DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)08-0051-05

面向工程测量控制的倾斜摄影测量技术研究

乐 俊,王健宇,雷全勇,吴 宁

(中建三局第三建设工程有限责任公司,武汉 430000)

摘 要:为提高工程测量精度,针对传统测量方法在地形复杂区域作业效率低、成本高的问题,构建了一套集成无人机平台与倾斜摄影测量技术的工程测量系统。该系统通过多传感器协同采集数据,利用尺度不变特征变换算法进行影像特征提取与匹配,结合影像密集匹配、联合平差及表面网格重建等技术流程,实现高精度三维模型的自动化构建。为验证系统效能,研究设计多组控制变量实验,系统分析了飞行高度与控制点数量对模型精度的影响规律。结果表明:飞行高度与模型精度成反比关系,而控制点数量与模型精度成正比关系。在飞行高度固定为 60 m 时,布设 3 个控制点的高程中误差为 0.047 m,较布设 9 个控制点时大 0.020 m;当控制点数量固定为 6 个时,飞行高度 60 m 的高程中误差为 0.035 m,低于 90 m(0.049 m)与 120 m(0.061 m)的误差水平。在测绘效果对比中,研究在食堂区域的测量面积误差仅为 0.68 km^2,相较于三维激光扫描技术的 2.61 km^2,误差减小了 1.93 km^2,展现出更高的测量精度与区域适应性。研究表明,所构建的倾斜摄影测量系统能够有效提升工程测量的作业效率与数据精度,同时节约人力与时间成本,可为复杂环境下的工程测绘提供可靠的技术解决方案。

关键词:工程测量;无人机;三维模型;倾斜摄影测量技术;精度;尺度不变特征变换

中图分类号:TV221.1;V279+.2;TP391.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-7241(2026)08-0051-05

Research on oblique photogrammetric technology for engineering surveying control

Le Jun, Wang Jianyu, Lei Quanyong, Wu Ning

(China Construction Third Engineering Bureau The Third Construction Engineering Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: To enhance the accuracy of engineering surveys, this study addresses the inefficiency and high costs of traditional measurement methods in complex terrain areas by developing an integrated engineering survey system combining UAV platforms and oblique photogrammetry technology. The system employs multi-sensor collaborative data acquisition, utilizes the scale-invariant feature transform algorithm for image feature extraction and matching, and integrates dense image matching, joint adjustment, and surface mesh reconstruction to achieve automatic high-precision 3D model construction. To validate system performance, multiple controlled variable experiments are designed, systematically analyzing the impact of flight altitude and control point quantity on model accuracy. Results indicate an inverse relationship between flight altitude and model accuracy, while a direct correlation exists between control point quantity and model accuracy. At a fixed flight altitude of 60 m, the elevation mean error with 3 control points is 0.047 m, 0.020 m higher than with 9 control points. When control point quantity is fixed at 6, the 60 m flight altitude produced an elevation mean error of 0.035 m, lower than the 0.049 m (90 m) and 0.061 m (120 m) error levels. In comparative survey assessments, the study achieves a measurement area error of only 0.68 km^2 in the cafeteria zone, reducing the error by 1.93 km^2 compared to 2.61 km^2 with 3D laser scanning technology, demonstrating superior measurement accuracy and regional adaptability. The research confirms that the developed oblique photogrammetry system effectively improves engineering survey efficiency and data precision while reducing labor and time costs, providing a reliable technical solution for engineering mapping in complex environments.

Keywords: engineering survey; drones; 3D model; tilt photogrammetry technology; accuracy; scale-invariant feature transform

在测绘行业的不断发展过程中,对测量的要求逐渐提高。然而受到地形、地貌等自然条件的影响,传统的测量方法在进行地物数据采集的过程中,存在一定难度[1-3]。其测量时间较长,人工成本大,采集得到的数据在某些情况下并没有达到现代测绘工程的测量要求。近年来,随着测绘新技术数字化信息化的发展,技术不断地更新换代,更新后的技术在提高工作效率的同时,其智能化、精确化水平不断提高[4-5]。无人机倾斜摄影测量技术,作为一种测绘新技术,其测量的分辨率高,具有较强的针对性,在测量的过程中,其作业方式较为灵活方便[6-8]。为了提高其

