

可搭载哈苏 P1 全画幅相机，有效像素 5000 万，保证远距离拍摄影像清晰度；植被覆盖率超 60% 的区域选择 RIEGL miniVUX-1UAV 激光雷达设备，测距精度 $\pm 5\text{cm}$ ，点云密度 100 点 / m^2 ，可穿透中低植被获取地面真实高程数据。像控点布设采取“自适应 + 分级”办法，依照地形复杂程度公式 $N=k \times S \times \sigma / H$ 来精确计算布设数量， k 值按照测区地形类型决定，山地 0.5，丘陵 0.3，山间平原 0.2。在山脊、山谷、坡脚等地形特征点强制布设，用梅花形均匀分布的方式，整体上保持 500 米间距，特殊地方加密到 300 米。像控点标志为 $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$

4.3 后期处理阶段，多技术融合数据解算

后期处理用软件协同加误差修正的方式，创建起预处理、解算、建模、修正闭环体系。影像预处理阶段用 PhotoScan 软件批量匀色，用色彩平衡算法统一影像色调，用相机内参数进行畸变校正，用 SIFT 算法剔除模糊、曝光异常、重叠度过高的冗余影像，保留的有效影像率 $\geq 95\%$ 。空三解算采用 ContextCapture 和 Pix4D 联合解算，先用 Pix4D 初解得到外方位元素的初始值，再导入 ContextCapture 精解，用光束法平差进行交叉验证，重投影误差控制在 0.3 像素以内，对粗差较大的像点采用人工干预剔除。三维建模时利用 Smart3D 软件和倾斜摄影数据创建高密度点云模型，点云密度 ≥ 500 点 / m^2 ，拉花、空洞处采用立体像对量测补测，补测精度为 0.1m 。采用气象补偿算法，用飞行时的温度、气压数据来修正影像畸变，温度每变化 10°C 相机内参数调整 0.02% ，气压每变化 10kPa 飞行高度调整 0.5m 。陕西水电工程中，在该算法下 -5°C 低温、 85kPa 低气压环境下依然可以得到平面精度 1.9cm 、高程精度 2.8cm 的高精度结果。最终用 EPS 软件完成地形图采集，对等高线、地物要素进行人工核查修正，保证成果符合《无人机航测数字地形图技术规程》的要求。

4.4 质量控制阶段：全流程精度检测体系

形成“分段检测、综合查验、动态反应”质量把控系统，保证精度始终处在可控范围之内，并且能实现问题的即时修正。前期检测 DEM 数据精度，采用随机抽样法抽取 20% 的区域设置实地采样点，利用 GNSS 静态测量得到真实高程并与 DEM 数据进行对比计算中误差，保证 DEM 高程中

误差 $\leq 1\text{m}(1 : 5000)$ ，如果不满足则重新融合数据。飞行中利用无人机地面站实时监测重叠度、航高稳定性、电池电量等参数，设置航高偏差 $\pm 5\text{米}$ 、重叠度偏差 $\pm 5\%$ 的预警阈值，一旦发现异常马上停止飞行，重新规划航线再作业。后期处理时用分层抽样法选取 10% 至 15% 的检查点，优先选择道路拐点、房角点、高程特征点等，用 GNSS RTK 技术实测坐标，通过距离中误差公式 $M = \sqrt{[\sum (P-Q)^2 / (n-1)]}$ 、高程中误差公式 $M = \sqrt{[\sum (H-H')^2 / (n-1)]}$ 计算，保证 $1:500$ 比例尺地形图平面精度 $\leq 0.3\text{m}$ 、高程精度 $\leq 0.5\text{m}$ 。设置动态反馈环节，把检测结果传回前期规划和数据采集阶段，某个区域精度不够时，找到原因再改航线参数或者增多像控点重新飞行。项目结束后形成包含技术方案、原始影像、空三报告、精度检测报告等的完整档案，用区块链技术存证数据，给后续项目提供可追溯的参考依据，建立成果复用数据库，把同类型测区技术参数沉淀下来，降低重复测绘成本。

5 结语

综上所述，本文从无人机航测山区地形测绘精度优化入手，对前期规划、数据采集、后期处理、质量控制这四个环节的关键影响因素进行剖析，构建出一个全程技术优化方案。实践案例显示，运用 DEM 融合航线规划、自适应像控点布设以及多软件协同解算的方法，可以很好地解决山区测绘中由于分辨率不均和模型畸变所造成的误差，从而大幅提高成果精度和作业效率。但是研究还存在复杂气象条件下精度控制、AI 技术深度融合等不足。可以进一步研究机器学习在航线自动优化中的应用，结合激光雷达和视觉 SLAM 技术来提高仿地精度，并推进技术标准化的建设，给山区测绘的高质量发展提供更强的技术支撑。

参考文献

- [1] 许春萌,段勇. 多旋翼无人机航测在山区水库测量中的应用[J]. 水利科技与经济,2024,30(05):101-105.
- [2] 郑光辉,张军. 无人机航测技术在山区河道治理中的应用[J]. 江西测绘,2023,(04):39-42.
- [3] 孟涛. 无人机航测在山区水利测绘中的应用要点[J]. 石材,2023,(05):94-96.
- [4] 张顺迎. 多旋翼无人机航测在山区水库测量中的应用[J]. 河北水利,2022,(12):48+17.

