

基于无人机三维重构技术的桥梁高墩施工外观质量检测方法研究

殷新锋¹, 陈涛¹, 黄胄¹, 全阳¹, 孟进²

(1. 长沙理工大学 土木与环境工程学院, 长沙 410114;

2. 湖北交投建设集团有限公司 武汉 430070)

摘要: 针对高墩所处的复杂地形限制, 传统的施工质量检测方法耗费大量人力、物力和时间, 且检测精度易受环境条件影响较大。为此, 提出了一种基于无人机三维重构模型方法, 旨在实现高墩施工的智能化质量检测。该方法结合定点环绕与分层飞行的数据采集策略, 利用无人机实现全方位的数据获取。通过提取图像中的目标特征, 采用坐标转换技术将关键像素点映射到三维空间, 再借助不规则三角网表面重建方法, 生成精细化的三维模型。最后, 通过采用基于YOLOv8-LDFM的目标检测算法对采集的图像进行混凝土缺陷检测, 检验高墩的外观质量。对正在施工的某座大桥高墩进行现场测试, 完成设定的六轮飞行后, 图像的航向、旁向重叠率分别达到了75.8%、84.2%。将图像进行坐标转换三维重构后, 生成高墩三维模型的 R_k 均小于1.0。该研究提出的目标检测算法对高墩外观质量进行了检测, 发现了3处麻面和2处渗水, 检测效果较好。三维重构模型最大的误差率为0.2%, 符合工程设计精度要求, 验证了该方法的适用性与其较高的精度。

关键词: 高墩施工; 无人机; 三维重构; 可视化; 施工检测

中图分类号: U445.55+9

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2025.20.016

Appearance quality inspection method of bridge high piers construction based on UAV 3D reconstruction technology

YIN Xinfeng¹, CHEN Tao¹, HUANG Zhou¹, QUAN Yang¹, MENG Jin²

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. Hubei Communications Investment Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: For the complicated terrain where the high pier is located, the traditional construction quality inspection method consumes a lot of manpower, material resources and time, and the inspection accuracy is susceptible to environmental conditions. Hence, a three-dimensional reconstruction modelling method based on an unmanned aerial vehicle was proposed, aiming at intelligent quality inspection of high pier construction. Data acquisition strategy of fixed-point encircling and layered flight were combined, utilizing unmanned aerial vehicles to achieve a full range of data acquisition. By extracting the target features in the image, the key pixel points were mapped to the 3D space using the coordinate transformation technique, and then the refined 3D model was generated with the help of irregular triangular mesh surface reconstruction method. Finally, the appearance quality of the high piers was examined by detecting concrete defects in the captured images with the target detection algorithm based on YOLOv8-LDFM. A field test was conducted on a bridge under construction. After completing the set six rounds of flights, the images achieved 75.8% and 84.2% of the heading and side overlap respectively. After the images were subjected to coordinate conversion and 3D reconstruction, the R_k was less than 1.0 at all locations of the generated high-pier 3D model. The target detection algorithm proposed in this study detected the cosmetic quality of the high piers and found three pockmarks and two seepages, which showed good detection performance. The maximum error rate of the 3D reconstruction model is 0.2%, which meets the requirements of engineering design accuracy and verifies the applicability of the method with its high accuracy.

Key words: high-pier construction; unmanned aerial vehicle; 3D reconstruction; visualization; construction inspection

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ30044)

第一作者 殷新锋 男 博士 教授, 1980年生

收稿日期: 2025-01-10 修改稿收到日期: 2025-05-08

E-mail: yinxinfeng@163.com

随着中国国家中西部高速公路、铁路建设加速,出现了越来越多的山区高墩大跨度桥梁^[1]。高墩施工检测因其安全风险高和高空作业难度大等问题,成为桥梁施工检测中的难点^[2]。传统的检测手段,如全站仪、GNSS-RTK^[3]和位移传感器^[4]等设备,虽然能够提供准确的检测数据,但这些方法通常耗费大量的人力、物力和时间,难以适应桥梁施工工程对效率和成本控制的要求^[5]。因此,开发一种智能化、自动化的高效检测方法,已成为解决高墩施工检测问题的关键需求。

在过去的研宄中,诸多学者提出了针对桥墩检测的改进方法^[6-8]。Liu 等^[9]使用高精度运动倾斜仪检测在车辆荷载下桥墩的位移,并结合有限元模型评估了桥墩的稳定性。丁克良等^[10]通过全站仪自由设站技术实现了无接触测量,大幅提高了检测的灵活性和精度。刘亚杰等^[11]则提出了桥梁立柱偏心无接触测量法,有效提升了检测效率。尽管这些方法提升了检测的精准度与效率,但仍受桥梁施工位置及气候影响较大,其智能化程度不足,无法实现智能化或实时检测的需求。

基于无人机图像处理技术的桥梁结构检测利用无人机代替人工视察进行巡检,实现了智能化检测目的^[12-14]。Jiang 等^[15]提出了快速确定建筑工地标高的三维场景重建方法,根据虚拟模型确定实际高程。Tian 等^[16]利用无人机图像数据,建立了施工现场的三维地质模型,实现了复杂地形下的高效检测。Chen 等^[17]提出了无人机结合三维场景重建的桥梁检测方法,能够快速获取全面的结构数据,并为后续的数字化管理提供有力支持。这些研究表明,无人机图像三维建模技术为桥梁检测带来了新的可能性。然而,当前的研究大多集中于低高度结构的检测,或是侧重于特定场景的建模^[18],对复杂地形下高墩结构的全面检测仍存在局限性^[19]。现有方法难以有效平衡高精度检测与施工现场的实际应用需求,尤其是无人机如何应对高墩施工时的数据连续性和全方位覆盖问题,仍需进一步探讨。

鉴于此,本研究结合图像处理和三维场景重建技术,提出了一种智能化的高墩施工质量检测方法。该方法结合无人机定点环绕飞行与分层航线的图像数据采集策略,获取能提升建模效率的桥墩图像数据。研究采用坐标原理转换算法与不规则三角网表面重建方法,生成高精度的三维模型。对于高墩的外观缺陷,采用基于 YOLOv8-LDFM 的目标检测算法进行检测。通过实际工程试验验证,证明其能够实时、精准地检测高墩施工质量。此外,该方法在显著提高检测精度的同

时,提升了施工安全性和工作效率。

1 高墩施工质量检测方法研究框架

本研究提出的方法包括三个部分:图像数据采集、三维重构高墩模型与外观缺陷检测、现场测试调查与数值分析。图像数据采集通过设置具有针对性的无人机摄影策略获取建模图像;基于坐标转换算法对图像数据进行特征点提取与匹配,形成点云数据网;建立后的图像点云数据模型存在空洞、模糊、缺失等问题,还需采用不规则的三角网格表面重建方法对生成的模型进行下一步运算。最终生成的三维模型反映了实际物体的表面细节特征,可从中获取施工质量的检测数据。采用基于 YOLOv8-LDFM 的目标检测算法对高墩的外观缺陷检测,对模型进行训练与学习,并进行消融试验,验证模型的检测精度较高。本研究提出的方法框架如图 1 所示。

