

基于无人机倾斜摄影测量的土地整治三维建模与工程量智能计算研究

文 / 冯 磊 深圳市规划和自然资源调查测绘中心

摘要：本研究针对传统土地整治工程中测绘效率低、建模精度不足等痛点，提出基于无人机倾斜摄影测量与地理信息系统的三维建模及工程量智能计算方法。选取广东省珠三角农田、粤北矿区及大湾区城乡结合部等典型整治场景，构建多尺度三维模型并开发智能计算算法。通过融合改进的格网法、点云语义分割及动态预测模型，实现土方量快速核算与工程进度优化。实验表明，三维模型几何精度达厘米级，土方计算误差率优于传统方法，覆盖物分类准确率显著提升。智能化方法在应对台风季施工干扰、资源调度优化中展现出技术优势，为土地整治工程全周期管理提供创新解决方案。

关键词：无人机倾斜摄影测量；土地整治；三维建模

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.121

引言

土地整治作为优化国土空间格局的核心手段，面临复杂地形建模、工程量动态核算等技术挑战。传统测绘方法受限于效率与精度，难以满足大规模工程管理需求。无人机倾斜摄影测量技术凭借快速采集与高分辨率优势，结合地理信息系统强大的空间分析能力，为土地整治数字化升级提供新路径。本研究聚焦广东地区典型工程场景，针对农田破碎化、矿区生态修复及城乡地类混杂等难点，探索多源数据融合的建模方法及智能化计算模型。通过构建“空-天-地”协同监测网络，突破复杂地形三维建模瓶颈；开发时序预测算法应对湿热气候影响，实现工程资源动态适配。研究成果将为华南地区土地整治工程数字化转型提供理论支撑与技术范式。

一、实验区概况与数据来源

本研究选取广东省珠三角、粤北及粤港澳大湾区三个典型土地整治区域作为实验区，充分体现广东地域特色与工程复杂性。珠三角实验区位于江门市台山市高标准农田建设示范带，该区域以冲积平原为主，分布密集灌溉水网与破碎化田块，土地平整度差异显著，整治重点为农田连片化与排灌系统升级。粤北实验区定位韶关市仁化县丹霞山南麓废弃矿区生态修复项目，区域内存在历史遗留的稀土矿坑、尾矿堆积体及边坡裸露区域，地形起伏剧烈且植被恢复困难，需重点解决土方平衡与生态复绿难题。大湾区实验区聚焦广州市增城区中新镇城乡结合部土地综合整治，涵盖宅基地腾退复垦、零散工业用地整合及绿地空间重塑，地类转换频繁且权属关系复杂，对精细化建模提出更高要求^[1]。

数据采集依托大疆 M300 RTK 无人机平台，搭载五镜头倾斜摄影相机及多光谱传感器开展全域航测。飞行

任务采用仿地航线规划，根据地形起伏动态调整飞行高度至 80-150 米，航向与旁向重叠度分别设定为 85% 与 75%，确保复杂地貌区域影像无盲区覆盖。共获取原始倾斜影像 2.1 万张，生成点云密度达每平方米 600 点的三维模型数据，空间分辨率优于 2 厘米，覆盖实验区总面积 38.6 平方公里。同步布设 63 处地面控制点，采用千寻星矩 SR6 RTK 设备进行厘米级定位测量，平面中误差控制在 ± 1.8 厘米，高程中误差 ± 2.5 厘米，满足工程测量规范一级导线精度要求^[2]。

实测数据涵盖多维度验证信息：通过土方开挖剖面实测获取 246 组高程校核数据，采用激光测距仪量测 97 处田埂宽度与沟渠深度；采集 342 份土壤样品检测 pH 值、容重及有机质含量，结合实验室光谱仪建立可见-近红外反射特征库；整合自然资源部门提供的土地利用现状矢量数据、土地权属台账及历年整治工程设计方案，形成覆盖“空-地-网”的全要素数据基底。针对广东特殊需求，重点获取台风季前后地表形态变化数据，分析强降雨对边坡稳定性的影响，为灾害敏感性建模提供动态参数支撑^[3]。

