

国土空间动态监测中的精度优化与误差传播模型研究

——以多源异构遥感数据融合为例子

瞿发初

梁河县自然资源局 云南德宏 679200

摘要: 目的: 为提升国土空间动态变化识别精度, 满足不动产登记中心对高时效、高精度宗地更新的业务需求, 构建多源遥感数据融合与误差传播模型。方法: 选取 GF-2 光学、Sentinel-1 SAR 与无人机影像数据, 设计多源融合流程, 基于主成分分析与 CNN 特征增强策略实现宗地边界提取, 并引入误差传播公式与蒙特卡洛模拟进行误差建模与敏感性分析。结果: 实验证明, 三源融合在宗地边界提取中 OA 提升至 95.1%, 边界平均偏移量控制在 0.84m, 优于任一单源或双源组合。结论: 所提出方法具备较强的空间一致性与误差鲁棒性, 可为不动产图斑动态更新提供高精度遥感支撑, 具有广泛推广价值。
关键词: 遥感数据融合; 误差传播; 宗地边界提取; 不动产登记

1 遥感数据融合在不动产登记动态监测中的应用基础

1.1 不动产登记中心的数据需求与监测任务

不动产登记中心负责国土空间治理中宗地, 地类及边界信息动态更新核验。当前自然资源统一确权制度对于高精度低时延的数据要求越来越高。尽管传统的地籍测量方法在精度上具有明显的优势, 但由于其周期过长和范围受限的问题, 很难达到“实地实物, 实时动态”的管理标准的要求^[1]。遥感技术由于具有高覆盖和自动识别能力而成为促进监测效率提高的一个关键技术。尤其是建设用地扩张, 宅基地确权及违法建筑核查场景下, 迫切需要具有时效性和多源互补性一体化的遥感协同方案。

1.2 多源异构遥感数据的类型与特点

目前, 用于国土空间动态监测的遥感数据种类越来越丰富, 这包括高分辨率的光学影像、合成孔径雷达 (SAR)、激光雷达 (LiDAR) 的点云数据以及无人机的近景遥感数据。光学影像可视性好, 适合建筑和耕地等边界识别; SAR 影像全天候成像的优点使其适用于多雨区域的辅助使用; 激光点云为三维结构信息的获取提供了可能, 增强了高程和建筑识别的准确性; 无人机影像具有分辨率高, 成本低廉等特点, 适用于局部边界校正。由于各类型数据空间, 光谱及几何特性存在显著差异, 因此需要通过融合进行信息互补以弥补单源覆盖及解析能力等方面的限制。

1.3 国土空间动态变化的遥感识别难点

在国土空间不断变化的大环境下, 遥感识别正面临着

地物边界经常变化和识别难度不断增加的双重考验。建设用地扩张和城镇化重构使得时效性要求显著提高, 同时违法占地和临时建设等不正规现象很难在遥感影像上形成清晰的光谱特征从而增加自动判读的困难。同时异构数据之间分辨率失配, 时间差异和影像遮挡等因素也容易导致配准误差积累, 从而影响宗地边界提取的精度^[2]。对于不动产登记中心来说, 迫切需要建设高精度, 强鲁棒数据融合机制来提高图斑比对及更新效率及合法性支撑力。

2 多源遥感数据融合方法与理论基础

2.1 遥感数据融合的空间配准与同化模型

空间配准作为多源遥感数据融合过程中至关重要的一环, 配准精度的高低直接影响到分析结果。对于几何畸变问题, 可以利用 SIFT 或者 SURF 这些特征点来达到对不同图像进行共视的目的。在处理高光谱和 SAR 数据时, 互信息 (MI) 配准技术能够在没有明显特征点的情况下完成灰度匹配, 从而提升了匹配的准确性。在数据融合的过程中, 融入了数据同化的概念, 并利用集合卡尔曼滤波 (EnKF) 或三维变分 (3D-Var) 来动态地调整多源数据在空间和时间上的权重, 这极大增强了融合结果的稳定性和信赖度。

2.2 特征级与决策级融合技术框架

融合策略按照处理深度和集成方式的不同可以分为特征级和决策级。特征级的融合方法是通过提取多源图像的核心特征来进行模型构建, 例如利用主成分分析 (PCA) 进行降维, 以及利用小波变换来整合空间和频率的信息。在最近

的几年中, 卷积神经网络 (CNN) 和注意力机制在边界检测方面都展现出了卓越的性能。在决策级的数据融合过程中, 各种数据源的分类结果, 例如加权投票和贝叶斯决策等, 都被整合在一起, 特别适用于图像类别边界存在较大差异的场景。二者相结合所构成的多层融合模型已经成为增强宗地边界识别准确性的一个重要途径。

