

# 实景三维中国建设中高精度地形建模的技术难点与解决方案探析

郭相相 王春燕

三和数码测绘地理信息技术有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i6.2354

**[摘要]** 本文旨在系统剖析实景三维中国建设过程中高精度地形建模所面临的关键技术难点,并提出相应的系统性解决方案。通过构建融合一致性误差与精度损失量化模型,结合分区耦合优化策略与分布式并行架构,对多源数据融合、复杂地形精度控制及大规模数据处理等瓶颈问题进行深入探讨。结果表明,所提出的方法在数据融合一致性、复杂地形建模精度及计算渲染效率方面均取得显著提升。研究结论显示,上述技术途径可有效支撑厘米级地形建模的工程实现,为实景三维中国建设提供可靠的技术支撑。

**[关键词]** 实景三维中国; 地形建模; 点云处理; 精度控制; 分布式计算

中图分类号: P21 文献标识码: A

## Analysis of Technical Difficulties and Solutions in High-Precision Terrain Modeling for the Construction of Realistic 3D China

Xiangxiang Guo Chunyan Wang

Sanshe Digital Surveying and Geoinformation Technology Co., Ltd.

**[Abstract]** This paper aims to systematically analyze the key technical challenges faced in high-precision terrain modeling during the construction of 3D Real-Scene China, and propose corresponding systematic solutions. By constructing a fused model integrating consistency error and precision loss quantification, combined with partitioned coupling optimization strategies and distributed parallel architecture, this study deeply explores bottleneck issues such as multi-source data fusion, precision control of complex terrains, and large-scale data processing. The results show that the proposed method has achieved significant improvements in data fusion consistency, complex terrain modeling precision, and computational rendering efficiency. The research conclusions indicate that the aforementioned technical approaches can effectively support the engineering realization of centimeter-level terrain modeling, providing reliable technical support for the construction of 3D Real-Scene China.

**[Key words]** Realistic 3D China; Terrain Modeling; Point Cloud Processing; Precision Control; Distributed Computing

实景三维中国建设作为国家新型空间基础设施的核心内容,对高精度地形建模提出了迫切需求<sup>[1]</sup>。然而,当前工程实践中仍面临多源异构数据融合一致性不足、复杂地形区域建模精度难以控制,以及海量数据处理与实时渲染效率低下等突出问题<sup>[2]</sup>。尽管现有技术已在单一环节有所进展,但缺乏系统性的集成解决方案<sup>[3]</sup>。为此,本文引入误差量化分析与智能优化方法,通过构建融合与精度评价模型,提出一套涵盖数据融合、地形优化与并行处理的技术体系,旨在系统性提升地形建模的整体质量与效率,为后续工程实践提供方法依据。

### 1 工程概况

#### 1.1 工程背景与需求分析

实景三维中国建设是自然资源部落实《实景三维中国建设实施方案(2021—2025年)》的核心工程,旨在构建全国统一、分级分布、权威可靠的三维时空基底,为国土空间规划、灾害防治、城市治理等提供厘米级空间参考<sup>[4]</sup>。某市主城区作为首批试点,承担验证政策落地与技术路线的示范使命,需在2024年底前完成980km<sup>2</sup>范围内优于0.2m格网精度、高程中误差≤0.15m的高保真地形模型<sup>[5]</sup>。该模型将直接支撑城市更新、洪涝模拟、地下空间开发等高频决策场景,并服务于市级国土空间总体规划与韧性城市专项规划,从而在国家与城市两级治理体系中确立其核心定位与不可替代的价值锚点。

#### 1.2 工程区域概况与数据基础

某市主城区位于东经118° 46′ —119° 04′、北纬31° 52′ —32° 08′, 呈“南丘北平”地形格局, 南部老山最高海拔382m, 北部平原高程不足15m, 全域兼有陡坡与缓坡, 属于典型的山区—平原复合地貌。工程覆盖980平方公里, 其中山地占34%, 平原占66%, 为多源数据融合与建模一致性验证提供了典型场景。数据获取方面, 采用机载LiDAR航摄, 平均点云密度达20点/平方米, 同步获取10厘米分辨率真彩色影像, 累计原始点云2.1TB、影像4.3TB。布设GNSS控制点200个, 平面与高程精度分别达到±8mm和±15mm, 并结合历史DOM与水下地形数据, 构建了空天地一体化的数据资源池, 为厘米级高精度地形建模奠定了坚实基础, 详见表1。

表1 工程区域多源数据基础参数表

数据类型	采集时间	空间分辨率/密度	精度指标	数据量
机载LiDAR点云	Mar-23	20点/m <sup>2</sup>	高程中误差0.10m	2.1TB
无人机影像	Mar-23	10 cm	平面误差±5cm	4.3TB
GNSS控制点	Apr-23	200点	平面±8mm, 高程±15mm	0.2MB
历史DOM	Aug-22	0.2 m	平面误差±15cm	0.8TB