收稿日期:2025-04-25;**录用日期**:2025-06-07

基金项目:福建省自然科学基金面上项目(2018J01085)

作者简介:乐 俊(1986—),男,高级工程师,研究方向为智能建造与智能装备研发。

引用本文:乐俊,王健宇,雷全勇,等.面向工程测量控制的倾斜摄影测量技术研究[J].自动化技术与应用,2026,45(8):51-55.(Le Jun, Wang Jianyu, Lei Quanyong, et al. Research on oblique photogrammetric technology for engineering surveying control[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(8):51-55.)

测量精度,研究选择无人机倾斜摄影测量技术,进行测量系统的构建,在多传感器的作用下,对山上某建筑的相关数据进行采集,并构建对应的三维模型,以此促进测量工作的有效开展。

1 规划竣工倾斜摄影测量技术

1.1 无人机倾斜摄影测量系统

无人机倾斜摄影测量系统的硬件系统设计,主要包含 6 个部分,分别为传感器、驱动器、航空控制器、倾斜摄影元件、无人机航空发动机、温控装置。在无人机传感器中,采用微机电系统(microelectro mechanical systems,MEMS),通过其对无人机数据进行实时监测[9-11]。其中,该部分的核心为 MPU9250 九轴惯性测量单元,其包含了多个组成部分,具体的组成结构见图 1。

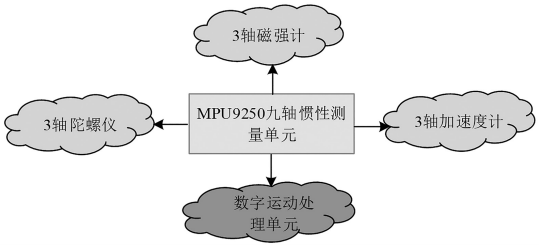


图 1 MPU9250 九轴惯性测量单元具体组成结构

Fig. 1 Specific composition and structure of MPU9250 nine axis inertial measurement unit

在图 1 中,包含 3 轴加速度计、3 轴磁强计等 4 个部分,通过 MEMS 传感器收集相关数据,实现对 9 个坐标系坐标的同时读取。为了缩小无人机主板的体积,研究采用 I2C 接口实现与内部控制器进行通讯,降低主控通用输入/输出占用率,获得更小体积的主板。无人机控制器型号为 STM32F4,包括位置控制器和位姿控制器。位置控制器可细化为高度控制器和水平控制器。该控制器控制无人机飞行运动参数,外接设备为传感器模块。在系统中,引入倾斜测量技术,进行对应元件的安装,以避免无人机引擎振动对测量的影响。无人机发动机采用 DLE120CC,具有较大排量,包括排气模块、供电模块、调速器、无人机发电机。四旋翼电动无人机型号为经纬 M300 RTK,配备 2 000 万像素相机。最大载重为 2.7 kg。测量系统软件功能主要分为影像数据获取和三维模型构建两部分[12]。影像数据获取模块包含 3 部分,分别为数据采集、数据检查、影像预处理,三维模型构建模块包含影像密集匹配[13-15]、表面网格重建等 3 个部分。影像数据获取的流程如图 2 所示。

在图 2 中,在无人机起飞前,首先进行任务提出并考虑气象环境。根据卫星地图[16],借助探查位置和建筑情况,设置飞行参数并制定飞行计划。参考高德地图,规划研究区控制点位置。以此为基础,在现场控制点进行布设。在航摄比例尺 m 中,其数学表达式如式(1)所示。

