第 9 卷◆第 4 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

实景三维城市地质与地上地下一体化建模方法

张宇华[1,2]　吴宝亚[2]
1 湖北省地质局地球物理勘探大队
2 湖北省神龙地质工程勘察院有限公司
DOI:10.32629/gmsm.v9i4.2500

[摘　要] 实景三维中国建设推动城市地质精细建模,地上地下空间一体化表达是智慧城市核心需求。传统建模融合多源数据时,存在精度不足、空间拓扑割裂问题。整合机载LiDAR点云、InSAR影像、地质钻孔、地下管线探测数据,构建异构数据统一配准融合流程,精细构建三维地质体,建立地上实景与地下地质空间拓扑一体化衔接体系。选取某城市建成区开展试验验证,模型水平精度0.05m、垂直精度0.08m,地上地下拓扑连通率96.3%,相比传统分层建模整体精度提升约18%,可为城市地下空间开发、地质灾害风险防控提供高精度三维空间数据支撑。
[关键词] 实景三维；城市地质体；地上地下空间；一体化建模；多源数据融合
中图分类号：P642.5　文献标识码：A

Real – scene three – dimensional urban geology and integrated modeling method for above – ground and underground areas

Yuhua Zhang[1,2]　Baoya Wu[2]
1 Geophysical Exploration Brigade of Hubei Provincial Geological Bureau
2 Hubei Shenlong Geological Engineering Survey Institute Co Ltd.

[Abstract] The construction of real-scene 3D China has promoted the fine modeling of urban geology, and the integrated expression of above-ground and underground space is a core requirement for smart cities. When traditional modeling methods integrate multi-source data, they suffer from insufficient accuracy and disconnected spatial topology. This paper integrates airborne LiDAR point clouds, InSAR images, geological boreholes, and underground pipeline detection data to construct a unified registration and fusion workflow for heterogeneous data, finely reconstruct 3D geological bodies, and establish an integrated topology connection system for above-ground real scenes and underground geological spaces. An experimental verification was conducted in a built-up area of a certain city, the results show that the model achieves a horizontal accuracy of 0.05 m and a vertical accuracy of 0.08 m, with a topological connectivity rate of 96.3% between above-ground and underground spaces. Compared with traditional layered modeling, the overall accuracy is improved by approximately 18%. This method can provide high-precision 3D spatial data support for urban underground space development and geological disaster risk prevention and control.
[Key words] real-scene 3D; urban geological body; above-ground and underground space; integrated modeling; multi-source data fusion

引言

城镇化进程的持续加速使城市地下空间开发利用日趋密集,精准刻画城市地质体与地上建构筑物的空间关系成为城市精细化治理的迫切需要,混合建模方法能够有效提升实景三维模型的建立效率并优化精度表现[1],基于多源数据的三维地质模型一体化构建亦已成为城市地下空间精准表达的关键手段[2]。

然而现有研究多集中于地上实景建模或单一地质体建模,缺乏对地上地下空间在统一坐标框架下几何建模与拓扑关联方法的系统探索,实景三维中国建设对多尺度与多类型城市空间实体的集成表达提出了更高要求,亟需建立一套兼顾地质体精细刻画与地上地下拓扑一致性的一体化建模方法体系,以支撑城市地下空间的科学规划与精细管理。

1 多源数据协同获取与预处理方法

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

1.1地质勘探与遥感多源数据采集体系构建

城市地质体与地上地下空间一体化建模涉及机载LiDAR点云,InSAR差分干涉影像,地质钻孔记录及地下管线探测成果四类主要数据源,各类数据在空间分辨率与探测深度上差异显著,因而需构建统一的多源数据采集体系以保障建模整体完整性[3],机载LiDAR记录地表及建筑物三维轮廓,InSAR影像提供毫米级地表形变信息,地质钻孔揭示地下岩土层序结构,管线探测成果明确地下管线走向与埋深四类数据在空间上相互补充,使地上地下全要素三维信息得以完整获取各类采集参数如表1所示。

地质钻孔按50m网格间距布设,LiDAR点云密度不低于25点/㎡,InSAR选取升降轨各8景以减小视线向盲区影响,管线探测采用地质雷达与示踪法结合的方式从而为后续建模提供可靠的原始数据支撑(见表1)。

表1 多源数据类型及采集参数对比

数据类型	采集方式	空间分辨率/点云密度	探测深度或覆盖范围
机载LiDAR点云	无人机载激光扫描	≥25点/㎡	地上建筑及地表
InSAR差分影像	星载合成孔径雷达	1～3m	地表形变(mm级)
地质钻孔数据	现场勘探取样	点位间距50m	地下0～200m
地下管线探测	地质雷达+示踪法	0.02m	地下0～15m

