

引用本文:周姝康,丁威,金振奋,等.基于三维点云重建的混凝土结构裂缝定位与追踪[J].建筑科学与工程学报,2024,41(5):14-22.
ZHOU Shukang,DING Wei,JIN Zhenfen,et al. Crack localization and tracking in concrete structures based on 3D point cloud reconstruction [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2024,41(5):14-22.

DOI:10.19815/j.jace.2022.10119

基于三维点云重建的混凝土结构裂缝定位与追踪

周姝康¹,丁威¹,金振奋^{2,3},俞珂⁴,张鹤¹,舒江鹏^{1,2,3}

(1. 浙江大学建筑工程学院,浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学平衡建筑研究中心,浙江 杭州 310058;
3. 浙江大学建筑设计研究院有限公司,浙江 杭州 310058; 4. 西北大学土木工程系,伊利诺伊 埃文斯顿 IL60208)

摘要:为实现混凝土结构裂缝的自动化定位、宽度量化及扩展追踪,提出一种基于三维点云重建的混凝土结构裂缝定位及扩展追踪方法。首先通过无人机搭载高分辨率云台相机获取目标建筑物的图像集,再通过优化数据集与三维重建流程得到准确的建筑结构点云模型,并还原相机空间参数;然后提出视点定位算法,基于还原的相机空间参数求得拍摄裂缝的相机世界坐标,将裂缝图片与相机世界坐标绑定,基于图片索引裂缝的三维坐标,实现裂缝在点云模型中的自动定位;最后提出适用于混凝土结构的点云映射与配准算法,对裂缝宽度的扩展进行量化追踪。通过试验对服役期的大型混凝土建筑结构进行了可行性和精度验证。结果表明:所提出方法的三维模型重建的尺度平均误差小于3%,且可自动化定位结构裂缝的三维坐标,裂缝平均定位时间为38.09 μ s;通过进一步将整体模型与更新的裂缝点云集配准,可实现裂缝扩展信息(裂缝宽度)的准确追踪,试验相对误差小于8%。

关键词:裂缝定位;宽度量化;裂缝扩展跟踪;三维点云重建;视点定位;点云映射

中图分类号:TU37

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)05-0014-09

Crack localization and tracking in concrete structures based on 3D point cloud reconstruction

ZHOU Shukang¹, DING Wei¹, JIN Zhenfen^{2,3}, YU Ke⁴, ZHANG He¹, SHU Jiangpeng^{1,2,3}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;
2. Center for Balance Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China; 3. The Architecture Design & Research Institution of Zhejiang University Co., Ltd, Hangzhou 310058, Zhejiang, China; 4. Civil and Environmental Engineering Department, Northwestern University, Evanston IL60208, Illinois, USA)

Abstract: In order to realize automatic crack localization, width quantification, and extension tracking in concrete structure, a methodology for crack localization and tracking in concrete structures based on three-dimensional (3D) point cloud reconstruction was proposed. Firstly, the image set of the target building was obtained by an unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with a high-resolution gimbal camera. Image acquisition and 3D reconstruction process were optimized to obtain an accurate point cloud model of the building structure and restore the camera space parameters. Secondly, the viewpoint localization algorithm was proposed to obtain the

收稿日期:2022-10-28

投稿网址:<http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52108179);浙江省自然科学基金探索项目(Q22E088936);

浙江省交通运输厅科技计划项目(202217)

通信作者:舒江鹏(1987-),男,工学博士,研究员,博士生导师,E-mail:jpeshu@zju.edu.cn。

camera world coordinates of the cracks based on the restored camera space parameters. After binding the crack images to the world coordinates of cameras, the 3D coordinates of the crack were indexed based on the image to realize the automatic localization of the crack in the point cloud model. Finally, point cloud mapping and the registration algorithm for concrete structures was proposed to quantitatively track the propagation of crack width. The feasibility and accuracy of the large concrete building structure in service period were verified by experiments. The results show that the average scale error of 3D model reconstruction by the method is less than 3%, and the 3D coordinates of structure cracks can be automatically located. The average localization time of cracks is 38.09 μ s, and by further registering the whole model with the updated crack point cloud set, the accurate tracking of crack propagation information (crack width) can be realized, and the test relative error is less than 8%.

Key words: crack localization; width quantization; crack propagation tracking; 3D point cloud reconstruction; viewpoint localization; point cloud mapping

Author resume: SHU Jiangpeng(1987-), male, PhD, research fellow, E-mail: jpesu@zju.edu.cn.