## 2 实景三维地形建模的关键技术难点分析

### 2.1 多源异构数据的融合一致性问题

在实景三维地形建模中, 多源异构数据的融合一致性是核心挑战之一, 主要体现在坐标基准、数据格式与精度层级的结构性差异上。LiDAR点云、无人机影像与GNSS控制点分别采用不同的坐标系与数据格式, 导致基准转换过程中易引入平面残差与高程系统偏差。同时, 点云在植被区精度下降, 影像高程重建受纹理缺失影响, 且控制点分布不均制约全域精度均衡, 冗余数据还会引发纹理错位与“重影”等现象。为系统评估融合误差, 本文构建如下一致性误差模型:

$$E_{fusion} = \sqrt{\alpha \cdot \left( \sigma_{\Delta H}^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{coord,i}^2 \right) + \beta \cdot RMSE_{redund}} \quad (1)$$

式(1)中,  $E_{fusion}$ 表示融合一致性误差(单位: m),  $\sigma_{\Delta H}$ 为高程基准转换残差的标准差(单位: m),  $\delta_{coord}$ 是平面坐标系转换误差(单位: m),  $RMSE_{redund}$ 代表冗余数据导致的局部匹配均方根误差(单位: m),  $\alpha$ 、 $\beta$ 分别为坐标系统误差与冗余干扰的权重系数(无单位),  $n$ 为控制点数量。该模型为后续的一致性优化提供了关键的量化依据。

### 2.2 复杂地形区域的建模精度控制难点

在实景三维地形建模中, 复杂地形区域的精度控制面临多重挑战。陡峭山区因激光扫描入射角限制, 山体背阴面点云密度不足(<5点/m<sup>2</sup>), 易形成建模空洞; 植被覆盖区受冠层遮蔽影响, LiDAR地面点分类误差显著, 导致高程异常抬升; 水域边缘则因水面镜面反射与动态变化, 引发点云缺失与岸线锯齿状偏移。现有方法如克里金插值、多回波滤波等, 在复杂岩体、高密度植

被及水陆边界处均存在局限。为量化地形属性与精度损失的关系, 建立如下模型:

$$\Delta \varepsilon = K \cdot \left( e^{-\lambda \cdot \rho} + \frac{\theta}{90^\circ} \cdot \zeta_{surf} \right) + M \cdot \beta_{veg} \quad (2)$$

式(2)中,  $\Delta \varepsilon$ 表示高程精度损失值(单位: m),  $\rho$ 为点云密度(单位: 点/m<sup>2</sup>),  $\theta$ 是地形坡度(单位: °),  $\zeta_{surf}$ 表示地表粗糙度指数(无单位),  $\beta_{veg}$ 为植被覆盖度(无单位),  $K$ 、 $M$ 分别是地形与植被的修正系数(无单位),  $\lambda$ 为点云密度衰减因子(单位: m<sup>2</sup>/点)。该模型揭示点云密度、坡度及植被覆盖是影响精度的核心因素, 为后续分区优化提供理论依据, 见表2。

表2 复杂地形区域建模误差对比表

地形类型	主要误差来源	现有处理方法	平均误差(m)	局限性
陡峭山区(>35°)	点云盲区	克里金插值	0.82	过度平滑岩体结构
高密度植被区(NDVI>0.7)	冠层遮蔽	布料模拟滤波	0.68	低估地表高程
水域边缘	镜面反射	影像边缘提取	1.25	岸线锯齿化
裸岩-土壤过渡带	光谱混淆	监督分类	0.47	边界模糊

### 2.3 大规模数据的高效处理与实时渲染瓶颈

某市主城区实景三维地形建模工程涉及500GB原始点云与4.3TB影像数据, 传统单机处理流程需耗时72h以上, 其中点云去噪与构网阶段占85%计算资源; 实时渲染环节受限于三角面片数量(全域超20亿面片), 在标准工作站配置下帧率不足15fps, 无法满足城市规划实时交互需求。效率瓶颈主要源于三方面: I/O读写速度制约(HDD顺序读写<200MB/s), 导致数据加载耗时占处理周期40%; 串行计算架构无法充分利用多核CPU/GPU资源, 单节点CPU利用率仅35%; 渲染引擎缺乏动态LOD机制, 全分辨率加载导致显存溢出。其核心矛盾在于计算、存储与I/O资源之间的严重失衡。为突破此瓶颈, 上述将提出基于分布式并行与动态调度的系统性架构。

