

基于深度学习方法的桥塔关键点位快速测量技术

王 浩

[上海城建市政工程(集团)有限公司,上海市 200065]

摘 要: 研究无人机倾斜摄影测量技术和深度学习目标识别算法在超高建筑桥塔施工测量中的应用,提出基于深度学习的桥塔关键点位快速测量技术。利用无人机倾斜摄影,经 Agisoft Metashape 软件重建三维模型,结合 YOLOv5 深度学习算法对带地理信息的图片进行目标点自动识别,以自动输出桥塔关键点精确地理位置信息。以兰原黄河大桥施工过程中的桥墩为例,验证关键点位快速测量技术的可行性与精度。结果表明:该方法可在不影响施工质量的前提下,显著提高测量速度和准确性。通过无人机和深度学习算法的结合使用,能够实现对桥塔复杂结构的高精度快速测量,并自动输出结构关键点的地理信息坐标值,可在 1 cm 误差内满足高精度工程测量要求。

关键词: 无人机;倾斜摄影测量;深度学习;三维重构;测量技术

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)08-0322-06

Rapid Measurement Technology for Key Points of Bridge Pylon Based on Deep Learning Methods

WANG Hao

[Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200065, China]

Abstract: The application of UAV oblique photogrammetry technology and deep learning target recognition algorithm in the construction measurement of super-high building bridge pylons is studied. A rapid measurement technology for key points of bridge pylons based on deep learning is proposed. UAV oblique photography is used, and the three-dimensional model is rebuilt by Agisoft Metashape software. Combined with the YOLOv5 deep learning algorithm, the target points of pictures with geographic information are automatically recognized to automatically output the accurate geographic location information of key points of bridge pylons. Taking the piers in the construction process of Lanyuan Yellow River Bridge as an example, the feasibility and accuracy of the rapid measurement technology for key points are verified. The results show that this method can significantly improve the measurement speed and accuracy without affecting the construction quality. Through the combined use of UAV and deep learning algorithm, the high-precision rapid measurement of the complex structure of bridge pylons can be realized, and the geographic information coordinate values of the key points of the structure can be automatically output, which can meet the high-precision engineering requirements within an error of 1 cm.

Keywords: drone; inclined photogrammetry; deep learning; 3D reconstruction; measurement technology

0 引 言

桥塔结构作为斜拉桥主要承载部件,其施工精度控制对整个桥梁的承载性能和安全性都起着至关重要的影响,而桥塔在施工过程中的浇筑、爬升等一系列操作主要依赖于现场的测量手段来控制其施工精度^[1-3]。因此,准确、快速的测量技术对桥塔结构

的施工控制以及整个桥梁的力学性能具有重要意义。目前,桥塔乃至整个施工现场的测量技术主要依靠以全站仪等传统测量器具为主的人工测量完成,通过使用全站仪和被安置在待测点上的棱镜协同工作^[4-8],来获取待测点的坐标。然而在面对较为复杂的施工环境、较为紧张的施工周期时,通过这样的传统方式进行测量工作将会导致测量作业的工作量巨大,投入的时间成本和生产成本较高的问题。然而,对建筑物进行精确测量是进行施工操作时必要的一项前期工作,点位测量的精度高低将会对施

收稿日期: 2024-12-11

作者简介: 王浩(1991—),男,工程师,学士,从事道路桥梁施工工作。

工质量产生非常巨大的影响,对于施工环境复杂、待测点位众多以及工期紧迫的项目,使用传统全站仪进行测量可能会导致较为严重的施工负担^[9]。尤其是在面对如桥塔这样的超高建筑时,使用传统全站仪进行测量的效率、准确性都无法保证,会导致很大的施工进度压力。