0 引言

裂缝作为混凝土结构中常见的病害损伤形式,其出现和开展可能会导致结构承载力和安全性的下降^[1-3]。因此,及时进行表面裂缝的检测和评估,对各类混凝土结构的安全运维具有重要意义。目前,裂缝检测工作主要依靠人工目视检测完成,检查人员观察和测量裂缝的位置、几何形态与走向,并定期追踪裂缝扩展信息以评估结构的当前状况。然而对于高层和大跨度结构等大型基础设施,人工目检的效率、精度和安全性都较低,难以满足实际需求。因此,亟需一种针对混凝土结构裂缝的自动化量化识别与定位追踪方法以解决上述问题^[4-8]。目前,基于计算机视觉方法的裂缝识别研究越来越受到重视^[9-10]。这类工作主要集中于裂缝图片的分类、检测与分割,并已取得较大进展。然而如何定位裂缝在大型结构上的三维坐标,针对其宽度进行量化并在扩展阶段持续追踪仍存在一定困难。

伴随着无人机等设备的发展,建筑结构及其损伤图片信息变得更易获取。结合三维重建技术,无人机拍摄图片被广泛用于创建建筑结构点云模型,以实现土木工程领域的结构检测评估任务。Liu等^[11]基于无人机和三维重建技术提出了一种桥墩裂缝的评估方法,解决了裂缝在非平面投影中的几何变形问题。为了加快施工进度, Kim等^[12]提出了一种基于点云测量预制构件在桥梁施工过程中相对位移变化的方法。除此之外,点云还被用于评估基础设施系统的结构损伤^[13-14]。以上研究进展体现了点云三维模型在结构裂缝检测任务上的潜力,但目前

前仍然鲜有针对裂缝或其他损伤进行发展阶段的持续量化与追踪研究。针对图像的自动定位问题, Liu等^[15]提出一种基于三维重建的室内场景自动定位方法,该方法可以更快更方便地为检测人员提供检测图像的实际地理位置。虽然无人机自带的全球定位系统(GPS)记录功能可以为每张照片提供地理坐标值,但当其处于信号较弱的地理位置时,使用GPS定位裂缝等局部损伤会出现精度下降甚至坐标丢失的问题^[16]。在裂缝检测中,需要特别注意那些快速增长的裂缝。这些裂缝的突然增长,可能会导致结构无预警失效。因此,对裂缝的扩展阶段进行持续追踪是必要的^[17]。

目前,混凝土结构裂缝的自动化定位、宽度量化及扩展追踪方法仍然是一项重大挑战。针对以上现状,本文提出一种基于三维点云重建的混凝土结构裂缝定位及追踪方法,通过优化图像获取与三维重建流程,提出视点定位算法和点云映射与配准算法,对混凝土结构实现自动化裂缝定位和准确的裂缝宽度量化及扩展追踪。

1 裂缝定位及追踪方法与理论

本文提出的混凝土结构裂缝定位及追踪方法由3个模块实现:结构三维点云重建、裂缝自动定位、裂缝宽度量化及扩展追踪(图1)。

1.1 基于 SfM 的结构三维点云重建

基于运动结构恢复(SfM)的三维重建方法被广泛用于获取建筑结构的点云模型^[18-19]。此类方法具有硬件设备要求低、现场操作简便等特点,仅利用原始的数字图像和相机参数,便可直接还原相机空间

