),男,教授,博导,博士。主要从事结构健康监测与安全评价方面的研究。

E-mail:zhixiangzhou@szu.edu.cn

and the maximum angle error is 0.76° . The calculated full-field displacement vector is in agreement with the actual structural deformation. This study is the first to realize full-field displacement monitoring of structures under natural texture conditions, extending the traditional single-point monitoring of the structure to the two-dimensional plane monitoring, and significantly improving the completeness of the monitoring data.

Keywords: bridge safety; health monitoring; machine vision; feature extraction; full-field displacement

0 引言

目前结构健康监测系统监测结构响应是通过局部测点传感器获得的,局部测点响应很难准确反映出整个结构的安全状态^[1]。因此常规桥梁健康监测方法面临测试数据不完备导致结构安全状态评价困难的问题^[2]。

随着计算机技术和人工智能的快速发展,机器视觉成为桥梁健康监测研究的热点^[3]。D.M.Feng等^[4]对基于机器视觉技术的桥梁位移监测方法进行总结,对比机器视觉方法与常规方法的优势,提出未来机器视觉监测桥梁变形的发展趋势。Y.Xu等^[5]总结了机器视觉方法在桥梁变形监测中的应用步骤,给出了机器视觉在桥梁位移测量中的工程案例。B.F.Spencer等^[6]对机器视觉桥梁监测应用现状进行综述,指出深度学习在桥梁机器视觉监测技术领域已经形成新的方向,在桥梁静态和动态位移监测中有广泛的应用前景。J.H.Lee等^[7]等针对基础设施长期健康监测中传感器数据漂移问题,提出了一种基于机器视觉的自我运动补偿系统,实验验证表明该系统可以将摄影测量运动误差从44.1 mm降低至1.1 mm。L.Ngeljaratan等^[8]利用数字图像相关技术(DIC)测量桥梁的三维动态响应以及模态特性(固有频率、阻尼比和振型),证明了DIC能够准确识别桥梁的动态响应。L.Y.Meng等^[9]提出了一种新的近距离摄影测量系统,可以实现自动识别标记点的沉降量,进而取代传统的水准仪测量法。C.Z.Dong等^[10]针对机器视觉测量法需要手动调整参数的问题,提出了一种基于深度学习全场光流方法的结构位移测量方法,并在一座人行天桥上开展工程应用,结果显示,基于全场光流算法追踪得到的结构模态频率与振动传感器相比只有0.5%的误差。G.F.Chen等^[11]提出将无人机和DIC技术结合起来用于桥梁的振动测量。无人机拍摄的桥

梁视频可以通过DIC方法进行分析,实现对测量点位移的跟踪,结果表明,标靶点的位移误差最大值0.5 mm。Y.D.Tian等^[12]提出在无人机上安装摄像机来拍摄缆索的振动图像,提出一种动态位移线形匹配算法(LSD)识别缆索的线形振动,验证结果表明该算法比传统的DIC在计算桥梁缆索动态位移时更鲁棒性,并且不需要调整预定义参数。

上述方法存在的问题是:基于机器视觉的结构健康监测方法需要在结构上布置标靶点,监测对象与常规监测相同,针对的是结构的局部测点^[13-14]。测试数据不完备导致结构安全状态评价困难的问题并没有很好解决。另一方面,目前结构全场变形监测应用成熟的DIC需要相机光轴垂直或近似垂直于被测物表面,且需要被测物体表面喷涂散斑,制约了其在桥梁结构变形监测中的工程应用。桥梁结构表面具有丰富的自然纹理特征,可以通过特征提取方法获取桥梁结构表面的自然纹理特征点,分析桥梁变形前后特征点相对位置变化的数学模型,提出结构表面特征点的位移场计算理论,建立一种自然纹理条件下结构全场位移监测方法,以期解除传统影像位移分析必须借助人工色斑的约束,从而非接触式地对桥梁结构开展变形监测。