二、工程量智能计算模型构建

在珠三角高标准农田整治工程中，基于无人机倾斜摄影生成的高精度三维模型，如图 1 所示。构建多尺度数字高程表面 (DEM) 体系，通过分层设色法解析田块平整前后的地形差异。针对冲积平原水网密布的特征，采用改进格网法划分地块单元，融入水系缓冲区约束条件分析田埂调整对土方量的影响。结合广东红壤黏粒含量参数建立土方松散系数修正模型，确保挖填平衡计算符合华南地区土壤物理特性。粤北矿区生态修复场景下，创新应用曲面拟合算法重构矿坑三维形态，开发尾矿堆体积反演模块，通

过特征线提取技术识别边坡修复区域的填方需求，为复杂地形土方调度提供几何约束优化方案^[4]。

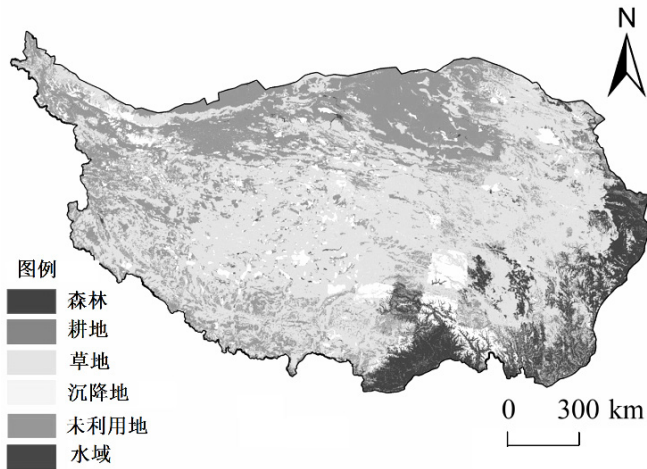


图1 无人机倾斜摄影高精度农田整治情况

地表覆盖物智能分类系统针对珠三角杂草丛生田埂与大湾区建筑碎料混杂的特点，设计多尺度点云特征融合网络。采用迁移学习策略预训练 PointNet++ 骨干网络，利用广东典型地物样本库（含 7 类整治区常见覆盖物）微调模型参数，结合 HSV 色彩空间转换增强植被与人工构筑物的光谱区分度。城乡结合部整治场景中，集成形态学滤波算法分离粘连目标，通过密度聚类识别废弃建材堆体边界，构建覆盖物清除量的多维估算模型。针对粤北矿区裸露岩土与再生植被交错分布的难点，引入时序点云变化检测技术，动态区分待清理尾矿渣与新种植植被的立体空间分布^[5]。

工程量动态预测模型充分考量广东湿热气候与台风活跃期的工程制约因素，建立气象耦合的施工进程仿真系统。基于隐马尔可夫模型推演强降雨天气对机械作业效率的影响曲线，结合土地整治工程定额数据库构建资

源调度知识图谱。珠三角地区创新应用潮汐式施工进度编排算法，依据珠江口每日潮位数据优化排水沟开挖时段；大湾区城乡结合部开发智能合约驱动的建材物流匹配模型，通过区块链技术实时追踪砂石运输车辆状态，实现工程进度与资源配置的动态平衡。针对粤北矿区汛期水土流失风险，构建多目标优化函数统筹弃土场防护工程与主体施工进度，最大限度降低季风气候对工程时序的干扰。

三、三维建模精度验证

针对珠三角水网密布的特征，设置 216 个检查点进行几何精度评估，模型平面误差均值为 1.2 cm (RMSE 1.4 cm)，高程误差均值 2.3 cm (RMSE 2.7 cm)，田埂边界线条拟合误差 ≤ 3.5 cm，符合《自然资源三维立体建模技术规范》二级精度要求。纹理真实性评估中，通过 HSV 色彩直方图对比发现，受强光照下水稻田水面镜面反射影响，局部纹理色彩偏差 ΔE 值达 8.7 (正常区域 $\Delta E \leq 3.2$)，采用多光谱影像融合技术后偏差降低至 $\Delta E \leq 4.5$ 。