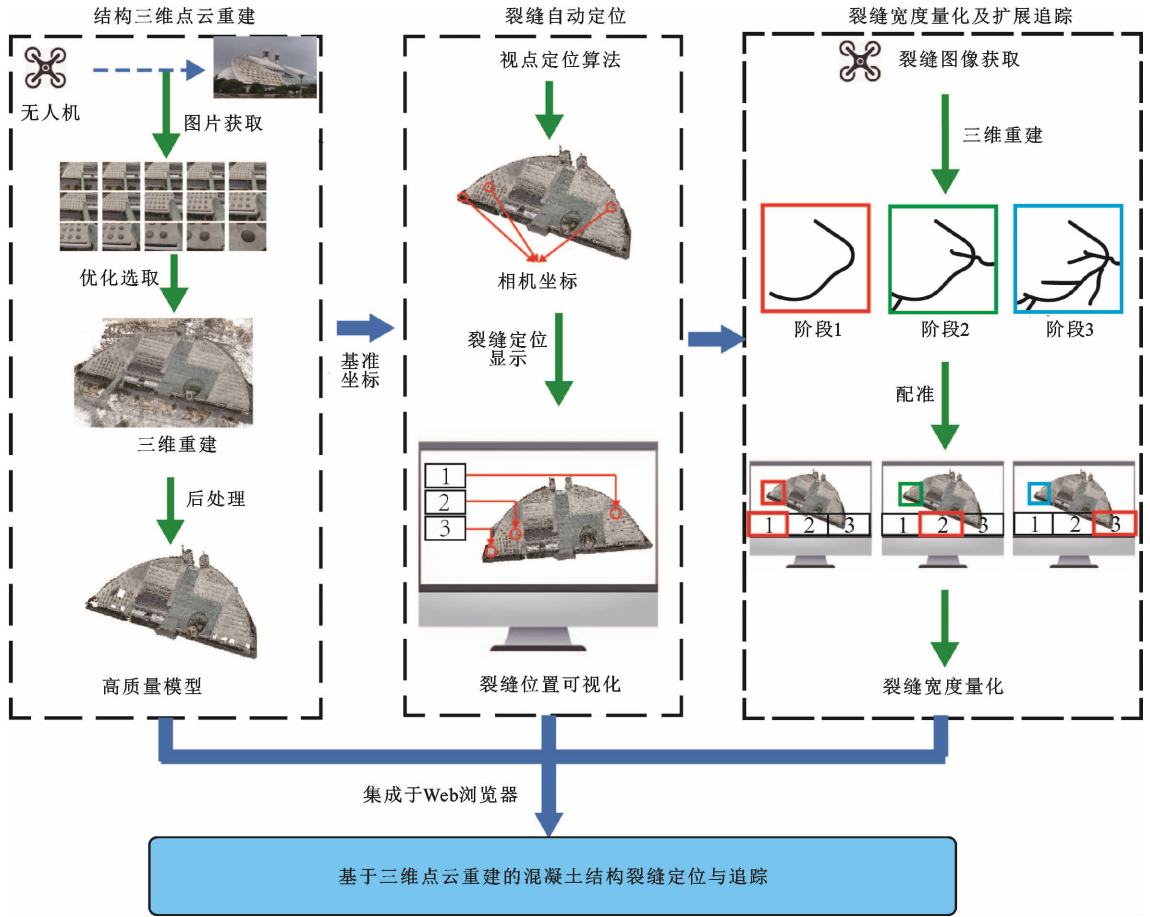


图1 混凝土结构裂缝定位及追踪方法框架

Fig. 1 Framework for crack localization and tracking in concrete structures

参数、生成点云三维模型。但因图像数据的缺失、数据集特征不明显或 SfM 各步骤算法的选用不当,会导致重建效果不佳。针对混凝土结构生成精确的点云三维模型,并为裂缝定位及追踪研究提供基础,提出了基于 SfM 改进算法的混凝土结构三维重建方法。

首先采用无人机搭载高分辨率云台相机,以倾斜或环绕方式拍摄建筑结构,获取多个方向和距离下的多视角图像(图2)。

在采用 SfM 算法进行三维点云重建的过程中,高质量多视角图像数据集的合理化选取可提高建模效果^[20-21]。因此,本文提出基于图像重叠率、目标区域占比、光照强度和清晰度的综合评价方案,对初步获取的图像数据集进行筛选。在进行数据集优化后,通过对比研究,依次采用以下算法执行 SfM 的关键步骤:

(1)尺度不变特征变换(Scale Invariant Feature Transform, SIFT)算法进行图像特征点提取。

(2)快速近似最近邻搜索(Fast Library for Approximate Nearest Neighbors, FLANN)算法进行

特征点匹配。

(3)PnP(Perspective-n-Point)算法基于稀疏光束平差求解法(Sparse Bundle Adjustment, SBA)迭代出最优的 3D 模型和相机参数(外参和内参)。

(4)多视图立体几何算法(Multi View System)逐像素地计算图像中每一个像素点对应的三维点,得到建筑结构稠密点云。在初步获取的三维点云模型基础上,考虑本研究中混凝土建筑结构具有大尺度的特点,为兼顾后续处理步骤的计算效率和精度,进行下采样和去噪的结构点云后处理步骤。最终,该方法输出高质量的建筑结构点云模型,为后续的裂缝定位和追踪提供基准的世界坐标系。

1.2 基于视点定位的裂缝自动定位

得到建筑结构整体点云模型后,自动定位出仅分布在局部区域内的裂缝,对于大型基础设施的结构健康监测具有重要意义。基于现有研究,裂缝图片的检测可依靠已开发的深度学习模型快速实现^[9],因此裂缝自动定位的重点为基于图片索引出其在点云模型中的三维坐标。为此,本文提出一种视点定位方法,获取拍摄到裂缝图像的对应相机位