## 3 高精度地形建模的解决方案与应用效果验证

### 3.1 多源数据融合的一致性优化方法

针对多源异构数据融合中的一致性优化问题, 本文提出了基于CGCS2000统一框架的两步优化策略。首先通过七参数布尔沙模型实现WGS84至CGCS2000的坐标转换, 控制平面残差; 融合EGM2008与地方似大地水准面模型以压缩高程系统偏差。在此基础上, 引入GNSS控制点约束的ICP配准, 实现LiDAR点云与无人机影像的亚厘米级对齐, 并结合基于局部熵的过滤规则剔除冗余数据, 有效抑制纹理错位与重影。优化后, 平面与高程内符合精度分别提升至0.02m和0.04m, 融合一致性误差显著降低, 为厘米级地形建模奠定了高精度几何基础, 见表3。

### 3.2 复杂地形区域的精度提升策略

表3 多源数据融合优化前后关键指标对比

指标	优化前	优化后	提升幅度
平面残差(m)	0.30	0.03	90%
高程系统偏差(m)	0.21	0.05	76%
融合一致性误差 $E_{fusion}$ (m)	0.45	0.08	82%
平面内符合精度(m)	0.15	0.02	87%
高程内符合精度(m)	0.12	0.04	67%

针对复杂地形区域建模精度不足的问题,本文提出分区耦合的精度提升策略。在陡峭山区,采用基于PointNet++的语义补充方法增强点云密度,并结合自适应高程约束降低地形误差。对于高密度植被区,通过影像增强与点云反射强度融合,利用随机森林分类提升地面点识别精度。针对水域边缘动态偏移,构建双水位模型并结合Alpha-Shapes算法实现岸线精准提取。经验证,上述策略显著降低了各类地形的高程误差,有力支撑了0.2米格网DEM在复杂环境下的可靠性,形成了一套系统性强、可解释的精度优化框架,见表4。

表4 复杂地形区域应用新策略后精度提升效果

地形类型	原平均误差(m)(表2)	新策略后误差(m)	精度提升幅度	关键技术贡献
陡峭山区(>35°)	0.82	0.3	63%	PointNet++语义补充、自适应高程约束
高密度植被区(NDVI>0.7)	0.68	0.25	63%	影像增强、反射强度融合、随机森林分类
水域边缘	1.25	0.28	78%	双水位模型、Alpha-Shapes岸线提取
裸岩-土壤过渡带	0.47	0.18	62%	多特征联合分类、边界优化算法

### 3.3 大规模数据的高效处理与渲染架构

针对大规模地形数据处理与实时渲染效率低下的问题,本文构建了分布式GPU并行架构。通过NVMe-oF实现高速存储访问,将I/O等待占比从40%降至8%;计算层基于Kubernetes调度容器

化任务,结合A100GPU与CUDA-awareMPI实现跨节点协同,将点云处理流水线分解为128项微任务,在64卡集群中理论加速比达56倍,整体处理周期由72h压缩至12h。渲染端采用四级动态LOD机制与GPU驱动管线,依据视点动态加载细节层次,显存占用控制在2.5GB以内,在4K分辨率下帧率稳定 $\geq 30$ fps,并借助异步上载与遮挡剔除进一步降低绘制负载,显著提升了系统的交互能力与渲染效率。

## 4 结语

本文围绕实景三维地形建模中的技术瓶颈,系统阐述了多源数据融合、复杂地形精度提升与大规模高效处理等关键问题的解决方法,初步验证了其在实际工程中的有效性。然而,面对全国范围、多地貌类型的复杂应用场景,现有方法在自适应性与智能化程度上仍有提升空间。未来研究可进一步结合人工智能与实时传感技术,推动地形建模向动态化、智能化方向演进,从而持续增强实景三维中国建设的核心技术能力。

## [参考文献]

- [1]姚巍,王谱佐.实景三维技术发展态势——XXIVISPRSCongress报告[J].时空信息学报,2023,30(2):167-176.
- [2]丁雪.基于倾斜摄影和点云数据的城市三维建模方法研究与应用[D].辽宁:辽宁工程技术大学,2023.
- [3]阳俊,吴艳双,徐敏.高分七号卫星在地形级实景三维建设中的应用研究[J].测绘与空间地理信息,2023,46(z1):16-19.
- [4]相晓立,刘建勇,李伟,等.中分辨率航空航空倾斜摄影在河北省实景三维试点建设的应用[J].北京测绘,2022,36(9):1182-1187.
- [5]郑志.基于亚米级立体卫星影像的三维地形智能提取[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(3):616.

## 作者简介:

郭相相(1991--),男,汉族,甘肃平凉人,工程师,本科,研究方向:摄影测量与遥感、工程测量等。