因此,亟需一种针对桥塔结构的自动化快速测量方法以解决上述问题。目前,基于计算机视觉的目标检测方法研究越来越受到重视^[10-11]。依托于计算机视觉算法,可以实现对照片、视频等图像信息中的目标进行筛选与定位,然而如何定位大型结构,尤其是超高型结构上的关键点位,并且量化输出其三维坐标仍存在一定困难。随着无人机技术的发展,商用无人机的大量普及使得现在建筑物的图片信息越来越容易获取^[12],尤其是在面对超高层建筑图像信息捕获时,无人机因为其自身优点,可以快速且方便的获取超高建筑的精细图片信息。无人机倾斜摄影测量技术弥补了传统测量方法效率低下,需求人力较多的不足,通过无人机测绘所建立的精细化实景三维模型源于多角度采集高分辨率、大范围的倾斜影像数据,该方法具有高效、低成本的建模优势^[13-16],且通过无人机倾斜摄影测量所产出的三维模型数据与现有的计算机视觉、深度学习技术可以进一步融合^[17-19],提高测量效率和测量精度。魏艳平等人^[20]通过无人机测量技术和三维重建技术对施工场地的管道布线、沟渠位置及土方大小进行了测量及重建,实现了施工现场的智能建设,提高了工程建设的效率;张文献^[21]通过无人机测绘及 Context Capture 软件对水库进行了三维重建,还原了该水库的地理信息位置,提高巡检的效率的同时降低了巡检成本,增强了水库巡检工作的智能化;李万润等^[22]通过无人机拍摄和 YOLOX 算法对大跨度钢结构吊装施工进行了全过程位移检测,体现了无人机拍摄与人工智能图像算法优异的兼容性。除此之外,无人机倾斜摄影测量技术还被用于评估与识别桥梁结构产生的裂缝等微小缺陷^[23-25],体现了无人机测量的精度。以上研究体现了无人机倾斜摄影测量在桥塔结构测量任务上的潜力,但目前少有针对桥塔关键点进行自动识别与坐标测量的研究。针对目标自动识别的问题,江路路等^[26]使用 YOLOv5 算法对探地雷达图像中的地下空洞与管线进行识别,实现了对探地雷达获得的图像按照识别目标类别进行快速分类,并且对混凝土管线和金属管线进行了

区分,提高了地下病害检测和识别工作的效率;王文瑾^[27]等使用 YOLOv5 算法结合无人机超分辨率图像拍摄,实现了大面积的林死枯松木识别,提升了林区检测工作作业效率。

目前,针对桥塔等超高建筑的关键目标点快速测量方法仍是一项重大挑战,本文将基于无人机测绘与重建技术,结合深度学习图像识别算法进行桥梁塔柱的关键点快速测量,以提升超高、复杂施工环境的测量工作效率。

1 桥塔关键点快速测量方法

本文中所提出的关键点快速测量由 3 个部分组成:结构三维模型重建、深度学习目标点自动识别、桥塔三维模型关键点自动化输出(见图 1)。

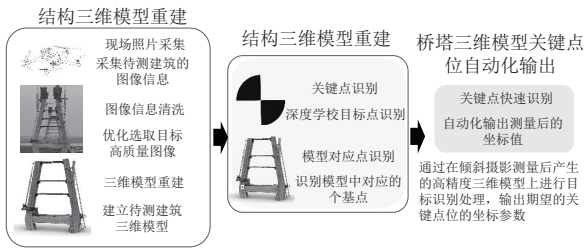


图 1 关键点快速测量方法与理论

1.1 工程概况

兰原黄河大桥的主桥桥塔为鼎式结构,中塔柱和下塔柱为变截面(见图 2),桥塔结构形状复杂,构件多样,在桥塔建设中需要非常高的匹配精度,传统的施工测量大多使用全站仪对结构点位进行测量,需要人力往复调整仪器,效率较低,所需工期较长。兰原黄河大桥在桥塔结构的测量中存在以下的技术难点。