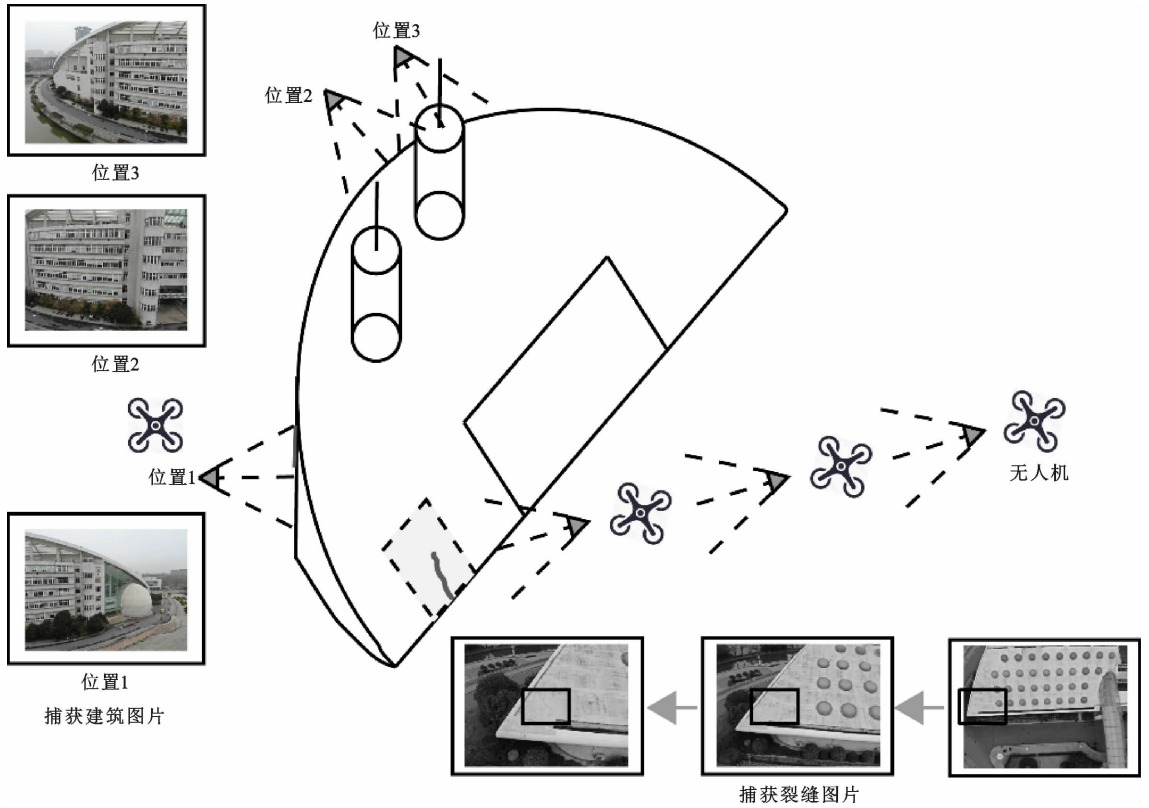


图 2 目标建筑结构及裂缝图片获取

Fig. 2 Image acquisition of target building structure and cracks

置,基于点云三维模型进行可视化与坐标输出,实现裂缝的自动化定位。

首先,基于已获取的建筑结构点云模型建立世界坐标系。世界坐标系与相机坐标系的数学关系可表示为

$$P_C = R P_O + T \quad (1)$$

式中: P_C 为相机坐标系中点的坐标值; P_O 为世界坐标系中对应点的坐标值; R 为世界坐标系和相机坐标系的相对旋转向量; T 为世界坐标系和相机坐标系的相对平移向量。

在公式(1)的基础上引入PnP算法,通过一组匹配好的三维重建点和二维映射点求解两幅图像之间的运动关系。而SBA算法作为PnP的求解算法,基于重投影误差最小化迭代相机位姿,求解各个相机的 R 和 T 。

因为PnP算法返回的是向量形式,无法直接用于坐标变换。因此旋转向量 R 需要基于Rodrigues旋转公式转换为旋转矩阵,即

$$R_{\text{matrix}} = \cos(\theta)I + [1 - \cos(\theta)]nn^T + \sin(\theta)n^\wedge \quad (2)$$

式中: R_{matrix} 为旋转矩阵; I 为单位矩阵; n 为旋转向量的单位向量; θ 为旋转向量的模长; n^\wedge 为 n 的反对称矩阵。

相机原点在相机坐标系中的坐标为 $(0,0,0)$,所以根据公式(1)可解得相机在世界坐标系下的坐标 P_O 为

$$P_O = -R_{\text{matrix}}^{-1}T \quad (3)$$

式中: R_{matrix}^{-1} 为旋转矩阵 R_{matrix} 的逆矩阵。

在获取了相机在世界坐标系下的坐标 P_O 后,以此为视点进行定位,输出此相机位置拍摄的裂缝图片在点云模型中的三维坐标。裂缝在点云中的坐标可进行记录存档,为后续的裂缝扩展监测提供参考数据。同时,实现局部裂缝在全局模型中相对位置的可视化,为建筑管养和运维人员快速提供裂缝位置指引,提高人工校核与维护的效率。本方法进一步设置了可自适应调整的观测方向参数,以获取裂缝在三维点云模型中的最佳定位效果。

1.3 基于点云映射与配准的裂缝宽度量化及追踪

混凝土结构裂缝在多种因素影响下会持续扩展,因此对裂缝的扩展状态和宽度变化持续追踪可以更好地评估和检测裂缝的发展趋势和危害等级,为结构的健康监测提供指导依据。因此,本文提出基于点云映射与配准的裂缝宽度量化及追踪方法,实现裂缝扩展期间宽度的准确量化以及长期追踪。

因三维重建过程中存在不可避免的误差,裂缝

区域的点云集一般会出现三维离散噪点。裂缝边缘点易与噪点混淆,会干扰裂缝形态的判定,增大裂缝宽度量化的难度。因此,本研究首先通过主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)拟合出裂缝所在平面,然后将目标裂缝区域的点云映射至拟合平面,实现对裂缝点云集进行降维并排除噪点的干扰,得到优化后的裂缝边缘特征点。

在确定出裂缝边缘点后,通过目标建筑上易获取的已知构件尺寸建立尺度基准,进而准确量化裂缝宽度。裂缝宽度的物理尺寸 w 可表示为

$$w = \frac{D}{D'} w' \quad (4)$$

式中: D 为已知构件的物理尺寸; D' 为已知构件的点云尺寸; w' 为选取的裂缝边缘点的点云距离。

图 3 为裂缝追踪算法流程图。依据检测需求定期部署无人机采集裂缝图像,重建出不同时期的裂缝点云集。然后裂缝点云集与建筑结构点云模型基于 ICP(Iterative Closest Point) 算法进行配准,依据配准的坐标位置与已有裂缝进行重合性判定。当裂缝被判定为新增裂缝时,该裂缝的坐标与量化宽度被记录,为后续裂缝监测提供依据。当判定为某条已有裂缝后,再次重复宽度量化步骤,比对已记录的裂缝宽度数据,可得到裂缝宽度变化。

