

度、语义一致性与数据更新的实时性。城市三维模型由不同空间尺度和对象维度构成，包含建筑、道路、水系、绿地等要素，通过模型分层管理和模块化拼接方式组织。在集成过程中，基础地形由 DEM 数据生成，建筑主体通过倾斜摄影重建，地面设施依赖点云与地理矢量数据融合，形成统一的地理空间基准体系。模型属性与外部业务系统对接，以标准化接口形式向交通、能源、市政等子系统提供空间支撑。模型动态感知功能依托物联网采集实时数据，对环境温度、交通密度、水位变化等信息进行动态映射。在集成逻辑中，数据规范化标准扮演枢纽角色，支撑不同来源模型的无缝拼接与更新推演。通过构建模型中间件与数据调度引擎，实现数据流、模型流与事件流的耦合机制，为城市运行管理提供高效、可视、智能化的综合支撑框架。

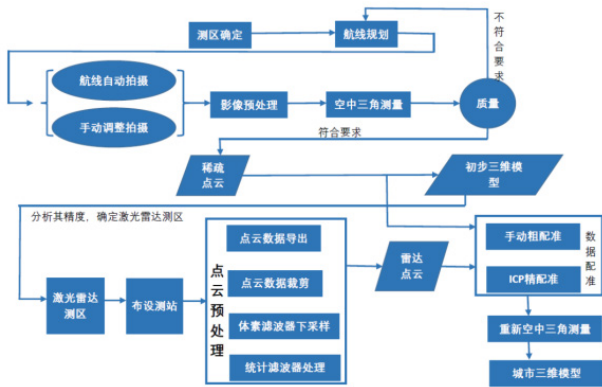


图1 多源数据融合的城市三维实景建模

5.2 城市规划、应急响应中的三维模型应用方案

三维模型在城市规划中提供了多维空间决策支持，其在控规评估、风貌分析与日照模拟中的应用已显著提升方案合理性。通过高精度建筑模型与地形数据融合，可以对规划区域的建筑密度、容积率、绿地率进行直观模拟，预测新增建筑对周边光照与景观的影响，并基于三维数据生成可视化调整建议。在交通规划中，三维道路网模型支持不同车流路径的空间仿真与交通压力分析，实现多方案比选。在应急响应领域，模型集成高程、建筑结构与功能属性信息，为应急疏散路径规划、危险源识别与响应部署提供依据。消防模拟系统基于三维建筑内部结构模型进行火势蔓延仿真，提前布控灭火节点与避险通道。地质灾害场景下，模型可动态加载滑坡、内涝等预警数据，精确标注风险范围与受影响对象，辅助快速决策。三维模型应用平台通常配套部署图形渲染引擎、空间分析组件与数据库系统，实现模型与业务系统的实时对接，提升综合应急与规划管理效率。

5.3 融合多源数据的动态更新机制与平台联动路径

城市三维模型在运行过程中需要具备高度的可更新性和系统兼容性，以应对快速变化的城市环境与管理需求。动态更新机制基于数据采集周期、变化检测算法与更新频次控制策略共同构成。倾斜摄影数据更新周期可控制在 90 天以内，点云更新频率为季度级，地理矢量信息依托城市管理数据实现月度同步。变化检测算法通过图像差分分析、点云高度变异检测等方法实现新增、拆除或变形目标的自动识别，变化识别精度达到 92%。更新流程通过中间模型库实现暂存、对比与校验后再同步至主模型库，确保数据准确性与连续性。在平台联动路径上，构建模型发布平台与业务系统的数据接口标准，实现与交通、环保、应急等多部门系统的互通联动。联动机制中引入统一身份认证、访问权限控制与数据调用日志，实现平台安全可控运行。模型接口通过 OGC 标准协议开放 WMS、WFS 与 3DTiles 等多种服务形式，适配不同终端需求。系统架构采用微服务部署模式，支持按需扩展与快速部署，有效提升城市三维模型的服务能力与集成适用性。

6 结语

城市实景三维重建作为支撑数字城市、智慧治理与空间决策的重要基础设施，正逐步迈向高精度、高自动化与高集成化的发展阶段。多源数据融合技术在空间信息表达中展现出强大的整合与补偿能力，不仅解决了单一数据源在复杂地形与建筑环境中的适应性难题，也提升了模型的精度、完整度与更新效率。在三维建模算法持续演进与平台系统协同联动的推动下，城市三维模型已从静态表达向动态更新、智能分析与实时服务方向拓展。未来，以标准化、模块化、智能化为特征的技术体系将更加完善，为三维模型的规模部署和应用拓展奠定坚实基础。推动多源数据在建模、治理与运维中的深度融合，不仅是城市数字化转型的技术需求，更是提升城市综合治理能力的关键路径。

参考文献

- [1] 梁静,戴晓琴,李林林.多源数据融合的室内外一体城市三维建模方法研究[J].智能城市,2024,10(10):23-26.
- [2] 何奇兵.基于多源数据融合的三维实景建模与可视化系统的设计与应用[J].信息技术与信息化,2024,(07):59-63.
- [3] 杨恒,张文清.多源数据融合实景三维重建研究进展[J].智能建筑与智慧城市,2023,(09):70-73.
- [4] 黄黎明.多源数据融合三维实景重建及其在建筑物变形监测领域应用研究[D].导师: 桑文刚,张兴国.山东建筑大学,2021.