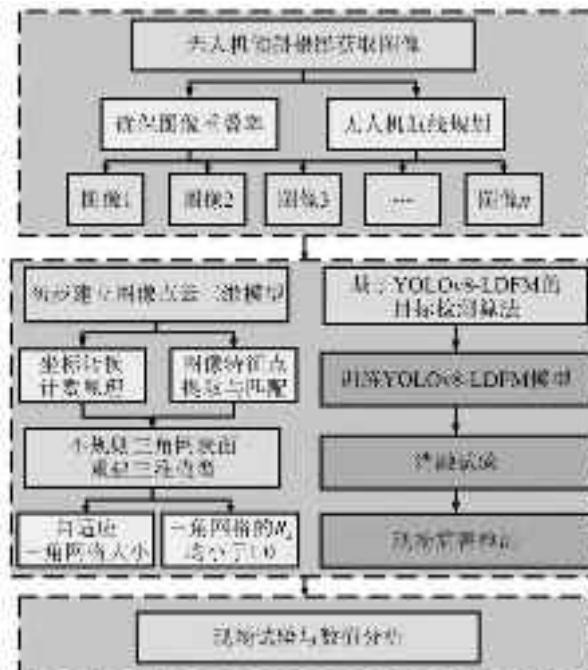


图 1 施工质量检测方法框架

Fig. 1 Framework of quality inspection methods

2 获取图像数据

2.1 基于无人机倾斜摄影测量的航线规划

利用无人机倾斜摄影的飞行方式下,进行预飞行获取桥墩的建模图像数据,然后计算出采集到图像的重叠率。进行基于图像的场景三维重建需要每个相邻图像至少 50% 的重叠率^[20]。随后以预飞行采集得到的图像重叠率为依据规划无人机倾斜摄影测量航线,进行现场桥墩结构倾斜影像数据的采集。

本研究采取结合了定点环绕与分层飞行方法,确

保影像数据具有高连续性和重叠率,如图2所示。对于圆形和矩形截面的桥墩,无人机最简单的检测飞行路径为圆形。针对不同尺寸的桥墩,将桥墩的矩形截面简化并替换为它们的外接圆,在水平方向上,无人机的飞行路径为同心圆的外圆。针对不同高度的桥墩,在垂直方向上,设置无人机分层航线,以获取完整的桥墩纵向信息。通过设定无人机的飞行半径、高度、相机的倾斜角度及相邻两张照片前后曝光的间距,快速、高效地收集用于满足建模重叠率要求的图像数据。无人机图像重叠率在2.2节有详细的介绍。

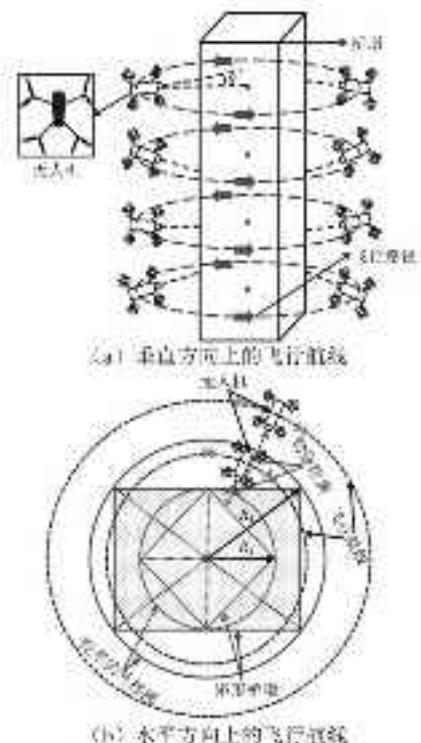


图2 基于倾斜摄影的数据采集方法

Fig. 2 The data acquisition method based on tilt photography

2.2 无人机图像重叠率计算

无人机图像重叠率可分为航向重叠率与旁向重叠率,它们的计算离不开物体与相机间的距离(成像距离) Z 。在每一轮飞行后,只需选取具有代表性的两张相邻的图像进行重叠率的计算,将采集的图像集轻量化,提升三维建模效率。在摄影测量学领域,一旦成像距离 Z 被确定,影像高在被摄物体投影大小 H 和影像宽在被摄物体投影大小 W 也随之被确定,计算公式如式(1)和(2)所示。

$$H = (h \cdot Z) / f \quad (1)$$

$$W = (w \cdot Z) / f \quad (2)$$

$$R_1 = (H - E) / H \quad (3)$$

$$R_2 = (W - F) / W \quad (4)$$

式中: h, w 分别为相机传感器的高度和宽度,mm; f 为相机的焦距,mm; R_1 为航向重叠率; R_2 为旁向重叠率; E 为相邻两张照片前后曝光的间距; F 为相邻两条

航线间的间距。

R_1 指的是在同一条飞行航线上,相邻图像之间的重叠部分占总拍摄范围的比例,如图3所示。 R_1 通常用于表示沿飞行方向的图像重叠程度,计算 R_1 如式(3)所示。通过设置 E ,确保 R_1 在50%以上。

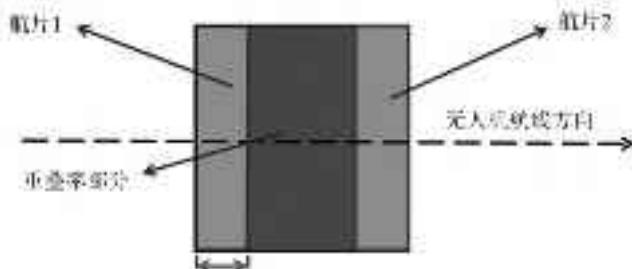


图3 航向重叠率的计算示意图

Fig. 3 Diagram of the calculation of the heading overlap rate

R_2 指的是在相邻航线之间,影像之间的重叠部分占总拍摄范围的比例,如图4所示。 R_2 通常用于表示在横向(与飞行方向垂直)上的图像重叠程度,计算 R_2 如式(4)所示。通过设置 F ,确保 R_1 也在50%以上。当无人机相机倾斜角度相同时, F 与两张航片未重叠的长度相等。

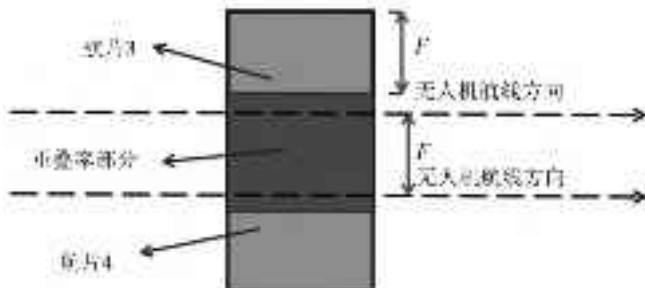


图4 旁向重叠率的计算示意图

Fig. 4 Diagram of the calculation of the side overlap rate

3 三维重构模型与目标检测算法

3.1 初步建立图像点云三维模型

图像转换中的三维与二维坐标系,如图5所示,其中 $O_w-X_wY_wZ_w$ 为世界坐标系,用于描述相机位置,单位为m。 $O_c-X_cY_cZ_c$ 为相机坐标系,光心 O_c 为原点,单位为m。 $O-XY$ 为图像坐标系,光心 O 为图像中点,单位为mm。 uv 为像素坐标系,原点为图像左上角,单位为pixel。

三维与二维坐标中的关键参数,其中 P_1 为世界坐标系中的一点,在世界坐标系中的坐标为(X_w, Y_w, Z_w)。 P_2 为相机坐标系的一点,在相机坐标系中的坐标为(X_c, Y_c, Z_c)。 P_3 为图像中的成像点,在图像坐标系中的坐标为(x, y),在像素坐标系中的坐标为(u, v)。 f 为相机焦距,等于 O 与 O_c 的距离 $f = \|O - O_c\|$ 。 R 为相机坐标系变换到世界坐标系的旋转矩阵。 T 为相机坐标系变换到世界坐标系的偏移矩阵。