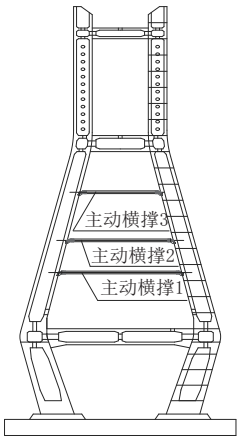


图 2 兰原黄河大桥索塔总体构造图

- (1)桥塔结构复杂,塔柱建筑高度较高,对测量精度要求高;
- (2)塔柱上配有主动横撑装置调整塔柱内力,对

塔柱的位移检测要求高,测量周期较为频繁;

(3)建设工期相对紧张,需要在加快测量效率的同时采用更加绿色、快捷的施工测量技术;

(4)大桥主副桩基位于黄河主河槽,水流随季节变化大,施工用地紧张,现场测量环境拥挤。本文针对以上技术难点提出了基于深度学习方法无人机倾斜摄影测量技术来针对性地提高兰原黄河大桥塔柱的测量效率及测量精度。

1.2 基于 Agisoft Metashape 的结构三维重建

倾斜摄影测量可以通过二维图像重构物体的三维几何模型,这种建模方法操作简单,产出结果快速,精度高,通过无人机可以很好地适应各种工况下的摄影任务,普适性强。关于对建筑进行三维重构,国内外近十年来有不少研究成果^[28],无人机可以方便地对建筑立面、建筑群等进行影像获取,通过三维重构相关算法对数据进行解算,得到点云模型,再进一步还可以将点云网格化和纹理化,以获得具有相对地理坐标的三维模型。

Agisoft Metashape 软件是一款基于影像自动生成高质量三维模型的优秀软件,它根据最新的多视图三维重建技术,可对具有一定重叠率的数码相片进行处理^[29]。凭借着能够快速生成高精度的三维模型的优势,在建筑测绘、三维重建领域广受欢迎,并为矿场、林场勘探和建筑地理信息测绘提供了技术支持。通过使用搭载 RTK(实时动态载波相位差分技术)的无人机拍摄得到具有高精度地理信息的照片,即可通过 Agisoft Metashape 生成的点云、三维模型对建筑物进行初步的测量。因此,Agisoft Metashape 能够与具有高精度地理信息的图像相适应,产生具有可靠性、准确性的精细三维模型。

1.3 深度学习目标点自动识别

利用深度学习模型关键点提取网络获取的最优权重,对整个桥塔标记数据集的所有图片进行处理,获取每张图片上的待测点在图片中的具体位置分布,存储关键点的分布参数,在不影响原有图片的地理位置信息的情况下即可获取每一张图片的关键点位坐标,通过对图片上相对位置放缩后的坐标位置进行选取,即可在由原图像生成的具有地理信息的三维模型上进行处理,在生成三维模型的图像中选取具有目标点的图像,并且在这些图像中的目标点位上确定标记,以实现目标自动识别与选取。

1.4 结构关键点位自动化输出

桥塔结构通过无人机倾斜摄影测量获得具有地

理坐标信息的图像信息后,通过 Agisoft Metashape 软件可以构建出具有地理信息坐标的三维模型,在 Agisoft Metashape 软件中可以通过对模型进行测量、标记等操作来查看选中目标的地理信息参数,如高程,经纬度等,但是由于人工选择工作量大,且精度难以保证,因此基于软件的该特点,本文提出基于深度学习目标识别的桥塔结构关键点位自动化输出方法,实现结构在得出具有三维地理信息模型后的关键待求点的目标识别以及坐标值准确量化。

2 无人机测量方法

2.1 无人机选型配置

无人机选用由大疆生产的消费级行业无人机,其功能丰富,性能稳定,且对于行业测绘应用进行了专业的软件适配处理,具有 RTK 差分定位系统,该无人机在使用过程中可以手动起降,可控速度,可以对物体进行环绕式近距离拍摄,适合在塔柱测绘的过程中使用。因此,在本试验中配置一架大疆生产的行业型无人机 DJI Mavic 3E(见图 3),其技术规格见表 1。

