

基于无人机测绘技术在水利工程测量中的应用

张必斌

海南省水利水电勘测设计研究院有限公司, 海南 海口 570100

DOI:10.61369/ERA.2025060004

摘 要 : 随着无人机技术与低空遥感技术的快速发展, 其在水利工程测量中的应用日益广泛。本文通过运用无人机摄影测量与激光雷达测量相结合的技术手段, 对自然河道进行了测量并对数据进行数据处理及产品输出。结果表明, 无人机技术可高效获取高分辨率正射影像 (DOM) 及三维模型 (OSGB), 并结合激光雷达点云数据生成高精度数字高程模型 (DEM) 及点云数据, 为水利工程规划设计、施工监测及运维管理提供可靠的数据支持。

关 键 词 : 无人机; 摄影测量; 激光雷达; 水利工程测量

Application of UAV Surveying and Mapping Technology in Hydraulic Engineering Survey

Zhang Bibin

Hainan Provincial Water Resources and Hydropower Survey and Design Research Institute Co.,
Ltd. Haikou, Hainan 570100

Abstract : With the rapid development of unmanned aerial vehicle (UAV) technology and low-altitude remote sensing technology, their application in hydraulic engineering surveys has become increasingly widespread. This paper utilizes a combination of UAV photogrammetry and lidar surveying techniques to measure natural river channels, process data, and produce outputs. The results demonstrate that UAV technology can efficiently acquire high-resolution digital orthophoto maps (DOM) and three-dimensional models (OSGB). Additionally, it can generate high-precision digital elevation models (DEM) and point cloud data by combining lidar point cloud data, providing reliable data support for the planning, design, construction monitoring, and operation and maintenance management of hydraulic engineering projects.

Keywords : unmanned aerial vehicle (UAV); photogrammetry; lidar; hydraulic engineering survey

引言

随着我国民用型无人机产业的不断升级、低空遥感测量技术的不断革新。无人机低空摄影测量与机载激光雷达 (LiDAR) 遥感技术在我国基础地理信息数据生产及应急测绘应用中已呈常态化趋势, 成为有人机航空遥感与卫星遥感的有力补充。

相较于传统人工测量, 无人机摄影测量能够快速获取照片数据并进行内业解译, 能够实现地物、建筑物和构筑物的快速分类识别分类及工程规划所需的精细化三维模型; 机载激光雷达通过主动发射激光脉冲 (主动遥感), 可穿透植被冠层并直接获取地表三维信息, 显著提升了在密林、陡坡等遮蔽区域的测量能力。随着多波束激光扫描仪、高精度惯导系统 (IMU) 与载波相位实时动态差分定位 (RTK) 技术的融合, 机载激光雷达的测量精度已达到厘米级, 同时具备全天候作业优势。

在水利工程领域, 这无人机测绘技术为实现水利工程设计规划, 地表形变监测、为大坝安全评估、河道淤积分析等提供动态化、高精度的数据支撑, 成为传统测量手段的重要补充。

一、水利工程测量的特点、需求

(一) 特点

水利工程测量具有一定的显著特点, 其一, 测量区域地形复杂, 水利项目常建于河流、湖泊周边或是山谷等地, 如峡谷中建设水电站, 既有陡峭的山体, 又有湍急的水流, 水下地形也错综

复杂, 给测量工作带来诸多阻碍^[1]。其二, 涉及范围十分广泛, 大型跨流域调水工程能绵延数百公里, 跨越不同的地理区域, 必须全面把控整个工程区域各类状况, 测量工作量极大。其三, 水利工程关乎防洪、灌溉、供水等重要民生功能, 对测量精度要求严苛, 从大坝的微小沉降、渠道的精确坡度, 任何细微偏差都可能影响工程效益与安全。