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$D(x, y, \sigma) = [G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)]^* I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (6)$$

$$m(x, y) = \sqrt{[L(x+1, y) - L(x-1, y)]^2 + [L(x, y+1) - L(x, y-1)]^2} \quad (7)$$

$$\theta(x, y) = \arctan \frac{[L(x+1, y) - L(x-1, y)]}{[L(x, y+1) - L(x, y-1)]} \quad (8)$$

式中: $L(x_i, y_i, \sigma_i)$ 为图像空间中第 i 层图像; $G(x_i, y_i, \sigma_i)$ 为 2 维的高斯模糊函数; $I(x_i, y_i)$ 为原始图像在位置 (x_i, y_i) 处对应的像素值; σ 为尺度空间的影响因子; * 为一个像素值与高斯核的乘积之后的累加和(卷积操作); $D(x, y, \sigma)$ 为生成的高斯差分图像; k 为相邻高斯尺度空间的比例因子; $L(x, y, k\sigma)$ 和 $L(x, y, \sigma)$ 为相邻尺度的高斯图像; $m(x, y)$ 为特征点的梯度模值; $\theta(x, y)$ 为特征点的梯度方向。

通过坐标转换原理,如式(5)所示,完成像素坐标系(图像上的点)与世界坐标系(三维坐标)之间的转换。根据式(6),建立图像高斯尺度空间,再使用差分高斯构建高斯金字塔进行极值检测,实现特征点提取,利用图像梯度方法求取该特征点的稳定方向,对提取到的特征点,根据式(7)和式(8),采集其在高斯金字塔图像邻域窗口内像素的梯度和方向分布,实现特征点的匹配^[21]。生成的图像点云模型存在空洞、模糊与图像点云重叠等问题,如图6所示,需进行模型拟合操作。

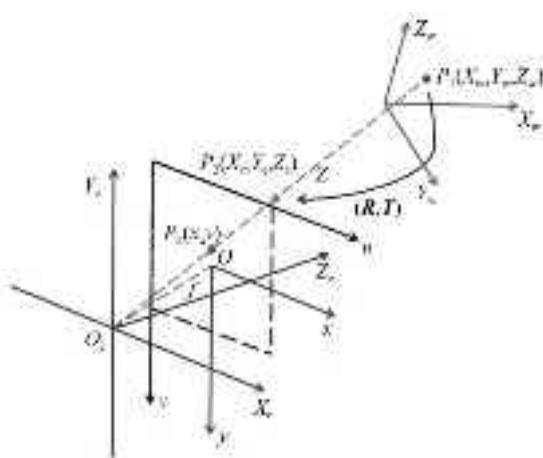


图5 立体视觉中坐标系之间的关系

Fig. 5 Relationship between coordinate systems in stereo vision

3.2 不规则三角网表面重建方法拟合模型

在高墩施工质量检测中,采用不规则三角网表面重建方法进行三维场景建模。不规则三角网表面重建方法的核心是将给定的点集生成一个三角网格,使任何三角形的外接圆中不包含其他点。为了避免生成有尖锐角的三角网格,需生成外接圆无量纲半径 R_k

小于1的三角网格,可以最大限度地保证三角网格的质量。

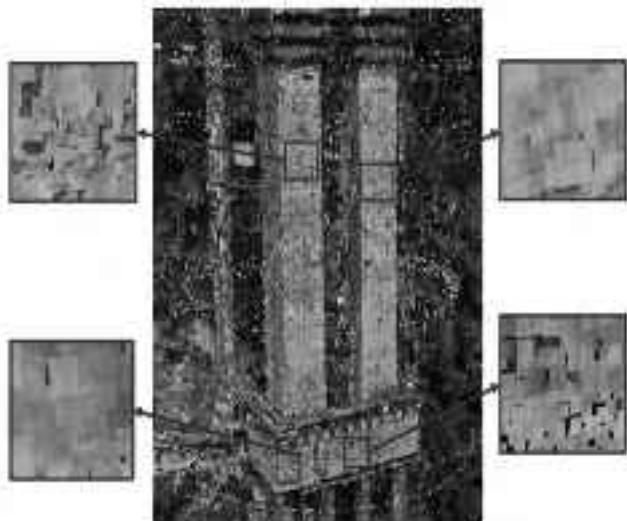


图6 图像点云模型

Fig. 6 Image point cloud model

R_k 的计算过程如下所示:①边界点的长度标尺 L_N 为相邻的两边长度平均值 $\sqrt{3}/2$ 倍,如式(9)所示。长度标尺的大小代表了边界上网格疏密的程度,网格点稠密的地方,长度标尺小,而稀疏处长度标尺大;②圆心的长度标尺 L_k 是由边界点的长度标尺插值而得到的,如式(10)所示;③外接圆无量纲半径 R_k 则通过外接圆半径 r_k 与 L_k 之间的比值得到,如式(11)所示。 R_k 的值越接近正三角形的 $R_k(2/3)$,模型拟合效果越好。

$$\begin{cases} L_N = \frac{l_{N-M} + l_{N-P}}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \\ L_M = \frac{l_{N-M} + l_{M-P}}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \\ L_P = \frac{l_{N-P} + l_{M-P}}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \end{cases} \quad (9)$$

$$L_k = \frac{\frac{L_N}{r_k} + \frac{L_M}{r_k} + \frac{L_P}{r_k}}{\frac{1}{r_k} + \frac{1}{r_k} + \frac{1}{r_k}} = \frac{L_N + L_M + L_P}{3} \quad (10)$$

$$R_k = \frac{r_k}{L_k} = \frac{3r_k}{L_N + L_M + L_P} < 1 \quad (11)$$

N, M, P 分别为三角网格的三个顶点,用一个大的三角网格 NMP 包住所有点,如图7所示。根据靠近三角网格 NMP 中心的点 j ,将三角网格 NMP 分解为三个新的三角网格 NjP, NjM, MjP 。在分解过程中,将会产生两种情况:①点 i 在三角网格 NjP 和 MjP 的外接圆内,需进行边交换操作,将公共边 jP 去掉,连接 iP, iN, iM, ij ;②点 q 在三角网格 NjM 的外接圆内,进行加边操作,连接 Nq, Mq, jq 。检查形成新的三角网格有无其他点,有则需进行边交换或加边操作,直至所有点都不在三角网格的外接圆内。

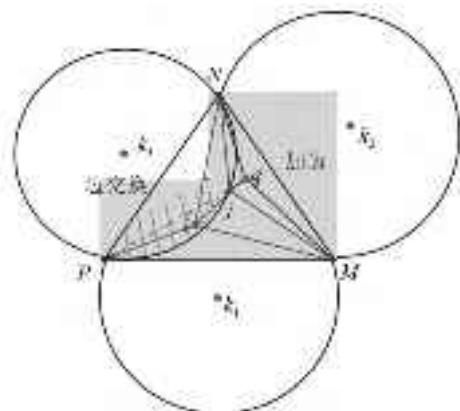


图 7 边交换与加边操作

Fig. 7 Lines switching and addition operations

不规则三角网格与固定网格有所不同,在处理复杂形状或高细节区域时,能够自适应调整网格密度,提高三维模型的表面拟合度,如图 8 所示。

3.3 基于 YOLOv8-LDFM 的目标检测算法

YOLOv8 模型以其检测速度快、精度高的优势在目标检测领域得到了广泛的关注,但在桥梁结构缺陷检测中仍存在精度不足,受背景噪声影响严重等问题。本研究对其主干结构进行了改进,如图 9 所示。将改进后的模型称之为 YOLOv8-LDFM。将主干结构中的卷积层 Conv(Convolution) 全部替换为线性可变形卷积层(Linear Deformable Convolution ,LDConv) ,