图 3 行业型无人机 DJI Mavic 3E

表 1 无人机的技术规格

参数	值
无人机重量/g	915
最大飞行时间/min	45
有效像素 px	2 000 万
相机参数	4/3 CMOS 广角相机
飞行器最大速度/(m·s ⁻¹)	21
续航时间/min	45
最快连拍间隔/s	0.7
图传支持频段/GHz	2.4 和 5.8
最大通信距离/km	15

2.2 无人机航线规划及相机标定

由于塔柱是高昂的竖向建筑,相对占地面积较小而竖向高度很高,为了得到较好的重构模型,所以需要无人机航线进行针对性规划,以保证图像间有较高的重叠率。在规定好航线后,DJI Mavic 3E 可以由其所带软件 DJI Pilot 2 按照所设置的航线参数进行自动飞行和拍摄,而较高的拍摄信息冗余度可以提高解算的精度,以获得更加准确的测绘数据^[15],

初步确定的航线规则如下:

- (1)无人机应按照蛇形的路线对塔柱外侧面进行拍摄;
 - (2)无人机测绘时的飞行速度不应太高,推荐 2 m/s;
 - (3)无人机测绘环境复杂危险,存在多处遮挡,应适当控制无人机与被摄面距离;
 - (4)航向的重叠率推荐选取 90%.
- 其详细的航线规划参数见表 2。

表 2 无人机航线参数

参数	值
正射 GSD	0.32
航线速度/(m·s ⁻¹)	2
旁向重叠率/%	80
航向重叠率/%	90
拍照模式	等距离拍摄
与 AR 被摄面距离/m	3

在 Agisoft Metashape 中提供选项可以调整并输入大疆无人机的参数信息,使用 DJI Pilot 2 进行航线规划处理、设置无人机飞行及拍摄参数后,将保存的照片及数据信息导入 Agisoft Metashape 软件后,在工具栏中的相机校检中可以输入 DJI Mavic 3E 的相机参数,并且在软件中进行相机参数标定,以保证无人机测绘结果的准确性,其中相机参数见表 3。

表 3 无人机相机参数

参数	值
照片分辨率 px	5 280×3 956
F	3 713.29
CX	2 640
CY	1 978
K1	-0.112 575 24
K2	0.014 874 43
K3	-0.027 064 11
P1	-0.000 085 72
P2	1×10 ⁻⁷

2.3 塔柱标记点

三维建模是利用无人机在航线上获取目标的有序图像数据,通过对多角度影像之间建立相应的立体关系,进行纹理映射,以达到实景三维模型的效果^[15]。在三维重构的过程中,需要布置一些已知的像控点,来纠正无人机因定位受限或电磁干扰而产生的位置偏移、坐标精度过低等问题。除此之外,还需要在关键位置布置一些特殊的靶点作为标志物,以记录这些关键点位,便于在后期使用深度学习方法对这些点位进行识别。

3 关键点目标识别方法

深度学习是现今最流行也是最适用的解决图像识别问题的有效工具,可以有效提取出图像的典型特征,通过采集大量被标记的特征点标记的图像,可以对建筑物上标记的特征点进行准确且快速的识别。YOLO 算法是深度学习中的一系列目标识别算法,作为单阶段的目标识别算法,YOLO 具有识别速度快,准确率高的优点,适合运用在广泛需要快速响应的工作场景下,本文通过 YOLOv5 算法实现结构关键点位的快速识别。

3.1 特征点标记及数据集制作

数据集收集与制作是使用深度学习方法训练模型的关键步骤,在建筑构件的目标识别过程中,钢筋混凝土结构外侧没有呈规律分布的显著特征点,需要通过人为操作在结构外侧表面进行特征点布设。通过在待求位置上布设事先准备好的特征点,即可通过深度学习进行训练学习,实现特征点的自动目标识别,结合 Agisoft Metashape 软件生成的具有地理信息位置的三维模型,通过对地理信息模型的处理即可输出特征点的地理信息坐标。基于深度学习算法适配性强的特点,实现关键点地理信息位置的自动输出。为了便于使用 YOLOv5 算法进行目标点识别,需要事先在塔柱外侧所需位置处粘贴特征靶点,特征靶点的选用应尽量简单,易于分辨,为了便于多种测绘仪器统一工作,方便后续对无人机测量结果进行校对,选用常见的黑白标靶作为特征点(见图 4)。