1 结构全场位移监测方法

桥梁结构表面混凝土凹凸不平,会存在的一些表面缺陷比如细小孔洞、麻面、蜂窝、裂缝等都构成了结构表面的自然纹理,可以对这些覆盖在结构表面的自然纹理特征进行识别,跟踪这些自然纹理在变形前后的位置,分析自然纹理特征点的位移计算理论,汇集自然纹理的位移,形成结构表面位移场。

1.1 结构全场位移矢量点源生成方法

在小变形情况下,结构表面的自然纹理不会发生明显变化。可以采用图像尺度空间极值点检测

方法来提取结构表面的自然纹理特征。图像尺度不变特征变换算法 SIFT (Scale-invariant feature transform)^[15-18]可以在图像的尺度空间内通过对图像灰度差分的方法提取结构表面自然纹理部位的极值点,称为特征点。获得的特征点具有尺度、位置和方向不变的特征。

为验证用 SIFT 算法对结构表面自然纹理特征提取的可行性,采用相机校验棋盘格开展验证试验。棋盘格分两次不同位置摆放并拍摄图像,两幅图像特征点的提取如图 1 所示。特征点匹配结果如图 2 所示(因特征点较多,仅展示前 60 个特征点匹配结果)。



图 1 不同位置的棋盘格特征点

Fig.1 Checkerboard feature points in different positions

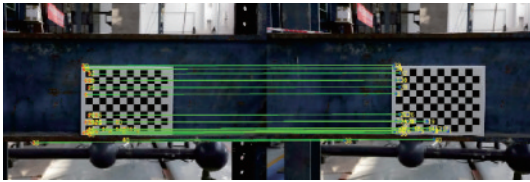


图 2 特征点的匹配

Fig.2 Registration of feature points

图 1、图 2 说明 SIFT 特征点具有较好的位置不变性。特征点一旦被检测出来,就能稳固的保持在特征位置,不易受环境影响发生变动。因此,可以将变形前后结构表面的特征点作为全场位移监测的点源。

1.2 结构全场位移矢量计算方法

可以在图像测量平面布置一个不动点,将各特征点的平面位置通过一个不动点约束起来。提出特征点相对位置变化数学模型,如图 3 所示。

变形前特征点 A_i 和对应的变形后特征点 A'_i 组成待测位移矢量 $A_i A'_i$, 待测位移矢量用 M_i 表示。 M_i 的测量方法:

(1) 桥梁变形前后的图像是 (i_1, i_2) 。通过 SIFT 算法从 (i_1, i_2) 中提取特征点 (A_i, A'_i) 。 (A_i, A'_i) 的初始匹配结果为 $C, C = \{(A_i, A'_i) : i=1, 2, \dots, n\}$, 其中 $A_i \in i_1, A'_i \in i_2$ 。

(2) 将特征点 (A_i, A'_i) 对不动点 O 进行坐标提取,得到特征点坐标 $A_i(x_i, y_i), A'_i(x'_i, y'_i)$ 。进而得到 $M_i = [(x'_i - x_i), (y'_i - y_i)]_i$ 。 M_i 为单位待测位移矢量,具有长度 L 和转角 θ 两个待测参数,这两个参数可以通过变形前后特征点坐标 $A_i(x_i, y_i), A'_i(x'_i, y'_i)$ 求得,见式(1)、式(2)。

(3) 桥梁变形前后的图像 (i_1, i_2) 所有特征点的位移量是由 n 个 M_i 所组成的集合 $M = \{M_i : i=1, 2, \dots, n\}$ 。求解 M 即可得到结构表面特征点的位移场。