Research on multi-source data fusion processing method in geological engineering survey

Hongbing Cheng

Shantou Geological Survey Center, Guangdong Bureau of Geology, Shantou, Guangdong, 515000, China

Abstract

Geological engineering surveying plays a crucial role in infrastructure construction, resource exploration, and geological disaster monitoring. As the geological environment becomes increasingly complex and data sources diversify, traditional single-measurement methods struggle to meet the demands for precision and efficiency. Multi-source data fusion technology integrates various types of heterogeneous information, including GNSS, remote sensing, LiDAR, geophysical measurements, and drilling data, to achieve the complementarity, enhancement, and optimization of spatial information, thereby improving the completeness, accuracy, and timeliness of measurement data. This paper systematically explores four key areas: multi-source data type analysis, preprocessing techniques, fusion algorithms, and system integration. It focuses on core aspects such as spatial registration, weight allocation, and accuracy assessment, and discusses the practical value of fusion processing in engineering practice, considering the actual needs of geological modeling and disaster monitoring. The study shows that the reasonable construction of fusion models and processing procedures can enhance the value of geological survey data and support decision-making, providing technical assurance for the digital transformation of geological engineering.

Keywords

multi-source data fusion; geological engineering survey; spatial registration; data processing; 3D modeling

地质工程测量中多源数据融合处理方法研究

程红兵

广东省地质局汕头地质调查中心, 中国·广东 汕头 515000

摘要

地质工程测量在基础设施建设、资源勘查及地质灾害监测中具有关键作用, 面对日益复杂的地质环境与多样的数据来源, 传统单一测量手段难以满足精度和效率要求。多源数据融合技术通过整合GNSS、遥感、LiDAR、地球物理测量及钻探数据等多类异构信息, 实现空间信息的互补、增强与优化, 提升了测量数据的完整性、准确性与时效性。本文围绕多源数据类型分析、预处理技术、融合算法与系统集成四个方面展开系统探讨, 重点研究空间配准、权重分配、精度评估等核心环节, 并结合地质建模与灾害监测实际需求, 探讨融合处理在工程实践中的应用价值。研究表明, 合理构建融合模型与处理流程, 有助于实现地质测量数据的信息增值与决策支撑, 为地质工程数字化转型提供技术保障。

关键词

多源数据融合; 地质工程测量; 空间配准; 数据处理; 三维建模

1 引言

随着地质工程项目日趋复杂, 地形地貌条件多变, 传统测量方法面临精度不高、信息维度有限、数据孤立等问题, 难以全面反映地下与地表的特征。现代地质工程测量逐步引入多源数据融合理念, 将 GNSS、遥感影像、激光雷达扫描、地球物理探测与钻探成果等多种测量手段进行集成处理, 形成更具深度与广度的信息体系。多源融合不仅要求技术层面的数据兼容与算法适配, 更涉及数据语义的匹配、处理流程的优化与成果精度的量化评价。本文正是在此背景

下, 围绕地质工程测量中多源数据融合的理论基础、核心技术与工程应用展开深入研究, 力求为提升测量成果质量与服务能力提供系统支撑。

2 地质工程测量中多源数据的类型与特征

GNSS 具有高精度三维定位能力, 适合野外实地测量和控制点布设, 其误差通常在厘米级范围。遥感数据具备大范围覆盖和多光谱信息获取优势, 可用于地貌识别与地表构造提取, 空间分辨率从数米至亚米级不等。LiDAR 以其高密度点云和强穿透力, 能获取地物高程与细部结构, 实现高精度数字高程模型构建。这三类数据在精度层级、采集方式与应用场景方面各具优势, 适配不同的地质测绘需求, 在数据融合中可形成空间结构与表面属性的互补, 从而提升测量的

【作者简介】程红兵 (1975-), 男, 中国湖南宜章人, 助理工程师, 从事地质中心测绘研究。

完整性和空间信息表达能力。GNSS 与 LiDAR 数据更强调实时性与精度，点位密度与获取频率高，适用于动态场景分析。而地球物理与钻孔数据多为静态采集，更新周期长。时空分辨率的不一致将直接影响数据间的配准、属性对齐与综合建模的难度。融合处理中需构建合理的插值、重采样与配准机制，实现多尺度数据的有效协同与信息完整性保障^[1]。

