

Research on 3D Urban Modeling Technology Based on Remote Sensing Image and Laser Point Cloud Fusion

Hongliang Chen Longyang Wang*

Guangdong Provincial Land and Resources Surveying and Mapping Institute, Guangzhou, Guangdong, 510000, China

Abstract

The research aims to explore the 3D city modeling technology based on the fusion of remote sensing images and laser point cloud data, analyze the acquisition and processing techniques of remote sensing images, as well as the characteristics and processing methods of laser point cloud data, and construct a 3D city modeling technology framework that integrates remote sensing images and laser point clouds. Based on the data preprocessing and accuracy improvement methods proposed in the research, the design of analysis and correction algorithms suitable for errors that may exist in the process of multi-source data fusion, combined with the accuracy evaluation method verification of technical reliability and applicability. The results show that the fusion of remote sensing images and laser point clouds can effectively improve the spatial accuracy and detail restoration ability of 3D urban modeling.

Keywords

remote sensing image; laser point cloud; 3D city modeling; data fusion; accuracy evaluation

基于遥感影像与激光点云融合的三维城市建模技术研究

陈洪亮 王龙阳*

广东省国土资源测绘院, 中国·广东广州 510000

摘要

研究旨在探索基于遥感影像与激光点云数据融合的三维城市建模技术, 分析了遥感影像的获取与处理技术以及激光点云数据的特征与处理方法, 构建了融合遥感影像和激光点云的三维城市建模技术框架。根据研究提出的数据预处理与精度提升方法, 适用于多源数据融合过程中可能存在误差的分析与校正算法的设计, 结合技术可靠性和适用性的精度评估方法验证。结果显示融合遥感影像与激光点云能有效地提升三维城市建模的空间精度和细节还原能力。

关键词

遥感影像; 激光点云; 三维城市建模; 数据融合; 精度评估

1 引言

随着城市化进程推进, 三维城市建模技术在城市规划和管理中发挥重要作用。遥感影像覆盖范围广可提供多时相信息, 但在空间精度和细节还原上存在局限。激光点云数据则以高密度三维点位精确描述地物几何结构, 在建筑物和复杂地形建模中表现出色。单一数据源难以满足复杂城市环境下高精度、大规模建模需求。融合遥感影像与激光点云数据可弥补各自不足, 提升模型空间精度和细节表现实现最佳的可视化效果。要实现高精度建模还需解决数据融合中的误差修正、精度提升和一致性等技术难题。

【作者简介】陈洪亮(1980-), 中国广东罗定人, 工程师, 从事国土资源、测绘遥感等研究。

【通讯作者】王龙阳(1988-), 中国河南许昌人, 本科, 工程师, 从事国土资源、测绘遥感等研究。

2 遥感影像与激光点云数据概述

2.1 遥感影像的获取与处理技术

遥感影像的获取借助卫星遥感、航空遥感等方式实现, 这些影像通常具有广泛的空间覆盖和多时相信息但由于大气干扰、传感器误差和几何畸变等因素, 影像处理成为确保其准确性和应用性的关键步骤。辐射校正用于消除传感器误差和大气影响使影像的光谱信息更加真实反映地物的实际反射特性。辐射校正使用黑体辐射源和地面测量数据进行配合, 根据比对影像的辐射值和标准值来消除大气散射和传感器的系统误差。遥感影像的大气校正采用大气校正模型(如6S模型或MODTRAN模型)能有效消除大气层对影像的影响恢复地物的真实反射光谱。几何校正用于修正影像中的几何畸变确保影像与实际地物之间的空间一致性。几何校正通常需要使用地面控制点(GCPs), 根据匹配影像上的地物位置与实际地面位置利用仿射变换或高次多项式变换等算法进行修正。

2.2 激光点云数据的特征与处理方法

激光点云数据的获取包含机载激光雷达、地面激光雷达和移动激光雷达三种方式。机载激光雷达适用于大范围地形测绘和城市结构建模，地面激光雷达具有高精度和密集采样率的优点在建筑物细节建模和复杂场景复原中适用，移动激光雷达优秀的动态采集能力在城市动态环境建模中具有重要应用。