$$L_i = \sqrt{(x'_i - x_i)^2 + (y'_i - y_i)^2} \quad (1)$$

$$\theta_i = \arctan \frac{x'_i - x_i}{y'_i - y_i} \quad (2)$$

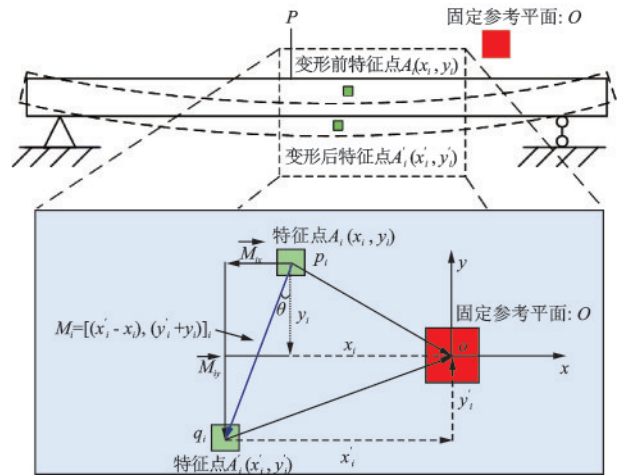


图 3 特征点相对位置变化数学模型

Fig.3 Mathematical model of relative position change of feature points

2 试验梁静载试验

2.1 试验梁的试验条件

采用钢桁-混凝土组合梁作为试验梁,试验梁构造和实物如图 4 所示。试验梁所用材料见表 1。

监测相机选用富士 GFX 100 普通民用相机,搭载富士 GF 32-64/4 R LM WR 镜头。相机和镜头技术参数见表 2。试验过程中相机位于距试验梁中心 5 m 位置,如图 5 所示。

采用百分表和三维激光扫描仪共同对试验结果进行验证。在试验梁下缘 13 个节点板下部布置百分表,如图 6 所示。

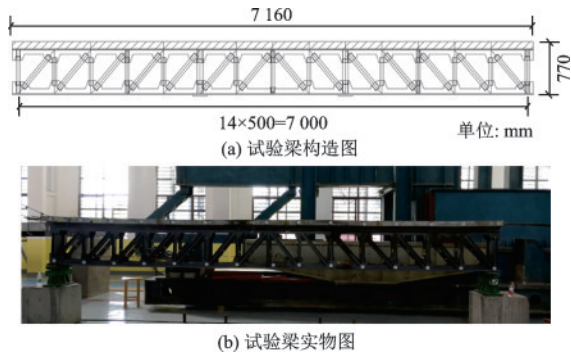


图4 试验梁的构造及实物图

Fig.4 Structure and physical drawing of the test beam

表1 试验梁所用材料

Table 1 Materials for the test beam

类别	所用材料
混凝土	C50
钢桁架	Q345
栓钉	$\phi 10 \times 80$ mm
钢筋	HRB335, $d=6$ mm, 8 mm

表2 监测相机参数表

Table 2 Monitoring camera parameters

型号	参数	技术范围
Fujifilm GFX 100	传感器尺寸	43.8×32.9 mm
	传感器类型	CMOS Sensor
	有效像素	102 million
FujiGF 32-64/4	焦距	32~64 mm
RLM WR lens	光圈	F4.0-F32

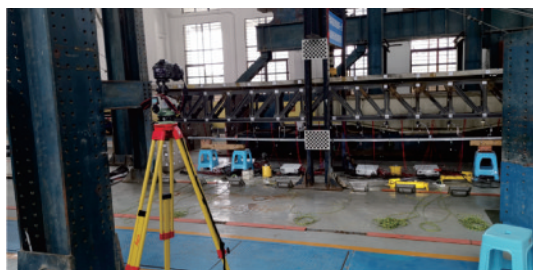


图5 测量相机摆放位置

Fig.5 Position of the measuring camera



图6 百分表布置

Fig.6 Arrangement of dial indicator

三维激光扫描验证方面,采用莱卡 Scan Station P50 激光扫描仪获取试验梁高精度三维形态。扫描仪的扫描分辨率 0.8 mm/10 m, 点位精度 30 mm/50 m, 标靶获取精度 2 mm/50 m, 噪声精度 0.4 mm/10 m。在试验梁每个节点板上粘贴编码标靶点提升扫描精度, 编码标靶点位置及编号如图 7 所示, 现场扫描如图 8 所示。