3 多源地质测量数据的预处理与标准化技术

3.1 坐标系统统一与数据格式转换机制

地质工程中常见的数据来源于多种测绘设备与观测平台，各自采用不同的空间参考系与数据编码格式。GNSS 数据通常基于 WGS84 坐标系，遥感影像则可能采用 UTM 或局部投影系统，地球物理数据多为测线参考或地面标高控制。坐标系统的差异若不处理，将造成数据位置错位与空间叠加失真。因此，在数据融合前需对坐标系统进行统一处理，包括椭球参数转换、投影方式调整与高程基准还原。同时，不同格式如 Shapefile、GeoTIFF、CSV 与 LAS 等也需标准化转换，以适配统一平台处理，确保后续融合流程的无缝对接与精度控制。

3.2 噪声滤除与异常值识别方法

多源测量数据在采集过程中受到仪器误差、环境干扰与人为操作等多种因素影响，常伴有噪声干扰与异常值。GNSS 受多路径效应、遮挡和电离层延迟影响较大，LiDAR 数据中常存在反射异常或伪高点，地球物理数据中也可能出现突变值与失真波形。有效的噪声滤除与异常识别需结合统计分析方法与模型预判方法，包括移动平均、中值滤波、Z-score 离群点识别、阈值设定与误差椭球分析等手段。通过滤波降噪与异常校正，可在保证数据真实性的基础上提升整体质量，为高精度融合算法提供可靠输入。

3.3 属性匹配与特征归一化策略

在多源数据融合前，必须对各类数据的属性进行语义对齐与尺度统一。遥感影像以光谱反射率为主，LiDAR 以高程与反射强度为主，钻孔与物探数据则多为深度序列或物理属性值，其单位、量纲、取值范围及表达方式差异明显。属性匹配需建立统一的属性字典与变量映射关系，对不一致的属性进行重定义与转换。特征归一化是实现数据等尺度处理的关键，包括标准差归一、最小最大规范化与 Z 分数处理等，目的是消除维度影响，突出本质差异，提升后续模型处理与特征融合的效率与可靠性，图 1 为工程测量中多元数据融合流程。

4 多源数据融合的技术路径与算法模型

4.1 基于空间配准的几何融合方法

多源地质数据在融合前必须实现空间上的精准对齐，空间配准技术通过识别各类数据中的共同控制点或空间特征，对不同数据源进行坐标校正与几何变换。GNSS 点位数据可作为控制基准，引导遥感影像、LiDAR 点云与地球物

理测线对齐处理。采用刚性变换、仿射模型或投影变换模型进行坐标调整，并结合特征点匹配算法如 SIFT 或 ICP 优化误差控制。配准精度直接决定融合后数据的一致性与可信度，适用于同一测区内异时、异源数据的几何叠合与空间一致性保障，是融合处理的基础环节^[2]。

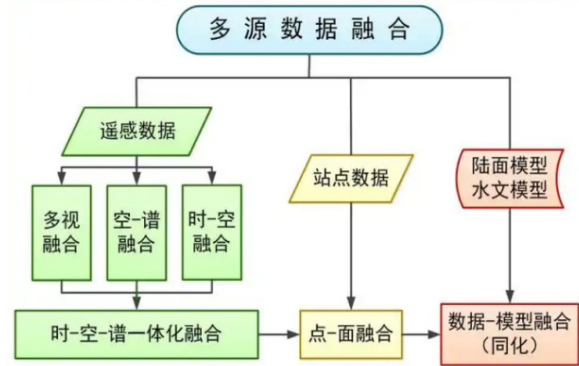


图 1 工程测量中多元数据融合流程

4.2 权重分配与数据协同增强模型

多源数据在质量、分辨率与信息表达方面存在差异，融合过程中需合理分配权重，实现不同数据间的协同增强。基于加权融合模型，通过评价数据的信噪比、时空覆盖度与精度等级确定各数据源在融合中的影响力。采用贝叶斯估计、模糊综合评判或改进的最小二乘法等方式进行权重优化，同时结合空间一致性校验与误差反演算法，实现数据互补与信息强化。在工程应用中，协同增强模型可显著提升目标识别能力与地质特征解析深度，是实现高效信息提取与增强识别的重要支撑。

4.3 融合精度评估与不确定性控制方法

数据融合结果的精度评估是判断融合质量的关键环节，常采用均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE) 与空间一致性系数等指标进行定量评价。不确定性控制则涉及误差传播分析与置信区间构建，通过协方差传播理论、蒙特卡洛仿真或模糊理论方法，分析数据误差在融合过程中的传递与累积影响。在融合模型建立过程中引入置信度约束，可实现结果的可靠性分类管理。融合成果的可信度分级有助于后续建模与工程决策，有效降低测量误差对地质推断与工程布置的潜在干扰。

5 多源融合在地质建模与分析中的应用

5.1 三维地质体构建中的融合数据支撑

三维地质建模依赖大量结构、属性与空间数据的集成，融合 GNSS 点位、钻孔剖面、物探剖面与遥感信息，可构建完整的地质结构模型与空间关系图。数据融合过程通过多源投影叠加、深度插值与等值面拟合，实现不同深度信息的统一表达。LiDAR 提供高精度地形边界，遥感影像补充地表纹理信息，钻孔与地球物理数据反映垂向地层变化，三类数据融合可形成连续、可视化、可运算的地质体模型，为工