能够为不同目标提供任意形状和尺寸的卷积核,从而弥补了传统规则卷积核的局限性,将改进后的模型称之为 YOLOv8-LD。将主干结构中的快速空间金字塔池化(spatial pyramid pooling fast ,SPPF) 替换为更轻量化更高效的焦点调制模块来增强对关键特征的关注,为改进后的模型提供更高的检测精度和鲁棒性,将改进后的模型称之为 YOLOv8-FM。

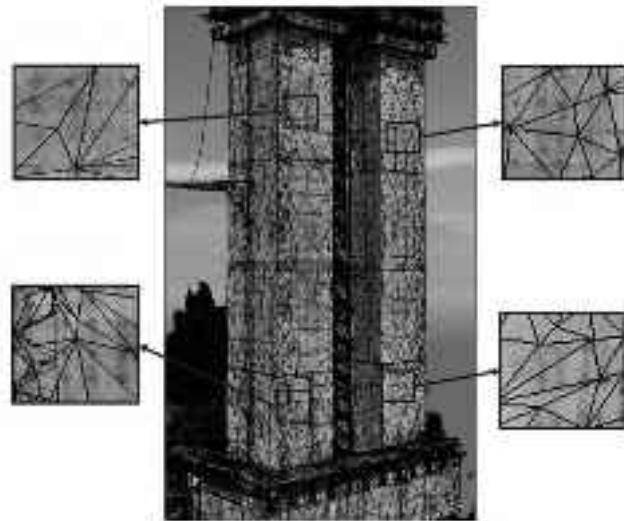


图 8 不规则三角网拟合桥墩模型图

Fig. 8 Model of the piers fitted with irregular triangular mesh

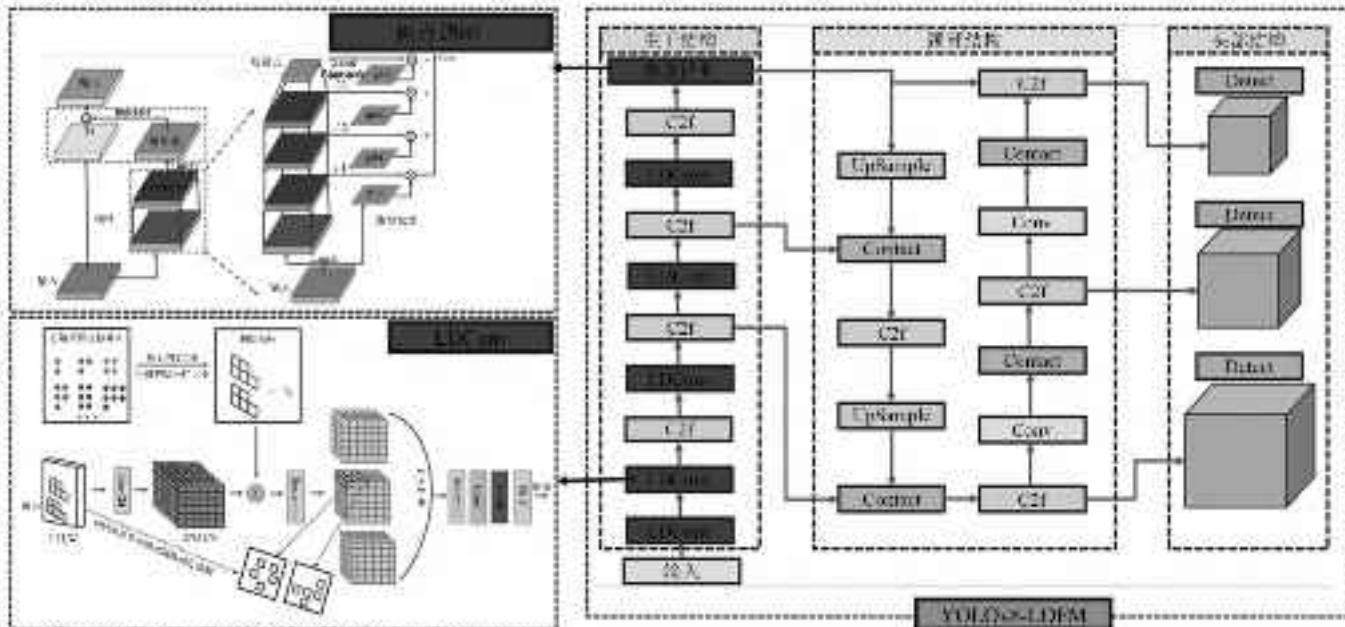


图 9 YOLOv8-LD 网络架构、LDConv 和 Focal Modulation

Fig. 9 YOLOv8-LD network architecture, LDConv and Focal Modulation

由图 9 可知,LDConv 首先通过标准卷积提取初级特征,随后基于特征映射参数化生成动态偏移量,优化采样位置的仿射变换系数,生成初始采样形状。在特征聚合阶段,依据优化后的几何坐标进行双线性插值调整,对调整后的采样形状。Focal Modulation 模块无

需对每一个尺度进行单独池化,通过调制器来动态地聚合上下文特征信息,灵活调整上下文的权重,并在多个尺度之间进行加权,减少计算开销的同时,还可以将更多细粒度的上下文特征信息输入到缺陷检测过程中,提高小缺陷的检测精度,减少背景干扰。

本研究采用 DJI MAVIC 3E 无人机拍摄某座大桥桥墩的外观缺陷图像,具体缺陷分为裂缝、麻面和渗水三种类型。无人机拍摄得到的某座大桥桥墩外观缺陷图像共 100 张,通过裁剪、旋转、曝光得到 2000 张桥墩病害照片,其中 8% (160 张) 用于验证集,92% (1840 张) 用于训练集。

改进后的模型能更有效地提取空间特征,增强对检测目标形状、纹理等细节的识别能力,进而提高检测精度。为了验证本研究改进模型中 LDConv 卷积模块和焦点调制模块的有效性,设计了消融试验,一共四组,分别是 YOLOv8、YOLOv8-LD、YOLOv8-FM、YOLOv8-LDFM 模型。

本研究的训练环境为 Windows 10 系统,显卡为 GeForce RTX4060,显存为 8G,CPU 为 i5-12600KF,运行内存为 32G,硬盘为 2T,训练轮次为 200 轮。根据精度值 P 和交并比阈值为 50 的平均精度均值 $mAP@50$ 衡量模型的性能。

当训练达到 200 轮次时,模型几乎达到了收敛状态,模型的精度与平均精度不再显著提升,因此,选择训练轮次为 200 轮次作为模型的最终训练结果,如图 10 所示。YOLOv8-LDFM 模型的 P 和 $mAP@50$ 明显高于其他模型,相较于原模型分别提升了 6.95% 和 3.95%,YOLOv8-LD 模型的 P 和 $mAP@50$ 相较于原模型分别提升了 3.06% 和 2.82%,YOLOv8-FM 模型的 P 和 $mAP@50$ 相较于原模型分别提升了 2.70% 和 0.88%,通过消融试验验证了加入 LDConv 卷积模块和 Focal Modulation 模块的 YOLOv8-LDFM 模型具有更准确的桥墩病害检测效果,如表 1 所示。