图 4 特征靶靶及现场靶靶图片

在完成 YOLOv5 模型搭建后,需要对特征靶靶进行目标识别的训练。训练用桥塔特征点图片集来源有兰原黄河大桥施工现场当地拍摄图片及互联网上搜集的具有相同特征的黑白标靶不同场景下的图片,其中现场图片使用 iPhone 14 Pro 手机进行采集,在对所有图片进行筛选和处理后,共获得图片 304 张。使用 MakeSense.ai 标注训练集中所有图片的靶靶部分,并且根据图片形式进行自适应调整。在完成数据集图片标注后,将标注后的图片按照 8:1:1 的比例划分为训练集、测试集和验证集,其中训练集有图

片 244 张,测试集和验证集分别有 30 张图片。

使用 YOLOv5x 模型进行训练,设置初始学习率为 0.001,通过随机梯度下降方法在训练中对学习率进行调整,其训练过程中评价指标的数值变化见图 5。从训练结果中可得,在对模型训练到第 50 轮时,模型的各项评价指标已经趋于稳定,模型逐渐开始收敛,故选择对模型共训练 100 轮以获取较为稳定的结果。训练的损失率随着迭代次数的增加而不断下降,证明模型正常训练,结果收敛性良好,没有出现异常。

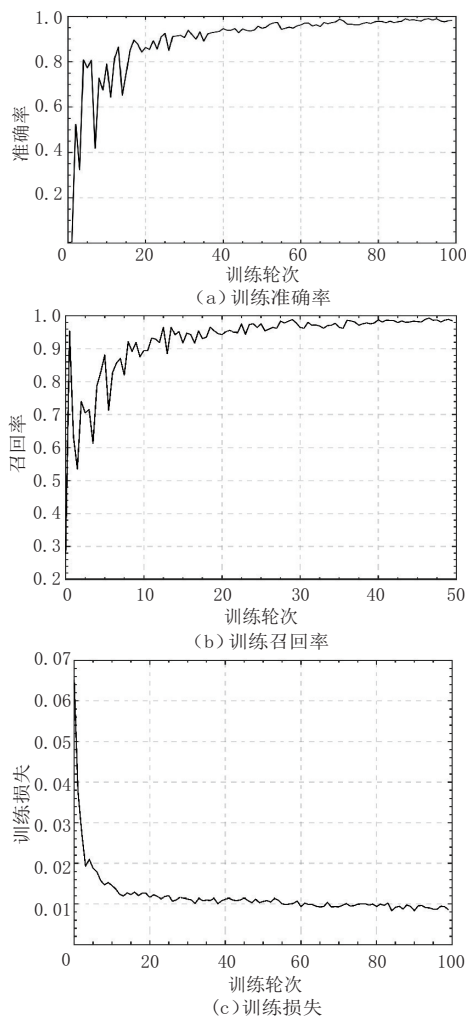


图5 特征标记点训练结果

使用上述训练的模型对塔柱关键点进行预测,可以稳定且快速地对一张施工现场的图片中识别出所标注的标靶的位置,并且可以对目标所在图片的相对位置和置信度进行输出。YOLOv5 以识别到目标的边界框的 $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 、 $y_{\max}$ 、 $y_{\min}$ 四个参数储存目标所在图片的相对位置,故可以使用这 4 个参数对一个目标的中心位置进行计算。

$$x_{\text{center}} = \frac{1}{2} (x_{\max} + x_{\min}) \quad (1)$$

$$y_{\text{center}} = \frac{1}{2} (y_{\max} + y_{\min}) \quad (2)$$

4 试验验证与误差分析

现选择兰原黄河大桥施工现场桥墩对本文提出的关键点快速测量技术进行可行性与测量精度验证。

4.1 数据导入与空三加密

选择兰原黄河大桥施工现场的辅助墩进行自动化建模及关键点坐标输出的实验验证,首先在辅助墩需要测量的位置粘贴黑白标靶,然后使用 DJI Mavic 3E 进行无人机倾斜摄影测量,按照规定航线对辅助墩全景进行拍摄,将获取的照片进行初筛,抛弃无用的废片后导入到 Agisoft Metashape 软件中,本次模型重建共使用 412 张有效照片。