Precision Analysis of 3D Cadastral Scene Applications

Jun Qiu Yuanzhi Li

First Surveying and Mapping Institute of Hunan Province, Changsha, Hunan, 410000, China

Abstract

With the advancement of digital and 3D-oriented cadastre information management, the precision construction and application of 3D cadastral scenes have become increasingly prominent. This paper elaborates on the precision requirements for various application scenarios of 3D cadastral scenes, while also discussing the impact of data collection and processing accuracy. Based on high-precision cadastral data acquisition, a professional processing workflow is established to create 3D cadastral models, followed by precision evaluation to analyze the application effects of these models. The study concludes that proper data processing can effectively enhance the accuracy of 3D scenes, thereby improving their utility for subsequent applications. It proposes optimization strategies for enhancing precision and refining application scenarios in 3D cadastral systems. Finally, the research provides practical references for future 3D cadastral information management practices.

Keywords

3D cadastral; accuracy assessment; data acquisition; data processing; scenario application; application effect

三维地籍场景应用精度分析

仇俊 李远志

湖南省第一测绘院，中国·湖南长沙 410000

摘要

由于地籍信息管理朝着数字化、三维化的方向发展，三维地籍场景的精准化构建与应用也愈加显现。笔者就三维地籍场景的不同应用场景，对其精度要求做了详细说明，同时针对其数据采集及处理的精度影响展开论述；在采集高精度的地籍数据的基础上开展专业的处理流程，建立三维地籍模型，并通过精度评价的方式展开地籍模型应用的效果分析。基于此得出合理的数据处理能有效提高三维场景的精度，更好地服务于后期的应用效果，并给出适用于三维地籍场景精度的提高以及应用场景的应用优化方案。最后为今后三维地籍信息管理的实践提供了参考。

关键词

三维地籍；精度评估；数据采集；数据处理；场景应用；应用效果

1 引言

由于我国城市化进程的快速发展以及城市建设过程中建设用地资源的相对稀缺，在以往二维地籍模式下已无法有效应对如今的各类复杂空间关系、立体产权及地下空间利用等情况，因此引入了三维地籍技术来建设真实、精确度高的三维场景，实现地物、地物与人之间的融合感知，同时将真实的三维场景用于地籍相关业务工作中，并辅以真实可靠的三维数据信息开展更实用化的服务工作^[1-3]。其中，地籍三维场景精度是衡量场景成形优劣的关键因素。在不同的应用场景下，对地籍三维场景精度的要求也不相同，例如，在进行土地确权登记时需要达到厘米级精度，而在进行城市规划等工作时则需达到米级精度即可，因此，研究地籍三维场景的精度需求并探索其对场景精度产生影响的机理，从而

指导三维地籍系统更为合理有效地进行构建和使用都具有重要的价值和意义^[4-6]。

本文就三维地籍场景应用精度问题进行研究，在此基础上进行了以下工作：一是从各种应用场景出发确定不同的精度要求；二是基于 GNSS/INS 组合与激光雷达扫描仪的数据采集方式获取高精度地籍数据；三是通过 ContextCapture 软件和泊松重建算法进行数据处理以及三维建模；四是构建精度评估体系，利用交叉验证法检验三维地籍场景精度；五是对其应用效果进行分析，检验优化后的三维地籍场景是否能够在实际应用过程中使用。

2 研究方法与数据处理

2.1 数据采集

利用多传感器集成技术对数据采集，并且采用了高精度测量仪器。主要设备为：NovAtelProPak6 全球导航卫星系统接收机（厘米级定位精度）、RieglVZ-400i 三维激光扫描仪（扫描速度 40 万点 / s，测距精度 ±3mm）及

【作者简介】仇俊（1983—），男，本科，高级工程师，从事基础测绘、实景三维、低空无人机遥感等研究。

CanonEOS5DSREDSMAX 数码相机等。主要技术指标为：平面定位精度 (H/V) $\leq \pm(2.5+1 \times 10^{-6}x/D)$ mm, 高程精度 ± 3 mm; 点云密度 ≥ 1000 点 / m²; 影像分辨率达到 2 cm / 像元。

数据采集流程包括前期准备（测区踏勘、控制网布设、设备检校）、现场采集（车载和架站相结合的方式）、数据记录和质量控制。本次数据采集共获取地籍点 1000 个，覆盖面积约 5 平方公里，点云数据约 50GB，影像数据约 20GB。