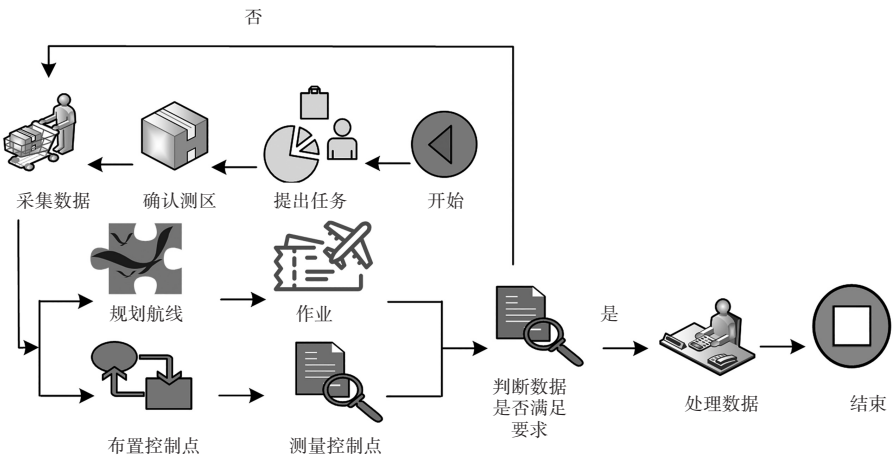


图 2 影像数据获取的流程

Fig. 2 Process of image data acquisition

$$m = \frac{p}{\mathrm{GSD}} \tag{1}$$

式中,将单位像元大小表示成 p, GSD 表示地面分辨率。基准面的具体情况如式(2)所示。

$$h_j = \frac{h_g + h_d}{2} \tag{2}$$

式中,对平均基准面的高度进行设置,将其表示成 h_j, 在区域内,对最高、最低点的平均高程进行表示,将其分别设置为 h_g、h_d。区域地物最高高度公式见式(3)。

$$\begin{cases} \dfrac{h}{F_r} = \dfrac{D_w}{S_w} \\ h = \dfrac{D_w \times F_r}{S_w} \end{cases} \tag{3}$$

式中,h 为测点高度,对相片横向分辨率进行设置,将其表示成 D_w,设置相机镜头实际焦距,其可以表示成 F_r,S_w 代表的意思是相机传感器实际宽度。而 D_w 的数学表达式见式(4)。

$$D_{\mathrm{w}}=\frac{W_{\mathrm{image}}\times \mathrm{GSD}}{100} \tag{4}$$

式中,对图像的宽度进行设置,把其设置成 W_{image}。根据式(3)和式(4),可以得到飞行高度的相关计算公式如式(5)所示。

$$h_{\mathrm{m}}=\frac{W_{\mathrm{image}}\times \mathrm{GSD}\times F_{\mathrm{r}}}{S_{\mathrm{w}}\times 100} \tag{5}$$