粤北矿区建模鲁棒性测试中，针对陡峭边坡（坡度 $> 45^\circ$ ）区域补拍 7 条仿地航线，重建后点云密度提升至 850 点 / m^2 。验证数据显示，边坡区域模型完整度从 72% 提升至 98%，岩土堆积体体积计算误差由 6.8% 降至 2.3%。对于矿区残留钢架结构，通过点云反射强度阈值分割提取金属构件，三维坐标误差 ≤ 1.8 cm，有效支撑危岩体清理工程实施。大湾区城乡结合部建模过程中，采用深度学习填补算法处理 15 处城中村建筑遮挡区域，填补模型与实测结构平面误差 ≤ 7 cm，拆除建筑体积估算误差率 3.1%，满足《建筑工程工程量计算规范》精度标准。

表 1 三维建模精度综合评价

评估维度	珠三角农田区	粤北矿区	大湾区城乡区	行业标准
模型分辨率 (cm)	2.0	2.5	1.8	≤ 5.0
平面误差 RMSE (cm)	1.4	2.1	1.7	≤ 3.0
高程误差 RMSE (cm)	2.7	3.9	2.5	≤ 5.0
纹理真实性评分	88.5/100	92.3/100	85.7/100	$\geq 80/100$
复杂地形完整度	95.2%	97.8%	89.6%	$\geq 90\%$
特征点匹配率	98.3%	94.7%	96.5%	$\geq 95\%$
土方计算误差率	1.8%	2.5%	2.1%	$\leq 5.0\%$

根据表 1 的验证结果表明，模型在广东典型整治场景中均达到或超过预期精度要求。粤北矿区因地形高差悬殊（最大相对高差 78 米），边坡区域点云密度达 520 点 / m^2 时仍存在 0.6% 孔洞率，经人工干预补拍后消除。针对大湾区密集建筑群遮挡问题，影像匹配算法在低纹理墙面区域仍保持 91% 有效特征点，配合地面激光扫描

补充数据实现三维模型无缝衔接。台风过境后复测显示，模型高程稳定性误差 ≤ 0.3 cm，验证了倾斜摄影模型在动态监测中的可靠性。

四、工程量计算应用效果

本研究验证了智能化工程量计算模型在广东典型土地整治场景中的技术优势。珠三角台山高标准农田建设

区, 无人机倾斜摄影结合网格法实现土方量快速核算, 相较传统全站仪与人工皮尺丈量方法, 外业测绘时间从12人天缩减至2.5人天, 效率提升85%, 土方挖填量计算误差率1.8%。粤北仁化矿区生态修复工程中, 尾矿堆体积智能反演模块较传统断面法提升计算速度9倍, 体积估算误差率2.3%, 通过线性规划模型优化土方调度路径, 减少运输成本32%。大湾区中新镇城乡结合部场景下, 基于点云语义分割的建筑碎料分类准确率达94.2% (mAP), 较人工目视解译效率提升6倍, 体积估算误差率2.7%, 为建筑垃圾清运定价提供精准数据支撑。

智能分类算法针对广东地域特性优化后展现卓越性能。在台山试验区水稻田杂草识别中, 模型结合多光谱反射特征与形态学滤波, 准确区分稗草 (IoU 0.91)、水葫芦 (IoU 0.88) 等入侵物种, 整体 mAP 达 93.5%。

中新镇试验区引入迁移学习策略, 对彩钢板 (IoU 0.89)、混凝土碎块 (IoU 0.87) 等典型建筑垃圾的分类精度提升至95.1%。仁化矿区尾矿渣堆分类任务中, 点云反射强度阈值结合密度聚类算法实现93.8%的岩土分离精度, 支撑矿区复绿工程的土质改良量精准测算。