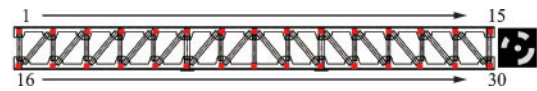


图7 编码标靶点布置示意

Fig.7 Arrangement of coding targets

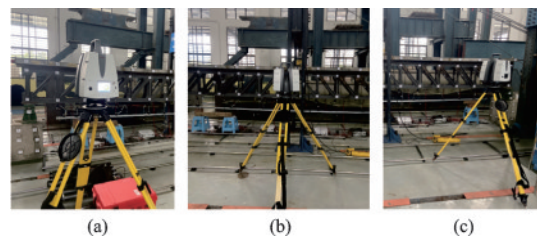
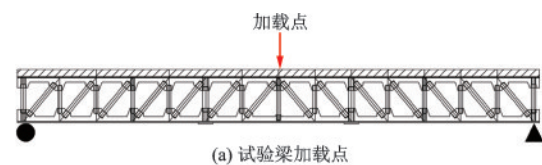


图8 验证试验

Fig.8 Verification tests

采用跨中加载的方式使试验梁产生位移, 如图 9(a) 所示。试验分级加载, 每级荷载 100 kN, 加载到 400 kN 试验终止。每级荷载持荷两分钟进行试验梁的图像采集, 百分表数据读取和三维激光扫描。加载制度如图 9(b) 所示。



(a) 试验梁加载点

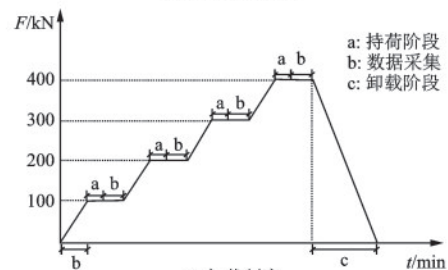


图9 试验梁加载方案

Fig.9 Loading scheme of the test beam

按照 1.2 节结构全场位移矢量计算方法, 需要提供一个不动点来约束特征点的平面位置。采用人工标靶来布置不动点, 人工标靶为棋盘格。在试验梁上部和下部各布置一个棋盘格, 下部棋盘格用

于监测加载过程中反力架是否出现位移,上部棋盘格的作用是为试验梁表面的特征点提供不动点 O 。理论上棋盘格任一特征点都可作为固定点 O ,因棋盘格正中心的特征点提取结果最稳定,具有较强不动性,因此本文选取棋盘格正中心的特征点作为不动点 O 。棋盘格放置于反力架上,位置固定不动,如图10所示。图10采用棋盘格不动点的目的是为验证结构全场位移矢量计算方法,实际工程中桥梁结构周边任何不动物体(岩石,建筑,桥墩等)表面的特征点均可作为不动点 O 。

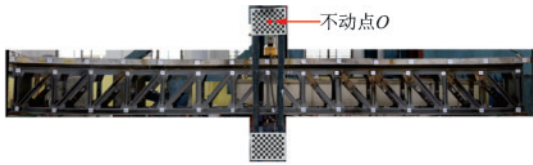


图10 试验现场棋盘格的布置

Fig.10 Arrangement of chessboard on the test site

利用SIFT特征点提取方法,提取各工况下试验梁的特征图像,获取的试验梁特征提取结果如图11所示。将试验梁的特征提取结果进行简化,删除不必要的环境特征点,突出显示结构主体特征如图12所示。

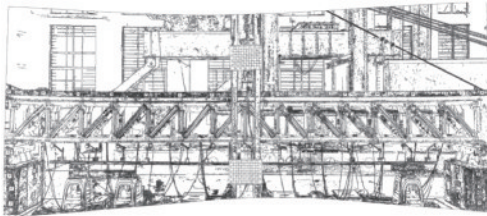


图11 提取的试验梁图像特征

Fig.11 Extracted image feature points of the test beam



图12 试验梁主体特征分布

Fig.12 Distribution of feature points of the test beam's surface

2.2 图像监测分辨率的标定

结构的图像是由像素的排列组成的,如图13所示。结构变形在图像上表现为变形部位像素的位置发生变化,像素的实际物理尺寸就是监测分辨率。在试验梁的15根竖杆上绘制有标定线,可以测