式中,h_{m} 表示飞行高度。进行航拍的过程中,飞机对地速度 V 等因素都会对像移量大小 δ 产生一定影响。其中,δ 的计算公式如式(6)所示。

$$\delta=\frac{V\cdot t\cdot f}{h_{\mathrm{m}}} \tag{6}$$

式中,对航摄仪主距进行设置,将其设置为 f,设置曝光时间为 t。在进行航线规划时,需考虑实验区域的高原山地环境、风向等因素,并调整飞行计划。

1.2　三维模型构建

完成测量后,根据所得的影像数据,进行建模操作。其中,涉及的流程如图 3 所示。

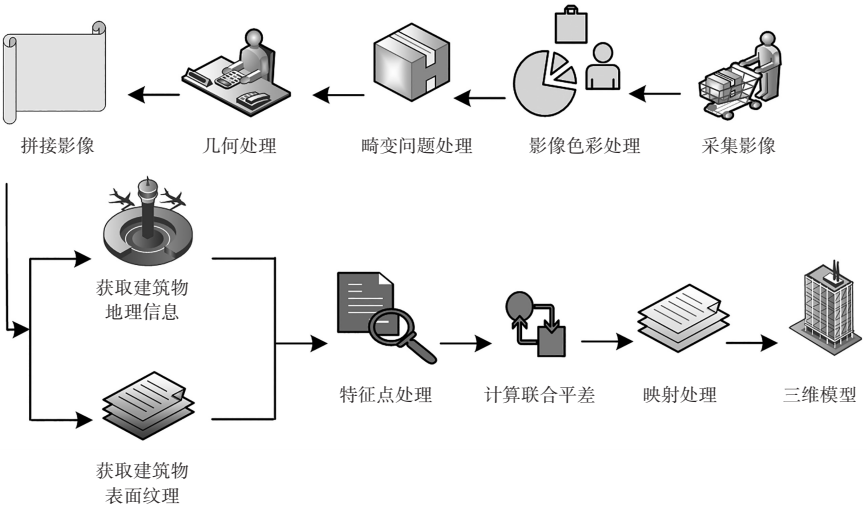


图 3　结合倾斜影像的三维模型构建流程

Fig. 3　Construction process of 3D model combined with oblique image

图 3 中,对无人机影像数据进行预处理,包括均光匀色处理、畸变差纠正和几何纠正等。然后提取影像特征,了解地面建筑物大小位置和表面纹理。进行影像特征匹配,使用尺度不变特征变换算法处理尺度变化等问题。通过该算法处理相关图片,首先进行尺度空间极值检测,获取尺度变化恒定潜在极值点。为了模拟多尺度特性,设置二维图像的尺度空间,如式(7)所示。

$$\boldsymbol{L}(x,y,\delta)=\frac{1}{2\pi\sigma^{2}}\mathrm{e}^{-(x^{2}+y^{2})/2\sigma^{2}}*\boldsymbol{I}(x,y) \tag{7}$$

式中,$\boldsymbol{I}(x,y)$ 表达的含义是二维图像,x 表示图像的横向坐标,y 代表的意思是图像的纵向坐标。$\boldsymbol{L}(x,y)$ 表示尺度空间,对尺度可变高斯函数进行设置,将其表示成 $\boldsymbol{G}(x,y,\delta)$,$\delta$ 代表的意思是高斯函数的标准差,$*$ 表示卷积操作。在高斯差分(difference of gaussian,DOG)方法中,能够用来对图像尺度特征进行检测,其鲁棒性较好。差分空间 $\boldsymbol{G}(x,y,\delta)$ 的计算公式见式(8)。

$$\boldsymbol{G}(x,y,\delta)=\boldsymbol{L}(x,y,k\delta)-\boldsymbol{L}(x,y,\delta) \tag{8}$$

式中,k 表示参数。极值点的精确位置的计算公式如式(9)所示。

$$\hat{X}=-\left(\frac{\partial^{2}D}{\partial X^{2}}\right)^{-1}\frac{\partial D}{\partial X} \tag{9}$$

式中,$\hat{X}$ 表示候选极值点,D 表示函数。而关键点值的数学表达式见式(10)。

$$D(\hat{X})=D+\frac{1}{2}\frac{\partial D^{T}}{\partial X} \tag{10}$$

式中,T 为对比度阈值,$D(\hat{X})$ 值表示关键点值。设置海森矩阵为 $\boldsymbol{H}$,将 $\boldsymbol{H}$ 的特征值的和设置成 $T_{\mathrm{r}}(\boldsymbol{H})$,对矩阵行列式进行设置,将其表示为 $\det(\boldsymbol{H})$,可以得到相关数学表达式如式(11)所示。

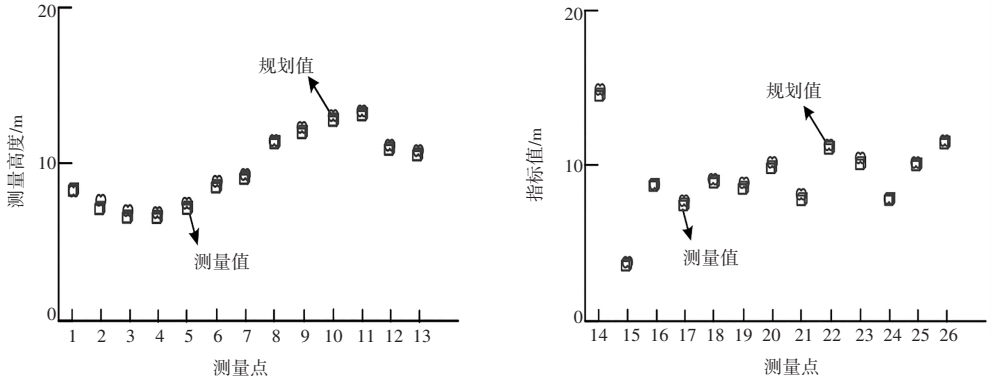
$$T_{\mathrm{r}}(\boldsymbol{H})^{2}/\det(\boldsymbol{H})<(\gamma+1)^{2}/\gamma \tag{11}$$