（二）需求

水利工程测量的精度需求：规划设计阶段，为合理确定水利工程布局、规模等，需高精度测量地形地貌、地质条件等。例如，精确掌握水库库盆的地形起伏，测量精度需达到厘米级，才能准确计算库容等关键参数，为坝址选择、坝高设计提供可靠依据^[2]。施工阶段更是对精度要求十分严格，如大坝的混凝土浇筑、水闸安装等，施工放样的精度往往要控制在毫米级，以此保障各构建物的位置、尺寸精准无误，确保工程质量符合设计要求。进入运营管理阶段，针对大坝、堤防等关键部位进行变形监测，更是进一步提高精度要求，需达到亚毫米级，以便及时察觉细微的变形情况，提前预警安全隐患，确保水利设施能安全稳定运行^[3]。

从水利工程测量的时效性需求：规划设计时，要第一时间获取最新、全面的测量数据，特别是一些受季节、气候影响大的区域，如北方河流冬季封冻、夏季丰水期水位大幅变化，需抓住合适时间节点进行测量，及时为工程的可行性研究、初步设计等提供支撑，避免因数据滞后影响决策进度。施工阶段，测量工作必须紧密配合施工进度，如河道清淤、护坡施工时，要实时提供高程、坡度等数据，一旦测量不及时，可能导致施工返工，延误工期。运营阶段，面对洪水、地震等突发情况，要迅速开展测量工作，实时掌握工程状态，如水库遭遇洪水时，需及时监测水位变化、坝体状况，方便工作人员快速做出科学调度、应急处置，充分发挥水利工程潜在功能，守护人民生命财产安全^[4]。

二、无人机摄影测量的原理及技术流程

（一）无人机摄影测量的原理

无人机摄影测量基于摄影测量学原理，利用无人机搭载的相机从空中对目标区域进行多角度拍摄，获取一系列重叠影像。核心原理是通过同名像点的匹配、空间前方交会来确定地面点的三维坐标。无人机飞行过程中，相机按一定时间间隔、航线间隔拍摄地面景物，这些影像存在一定重叠度，因为同一地面点在不同影像上会成像，通过影像匹配技术可找出这些同名像点，依据共线条件方程，即物点、像点和摄影中心三点共线，利用已知相机内方位元素——相机主距、像主点坐标等，外方位元素——摄影瞬间相机的位置、姿态参数，结合同名像点的像平面坐标，通过空间前方交会计算，就能得出地面点的三维坐标（X、Y、Z）^[5]。

（二）无人机摄影测量的技术流程

1. 外业工作流程

（1）低空数字航空摄影：根据测量任务要求，规划无人机飞行航线，设定飞行高度、速度、拍摄间隔等参数，利用无人机搭载的相机对目标区域进行摄影，获取覆盖目标区域的航空影像数据^[6]。

（2）准备工作：飞行前需对无人机、相机设备进行检查调试，确保设备性能良好；同时收集测区已有资料，如地形图、控

制点成果等，为后续工作做准备。

（3）像片控制点选点、布设、测量：在测区内均匀布设像片控制点，通过全球定位系统（GPS）等测量手段精确测定控制点的坐标、高程，为后续影像处理提供高精度的地面控制信息^[7]。

（4）低空数字摄影测量内业：将外业获取的影像数据、控制测量成果传输至内业处理环境，为内业数据处理做准备。

（5）检查与上交成果：对整个外业工作进行质量检查，确保数据的完整性、准确性，合格后将相关成果资料整理上交。

2. 内业工作流程

（1）准备工作：整理外业获取的数据，包括影像数据、控制点数据等，导入专业摄影测量软件，同时检查软件运行环境、相关参数设置。

（2）数据预处理：对影像进行辐射校正、几何校正处理，消除因相机镜头畸变、飞行姿态等因素引起的影像变形，提高影像质量^[8]。

（3）空中三角测量：通过影像匹配技术自动识别同名像点，利用像片控制点信息，采用平差计算方法，解算每张像片的外方位元素、加密点的三维坐标，建立测区的空中三角网。

（4）基础地理信息数字成果生产：基于空中三角测量成果，进行数字高程模型（DEM）、数字正射影像图（DOM）、数字线划图（DLG）等基础地理信息产品的生产，进一步构建三维模型^[9]。