1.2异构数据配准与坐标系统一转换模型

多源数据采用不同坐标参照系与时间基准导致数据间存在系统性偏差,因而坐标系统成为实现地上地下空间一体化建模的前提条件。坐标转换采用Bursa-Wolf七参数模型,将各数据源统一转换至2000国家大地坐标系(CGCS2000),转换公式为:

$$X_t = (1+m)RX_s + T$$

其中,X_t为目标坐标系下的三维坐标向量,X_s为源坐标系下的三维坐标向量,R为三轴旋转矩阵,m为尺度因子,T为平移向量,七参数由均匀分布于实验区的9个以上控制点经最小二乘解算确定。地质钻孔坐标经GPS实地测量后直接归算至CGCS2000,LiDAR点云与InSAR影像借助高精度地面控制点完成绝对定向,最终各类数据配准均方根误差控制在0.03m以内满足城市级精细建模的精度要求。

1.3数据质量评估与噪声滤除算法设计

完成坐标统一后各类数据不可避免地包含粗差,噪声点及缺失值,若不加以处理将直接影响地质体建模的几何精度与拓扑正确性。针对LiDAR点云采用统计离群点滤除算法对每个点的K近邻均值距离进行统计分析,偏差超过2倍标准差的点予以剔除,K取20时噪声滤除率约为1.8%,针对地质钻孔缺失地层采用克里金插值进行推算,插值精度以交叉验证均方根误差量化:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(z_i - \hat{z}_i)^2}$$

其中,z_i为实测值,$\hat{z}_i$为插值估计值,n为验证样本数,实验显示地层插值RMSE为0.42m,满足地质体精细建模的精度阈值。InSAR影像相位噪声通过Goldstein滤波加以抑制,相干系数低于0.3的区域不参与后续建模确保进入建模流程的数据整体质量达到统一标准(见图1)。



图1 多源数据融合预处理流程

2 城市地质体与地上地下空间协同建模算法

2.1城市地质体三维精细化表达方法

城市地质体三维精细化表达以钻孔数据为骨架,结合克里金空间插值与三维约束Delaunay剖分,构建多地层单元的体素化模型,地层分界面拟合为不规则三角网(TIN)后经体元化处理生成三维地层实体,单一体元尺寸设定为2m×2m×0.5m,在保证精度的同时有效控制数据体量。

对于断层与透镜体等非连续地质构造采用局部加密策略在构造边界处将网格分辨率提升至0.5m,使地质体边界的几何刻画更为精确,实验区内共建立9个主要地层单元三维模型,覆盖深度至地表以下80m,地层界面拟合平均偏差为0.38m,每个体元均赋予岩性编码,地层代号及力学参数属性使模型兼具几何与属性双重精度,为后续地上地下空间拓扑关联提供完整的地下空间基准框架。

2.2地上建筑物实景三维建模技术框架

地上建筑物实景三维建模以机载LiDAR点云为主要数据源[4],结合倾斜摄影纹理影像构建语义化城市建筑物模型,点云经地面点滤除后提取建筑物轮廓,采用随机采样一致性(RANSAC)算法对建筑墙面与屋顶等主要平面要素进行分割,拟合精度控制在2cm以内。依据城市三维建模规范构建LOD1至LOD3级别模型：LOD1级表达建筑体量,LOD2级附加屋顶几何结构,LOD3级集成门窗洞口与立面纹理。

倾斜摄影纹理与点云几何模型通过共轭特征点匹配精确对齐,纹理映射误差不超过1个像素。实验区内共建模建筑物347栋,平均单体建模时间约12分钟模型完整率达98.6%,为地上地下空间拓扑一体化构建提供几何精确及语义完整的地上空间基准数据。

2.3地上地下空间拓扑一体化构建机制

地上建筑与地下地质体独立建模后易出现界面割裂与空间重叠等拓扑缺陷,需搭建统一拓扑关联机制实现地上地下无缝融合,以地表基准面为分界匹配建筑基础底板与地质体上边界坐标匹配容差0.05m,超出阈值的节点通过插值修正后嵌入地质网格。建筑桩基与筏板等地下基础作为独立构件嵌入地质模型,边界与地层单元构建双向拓扑关联保障建筑荷载与地层空间逻辑统一[5],地下管线以空间曲线嵌入模型借助布尔求交提取管