2.3 融合精度的影响因子与控制策略

多源遥感数据融合精度受到很多因素的影响, 主要有传感器分辨率不同, 成像时间不连贯, 地物变化以及地形遮挡等。分辨率失配将造成细节信息的损失, 需要通过插值或者下采样的方法进行统一的处理; 时间差异会诱发地物状态的偏离, 应该首选同季多时相资料; 地形遮挡可以通过 DEM 校正和阴影补偿的方法来减轻。配准误差控制特别关键, 要将高精度的 GCP 和误差建模相结合才能达到精确校正的目的。在实际运行中, 标准化流程和质量评估机制的建设有利于促进数据在时效性和空间上的准确度, 并对宗地更新工作提供强有力的支持。

3 误差传播建模与敏感性分析体系

3.1 遥感数据中的典型误差类型

遥感数据应用于不动产动态监测的整个过程都面临着误差的影响, 这些误差直接影响着宗地边界确定的准确性和合法性。常见的误差有空间配准误差, 辐射误差和姿态误差等。配准误差是由于几何畸变, 姿态解算以及控制点偏差等因素造成的, 具体表现在边界错位; 由于传感器的标定和大气的散射等因素, 辐射误差会对光谱的一致性和分类的准确性产生影响; 姿态误差多存在于无人机影像上, 在复杂地形条件下容易加重定位偏差。这些误差对多源融合存在叠加效应, 需要系统建模定量评估和有效控制。

3.2 误差传播的数学建模方法

为合理评估遥感数据融合在不动产边界提取中的误差影响, 可构建基于偏导传播原理的误差传播模型, 量化观测误差对融合输出的影响。设最终融合输出结果为函数 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 其中 x_i 表示各源数据中的几何、光谱或姿态输入变量, 且每个变量存在一定标准差 σ_{x_i} 。依据经典误差传播公式, 可表示为:

$$\sigma_f^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \text{Cov}(x_i, x_j)$$

其中, σ_f^2 表示最终输出的不确定性, $\text{Cov}(x_i, x_j)$ 表示输入变量间的协方差项。对于多源图像空间配准问题, 融合函数可具体表示为像素坐标偏差函数 $f(x, y, \theta, t)$, 其中 x, y 表示像素平移误差, θ 为旋转偏差, t 为时间差引起的地物状态差异。

为进一步验证模型有效性与稳定性, 可采用蒙特卡洛方法进行误差传播仿真。设定每个输入误差服从正态分布 $x_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$, 在每轮仿真中从每个误差分布中采样构建扰动输入集合, 通过迭代计算得到输出偏差分布, 进而估算宗地边界提取的平均误差与置信区间。本文选取 2000 次采样构建稳定样本, 采用中值偏差 (Median Error)、95% 置信区间 (CI) 与最大偏差幅度等指标表征融合模型的稳定性与误差容忍能力。

3.3 典型误差场景下的敏感性分析

为了深入了解各种误差因素对业务的影响, 设计了三种典型的误差场景实验: 配准扰动、姿态扰动和时间差异, 并以城市建成区和耕地区域作为测试区域, 构建了标准宗地矢量图作为真值基准。利用 RMSE 和 ME 对边界偏移进行了不同范围的干扰^[3]。研究表明, 当姿态误差在 $\pm 1.5^\circ$ 以上或者时间差大于 7 天时边界偏移明显增大且成倍增大。进一步的全因子设计和方差分析表明配准和姿态误差之间的相互作用对精度有影响, 在融合之前需要重点加以控制。结论可供登记部门建立边界误差容差标准和控制策略时参考。

4 模拟仿真实验设计与精度优化策略验证

4.1 典型监测区与数据源配置

为了验证本文提出的多源融合和误差传播建模方法对国土空间动态监测的适用性和精度表现, 研究选择了云南省德宏州梁河县城乡接合区域作为试验区, 覆盖了村镇建成区、山地梯田耕地和丘陵林地区 3 种典型的地貌类型。该地区近年来城乡建设发展加快, 土地利用变化频繁, 具备代表性和挑战性。数据源配置如下: 高分二号 (GF-2) 光学影像 (1m 分辨率, 获取时间为 2022 年 11 月), Sentinel-1 SAR 影像 (10m 分辨率, 获取时间为 2022 年 11 月与 2023 年 1 月双时相), 以及 DJI Phantom 4 无人机影像 (0.2m 分辨率, 采集时间为 2023 年 1 月 8 日)。采用 1:500 的实测地籍图作为地表真实数据的基准, 为精度评定与误差分析提供参考。