式中,γ 代表的意思是比值,γ 的取值在 6~10 以内。通过式(11)可以对主曲率进行判断,了解其与设置阈值的大小关系,选取不超出阈值对应的候选极值点,从而达到筛选候选极值点的目的。完成了极值点精确定位工作后,为了实现旋转不变形,研究选择了 SIFT 算法来确定特征点的主方向。并对特征点邻域像素梯度方向分布情况进行分析。研究使用离其最近的高斯图像的选取来计算该邻域某像素点梯度方向情况。同时,采用了欧式距离法来衡量特征向量间的相似度,使用全站仪法对检查点坐标进行测量,并进行结果对比。基于面片的多视图重建算法来恢复稠密表面,得到大量的三维点云。然后,使用精密三角网来构建地表的形态,参考地物的形状等信息,对该网格尺寸进行修改,提高重建效果,并得到对应的地物三维模型。

2　倾斜摄影测量技术工程应用

研究以山上某建筑物为例,进行实验设计。实验区域

中心为研究所选建筑物,该区域的尺寸为 145 m×200 m。通过上述方法中提到的设备进行影像采集,选择 ZTS-421L10 型号的全站仪,对控制点进行测量,该设备的精度控制在±2 mm。研究设置的地面控制点共 28 个,选择变量控制法,进行实验方案设置,将控制点分别设置成 3 种情况,从所有控制点中选取的控制点个数分别为 3 个、6 个、9 个,通过剩余控制点检查研究方法的精度情况。在随机选择 26 个测量点,通过无人机倾斜摄影测量技术,具体结果如图 4 所示。