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

线与地层交界面并存入拓扑数据表,实测数据显示拓扑约束嵌入方案可将地上地下空间拓扑连通率由79.2%提升至96.3%,拓扑错误率从8.7%下降至1.1%。

3 一体化建模精度验证与实验分析

3.1实验区域设置与评价指标体系设计

实验选取华东地区某中等城市建成区约3.2km²范围作为研究区域,该区涵盖高密度商业建筑群与居住小区,地质条件以软弱黏土层与砂砾石交互层为主,地下空间开发深度达25m具有典型的城市地上地下复杂空间特征,区内布设地质钻孔86个,LiDAR航飞3次获取多时相点云,InSAR升降轨各收集8景地下管线探测成果约240km。

评价指标体系从几何精度与拓扑完整性两个维度构建：几何精度包括水平均方根误差($RMSE_H$)与垂直均方根误差($RMSE_V$),拓扑完整性包括拓扑连通率(η)及拓扑错误率(ε),各指标精度阈值依据《城市地下空间三维建模技术规程》设定,其中$RMSE_H$≤0.10m，$RMSE_V$≤0.15m，η≥90为合格标准,以此对不同建模方法进行系统性量化对比为后续分析提供统一的评价依据。

3.2建模方法精度对比实验与结果分析

将所提一体化建模方法与传统分层建模法和单一点云建模法进行系统对比,三种方法在同一实验区内基于相同数据集独立运行(见表2)。

表2 不同建模方法精度对比

建模方法	$RMSE_H$(m)	$RMSE_V$(m)	拓扑连通率 η(%)	拓扑错误率 ε(%)
传统分层建模	0.13	0.19	78.5	9.4
单一点云建模	0.09	0.13	87.6	5.8
一体化建模方法	0.05	0.08	96.3	1.1

由表2可见一体化建模方法水平精度与垂直精度较传统分层建模分别提升61.5%与57.9%,拓扑连通率提高17.8个百分点,拓扑错误率降低8.3个百分点。精度提升主要源于多源数据融合策略有效补偿了单一数据源的信息盲区,拓扑约束嵌入机制从根本上解决了地上地下界面的几何不连续问题,三种方法精度差异在地下15m以深尤为显著,一体化方法借助多孔联合约束将该深度范围误差控制在0.12m以内,体现出多源数据协同建模的技术优越性。

3.3集成模型在城市地下空间管理中的应用效果

一体化模型完成精度验证后接入城市地下空间综合管理平台,重点评估其在地下工程安全评估与管线风险监测两类场景中的应用效能,在地下工程安全评估场景中集成模型支持对地铁区间隧道下穿软弱地层段进行三维空间分析,任意断面处的岩性组合与承载力分布均可直接读取,分析效率较传统二维剖面方法提升约3倍,同时有效减少人工识读误差。在管线风险监测场景中集成模型将地下管线网络与地层沉降形变数据关联,通过空间叠加分析识别出实验区内高风险管线段14处,经现场巡查确认其中7处存在接口松动或腐蚀,风险识别准确率达85.7%,集成模型的拓扑一体化特征使地上建筑荷载,地下管线走向与地质体承载状态三者的空间关联分析成为可能,有效提升了城市地下空间管理的科学性与精准度。

4 结语

依托多源数据协同采集,地上地下协同建模及精度验证完整技术体系,一体化建模方案显著提升建模精度与拓扑连通效果。城区实测结果显示模型水平精度0.05m,垂直精度0.08m,地上地下拓扑连通率96.3%,相较传统分层建模整体精度提升18%证明多源数据融合与拓扑约束策略适配实景三维建模需求。

异构数据配准与拓扑一体化机制解决地上地下模型几何与语义割裂难题,为地下空间规划与地质灾害防控提供高精度空间数据支撑。整套技术统一坐标,配准数据与搭建拓扑关联框架,为大范围城区工程应用提供完整技术路径,后续可深挖地质模型动态更新技术推动建模成果与CIM平台深度融合,助力实景三维中国实现更高精度及更广范围落地。

[参考文献]

[1]王荣华,付恒心,张浩,等.混合建模方法下实景三维模型建立与精度分析[J].地产,2023,(2):225-228.

[2]孔夏丽,肖永东,何后约,等.基于多源数据的三维地质模型一体化构建研究[J].城市勘测,2024,(6):188-193.

[3]曹悦,常乐,李璎昊,等.融合多源数据的三维实景建模在城市智慧规划管理中的应用[J].产业与科技论坛,2026,25(8):243-246.

[4]左书豪,杨钦,李吉刚,等.市域级三维地质建模关键技术及应用[J].城市地质,2026,21(2):143-151.

[5]王盼盼,王帆,刘昭贤,等.基于多源点云融合技术的城市更新数据实景三维建模研究[J].智能城市,2025,11(10):136-139.

作者简介：

张宇华(1988--),男,汉族,湖北省武汉市人,硕士研究生,地质测绘工程师,从事的工作领域：航测遥感测绘应用、地理信息生产及管理工作。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.