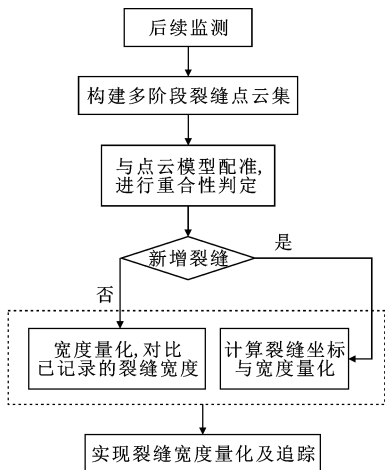


图 3 裂缝追踪算法流程图

Fig. 3 Flowchart of crack tracking algorithm

2 试验验证与误差分析

本文提出的混凝土结构裂缝定位及追踪的 3 个模块集成于 Web 平台,现基于在役大型混凝土结构,通过试验进行可行性与精度验证。

2.1 试验场地及设备

在本研究中,采用大疆 M300RTK 无人机搭载

H20T 相机进行原始图像数据采集,相关参数如下:

- ①相机和无人机总质量为 7.4 kg;
 - ②相机传感器尺寸为 1/1.7;
 - ③图像像素分辨率为 $5\ 184 \times 3\ 888$;
 - ④相机镜头焦距为 6.83~119.94 mm;
 - ⑤相机对角视场为 $4^\circ \sim 66.6^\circ$ 。
- 本试验选择某混凝土结构(图 4)作为研究目标,其长度为 190 m,宽度为 60 m,高度为 43 m。

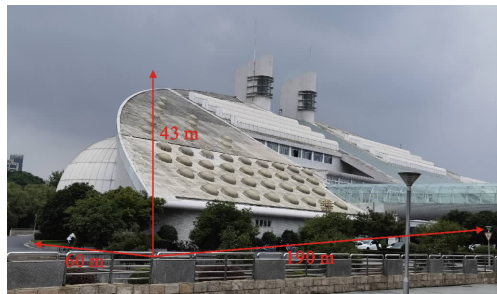


图 4 目标建筑结构

Fig. 4 Target building structure

2.2 三维点云重建模型

初步采集图像 487 张,经过综合筛选后保留 281 张作为图像数据集。采用第 2.1 节所述方法进行 SfM 重建后,得到包含 1 645 032 个点的三维模型,如图 5 所示。

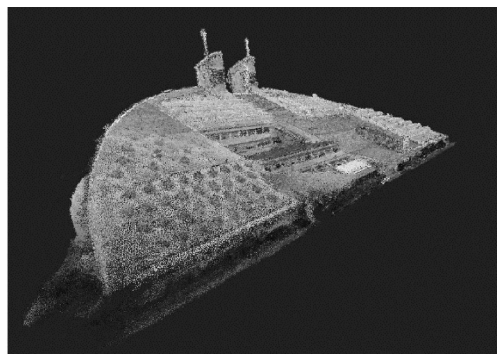


图 5 目标建筑结构点云模型

Fig. 5 Point cloud model of target building structure

为了验证三维点云重建方法的整体精度,在不同方向上选取多处结构构件进行实地测量,并在点云模型中以建筑整体尺度为基准进行尺寸计算,结果如表 1 所示。三维重建结果在不同方向上的平均相对误差为 2.79%,体现了良好的重建精度。

2.3 裂缝自动化定位

基于重建的目标建筑结构三维模型,选取图 6 所示的 10 处裂缝进行裂缝自动化定位准确性与效率的试验验证。

在未进行自动化定位时,观测窗口用以呈现整体建筑点云模型。引入本文提出的自动定位方法

表 1 目标建筑结构的三维模型精度

Table 1 3D model accuracy of target building structure

测量构件	实测尺寸/m	计算尺寸/m	相对误差/%	平均相对误差/%
构件 1	33.71	33.35	-1.04	2.79
构件 2	19.00	18.09	-4.80	
构件 3	65.96	67.41	2.19	
构件 4	22.38	21.50	-3.93	
构件 5	19.87	19.11	-3.86	
构件 6	26.09	25.85	-0.93	

后,观测窗口得以提供裂缝的空间位置,实现基于图片索引裂缝的空间坐标,并索引其与整个建筑物的相对位置,具体方式为高亮拍摄该裂缝的相机位置。试验结果表明,观测窗口呈现的裂缝位置全部准确。由于每条裂缝对应的相机位姿信息是由第 1.2 节中 PnP 算法计算得到的,实现了相机位姿和裂缝位置的绑定,所以定位误差主要由三维重建误差与 PnP 算法误差导致。而文中三维重建的误差为 2.79%, PnP 算法误差约为 0.5%^[22],因此计算误差对裂缝