量每根标定线的长度和标定线覆盖像素的个数,进而计算试验梁的图像监测分辨率。监测分辨率标定算法如图14所示,监测分辨率标定结果见表3。

可以利用表2得到的监测分辨率将像素坐标向物理监测坐标进行换算。

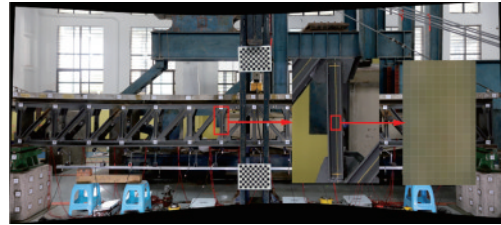


图13 结构图像的像素分布

Fig.13 Pixel distribution of the structural image

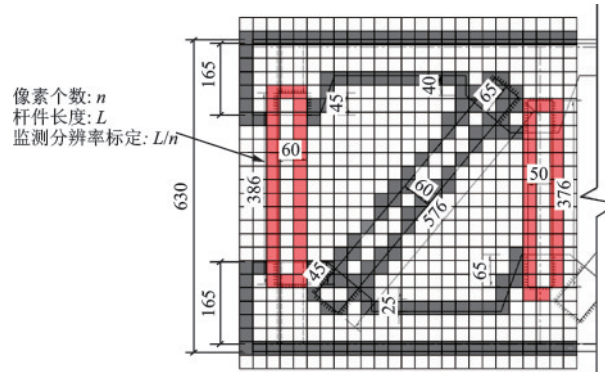


图14 图像监测分辨率标定方法

Fig.14 Calibration method of image monitoring resolution

表3 监测分辨率标定表

Table 3 Monitoring resolution calibration

竖杆 编号	像素 个数	标定线长度/ mm	标定值 (mm/px)	平均值 (mm/px)
1-2	1 983	365.12	0.184 0	
3-4	1 991	353.24	0.177 2	
5-6	1 995	361.11	0.181 6	
7-8	1 992	352.32	0.176 8	
9-10	1 997	352.39	0.176 9	
11-12	1 993	311.37	0.155 9	
13-14	1 987	353.92	0.178 5	
15-16	2 652	451.93	0.170 2	
17-18	1 981	351.84	0.177 3	
19-20	1 996	323.47	0.162 3	
21-22	1 989	352.79	0.177 3	
23-24	1 983	355.74	0.179 2	
25-26	1 992	363.39	0.182 3	
27-28	1 987	361.13	0.182 3	
29-30	1 982	355.45	0.178 8	
				0.176 0

3 试验验证

3.1 试验梁全场位移矢量监测结果

按照结构全场位移矢量计算方法,对各级荷载条件下的试验梁图像进行计算,得到试验梁结构全场位移矢量计算结果,并按位移矢量的长度进行色谱赋值,如图15所示。

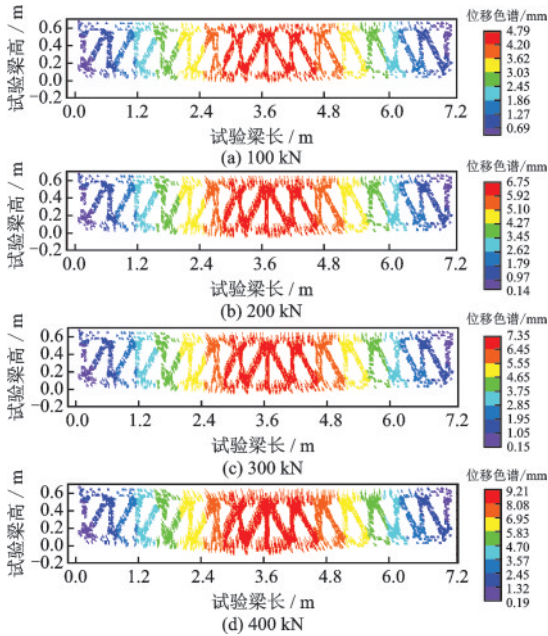


图15 试验梁全场位移监测结果

Fig.15 Full-field displacement monitoring results

3.2 试验梁全场位移矢量精度验证

梁1/4,1/2,3/4位置处百分表实测值与监测值对比结果见表4。采用徕卡 ScanStation P50 激光扫描试验梁获得点云如图16所示。利用徕卡 Cyclone