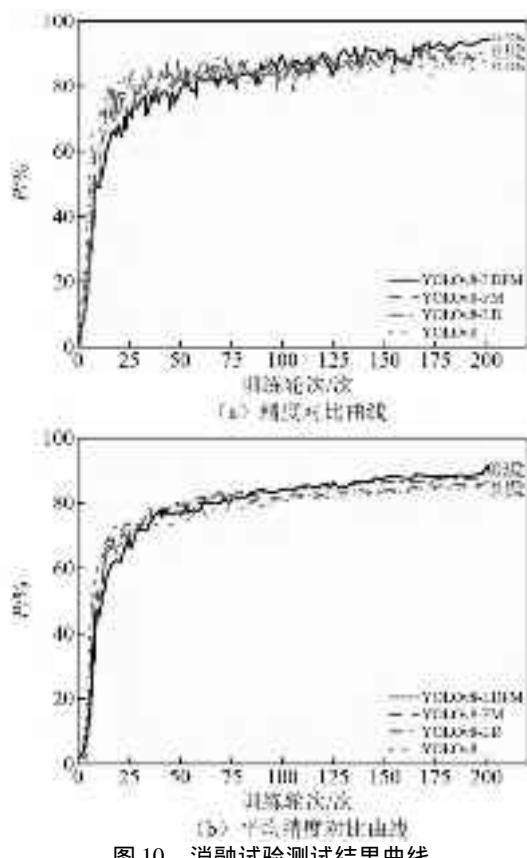


图 10 消融试验测试结果曲线

Fig. 10 The test result curve of the ablation test

表 1 消融试验结果

Tab. 1 The results of ablation test

试验编号	模型	精度值 P /%	平均精度值 $mAP@50$ /%
1	YOLOv8	87.09	85.26
2	YOLOv8-LD	90.15	88.08
3	YOLOv8-FM	89.79	86.14
4	YOLOv8-LDFM	94.04	89.21

4 现场试验

4.1 工程概况

本文以正在施工的某大桥左幅 6# 桥梁主墩为研究背景。桥梁主墩墩身采用空心薄壁墩构造,有左右两幅矩形桥墩,为双墩结构。墩身总高 110 m,主墩承台高 5.0 m。具体结构尺寸如图 11 所示。

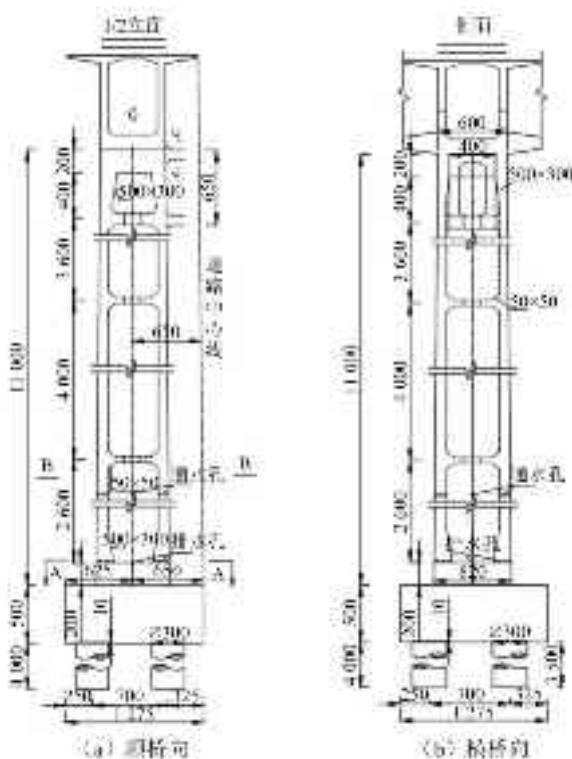


图 11 桥梁主墩立面图 (cm)

Fig. 11 Elevation of the main pier of the bridge (cm)

4.2 试验研究与参数设计

无人机的选择是一款专业级测绘版无人机 DJI MAVIC 3E,具体参数如表 2 所示。

表 2 无人机具体参数信息

Tab. 2 The information of specific parameters of the UAV

设备	参数名称	参数值
无人机	质量/g	1 050
	最长续航时间/min	39
	尺寸/mm × mm × mm	347.5 × 283.0 × 107.7
相机	传感器	4/3 CMOS
	有效像素/pixels	5 280 × 3 956
	焦距/mm	24
	倾斜角度范围/(°)	-90 ~ 35

经过不同的对照试验,最终确定无人机定点环绕半径为 20 m,无人机既不会被施工建筑影响飞行路径,也能靠近桥墩拍摄。为了达到最佳的数据采集效果,将环绕速度设置为 1 m/s,拍摄帧率为 2 s/张。为了使图像重叠率达到建模最低要求的 50%,需改变相机的俯仰角度及飞行高度以满足要求。每一轮飞行时,固定一个俯仰角度,调整飞行高度(以 5 m 的高度进行递增),共采集 6 轮数据,每轮飞行参数,如表 3 所示。

表 3 无人机飞行参数记录汇总表

Tab. 3 Summary of the recording of UAV flight parameters

飞行轮次	俯仰角度/(°)	飞行高度/m
F_1	-30	$5n (3 \leq n \leq 12, n \in R)$
F_2	-15	$5n (3 \leq n \leq 11, n \in R)$
F_3	-5	$5n (3 \leq n \leq 10, n \in R)$
F_4	5	$5n (3 \leq n \leq 9, n \in R)$
F_5	15	$5n (3 \leq n \leq 8, n \in R)$
F_6	30	$5n (3 \leq n \leq 7, n \in R)$

4.3 建立高墩施工质量的三维模型

将整理好的建模图像进行坐标转换,将图像上的点转换到三维空间中,得到初步的三维点云模型,如图 12(a) 所示。初步模型细节特征比较分散,模型不够紧凑,存在空洞、模糊、图像点云数据重叠等问题。通过不规则的三角网表面重建方法,重建出最终的三维模型,如图 12(b) 所示。

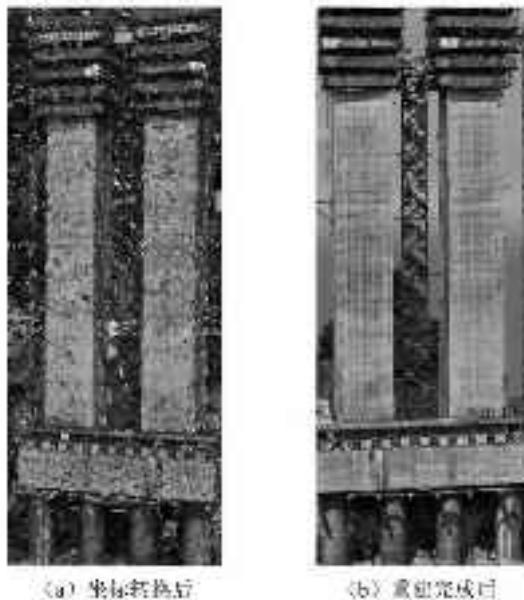


图 12 三维建模过程中不同时期效果图

Fig. 12 Effect of different periods in the 3D modelling process

5 数值分析

5.1 基于重叠率的图像采集效果分析

使用无人机进行桥墩巡检时 R_1 与 R_2 在每一轮飞行下都会有所提升。主要是以下两种情况,如图 13 所

示。由图 13 可知:①不同的飞行轮次下, R_2 不仅仅通过航线的高度确定 相机的倾斜角度也会使 R_2 得到提升;②相同的飞行轮次下 R_1 不仅仅通过拍摄间隔而确定 航线的高度也会使 R_1 得到提升。