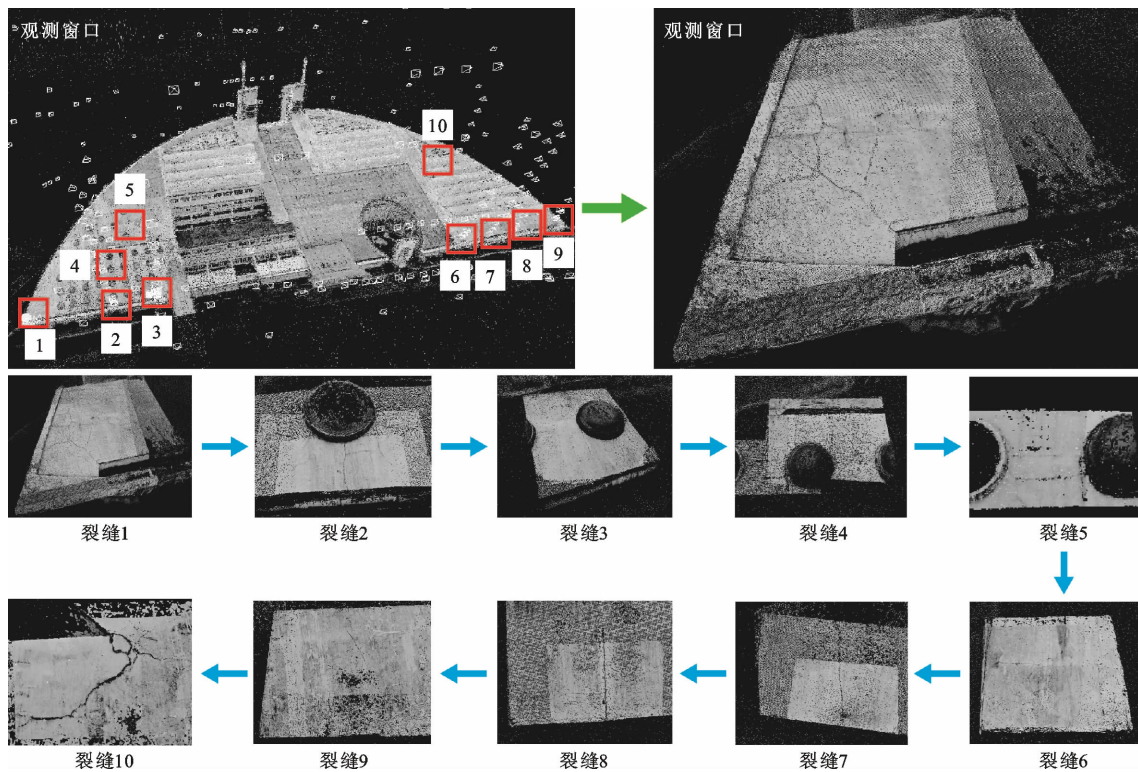


图 6 裂缝自动定位的可视化

Fig. 6 Visualization of automatic crack localization

定位与显示效果的影响较小。为验证裂缝自动化定位的效率,本试验按顺序对每条裂缝的定位时间进行了统计,结果如表 2 所示,裂缝的平均定位时间为 38.09 μ s。

对于裂缝自动定位,Hamdan 等^[23]提出了一种基于二维图像特征和三维重建的混凝土梁裂缝定位方法,但其裂缝坐标由人工选点插值获取,且裂缝形状特征提取不明显。本研究提出视点定位算法可自适应调整观测方向参数,获取裂缝在三维点云模型中的最佳定位效果。与以往的方法相比,该方法可自动提供裂缝相对于整个建筑结构的相对位置,快速引导人工校核与现场修复,极大提升建筑管养和运维效率。

表 2 裂缝自动定位耗费时间

Table 2 Time spent of automatic crack localization

裂缝	定位时间/ μ s	平均定位时间/ μ s
任意视角-裂缝 1	113.04	38.09
裂缝 1-裂缝 2	52.98	
裂缝 2-裂缝 3	20.02	
裂缝 3-裂缝 4	25.15	
裂缝 4-裂缝 5	15.87	
裂缝 5-裂缝 6	21.97	
裂缝 6-裂缝 7	23.93	
裂缝 7-裂缝 8	16.85	
裂缝 8-裂缝 9	36.13	
裂缝 9-裂缝 10	54.93	

2.4 裂缝宽度量化及追踪

基于第 2.3 节提供的裂缝空间位置对裂缝扩展

信息(裂缝宽度)进行追踪。首先利用无人机定期采集该批裂缝各自不同时期的图像,随后通过三维重建获取多组裂缝点云集,并将更新的裂缝点云集与建筑结构点云模型进行配准,以此实现裂缝宽度的量化与追踪。本试验首先选取较宽的不规则裂缝上的两点(点1和点2)进行宽度量化及追踪验证,结果如图7所示。可以看出,其裂缝宽度均大于1 mm。

表3为宽裂缝不同发展阶段计算宽度与测量宽度的对比,其中裂缝宽度 w 由公式(4)计算得到,裂缝宽度真值由裂缝测宽仪测得。在对裂缝扩展的多

个阶段进行追踪时,可得到裂缝宽度的实时扩展数据。可以看出,点1处宽度由1.27 mm扩展至3.89 mm,点2处宽度由1.40 mm扩展至3.32 mm。总体而言,在裂缝扩展的不同阶段,点1和点2计算宽度的平均相对误差分别为3.37%和5.83%。为进一步验证本文方法针对较细裂缝的追踪量化能力,对裂缝宽度为0.2~0.6 mm的正常使用结构裂缝进行了试验,结果如表4所示。可以看出,细裂缝点1处的裂缝宽度由0.24 mm扩展至0.54 mm,细裂缝点2处的裂缝宽度由0.23 mm扩展至0.58 mm。总体而言,在裂缝扩展的不同阶段,点1和点2计算