（5）检查验收和上交成果：对生产的各类成果实施质量检查，包括精度检查、逻辑一致性检查等，确保成果符合相关标准、要求，检查合格后将成果整理上交。

三、无人机机载激光雷达测量的原理及技术流程

（一）无人机机载激光雷达测量的原理

无人机机载激光雷达（LiDAR）测量系统集成了激光测距技术、全球定位系统（GPS）和高精度IMU（惯性测量单元）等。激光雷达发射激光脉冲，激光脉冲射向目标物体并反射回来，被传感器接收。通过精确测量激光脉冲从发射到接收的时间间隔，结合光速，利用公式 $d=c \times t/2$ （其中 d 为目标距离， c 为光速， t 为飞行时间），可计算出传感器与目标点之间的距离^[10]。同时，无人机搭载的GPS用于确定激光雷达在空间中的位置，IMU则实时测量无人机的姿态（包括俯仰、翻滚和偏航角度）。通过这些信息，能够精确确定每个激光脚点在三维空间中的坐标（X、Y、Z）。且激光雷达可以在短时间内获取大量的三维点云数据，这些点云数据能够详细地反映目标区域的地形地貌、物体表面特征。

（二）无人机机载激光雷达测量的技术流程

1. 数据准备：

（1）点云数据；

（2）航迹文件（GPS 时间、位置信息 X,Y,Z）与姿态信息

(H,R,P) 相对应的列表文件) 等参考 文件;

- (3) 地面检查点, 即用于精度检测的野外实测数据;
- (4) 成果坐标系与点云坐标系统之间的转换参数;
- (5) 其他有关数据, 如与数据处理、成果检验相关的数据。

2. 点云处理:

(1) 噪声点滤除: 将明显低于地面的点或点群 (低点) 和明显高于地表目标的点或点群 (空中点), 以及移动地物点定义为噪声点。在进行地面点分类之前, 应首先将这类点分离出来。

(2) 分类算法: 利用基于反射强度、回波次数、地物形状等的算法或算法组合, 对点云数据进行自动分类。

(3) 提取地面点云: 裸露地表处有且只有一次回波, 此次回波对应的反射点即为地面点。植被覆盖区域可能对应多次回波, 正常的地面点是最后一次回波对应的反射点。相对于地物点, 地面点的高程是最低的。从较低的激光点中提取初始地表面; 基于初始地表面, 设置地面坡度阈值进行迭代运算, 直至找到合理的地面。

(4) 质量控制: 对分类结果进行检查。通过将点云分类显示、按高程显示等方法, 目视检查分类后点云; 对有疑问处用断面图进行查询、分析。

(5) 数字高程模型制作及质量控制: 根据需要, 对点云中所有地面点均作为特征点进行数字高程模型构建; 基于地面点云或数字高程模型, 根据成图比例尺、地形类别和等高距, 计算生成等高线数据; 根据成图的比例尺, 设置高程注记点距离; 通过三维透视及晕渲, 检查数字高程模型的可靠性。对模型不连续、不光滑处应重新核实地面点分类的可靠性; 使用实地施测的地面检查点, 在数字高程模型中内插获取相应平面位置的高程, 计算并统计检查点与内插点间的高程误差。

(6) 成果输出: LAS/PNTS 格式点云数据、平差后的轨迹文件、地面点文件及 DEM 产品。

四、海南省某河道治理工程中的实际应用

(一) 工程概述

1. 项目概况: 测区位处于海南省中大型某河流中上游, 河道长度2km, 测量范围约为: 0.36km²。地形起伏变化大, 植被茂密, 河坎落差大, 岸线走向及地形较为复杂, 全站仪及 RTK 的等测量手段获取数据难度较大。因此, 通过无人机摄影测量与激光雷达测量相结合的技术手段来完成项目的测绘工作。

2. 任务书及设计要求:

- (1) 坐标系: CGCS2000坐标系, 85国家高程;
- (2) 测量精度: 对测量范围区域进行 1:1000 地形图测量;
- (3) 内容要求: 与河道交叉的建筑物或路网高程地形地貌地物信息需要详细测量; 与河道交叉的管网、电缆、高压电等构筑物的高程和地形地貌地物信息需要详细测量。

(4) 设计及作业要求: 航测外业及内业内容符合《CH/T3003-2021 低空数字航空摄影测量内业规范》; 《CH/3004-

2021 低空数字航空摄影外业规范》; 《CH/T3005-2021 低空数字航空摄影规范》; 《CH/T 8023-2011 机载激光雷达数据处理技术规范》; 《CH/T3006-2011 数字航空摄影测量 控制测量规范》等测绘行业标准

(二) 无人机摄影测量及激光雷达测量工作流程:

前期准备工作: 像控点的布设及采集, 根据规范及现场情况合理布设平高点及检查点。

(1) 像控点布设略况 (红色钉子为平高控制点, 蓝色钉子位置为检查点) 如下图1示:



图1 像控点点位布设略况图

(2) GNSS 接收仪器现场采集点位如下图2、3示:



图2 像控点采集



图3 基础控制点采集

飞行平台的航线规划及参数设置:

(1) 飞行器: 大疆 Matrice 300 RTK、DJI Mavic 3E (自带镜头)

(2) 机载设备: 禅思 L2 (相机 + 激光雷达)

(3) 参数设置: 规划类型为航带飞行, 航向重叠为80%, 旁向重叠65%; 激光雷达扫描方式为重复扫描, 设置航高为100米, 地面分辨率 (GCD) 为2.58cm/px; 等时曝光拍照。



图4 大疆 Matrice 300 RTK 搭载禅思 L2

(三) 正射影像及三维模型的处理及输出

获取的原始照片, 在瞰景 smart3d 及大疆制图软件中进行导入及对照片 POS 数据查看 Yaw,Ptich,Roll 的三种飞行姿态及相关精度是否正常, 随后进行空三解算, 检查空三结果精度, 其中连接点的中误差符合低空数字航空摄影内业规范的精度要求, 丘陵地区平面位置小于0.2m, 高程中误差小于0.28m; 导入像控点进行地理匹配及高程纠正, 并检查像控点的误差及检查点的平面中误差均不超过0.12m, 高程中误差不超过0.1m, 符合限差要求。空三重建质量报告如下图4:

空三重建质量报告

1. 基础信息

航线名称

1

最小飞行高度/障碍物高度

90m

像控点数量/地面像控点

158/7121

图像尺寸

2407608

激光雷达精度 (m)

0.040 px

图像分辨率/地面分辨率

0.038 cm

2. 精度指标

计算方式

最小二乘法

相机高度

高

地面像控点精度

100 mm

相机高度

高

像控点精度

像控点精度

像控点精度

像控点

名称

Id

dx

dy

dz

精度

精度

精度

精度

像控点

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

像控点

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

像控点精度

名称

Id

dx

dy

dz

精度

精度

精度

精度

像控点精度

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

像控点精度

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

0.017 m

图5 空三重建质量报告

根据项目的要求, 输出成果图为坐标系为 CGCS2000, 高程坐标系为85国家高程; 地面采样间隔 (GSD) 为3.78cm 的正射影像 (DOM) 及三维模型 (OSGB)。如下图6:



图6 正射影像 (DOM)

(四) 激光雷达点云的处理及输出

本次项目采用大疆 M300 搭载的禅思 L2 进行原始数据的获取, 点云数据的处理在大疆制图软件中实现。

导入原始点云数据, 因为是通过 RTK 实时定位飞行获得的点云数据, 所以参数设置选择高精度点云处理模式。点云密度按百分比设置为100%, 点云有效距离设置为3-300米, 点云精度优化及点云平滑 (去噪); 地类点分类设置中, 根据经验设置地面类型选择缓坡, 最大建筑物对角线20m, 迭代角度6°, 迭代距离0.5m; 按比例尺1:500生成 DEM; 设置等高线间隔及基准高程; 设置高程注记为5m, 导入像控点, 根据像控点进行匹配纠正; 根据项目的要求设置成果输出坐标系, 产品的输出格式为 (PNTS|LAS) 及 DEM, 点云数据选取高程显示预览查看。如下图7:

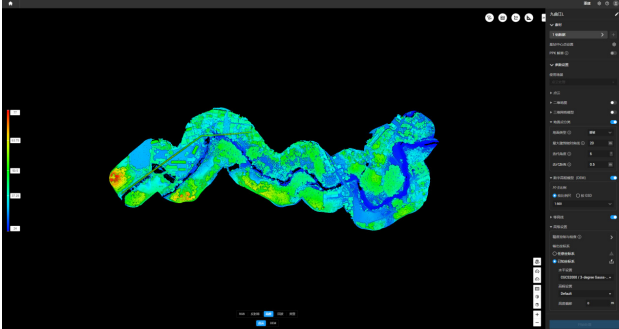


图7 点云数据高程显示

通过将点云分类显示、按高程显示等方法, 目视检查分类后点云, 对有疑问处用断面图进行查询、分析。最后, 查看质量报告, 控制点误差小于0.05cm, 符合精度要求, 如下图8。

精度参数

POS 精度

精度

100.00%

精度

0.00%

IMU 精度参数

参数

POS 精度

精度

0.000001 m

精度

0.000001 m

精度

0.000001 m

精度

0.000001 m

精度

0.000001 m

精度

0.000001 m

精度

0.000001 m

精度

0.000001 m

精度

0.000001 m

精度

0.000001 m

精度

0.000001 m

精度

0.000001 m

点云精度参数

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

精度

图8 IMU 轨迹误差及控制点误差报告

五、结语

综上所述,本文通过对海南省某河道治理工程测绘的实际应用,验证了无人机测绘技术在复杂水利工程测量中的高效性与可靠性。相较于传统人工测量,激光雷达与摄影测量相结合的技术

方法可快速获取大面积、高精度地理信息数据,显著缩短成图周期并降低人力成本。为水利工程的规划设计、施工及灾害监测提供了重要技术支撑。未来,随着多传感器融合与 AI 算法的深化应用,无人机测绘技术将在水利工程全生命周期管理中发挥更大价值。

参考文献

[1] 金佳栋, 仅然. 基于三维激光扫描与无人机倾斜摄影的多测合一作业模式 [J]. 北京测绘, 2024, 38(11): 1575-1579.

[2] 范小亮, 康彦伟. 基于倾斜测量技术的水利工程库区遥感影像测绘方法探讨 [J]. 内蒙古水利, 2024, (11): 87-89.

[3] 张颖, 熊云. 测绘工程测量中无人机遥感技术的运用——以贵阳市观山湖区金华水库、观山水库水利工程为例 [J]. 石材, 2024, (03): 153-155.

[4] 石刚. 无人机低空摄影测量技术在水利工程测量中的应用探究 [J]. 住宅与房地产, 2019, (30): 187-188.

[5] 杨李. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用研究 [J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52(09): 98-99.

[6] 李尤瑾, 崔恒军, 焦建超. 水利工程测量中数字化测绘技术的应用探析 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2023, (09): 32-34.

[7] 包善文. 航空摄影与机载激光雷达集成技术在水利测量中的应用 [J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(S1): 236-239.

[8] 周伟. 论无人机测绘技术在工程测量中的应用 [J]. 产品可靠性报告, 2024(06): 95-96.

[9] 汪建波, 程锦. 浅析无人机测绘技术在建筑工程测量中的应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2023(22): 172-174.DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202322056.

[10] 何惠霞. 浅析无人机遥感技术在测绘工程测量中的应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2023(08): 98-100.DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202308032.