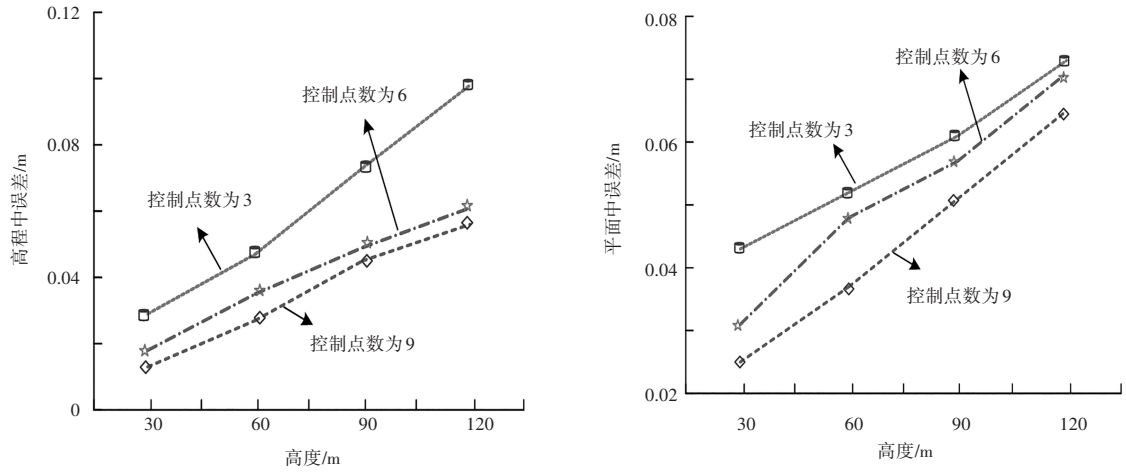


(a) 1 测量点到 13 测量点 (b) 14 测量点到 26 测量点

图 4 测量高度与规划高度对比

Fig. 4 Comparison between measured height and planned height

在图 4(a)中,1 测量点的测量高度与对应的规划高度相等,均为 8.45 m。在 3 测量点中,测量高度为 7.16 m,比对应的规划高度小 0.03 m,而规划高度为 7.19 m。相较于其他测量点的测量值,11 测量点的测量高度值最大,其测量高度为 12.87 m,而 11 测量点对应的规划高度为 12.89 m,该测量点的测量高度略比对应的规划高度小 0.02 m。在图 4(b)中,对于 19 测量点,其测量高度为 8.47 m,而其规划高度为 8.50 m,前者比后者小 0.03 m。无人机倾斜摄影测量技术具有较高的测量精度,其测量效果较好。为具体探究飞行高度和控制点数对结果的影响情况,研究对不同高度下不同控制点对应模型误差情况进行分析,具体结果如图 5 所示。



(a) 高程 (b) 平面

图 5 平面与高程中误差结果

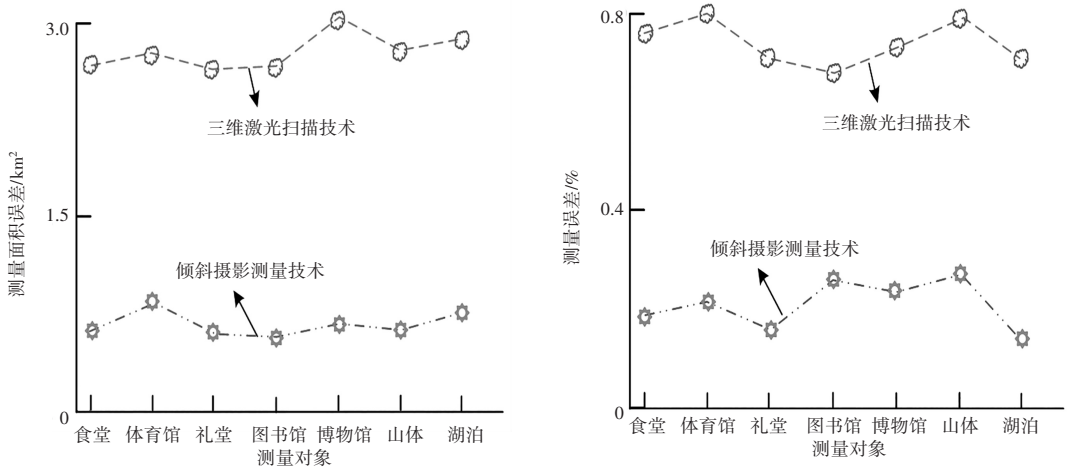
Fig. 5 Results of mean square error between plan and elevation

图 5 中的数据表明,飞行高度越高,研究方法的误差越大;控制点越多,研究方法的误差越小。在相同高度下,不同控制点的中误差情况存在差异。当飞行高度固定为 60 m,控制点数为 3 个时,高程中误差为 0.047 m,比控制点数为 9 个时大 0.020 m;飞行高度固定为 90 m,控制点数为 3 个时,高程中误差为 0.073 m,比控制点数为 9 个时大 0.028 m。飞行高度固定为 120 m,控制点数为 3 个时,平面中误差为 0.073 m,比控制点数为 6 个时大 0.002 m。控制点数固定为 6 个,飞行高度为 60 m 时,其高程中误差为 0.035 m,比飞行高度为 90 m 时小 0.014 m,比飞行高度为 120 m 时小 0.026 m。

实验将三维激光扫描技术作为前一种方法的对比方法,对不同测绘区域进行测量,得到相应的对比结果见图 6。

图 6 中,相较于三维激光扫描技术,倾斜摄影测量技术的测量误差更小,对应的误差率更低。在食堂测量

中,研究方法的测量面积误差为 0.68 km^2,比三维激光扫描技术小 1.93 km^2,后者的测量面积误差为 2.61 km^2。在礼堂测量中,研究方法的测量误差率比三维激光扫描技术小。