空三加密是构件辅助墩三维模型工作中非常重要的一步,通过使用无人机拍摄的数据与地面拍摄的照片数据进行空中三角测量计算,无人机搭载 RTK 系统,其航拍数据可根据位置信息计算出具有准确且真实空间定位的空三成果,再结合航空影像数据和 POS 数据对象点坐标进行加密,获取同名特征点的坐标,这些同名点将作为区域网平差的条件,获取每张影像的相机位置、姿态参数及密集的点云数据。

4.2 图片特征点选取

在 Agisoft Metashape 软件中,可以对导入的图片进行特征点标注,在工作区中打开图片,即可在对应的图片中进行标记。通过上文训练的 YOLOv5 模型,可以事先对输入的图片进行特征靶点的识别,并将识别的相对位置结果储存起来,然后再将图片导入到 Agisoft Metashape 软件中,在识别得到的相对位置处放置一个标记,即可自动化完成图片特征靶点的选取,完成一部分的图片特征点标记后,软件会自动计算该特征点在其他照片的相对位置,并且自动进行标记设置,可以通过该算法对靶点标注工作进行校准,以增加特征靶点选取的准确率。

4.3 三维模型重建

使用空三加密后生成的密集点云对辅助墩进行三维模型重建,Agisoft Metashape 软件将会自动计算模型中得到的三角面片与拍摄影像的一一对应关系^[30],并且对模型进行纹理映射,在完成纹理贴图后即可生成所需辅助墩的实景三维模型,以完成三维模型重构,见图 6。

4.4 结果验证

在完成模型重建后,可以在模型中显示出所标

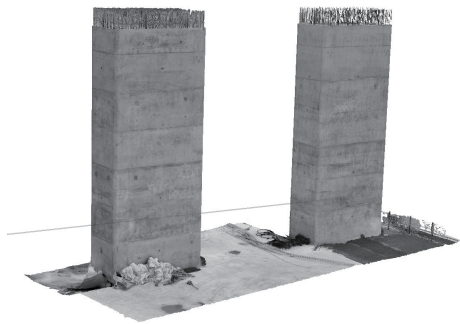
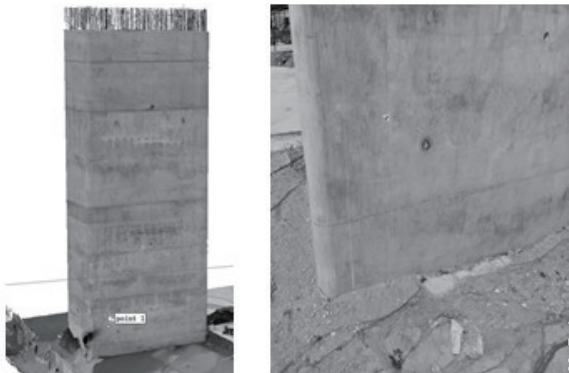


图6 辅助墩三维重构模型

记出的靶点的地理坐标信息,将关键靶点的地理坐标导出,可以看到 Agisoft Metashape 软件输出了该待求点的经纬度及高程(见图7),将该结果与使用传统全站仪测量的结果进行对比,误差控制在 1 cm 内,所得结果精度较好,并且通过三维重建获得了完整的辅助墩模型,其任意点的地理位置坐标均可通过该模型进行测量,该方法较传统方法具有更强大的实用性与展示性,并且仅需要控制无人机按照既定航线进行图片拍摄,减少人力的同时大大提高了工作效率。