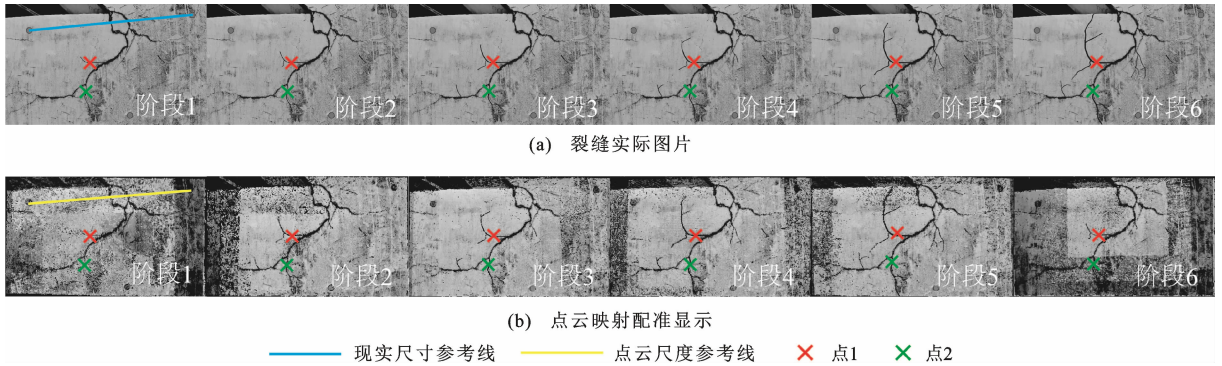


图7 裂缝不同发展阶段

Fig. 7 Different crack propagation stages

表3 宽裂缝不同发展阶段计算宽度与测量宽度的对比

Table 3 Comparison of calculated width and measured width of wide cracks at different propagation stages

发展阶段	宽裂缝点1				宽裂缝点2			
	裂缝计算宽度/ mm	裂缝宽度真值/ mm	相对误差/%	平均相对 误差/%	裂缝计算宽度/ mm	裂缝宽度真值/ mm	相对误差/%	平均相对 误差/%
阶段1	1.27	1.26	0.63	3.37	1.40	1.12	5.98	5.83
阶段2	1.39	1.30	6.77		1.56	1.25	2.08	
阶段3	2.43	2.23	9.06		2.08	1.82	9.95	
阶段4	2.48	2.47	0.28		2.32	2.20	5.64	
阶段5	3.25	3.23	0.50		3.31	2.97	7.34	
阶段6	3.89	3.77	3.00		3.32	3.19	4.01	

表4 细裂缝不同发展阶段计算宽度与测量宽度的对比

Table 4 Comparison of calculated width and measured width of minute thin cracks at different propagation stages

发展阶段	细裂缝点1				细裂缝点2			
	裂缝计算宽度/ mm	裂缝宽度真值/ mm	相对误差/%	平均相对 误差/%	裂缝计算宽度/ mm	裂缝宽度真值/ mm	相对误差/%	平均相对 误差/%
阶段1	0.26	0.24	8.33	6.14	0.22	0.23	-4.35	7.41
阶段2	0.28	0.30	-6.67		0.32	0.28	14.29	
阶段3	0.37	0.36	2.78		0.40	0.37	8.11	
阶段4	0.40	0.40	0.00		0.38	0.40	-5.00	
阶段5	0.45	0.44	2.27		0.46	0.43	6.98	
阶段6	0.43	0.45	-4.44		0.51	0.48	6.25	
阶段7	0.44	0.54	-18.52		0.54	0.58	-6.90	

得到的裂缝宽度 w 的平均相对误差分别为 6.14% 和 7.41%。由此可见,通过本文方法获取的裂缝宽度具有较高的准确性,可对裂缝进行有效的宽度量化和追踪。本文研究成果可以准确地评估和检测裂缝的发展趋势,为大型结构的健康监测提供依据。

3 结语

(1)通过对无人机采集图像进行综合筛选,提出包含后处理的运动恢复结构算法,实现了针对大型混凝土结构准确的点云三维建模,相对误差小于 3%。

(2)提出视点定位算法,仅需裂缝图片索引便可实现裂缝三维坐标的自动化输出。可自适应调整观测方向参数,获取裂缝在三维点云模型中的最佳定位效果,裂缝的平均定位时间为 38.09 μ s。

(3)提出目标裂缝区域的点云映射方法,优化裂缝边缘特征并提升裂缝宽度量化精度。通过进一步将整体模型与更新的裂缝点云集配准,可实现裂缝扩展信息(裂缝宽度)的准确追踪,试验相对误差小于 8%。

(4)未来可与深度学习方法结合,实现裂缝及多类别病害图片的自动检测和分类,与本研究的方法衔接,以满足大型基础设施日益增多的病害识别及追踪的需求。

参考文献:

References:

- [1] 丁威,马亥波,舒江鹏,等.基于残差网络的混凝土结构病害分类识别研究[J].建筑科学与工程学报,2022,39(4):127-136.
DING Wei, MA Haibo, SHU Jiangpeng, et al. Research on classification and recognition of concrete structure diseases based on residual network[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(4):127-136.
- [2] 杨铄,许清风,王卓琳.基于卷积神经网络的结构损伤识别研究进展[J].建筑科学与工程学报,2022,39(4):38-57.
YANG Shuo, XU Qingfeng, WANG Zhuolin. Research progress on structural damage detection based on convolutional neural networks[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(4):38-57.
- [3] 邵旭东,罗军,曹君辉,等.钢-UHPC 轻型组合桥面结构试验及裂缝宽度计算研究[J].土木工程学报,2019,52(3):61-75.
SHAO Xudong, LUO Jun, CAO Junhui, et al. Experi-

mental study and crack width calculation of steel-UH-PC lightweight composite deck structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(3):61-75.

- [4] DANCYGIER A N, ARINSKI Y S. Effect of cracking localization on the structural ductility of normal strength and high strength reinforced concrete beams with steel fibers[J]. International Journal of Protective Structures, 2019, 10(4):457-469.
- [5] WANG X, ZHAO Z H, LI N, et al. Pavement crack analysis by referring to historical crack data based on multi-scale localization[J]. PLOS ONE, 2020, 15(8):e0235171.
- [6] LI C, XU P, NIU L, et al. Tunnel crack detection using coarse-to-fine region localization and edge detection[J]. WIREs Data Mining and Knowledge Discovery, 2019, 9(5):e1308.
- [7] ZHANG B, ZHOU Z, LI X. A Crack monitoring method for concrete structures[J]. Intelligent Automation & Soft Computing, 2010, 16(5):763-770.
- [8] QI C, WEI X Y, JUN L, et al. A research on fatigue crack growth monitoring based on multi-sensor and data fusion[J]. Structural Health Monitoring, 2021, 20(3):848-860.
- [9] 舒江鹏,李俊,马亥波,等.基于特征金字塔网络的超大尺寸图像裂缝识别检测方法[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(3):29-36.
SHU Jiangpeng, LI Jun, MA Haibo, et al. Crack detection method based on feature pyramid network for super large-scale images[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(3):29-36.
- [10] 丁威,俞珂,舒江鹏.基于深度学习和无人机的混凝土结构裂缝检测方法[J].土木工程学报,2021,54(增1):1-12.
DING Wei, YU Ke, SHU Jiangpeng. Method for detecting cracks in concrete structures based on deep learning and UAV[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(S1):1-12.
- [11] LIU Y, NIE X, FAN J, et al. Image-based crack assessment of bridge piers using unmanned aerial vehicles and three-dimensional scene reconstruction[J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2020, 35(5):511-529.
- [12] KIM D, KWAK Y, SOHN H. Accelerated cable-stayed bridge construction using terrestrial laser scanning [J]. Automation in Construction, 2020, 117:103269.
- [13] VETRIVEL A, GERKE M, KERLE N, et al. Identification of damage in buildings based on gaps in 3D

- point clouds from very high resolution oblique airborne images[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 105: 61-78.
- [14] MOMTAZ DARGAHI M, KHALOO A, LATTANZI D. Color-space analytics for damage detection in 3D point clouds[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2022, 18(6): 775-788.
- [15] LIU X, DYKE S J, YEUM C M, et al. Automated indoor image localization to support a post-event building assessment[J]. *Sensors*, 2020, 20(6): 1610.
- [16] 吕忠达. 杭州湾跨海大桥关键技术研究及实施[J]. *土木工程学报*, 2006(6): 78-82, 87.
LU Zhongda. Key technologies for Hangzhou bay bridge[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006(6): 78-82, 87.
- [17] KONG S, FAN J, LIU Y, et al. Automated crack assessment and quantitative growth monitoring [J]. *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2021, 36(5): 656-674.
- [18] 邱志强, 于起峰. 从建筑物序列图像恢复三维结构[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2003(3): 13-15, 25.
- QIU Zhiqiang, YU Qifeng. 3D building structure from image sequence [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2003(3): 13-15, 25.
- [19] PANTOJA-ROSETO B G, ACHANTA R, KOZINSKI M, et al. Generating LOD3 building models from structure-from-motion and semantic segmentation[J]. *Automation in Construction*, 2022, 141: 104430.
- [20] QIU W, JIAN L, CHENG Y, et al. Three-dimensional reconstruction of tunnel face based on multiple images [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 1-11.
- [21] ELKHRACHY I. 3D Structure from 2D dimensional images using structure from motion algorithms [J]. *Sustainability*, 2022, 14(9): 5399.
- [22] LI S, XU C, XIE M. A robust $O(n)$ solution to the perspective-n-point problem [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(7): 1444-1450.
- [23] HAMDAN A H, TARABEN J, HELMRICH M, et al. A semantic modeling approach for the automated detection and interpretation of structural damage [J]. *Automation in Construction*, 2021, 128: 103739.