表4 挠度测量结果精度验证

荷载/kN	测点	百分表/mm	计算值/mm	误差/%
100	2 080	3.83	3.96	3.34
	3 580	4.76	4.65	2.42
	5 080	3.84	3.98	3.67
200	2 080	5.80	5.84	0.82
	3 580	6.72	6.60	1.77
	5 080	6.16	6.05	1.93
300	2 080	6.63	6.58	0.75
	3 580	7.52	7.63	1.46
	5 080	6.53	6.62	1.38
400	2 080	7.93	7.85	1.07
	3 580	9.17	9.11	0.62
	5 080	8.08	7.89	2.44

点云处理软件提取试验梁节点部位的编码标靶点圆心坐标,如图17所示。

可通过变形前后编码标靶点的坐标差计算标靶点的位移矢量,并与该点位置提取的结构位移矢量进行对比验证,如图18所示(以400 kN荷载作用为例)。

由图18可知,标记点位置的结构表面矢量与基准矢量一致,矢量长度最大误差0.68 mm,最大角度误差0.76°,提取的结构全场位移矢量准确反映出了结构的变形特征。



图16 试验梁点云

Fig.16 Test beam point cloud

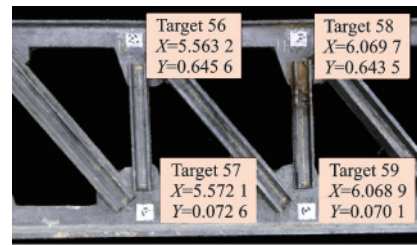
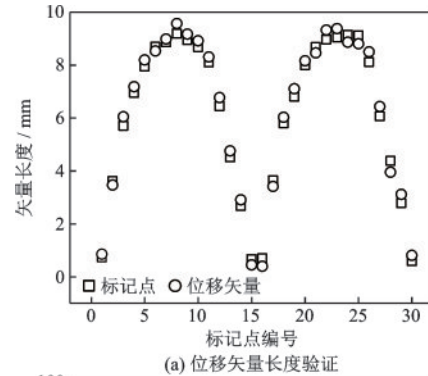
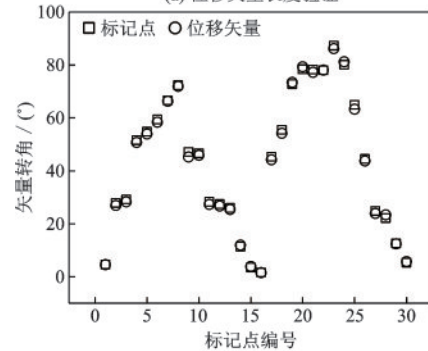


图17 编码标靶点位置信息提取

Fig.17 Extraction of coded target position information



(a) 位移矢量长度验证



(b) 位移矢量角度验证

图18 位移矢量与标靶矢量对比

Fig.18 Comparison of the displacement vector and target vector

4 结论

提出采用数字图像处理技术,提取结构表面自

然纹理特征点,解析特征点变形前后位移场计算理论,形成了一种结构全场位移监测方法。对该方法进行试验验证,在自然纹理条件下获得了结构的全场位移监测结果。结论如下:

(1)结构表面具有丰富的自然纹理特征,可通过图像尺度不变特征变换(SIFT)算法提取结构表面的自然纹理特征,构成结构全场位移监测的点源数据。

(2)布置不动点来对测量平面变形前后特征点的位置进行约束,通过计算变形前后特征点与不动点的相对位置关系,可提取出结构表面的全场位移矢量。

(3)计算得到的试验梁边缘挠度最大误差4.94%,平均误差为2.08%;全场矢量长度误差最大值0.68 mm,转角误差最大值0.76°,表明提取的位移矢量能够准确反映结构的全场位移特征。