2.2 数据处理

利用先进的技术手段完成数据处理，才能达到准确且适用三维地籍场景的目的。（1）数据预处理：包含数据清洗（剔除异常值 / 离群点 / 重复数据）；数据去噪（结合使用统计离群点移除滤波器以及半径离群点移除滤波器两种滤波器对噪声数据进行去除）；数据配准（使用 ICP 迭代最近点算法配准，配准精度控制在 2cm 以内）；数据融合（综合考虑 GNSS、IMU 及激光雷达数据生成高精度点云数据）。

（2）三维建模：运用泊松重建算法进行三维建模，这是根据点云数据来进行三维网格重建的一种方法，通过求解泊松方程实现隐式曲面的重建，可有效的去除噪音数据并得到光滑连续的三维曲面，具体步骤分为法向量估计（利用 PCA）、八叉树构建（设置深度为 10，分辨率为约 2cm）、泊松方程求解以及等值面提取（使用 Marching 本文就三维地籍场景应用精度问题进行研究，在此基础上进行了以下工作：一是从各种应用场景出发确定不同的精度要求；二是基于 GNSS/INS 组合与激光雷达扫描仪的数据采集方式获取高精度地籍数据；三是通过 Cubes 算法）等，可以很好的处理一些噪音数据并生成平滑连续的网格模型，并且三维重建精度很高，能达到厘米级左右。

（3）纹理映射：采用 UV 映射技术实施纹理映射时主要是经过对纹理图样拍摄（用数码相机拍摄，成像分辨率要大于 2cm/ 像素）、纹理坐标生成（利用自动生成法）、纹理图样处理（色差调整、亮度修正、图片拼接）、纹理映射与优化这几个步骤，UV 映射能够使三维地籍场景拥有非常好的逼真度以及视觉表现力，纹理映射误差不超过 1 个像素。

（4）精度验证：利用交叉验证的方法进行精度检验，按照随机划分的方式，把采集的数据划分成训练集（占数据总量的 70%）、测试集（占数据总量的 30%），其中训练集用来建立三维模型，测试集用来检验三维模型的精度。检验指标包括平面位置误差、高程误差、均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE)，使用交叉验证法对三维地籍场景精度进行全面评定。

3 实验与结果分析

3.1 实验设计

为验证本文方法，采用三维地籍场景构建及精度检测

实验，选取某城市中典型建成区作为试验区，试验区范围约 5km²，用地性质包含住宅用地、商业用地和工业用地等，具有较强的示范性；实验平台使用 Intel Corei9-10900K 处理器，内存 64GB，显卡 NVIDIA RTX3090，软件环境包括 Windows10 操作系统，ContextCapture、CloudCompare 等软件。

实验内容包括：（1）通过布设 50 个控制点，采集地籍点 1000 个，得到点云数据约 50GB、影像数据约 20GB 的数据采集试验（2）利用采集的数据进行预处理、三维建模、纹理映射等数据处理试验；（3）利用交叉验证法进行三维地籍场景精度评估试验；（4）利用建立的三维地籍场景实现对土地管理和城市规划等方面的运用效果试验。

3.2 精度评估结果

通过交叉验证方法对三维地籍场景的精度进行评估，评估结果如下：

（1）平面位置精度：测试集包含 300 个地籍点，平面位置误差的统计结果如表 1 所示。X 方向的 RMSE 为 0.035m，Y 方向的 RMSE 为 0.038m，综合 RMSE 为 0.036m，满足地籍测量规范中对于界址点精度（ ± 0.05 m）的要求。

表 1 平面位置误差统计结果

统计指标	X 方向 (m)	Y 方向 (m)	综合 (m)
最大值	0.089	0.092	0.095
最小值	0.003	0.002	0.004
平均值	0.028	0.031	0.029
均方根误差	0.035	0.038	0.036
标准差	0.021	0.023	0.022

（2）高程精度：高程误差的统计结果如表 2 所示，高程方向的 RMSE 为 0.025m，满足地籍测量规范中对于高程精度（ ± 0.03 m）的要求。

表 2 高程误差统计结果

统计指标	Z 方向 (m)
最大值	0.067
最小值	0.001
平均值	0.019
均方根误差	0.025
标准差	0.016

精度分布分析：由图 1 可知：误差在整个测区内分布比较均匀，不存在明显系统性误差，但在建筑物密集的地方，误差略大一些，因为此区域遮挡较多，不易于采样；而在开阔的地方，误差较小，精度也相对较高。从直方图可以看出，无论是平面位置误差还是高程误差都呈现出了几乎符合正态分布的特性，所以误差的分布还是比较合理的，不存在比较明显的系统性的偏差；由图 1 可知：累计分布曲线表示有 68% 的测试点平面位置误差 < 0.035 m，有 95% 的测试点误差