标记	经度/(°)	纬度(°)	海拔高度/ m	精度/ m	误差/ m
point 1	114.739 944	34.959 930	56.736 841	0.005 000	0.000 000

图7 关键点测量结果

5 结 语

本文以兰原黄河大桥为实际工程案例进行了桥塔快速测量技术应用与验证。在复杂的施工环境下通过无人机倾斜摄影测量技术及深度学习方法进行了桥塔的全景三维重建,并且输出了关注的待求点的地理信息坐标。

(1)基于 Agisoft Metashape 对搭载 RTK 的无人机所拍摄的具有地理信息的图像进行了三维重建,实现了将深度学习目标检测算法融合进三维地理信息模型中,实现了对于桥塔关键点的地理信息坐标检测、识别与输出。

(2)该基于深度学习方法桥塔关键点快速测量技术不需要多仪器、多人工操作,按照施工现场环境对无人机进行航线规划,无人机即可按照既定航线进行摄影测量,通过结合深度学习方法,对三维重建的过程进行处理,即可在结果中获得待求的关键靶点处的地理信息位置,减少了人力消耗和工作量,提高了工作效率。

(3)通过该快速测量技术所求得到关键靶点的坐标位置误差控制在厘米级,可以很好地应用在施工现场的测量工作,并且可以通过已获得的全景三维重建模型进行再处理,获得任意位置处的地理坐标参数,增加该模型的实用性与易用性,减少重复的测量工作。

参考文献:

[1] 解光路, 刘建, 詹益. 空间钻石型四塔肢桥塔施工测量技术[J/OL]. 世界桥梁, 2025: 1-6 (2024-12-09)[2024-12-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1681.U.20241206.1235.012.html>.

[2] 蓝其平, 陈景平. 关于斜拉桥塔梁同步施工测量技术的研究[J]. 测绘通报, 2011(9): 48-51; 69.

[3] 杨辉. 基于斜拉桥主塔施工极坐标法放样精度估算及误差分析[J]. 施工技术, 2016, 45(增刊1): 257-260.

[4] 夏焕文, 常建增. 鲇鱼洲长江大桥南汊航道桥塔梁同步施工测量技术[J]. 世界桥梁, 2023, 51(增刊1): 91-96.

[5] 付建曲, 李松, 高安荣. 鄂东长江公路大桥北索塔施工测量技术[J]. 施工技术, 2011, 40(19): 93-97.

[6] 汤雪原. 大汶溪大桥塔梁同步施工测量控制技术研究[J]. 四川建材, 2014, 40(4): 111-113.

[7] 黄红林. 公安长江公铁两用特大桥主塔施工测量技术研究[J]. 现代测绘, 2016, 39(3): 40-44.

[8] 邓少锋, 兰其平, 程海琴. 武汉天兴洲长江大桥上塔柱施工测量技术[J]. 测绘通报, 2008(10): 33-35; 38.

[9] 侯红科. 一种提高测量精度和效率的全站仪控制系统设计[J]. 通讯世界, 2016(9): 107-108.

[10] 舒江鹏, 李俊, 马玄波, 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.

[11] 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(增刊1): 1-12.

[12] 吴成真. 新时期工程测绘中无人机航空摄影测量应用分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(34): 180-182.

[13] 张巧玲, 赵燕伶, 等. 无人机倾斜影像的精细化三维实景重建[J]. 山西建筑, 2024, 50(20): 188-191.

[14] 马如进, 董一庆, 潘子超, 等. 基于消费级无人机的古桥三维重构分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 94-100; 126.

[15] 王佩军. 摄影测量学(测绘工程专业)[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2016.

[16] 王万国, 田兵, 刘越, 等. 基于RCNN的无人机巡检图像电力小部件识别研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(2): 256-263.

[17] 卢少波. 基于机器视觉的智能算法在矿山安全监测系统中的应用