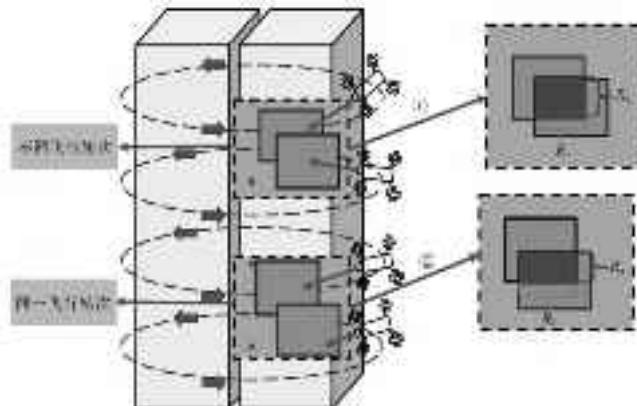


图 13 飞行轮次的重叠率情况

Fig. 13 Overlap rate of flight cycles

R_1 和 R_2 在每轮飞行中都会得到提升,但 R_2 的提升明显于 R_1 的提升,如图 14 所示。

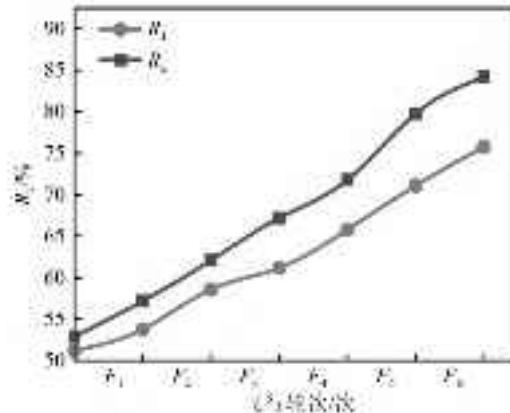


图 14 航向与旁向重叠率的变化曲线

Fig. 14 Variability curves of heading and side overlap rate

每轮飞行的 R_1 和 R_2 都达到了 50% 以上,如表 4 所示。经过六轮飞行后 R_1 与 R_2 分别为 75.8%、84.2%,满足精确化三维建模的同时,提升了图像采集与建模效率。

表 4 每轮的 R_1 和 R_2 Tab. 4 Each round R_1 and R_2

飞行轮次	R_1 /%	R_2 /%
F_1	53.8	57.2
F_2	58.6	62.1
F_3	61.2	67.2
F_4	65.8	71.8
F_5	71.1	79.8
F_6	75.8	84.2

5.2 基于三角网格 R_k 的建模效果分析

不同三角网格外接圆无量纲半径 R_k 的三角网格具有不同的特点,如图 15 所示。0.1~0.2 的 R_k 三角

网格较尖锐,质量较差。0.2~0.4的 R_k 三角网格质量一般。0.4~0.6的 R_k 三角网格质量较好,这种类型的网格在模型各个位置都有所分布。0.6~0.8的 R_k 三角网格质量优异,一般是在一些平滑且色彩均匀的表面分布较多。