(4)结构全场位移监测方法将常规单点监测数据扩展至结构平面全场位移监测,极大的充实了监测数据,完整的反映出了结构在荷载作用下的全场变形特征,可为下一步结构安全状态评价提供更全面的分析数据。

本次研究主要以试验梁为研究对象,而实际桥梁环境较实验室复杂,图像噪声会更加明显,特征点提取更加困难,实际工程应用中还需进一步解决降噪问题。

参考文献:

[1] 王佐才,丁雅杰,戈壁,等.桥梁结构非线性模型修正研究综述[J].交通运输工程学报,2022,22(2):59-75.
Wang Z C, Ding Y J, Ge B, et al. Review on nonlinear model updating for bridge structures[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(2): 59-75. (in Chinese)

[2] 熊文,李刚,张宏伟,等.基于点云数据与工程知识的桥梁形态变化识别方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(5):101-110.
Xiong W, Li G, Zhang H W, et al. Change detection method of bridges geometrical profile based on point cloud data and engineering knowledge [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2022, 49(5): 101-110. (in Chinese)

[3] 孙利民,尚志强,夏焯.大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望[J].中国公路学报,2019,32(11):1-20.
Sun L M, Shang Z Q, Xia Y. Development and prospect of bridge structural health monitoring in the context of big data[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(11): 1-20. (in Chinese)

[4] Feng D M, Feng M Q. Computer vision for SHM of civil infrastructure: from dynamic response measure-

ment to damage detection-a review [J]. Engineering Structures, 2018, 156: 105-117.

[5] Xu Y, Brownjohn J M W. Review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2018, 8: 91-110.

[6] Spencer B F, Hoskere V, Narazaki Y. Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring [J]. Engineering, 2019, 5: 199-222.

[7] Lee J H, Lee K C, Jeong S, et al. Long-term displacement measurement of full-scale bridges using camera ego-motion compensation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 26(9): 106651.

[8] Ngeljaratan L, Moustafa M A. Structural health monitoring and seismic response assessment of bridge structures using target-tracking digital image correlation [J]. Engineering Structures, 2020, 213: 110551.

[9] Meng L Y, Zou J G, Liu G J. Research on the design and automatic recognition algorithm of subsidence marks for close-range photogrammetry [J]. Sensors, 2020, 20(2): 544.

[10] Dong C Z, Celik O, Catbas F N, et al. Structural displacement monitoring using deep learning-based full field optical flow methods [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(1): 51-71.

[11] Chen G F, Liang Q, Zhong W T, et al. Homography-based measurement of bridge vibration using UAV and DIC method [J]. Measurement, 2020, 170: 108683.

[12] Tian Y D, Zhang C, Jiang S, et al. Noncontact cable force estimation with unmanned aerial vehicle and computer vision [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2021, 36(1): 73-88.

[13] Yu S S, Xu Z F, Su Z Y, et al. Two flexible vision-based methods for remote deflection monitoring of a long-span bridge [J]. Measurement, 2021, 181: 109658.

[14] Chu X, Zhou Z X, Deng G J, et al. An overall deformation monitoring method of structure based on tracking deformation contour [J]. Applied Sciences, 2019, 9(21): 4532.

[15] Song F H, Lu B. An automatic video image mosaic algorithm based on SIFT feature matching [J]. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2013, 181: 879-886.

[16] Wang Z S, Lai Y F, Yang S, et al. Absolute depth measurement of objects based on monocular vision [J]. International Journal on Artificial Intelligence Tools, 2020, 29: 2040011.

[17] Huang X, Wan X, Peng D F. Robust feature matching with spatial smoothness constraints [J]. Remote Sensing, 2020, 12(19): 3158.

[18] Hafeez J, Lee J, Kwon S, et al. Evaluating feature extraction methods with synthetic noise patterns for image-based modelling of texture-less objects [J]. Remote Sensing, 2020, 12(23): 3886.

(本文编辑:赵霞)