4.2 数据融合流程与处理步骤

融合流程主要包括五个阶段: 图像预处理、空间配准、

特征提取、融合建模与边界输出。其中，图像预处理包括投影转换、大气校正与主影像选定。空间配准采用基于 SIFT 点对的多源刚性变换方法，配准误差控制在 0.5 像素内。特征提取方面，利用多尺度小波变换提取边缘纹理特征，SAR 图像则引入灰度共生矩阵 (GLCM) 构建后向散射特征集^[4]。融合建模采用特征级融合策略，具体为主成分分析 (PCA) 降维融合与卷积神经网络 (CNN) 边界增强模块联合建模，融合输出以边界强度图形式表现，结合 Canny 边缘检测与多尺度区域生长算法生成宗地矢量边界线。上述流程确保空间一致性、信息互补性与边界表达连续性。



图 1 多源遥感数据融合与边界提取处理流程

4.3 误差传播与精度评估指标体系

为全面评估融合结果的边界提取效果与误差控制能力，本文采用以下指标体系^[5]：

分类精度类指标：整体精度 (Overall Accuracy, OA)、Kappa 系数；

几何一致性指标：交并比 (Intersection over Union, IoU)、根均方误差 (RMSE)；

边界偏移指标：宗地轮廓点坐标均值偏移量，计算公式如下：

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i - x_i^*)^2 + (y_i - y_i^*)^2}$$

其中， (x_i, y_i) 为融合输出边界点， (x_i^*, y_i^*) 为真值边界点， N 为边界点总数。实验评估结果如表 1。

表 1 不同遥感数据融合方式在宗地边界提取中的精度评价结果

融合方式	OA (%)	Kappa	IoU (建设用地)	RMSE (m)	平均边界偏移 (m)
光学单源 (GF-2)	88.4	0.79	0.71	2.51	1.96
SAR + 光学融合	91.2	0.84	0.76	1.94	1.43

光学 + 无人机融合	93.6	0.88	0.81	1.52	1.11
全源融合 (三源)	95.1	0.91	0.85	1.26	0.84

4.4 不动产登记场景下的应用实效评估

结合不动产登记中心宗地更新业务选择了近一年来地类变更 45 宗进行边界提取实验。三源融合模型由于 SAR 地表穿透能力和无人机影像细节优势，在耕地和建设用地交界处呈现高度几何一致性。融合后的结果有效地避免边界模糊和错判问题。在不动产统一登记系统中，已提取的宗地边界得到了挂接，其核通过率高达 93.3%，这比单一来源的方法提高了超过 15%，并且边界修正的效率也增加到每宗仅需 6 分钟。结合误差传播模型产生的边界不确定图层，注册人员可以对风险区域进行辅助确定，提高了结果的实用性和法理支撑。

5 结论

本文构建了一套面向不动产登记应用场景的多源遥感数据融合与误差传播分析框架，并通过典型区域实证验证了其精度优势与适应能力。三源融合在宗地边界自动提取中显著提升了整体精度与空间一致性，RMSE 降低至 1.26m，平均偏移量降至 0.84m。同时引入误差传播模型与敏感性分析手段，为边界不确定性控制提供了理论依据与操作工具。研究表明，该方法可有效支撑登记图斑的动态更新与质量审核，为构建高效、智能的不动产管理系统提供技术基础。

参考文献：

- [1] 周平, 唐新明. 高分七号卫星立体影像与激光数据复合测绘处理原理及方法 [J]. 遥感学报, 2024, 28(6):1539-1550.
- [2] 张春玲, 赵训威, 王志刚, 等. 基于人工智能的多源遥感数据融合在电网勘测应用研究 [J]. 现代电子技术, 2024, 47(4):128-133.
- [3] 贺鹏, 王婧姝, 曹晨斌, 等. 基于多源遥感数据融合的运城盆地夏玉米估产研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2023(3):213-221.
- [4] 郭松涛, 邢帅, 张国平, 等. 异构卫星遥感数据融合的水深反演模型 [J]. 测绘通报, 2024(5):19-23.
- [5] 骆延青, 张晓莹, 李森, 等. 基于规则集开发的高分影像分类技术研究 [J]. 科技创新, 2025,(12):26-29.

作者简介：瞿发初 (1979—)，男，汉族，云南省德宏州梁河县，工程师，本科，研究方向为国土调查与监评价测。