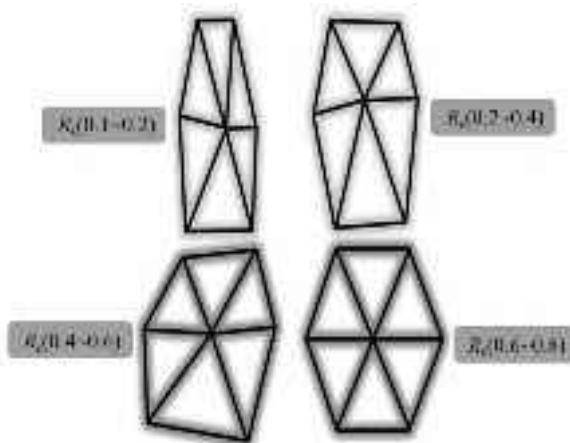


图 15 不同三角网格对应的 R_k

Fig. 15 The R_k corresponding to different triangular meshes

桥墩三维模型通过不规则三角网表面重建方法拟合较好,每个位置的三角网格的 R_k 均小于1,如图16所示。

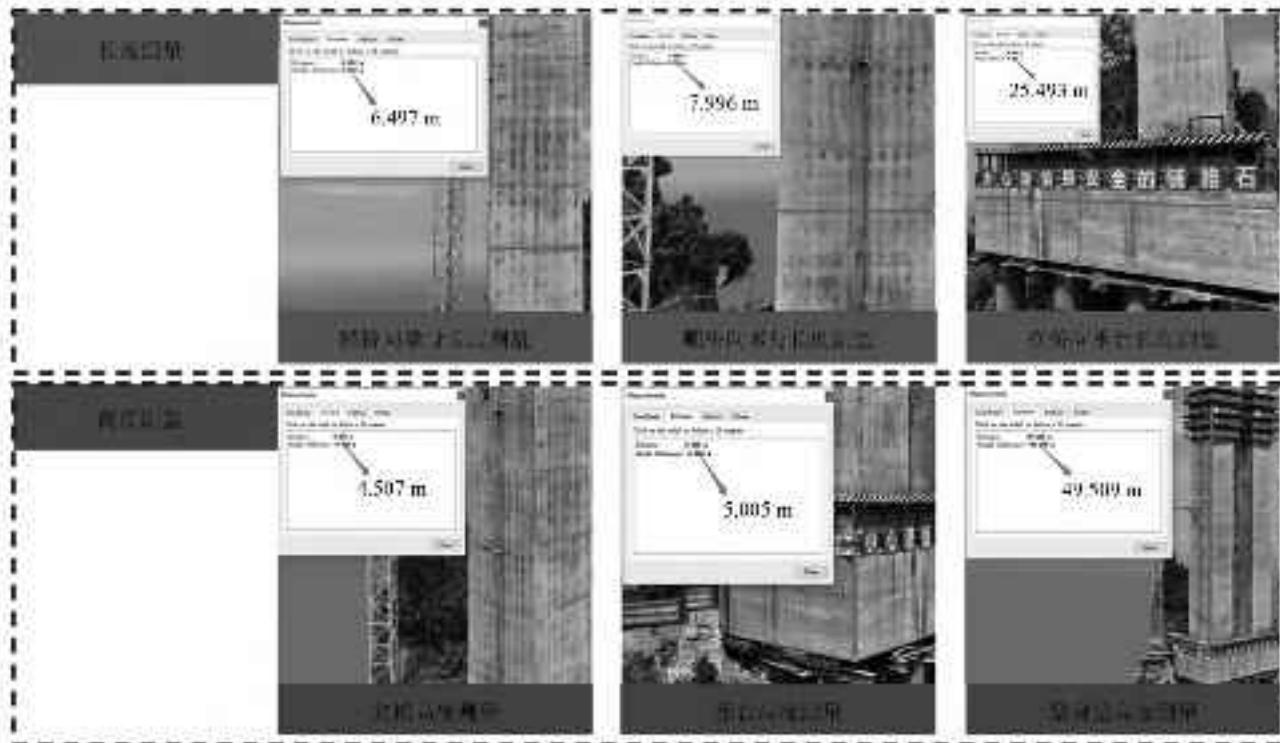


图 16 模型具体位置的 R_k
Fig. 16 The R_k for the specific location of the model

5.3 三维模型测量值与实际值对比分析

对三维模型进行了长度测量和高度测量,三维模型不仅展示了整体桥墩形态,还通过可视化手段直观地展现了各测量点的具体位置和数据,如图17所示。

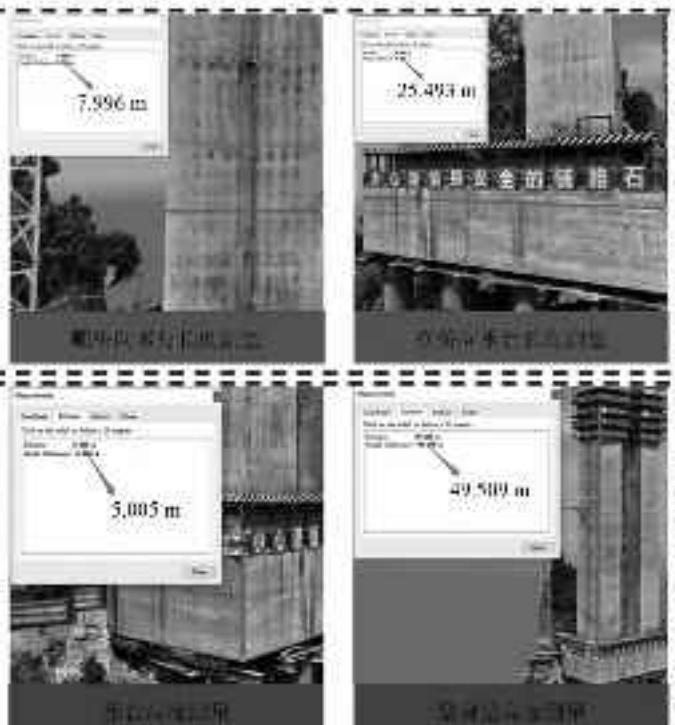


图 17 模型测量应用
Fig. 17 The application of model measurements

对三维模型进行了长度测量,测量结果如表5所示。桥墩横桥向截面长度为6.497 m,与实际值6.505 m相比,绝对误差为8 mm,误差率为0.123%;顺桥向截面长度为7.996 m,实际值为7.989 m,绝对误差为7 mm,误差率为0.088%;承台横桥向截面长度为25.493 m,

与实际值25.484 m相比,绝对误差为9 mm,误差率为0.035%;顺桥向截面长度为12.495 m,实际值为12.488 m,绝对误差为7 mm,误差率为0.056%。

对三维模型进行了高度测量,测量结果如表6所

示。第三模、第五模和第九模的高度分别为 4.507 m、4.505 m 和 4.493 m, 对应的实际值均分别为 4.516 m、4.496 m 和 4.498 m, 最大的绝对误差为 9 mm, 最大误差率为 0.2%。承台高度测量值为 5.005 米, 实际值为 5.011 m, 绝对误差为 6 mm, 误差率为 0.120%。墩身

总高度测量值为 49.509 m, 实际值为 49.516 m, 绝对误差为 7 mm, 误差率为 0.014%。这些数据表明, 绝对误差均控制在 10 mm 以内, 且误差率非常低, 均在 0.2% 及以内, 达到了毫米级的精度, 满足工程摄影测量的厘米级精度要求^[23]。

表 5 模型长度测量结果

Tab. 5 Results of model length measurements

序号	描述	测量结果/m	设计尺寸/m	实际尺寸/m	绝对误差/mm	误差率/%
1	横桥向墩身截面长度	6.497	6.500	6.505	8	0.123
2	顺桥向墩身截面长度	7.996	8.000	7.989	7	0.088
3	横桥向承台截面长度	25.493	25.500	25.484	9	0.035
4	顺桥向承台截面长度	12.495	12.500	12.488	7	0.056

表 6 模型高度测量结果

Tab. 6 Results of model height measurements

序号	描述	测量结果/m	设计尺寸/m	实际尺寸/m	绝对误差/mm	误差率/%
1	第三模立模高度	4.507	4.500	4.516	9	0.199
2	第六模立模高度	4.505	4.500	4.496	9	0.200
3	第九模立模高度	4.492	4.500	4.498	6	0.133
4	承台高度	5.005	5.000	5.011	6	0.120
5	墩身高度	49.509	49.500	49.516	7	0.014

5.4 外观质量检测效果分析

障碍物的遮挡干扰和其他设施的背景干扰会影响检测结果, 先进行预处理, 只保留混凝土表面的图像。将训练好的 YOLOv8-LD 模型对处理后的桥墩图像进行检测, 检测结果如图 18 所示, 共检测出 3 处麻面和 2

处渗水, 其中在承台检测出 2 处麻面和 2 处渗水, 在桥墩的墩柱上检测出 1 处麻面。因此, 本研究提出的 YOLOv8-LD 模型桥墩施工过程中常见的病害检测具有较好的检测效果。



图 18 正常环境下的外观缺陷检测

Fig. 18 The detection of cosmetic defects under normal conditions

为了验证该模型对不同光照和复杂环境下桥墩病害的精确检测效果, 将检测出的图像调整亮度、裁剪或添加噪声, 试验结果如图 19 所示, 训练好的 YOLOv8-LDFM 模型依旧能准确地检测病害位置, 并

判断出病害类型。因此, 本研究提出的 YOLOv8-LDFM 模型不仅在检测精度和平均精度上有较大的提升, 也适合应用于不同光照和复杂环境下的桥墩病害检测。

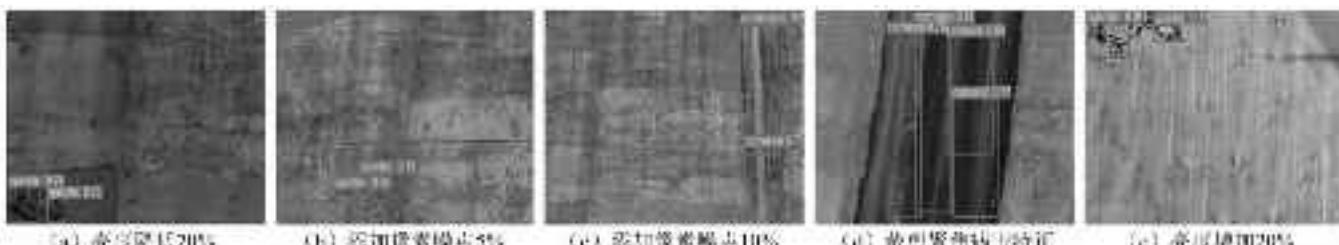


图 19 复杂环境下的外观缺陷检测

Fig. 19 The detection of cosmetic defects in complex environments

6 结 论

本研究基于坐标转换与三维重构技术建立了桥墩三维模型,提出了一种智能化的高墩施工质量检测方法,并通过实际施工桥墩试验验证了其较高的精度和适用性。主要结论如下:

(1) 在桥墩施工的复杂地形条件下,本研究实现了对桥墩结构的全方位数据采集。无人机拍摄的图像重叠率超过50%,航向、旁向重叠率分别达到了75.8%、84.2%。

(2) 建模图像经坐标转换后,生成了图像点云模型,再通过不规则三角网表面重建方法,生成桥墩三维模型的 R_k 均小于1.0。特别是第一至第八模及承台的建模效果 R_k 接近于正三角形的 $2/3$ 。