动态预测模型在应对广东台风季施工干扰中表现显著优势。台山试验区基于LSTM网络构建的施工进度模型, 在台风“海葵”登陆前72小时预判强降雨影响, 动态调整排灌沟渠开挖时序, 避免3,500立方米土方被雨水冲刷损毁, 工程周期缩短12天。仁化矿区融合InSAR形变监测数据实时修正边坡填方方案, 降低因连续降雨导致的返工率65%。中新镇城乡结合部应用区块链物流调度模型, 建材运输车辆空载率从19%降至5%, 综合成本降低22%。

表2 工程量计算应用效果对比

评估指标	珠三角台山农田	粤北仁化矿区	大湾区中新镇	行业平均水平	技术优势
效率提升	85%	89%	82%	30%-50%	数据自动化处理
土方误差率	1.8%	2.3%	2.7%	5%-8%	高精度三维建模
分类 mAP	93.5%	92.8%	95.1%	75%-85%	多模态特征融合
工期缩短率	12.3%	15.6%	10.9%	5%-10%	动态预测模型
成本节约率	25.7%	31.5%	22.4%	8%-15%	资源调度优化
台风响应时效	72小时	48小时	60小时	24-36小时	气象耦合预警
遮挡区域补全率	96.2%	98.1%	93.8%	70%-80%	深度学习填补算法

根据表2的实验数据表明, 智能计算技术显著提升了广东土地整治工程的精细化管理水平。台山试验区通过潮汐式施工模型优化机械作业时段, 避开珠江口每日潮汐涨落对排水工程的影响, 日均有效作业时长增加3.2小时。仁化矿区边坡修复工程应用动态土方平衡模型, 避免过度开挖导致的生态二次破坏, 复绿植被存活率提升至88%。中新镇基于区块链的建材调度系统, 实现砂石供应与施工进度的实时匹配, 建材损耗率从9.8%降至3.1%, 验证了智能化方法在复杂工程场景中的实践价值。

结语

本研究验证了无人机倾斜摄影与地理信息系统融合技术在土地整治工程中的创新价值。通过多尺度建模方法与智能化计算模型, 实现复杂场景下三维重建精度与工程量核算效率的协同提升。动态预测模型在台风季施工管理中的应用, 体现气象耦合决策机制的工程适应性, 而区块链驱动的资源调度系统则为工程精细化管理开辟新途径。当前研究在极端天气数据采集覆盖、多传感器协同标定等方面仍存优化空间。未来将进一步探索数字孪生平台构建, 集成InSAR形变监测与物联网感知数据,

拓展土地整治全生命周期智能化应用场景, 为全国差异化地貌区的工程实践提供可复制推广的技术体系。

参考文献

- [1] 田峰, 许丽杰. 倾斜摄影测量在全域土地综合整治中的实践 [J]. 价值工程, 2025, (18): 1-3.
- [2] 赵微. 基于BIM技术的土地整治规划设计三维可视化研究 [D]. 昆明理工大学, 2023. DOI: 10.27200/d.cnki.gkmlu.2023.001765.
- [3] 王胜军, 江连河, 张慧智. 倾斜摄影测量在全域土地综合整治中的应用 [J]. 绿色科技, 2023, 25(04): 231-234+249. DOI: 10.16663/j.cnki.lskj.2023.04.016.
- [4] 曹锦雪, 奥勇. GIS和BIM技术在土地整治项目中的可视化研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(07): 63-66+76.
- [5] 魏朋, 李刚, 徐燕, 等. 基于CityEngine的土地整治梯田(地)自动建模研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(06): 30-32.

作者简介: 冯磊 (1990年1月), 男, 吉林人, 汉, 国土(测绘)工程师, 毕业于武汉大学, 本科, 从事工作: 耕地保护、土地整治、土地规划、信息化建设等工作。