(a) 测量面积误差 (b) 测量误差率

图 6 不同测绘区域的对比结果

Fig. 6 Comparison results of different surveying areas

3 结论

为获得更好的检测效果,研究以山上某建筑物为对象,进行测量系统硬件和软件功能设计。借助倾斜摄影测量技术,对建筑物进行测量。在 SIFT 算法等方法的基础上,对多视影像联合平差处理。进行影像密集匹配和表面网格重建,以此来提高模拟的效果,得到最终所需的地物三维模型,并进行应用分析。结果显示,对于 19 测量点,其测量高度为 8.47 m,而其规划高度为 8.50 m,前者比后者小 0.03 m。当飞行高度固定为 60 m,控制点数为 3 个时,高程中误差为 0.047 m,比控制点数为 9 个时大 0.020 m。在食堂测量中,研究方法的测量面积误差为 0.68 km^2,比三维激光扫描技术小 1.93 km^2,后者的测量面积误差为 2.61 km^2。由此可见,研究方法的应用效果不错。尽管如此,倾斜摄影测量技术还存在一定局限,其数据处理比较复杂,需要专业人员进行处理。在今后,可引入人工智能等技术,提高数据处理的智能化程度。

参考文献

[1]盛辉,池海旭,段政明,等. 倾斜摄影测量在建筑附属设施施工中的应用[J]. 地理空间信息,2021,19(1):109-115.
[2]毕卫华,赵星涛,杨化超,等. 基于智能手机的无人机低空倾斜摄影测量系统及其应用研究[J]. 国土资源遥感,2021,33(2):248-255.
[3]闻彩焕,王文栋. 基于无人机倾斜摄影测量技术的露天矿生态修复研究[J]. 煤炭科学技术,2020,48(10):212-217.
[4]王锦. 无人机倾斜摄影测量技术在工程测量中的应用研究[J]. 建材发展导向,2022,20(14):55-58.
[5]娄超雨,孙艳彬,焦启航. 无人机倾斜摄影测量建模技术在基坑工程量测算中的应用[J]. 现代工程科技,2022,1(9):101-104.
[6]武炜,张丽丽,司典浩,等. BIM+无人机倾斜摄影测量融合技术在雄安砻岗再生水厂工程中的应用[J]. 北京工业职业技术学院学报,2022,21(2):1-5.
[7]王琼,方怒放. 切沟形态特征无人机倾斜摄影测量[J]. 农业工程学报,2022,38(8):107-114.
[8]支妍力,周宇,程艳辉,等. 基于无人机倾斜摄影的输电线路环水保地物多光谱影像分类研究[J]. 自动化技术与应用,2025,44(7):89-93,163.
[9]Maleika W. Inverse distance weighting method optimization in the process of digital terrain model creation based on data collected from a multibeam echosounder [J]. Applied Geomatics, 2020, 12 (4): 397-407.
[10]范文华,刘英健,鲍海铭,等. 基于智能感知技术的新能源电站无人机全自主巡检技术[J]. 自动化技术与应用,2025,44(7):61-65.
[11]李友兵. 基于倾斜摄影测量技术和点云数据的古建筑三维模型构建[J]. 测绘科学技术,2023,11(4):334-341.
[12]李延芳,杨顺坡. 基于多源数据融合的水利工程测量信息动态更新系统[J]. 自动化技术与应用,2024,43(1):88-90,138.
[13]余和顺,刘荣,符娇. 影像密集匹配点云数据的建筑物平面分割方法[J]. 测绘科学技术学报,2024,40(4):386-391.
[14]任添翼,彭勃,袁帅,等. 基于无人机冠层三维重建的田间白菜表型研究[J]. 农机化研究,2025,47(10):226-232,242.
[15]魏灵辉,王辉,蒋欣. 利用无人机 LiDAR 点云和影像密集匹配点云更新 DEM 的方法研究[J]. 测绘与空间地理信息,2025,48(7):40-42.
[16]李磊磊,雷玉嵩,梅一林,等. 二维卫星地图像素匹配的无人机视惯定位方法[J]. 中国惯性技术学报,2024,32(11):1078-1085.