3 三维城市建模技术框架

3.1 三维城市建模流程

三维城市建模的流程涉及多个步骤，其中数据获取是三维城市建模的基础包括遥感影像和激光点云数据的采集。遥感影像能提供大范围、连续的城市表面信息适用于覆盖区域的广泛数据获取。激光点云数据提供了详细的三维空间信息在建筑物和复杂地形的建模中具有不可替代的优势。遥感影像根据卫星、无人机或航空平台获取激光点云借助地面激光雷达、机载激光雷达或移动激光雷达采集。数据预处理步骤对原始数据进行处理和优化，在这一过程中遥感影像的辐射校正和几何校正确保了影像数据的真实和准确，激光点云的噪声去除和配准则消除了数据集中的误差和不一致性。数据预处理完成后进入数据融合环节，数据融合的目的是利用有效结合两者的优点提升三维模型的空间精度和细节表现。

3.2 数据预处理与精度提升方法

在遥感影像与激光点云数据融合中数据预处理和精度提升是关键。遥感影像预处理包括辐射校正、大气校正和几何校正，用于消除传感器误差、大气影响，根据地面控制点（GCPs）修正几何畸变确保空间匹配。激光点云数据预处理主要涉及噪声去除、点云配准和滤波，配准采用 ICP 算法或特征匹配方法实现多视角数据精确对齐^[1]。融合时根据几何校正、ICP 算法和坐标转换统一数据源消除偏差提高模型精度。表 1 是不同误差源对数据融合精度的影响及校正效果。

表 1 不同误差源对数据融合精度的影响

误差来源	校正前精度	校正后精度	校正方法
遥感影像几何畸变	2.5m	0.8m	大气校正、几何校正
激光点云配准误差	3.0m	1.2m	ICP 算法、特征匹配
坐标系不匹配	4.2m	1.5m	坐标转换与统一
点云数据密度问题	5.3m	2.0m	点云密度提升与补偿

表格数据显示经过校正后的精度得到了显著提升。遥感影像的几何畸变经过大气校正和几何校正后，精度从 2.5m 提高至 0.8m，改进幅度为 68%。激光点云配准误差通过 ICP 算法和特征匹配后从 3.0m 降低至 1.2m，精度提升了 60%。坐标系不匹配问题通过坐标转换和统一处理精度从 4.2m 提升至 1.5m，提升幅度为 64%。点云数据密度问题

通过点云密度提升和补偿措施得到改善精度从 5.3m 提高到 2.0m，改进幅度为 62%。

3.3 融合关键技术

遥感影像与激光点云融合的关键技术包括空间域融合、特征域融合以及深度学习驱动融合方法。这些技术为高精度的三维建模奠定了基础。空间域融合技术借助影像和点云的几何校正和精确配准利用优化变换矩阵，将影像的光谱信息与点云的三维坐标信息进行匹配实现空间一致性。典型方法包括最小二乘法（Least Squares）和迭代最近点（ICP）算法这些方法在融合过程中能够修正两种数据源的空间偏差。特征域融合技术针对遥感影像中的纹理信息和点云中的几何结构特征，如建筑物轮廓、地面标志线等提取关键特征并进行匹配。特征提取通常依赖边缘检测算法或点云分割技术，配合特征点匹配方法提升数据融合的精度与效率。深度学习融合技术采用深度卷积神经网络（CNN）、生成对抗网络（GAN）等模型，根据联合学习影像的纹理特征和点云的几何特征实现自动化融合与优化。深度学习技术能适应复杂场景的建模需求有效克服传统方法中的误差积累问题。