(3) 本研究生成的三维桥墩模型,误差都在9 mm及以内。对比实际尺寸和模型测量结果,桥墩的横桥向截面长度与实际值差异为8 mm,顺桥向截面长度与实际值差异为7 mm,立模高度与实际值差异最大为9 mm,达到了毫米级的精度,满足工程摄影测量的厘米级精度要求。

(4) 本研究提出YOLOv8-LDFM模型的对采集到的图像进行外观缺陷检测,发现出承台2处麻面和2处渗水,墩柱1处麻面,并验证了其在不同光照和复杂环境下也能实现较好的桥墩病害检测目的。

参 考 文 献

- [1] 辛亚兵,邵旭东,刘志文,等.高墩多塔斜拉桥沿桥轴向风特性实测分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(11):103-111.
XIN Yabing, SHAO Xudong, LIU Zhiwen, et al. Wind characteristics along axis bridge measured at multipylon cable stayed bridge site with high piers [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2016, 43(11): 103-111.
- [2] 方小林,朱磊磊,杨登,等.芦沟河特大桥192 m高墩整体自适应高效平台设计及施工技术研究[J].建筑结构,2023,53(增刊2):1982-1990.
FANG Xiaolin, ZHU Leilei, YANG Deng, et al. Research on design and construction technology of overall adaptive efficient formworkplatform for 192 m high pier of Lugou River Bridge [J]. Building Structure, 2023, 53 (Suppl. 2): 1982-1990.
- [3] 熊春宝,王猛,于丽娜.桥梁GNSS-RTK变形监测数据的CEEMDAN-WT联合降噪法[J].振动与冲击,2021,40(9):12-18.
XIONG Chunbao, WANG Meng, YU Lina. CEEMDAN-WT joint denoising method for bridge GNSS-RTK deformation monitoring data [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(9): 12-18.
- [4] 杨相平,赵建祥.高墩大跨度连续刚构桥悬臂施工线形和应力控制研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2021,52(3):525-528.
YANG Xiangping, ZHAO Jianxiang. Research on alignment and stress control of cantilever construction of high-pier and long-span continuous rigid frame bridge [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 52(3): 525-528.
- [5] ZHAI Z H, ZHU S Y, YANG Y, et al. Dynamics analysis of train-track-bridge coupled system considering spatial flexibility of high piers and system longitudinal vibrations [J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(10): 2613-2637.
- [6] 石岩,张奋杰,韩建平,等.高墩大跨度连续刚构桥典型施工阶段地震损伤分析[J].振动与冲击,2020,39(22):89-95.
SHI Yan, ZHANG Fenjie, HAN Jianping, et al. Seismic damage analysis of a long-span continuous rigid frame bridge with high piers during typical construction stages [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(22): 89-95.
- [7] DENG Y L, GE S X, GE X. Mitigating seismic irregularity of continuous girder bridge with unequal height piers through differential design of shear key strength [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2023, 48(10): 13749-13769.
- [8] CHEN X. System fragility assessment of tall-pier bridges subjected to near-fault ground motions [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(3): 04019143.
- [9] LIU C Y, JIANG Z S, YU H C. Safety analysis for bridge pier under nearby road construction and operation [J]. Measurement, 2020, 151: 107169.
- [10] 丁克良,刘明亮,刘亚杰,等.高速公路高墩桥梁垂直度无接触快速检测方法与精度分析[J].测绘通报,2019(6):121-125.
DING Keliang, LIU Mingliang, LIU Yajie, et al. Research on non-contact rapid inspection method of high pierbridge verticality and its precision analysis [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(6): 121-125.
- [11] 刘亚杰,丁克良,关士新,等.桥梁高墩柱垂直度的快速检测方法研究[J].山东建筑大学学报,2018,33(2):33-37.
LIU Yajie, DING Keliang, GUAN Shixin, et al. Study on method of rapid detection of the verticality of high pier column [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2018, 33(2): 33-37.
- [12] 韩怡天,冯东明,吴刚.基于机器视觉与无人机的结构动态位移测量方法[J].振动与冲击,2022,41(19):1-7.
HAN Yitian, FENG Dongming, WU Gang. Measurement method of structural dynamic displacement based on machine vision and UAV [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(19): 1-7.
- [13] 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(9): 13-23.
- ZHOU Yun, LIU Peng, HAO Guanwang, et al. Method on inverse establishment of bridge finite element model based on UAV oblique photography technology [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2023, 50(9): 13-23.
- [14] 李万润, 范博源, 赵文海, 等. 基于无人机及 YOLOX 视觉算法的大跨度钢结构吊装过程位移监测[J]. 振动与冲击, 2024, 43(17): 61-70.
- LI Wanrun, FAN Boyuan, ZHAO Wenhai, et al. Displacement monitoring in large-span steel structure hoisting process based on drone and YOLOX visual algorithm [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(17): 61-70.
- [15] JIANG Y H, BAI Y. Low-high orthoimage pairs-based 3d reconstruction for elevation determination using drone [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2021, 147(9): 04021097.
- [16] TIAN J H, LUO S, WANG X M, et al. Crane lifting optimization and construction monitoring in steel bridge construction project based on BIM and UAV [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(8): 1-15.
- [17] CHEN S Y, LAEFER D F, MANGINA E, et al. UAV bridge inspection through evaluated 3D reconstructions [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(4): 05019001.
- [18] 余加勇, 尹东, 刘宝麟, 等. 施工场地无人机精细化三维模型构建及土方测量[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(1): 181-188.
- YU Jiayong, YIN Dong, LIU Baolin, et al. Construction of detailed 3d model of construction site and earthwork survey based on UAV [J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2023, 50(1): 181-188.
- [19] ZHANG S H, LIU C, HAALA N. Guided by model quality: UAV path planning for complete and precise 3D reconstruction of complex buildings [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2024, 127: 103661.
- [20] LIU Y F, NIE X, FAN J S, 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.
- [21] VARDAKAS G, LIKAS A. Global k-means plus plus: an effective relaxation of the global k-means clustering algorithm [J]. Applied Intelligence, 2024, 54(19): 8876-8888.
- [22] 杨佳宾, 范大昭, 杨幸彬, 等. 面向倾斜摄影的深度学习航空影像匹配方法[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(10): 1823-1837.
- YANG Jiabing, FAN Dazhao, YANG Xingbin, et al. Deep learning based on image matching method for oblique photogrammetry [J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(10): 1823-1837.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程摄影测量规范: GB 50167—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

(上接第 131 页)

- [20] OU Y C, WANG P H, TSAI M S, et al. Large-scale experimental study of precast segmental unbonded posttensioned concrete bridge columns for seismic regions [J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(3): 255-264.
- [21] 鲍泽华, 李建中, 李永兴, 等. 自复位桥墩耗能钢筋合理配筋率的设计方法研究[J]. 工程力学, 2022, 39(10): 88-98.
- BAO Zehua, LI Jianzhong, LI Yongxing, et al. Research on the design method of reasonable reinforcement ratio for energy dissipating reinforcement of self resetting bridge piers [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(10): 88-98.
- [22] 贾俊峰, 魏博, 欧进萍, 等. 外置可更换耗能器的预制拼装自复位桥墩抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(5): 154-162.
- JIA Junfeng, WEI Bo, OU Jinping, et al. Experimental study on seismic performance of prefabricated assembled self-resetting bridge piers with external replaceable energy dissipators [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(5): 154-162.
- [23] 米莹. 基于地震易损性的非延性 RC 框架黏滞阻尼器加固方案决策[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [24] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491-514.