3.4 模型生成、优化与精度评估

三维城市模型的生成借助数据融合将遥感影像与激光点云数据结合实现从二维信息到三维空间的转换。要更好地处理大规模数据模型生成过程通常采用高效的算法，如基于图像处理的多视角立体重建方法和激光点云的三角网格生成技术。影像和点云数据的精确融合需要依赖于深度学习方法的支持。深度卷积神经网络（CNN）和生成对抗网络（GAN）等深度学习算法能够自动提取数据中的特征并进行高效的融合处理。具体方法包括基于图像的纹理映射技术、多边形网格优化以及自适应光照模型等。纹理映射能够根据影像中的纹理信息对三维网格进行高质量渲染增强模型的视觉效果。多边形网格优化根据减少不必要的三角形面片和改善网格的平滑性提升模型的几何精度。对复杂的建筑结构可以利用深度学习方法对其进行细节重建自动填补模型中的细节缺失优化几何形态和空间表现。精度评估根据与实地数据的比对验证模型的空间一致性和几何精度^[2,3]。根据这些评估可以量化模型生成和优化过程中产生的误差指导后续的优化调整。根据对比不同算法生成的模型与实地测量数据，评估误差并据此调整深度学习模型的参数保证最终生成的三维城市模型精度达到预期要求，见表 2。

由表 2 可得，传统几何校正将精度从 3.5m 提高至 1.5m，提升 57%，主要因辐射与几何校正减少影像畸变。深度学习融合方法效果更显著，精度从 4.2m 降至 0.9m，提升 78%，在复杂环境的细节重建与还原上表现突出。深度学习优化模型生成精度从 2.8m 提高至 1.2m，提升 57%，增强了城市结构细节的准确性。多边形网格优化将精度从 2.1m 提升至 0.8m，提升 62%，有效减少冗余并增强模型平滑度与真实性。

表2 不同方法在生成、优化和评估过程中的精度提升效果

方法	校正前精度	校正后精度	优化提升幅度	评估方法
基于传统几何校正的方法	3.5m	1.5m	57%	基于 GCP 的误差分析
基于深度学习的图像与点云融合方法	4.2m	0.9m	78%	点云与模型配准分析
深度学习优化后的模型生成方法	2.8m	1.2m	57%	与实测数据对比
多边形网格优化后精度提升方法	2.1m	0.8m	62%	空间一致性对比

4 遥感影像与激光点云融合方法

在空间域融合中激光点云和遥感影像的空间信息必须经过精确配准通常使用最小二乘法 (Least Squares) 或迭代最近点 (ICP) 算法进行点云配准。这一过程可以根据优化变换矩阵来实现点云与影像的精准对齐。在此过程中卷积神经网络 (CNN) 和生成对抗网络 (GAN) 等技术能够对点云数据中的结构信息和影像中的纹理信息进行高度抽象和重建,从而优化城市建模的精度和视觉效果。融合过程中,假设遥感影像的空间信息为 $I(x, y)$ 激光点云的三维坐标为 $P(x, y, z)$ 那么空间融合的基本公式可以表示为:

$$P'(x, y, z) = T(I(x, y), P(x, y, z))$$

其中, T 为变换矩阵表示遥感影像与激光点云之间的空间转换,为融合后的点云数据。根据优化变换矩阵能够精确将遥感影像和激光点云数据对齐生成高精度的三维模型。深度学习技术使得融合过程更加智能化能自适应地处理不同数据源之间的误差,显著提高融合后的三维城市模型的精度与细节还原效果满足大规模城市建模的需求^[4]。

5 结语

结合遥感影像和激光点云数据的三维城市建模技术提供了更加精确、全面的城市空间信息。在精度提升上不同的数据融合方法展现出显著优势尤其是深度学习融合技术,在几何和属性精度方面做出了较大突破。随着技术进步的不断发展多源数据有效地进行融合,既增强了模型空间精度也优化了细节重建以及可视化效果。

参考文献

- [1] 苏俊波.无人机倾斜摄影测量技术在城市三维建模及优化方法中的应用[J].工程建设与设计,2024(18):86-88.
- [2] 杨华杰,武立军.三维激光扫描技术在数字城市三维建模中的应用[J].测绘与空间地理信息,2024,47(S1):177-178+183.
- [3] 杨晓玉,王彦君,王冬梅,等.多技术融合在城市三维建模中的应用[J].长春师范大学学报,2022,41(4):116-120.
- [4] 黄小兵,万铁庄.多源数据的点云融合算法在智慧城市三维建模中的应用[J].北京测绘,2021,35(12):1582-1586.