

文章编号: 1001-5078(2026)02-0197-05

· 激光应用技术 ·

无人机影像联合 LiDAR 点云的城市建筑三维建模

李鹏飞, 韩磊

(云南省地图院, 云南昆明 650100)

摘要:随着实景三维中国建设不断深化,城市级实景三维建设是构建实景三维中国的重要数据载体,其中的建筑物三维模型是城市级实景三维建设的重要内容。目前利用单一数据源构建城市区域建筑物三维模型会出现空洞、变形、拉花等问题,导致建模不完整。针对上述问题,提出了一种将无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)倾斜摄影测量获得的影像和机载激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)点云数据进行配准融合进行三维建模的方法来解决上述问题。首先通过无人机系统分别获取到 LiDAR 点云数据和 UAV 影像数据,通过空中三角测量得到 UAV 点云。其次基于点云粗配准,利用 KD-tree 改进的最邻近迭代(Iterative Closest Point, ICP)算法进行点云精配准实现点云的配准融合,构建出完整的三维模型。以云南省红河州蒙自市实景三维建设项目进行实验验证,结果表明:利用 KD-tree 改进的 ICP 算法能够显著提升配准效率和精度,配准融合后构建三维模型,完整度和精细度更好,能更完整地表现出建筑物的信息,有效解决了三维模型出现空洞、变形、拉花的问题。

关键词:实景三维;激光雷达;三维建模;点云配准

中图分类号: TN958.98; V279+.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2026.02.007

3D Modeling of urban buildings using UAV imagery and airborne LiDAR point clouds

LI Peng-fei, HAN Lei

(Yunnan Provincial Cartographic Institute, Kunming 650100, China)

Abstract: With the continuous advancement of 3D real-scene China construction, city-level 3D real-scene modeling serves as crucial data infrastructure, where 3D building models constitute essential components. Current methods relying on single data sources for urban building reconstruction often suffer from defects such as voids, deformation, and texture stretching, leading to incomplete modeling. To address these issues, an integrated 3D modeling method combining UAV oblique photogrammetry images with airborne LiDAR point cloud data through registration and fusion is proposed in this paper. Initially, both LiDAR point clouds and UAV imagery are acquired through aerial surveys, with UAV point clouds generated via aerial triangulation. Subsequently, a two-stage point cloud registration approach is implemented: coarse alignment followed by refined registration using a KD-tree optimized Iterative Closest Point (ICP) algorithm, achieving effective point cloud fusion for complete 3D reconstruction. Experimental validation through the 3D real-scene construction project in Mengzi City, Honghe Prefecture, Yunnan Province demonstrates that the KD-tree enhanced ICP algorithm significantly improves registration efficiency and accuracy. The fused 3D models exhibit enhanced completeness and refinement in architectural details, effectively resolving issues of model voids, deformation, and texture artifacts.

Keywords: 3D real-scene; LiDAR; 3D modeling; point cloud registration

1 引言

城市级实景三维是指对城市中的现实场景进行

三维立体、客观真实、时序化的表达,随着中国城市化进程深化对城市级实景三维建设的要求也越来越

作者简介:李鹏飞(1986-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为激光雷达应用技术。E-mail:qazlipengfei@126.com

通讯作者:韩磊(1998-),男,硕士,主要研究方向为激光雷达应用技术。E-mail:wilzzhl@163.com

收稿日期:2025-04-18

高^[1-3]。其中建筑物三维模型的构建是城市级实景三维建设的重点,目前往往是由单一数据源构建建筑物的三维模型,导致模型出现空洞、变形、拉花的问题^[4-6]。因此,有必要进行多源数据融合来构建建筑物三维模型以提升模型的质量和精细度。

目前实景三维建模方法可分为人工建模、无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)倾斜摄影测量、激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)点云建模三类^[7-8]。其中人工建模能够准确处理建筑物复杂的结构,构建的模型质量较好,但是耗时耗力、成本高。无人机倾斜摄影系统具有较高的灵活性、数据采集效率高等特点,在城市区域尤其适合用无人机系统采集数据。其数据采集角度为倾斜向下拍摄,可以获取到建筑物的高分辨率影像,并生成对应的三维点云,构建出建筑物的 TIN(Triangulated Irregular Network, TIN)实现三维建模。但由于无人机倾斜摄影测量因视角问题不能准确得到建筑物准确的影像。此外,难以获取到建筑物垂直维度上展现出建筑的细节,如窗户、阳台等。机载 LiDAR 系统是利用无人机搭载激光雷达模块通过发射激光接收回波信号来获取建筑物的高精度点云数据。采集数据角度为垂直向下,恰好能采集到无人机摄影测量采集数据的盲区,两者互补^[9-10]。但机载 LiDAR 只能生成点云数据,不包括建筑物的纹理信息,所得到的模型通常缺乏表面细节和真实感。因此还需结合无人机倾斜摄影获取到的纹理信息,生成带有纹理的真实建筑物模型。

为提高三维模型的建模的质量和精度,有必要对多源数据进行数据配准、融合处理来对建筑物进行三维建模。两者在数据采集角度充分互补,弥补各自的数据盲区,能够显著提升三维模型建模的完整性和质量。此外目前的研究利用传统 ICP 算法将机载 LiDAR 点云与 UAV 影像进行配准融合构建三维模型。但传统的 ICP 算法每次迭代都需要对源点云中的每个点,逐个遍历所有目标点来寻找最近点,配准融合时间较为耗时。并且 ICP 算法依赖于点云的粗配准情况,若粗配准结果不好,ICP 算法会陷入局部最优解,无法找到全局最优的配准结果^[11-13]。

基于此,本研究对采集到的机载 LiDAR 点云和 UAV 影像先进行点云粗配准,然后采用 KD-tree 改进的 ICP 算法进行点云精配准融合,提升配准效率和质量。构建出更加完整准确的三维模型,优化城市建筑物的三维模型效果。最后为验证本研究提出的三维建模方法,以云南省红河州蒙自市实景三维

建设项目中的建筑物为研究区进行实验验证。

2 数据获取

以云南省红河州蒙自市区内实景三维建设项目的高层建筑为研究对象采集数据,分别利用 UAV 和机载 LiDAR 采集 UAV 影像数据和机载 LiDAR 点云数据。

使用飞马 D2000 无人机搭载 D-OP3000 镜头获取 UAV 影像数据,无人机最大载重 750 g,最大起飞重量 3.35 kg,具有全方位避障,自动返航等功能。相机镜头焦距为 35 mm,总像素为 1.26 亿。无人机具体飞行参数,如表 1 所示。由于 UAV 影像不是点云数据,无法进行后续的点云融合处理,因此采用 Context Capture 软件构建出 UAV 影像的点云数据,以确保数据统一。

表 1 无人机飞行参数设置

Tab. 1 UAV flight parameter settings

类型	飞行参数
相对飞行高度/m	110
飞行速度/(m·s ⁻¹)	8
航向重叠度/%	85
旁向重叠度/%	75
最长续航时间/min	60

构建出的 UAV 点云,如图 1 所示。从图中可以看出 UAV 点云点云密度高,包含 RGB 颜色信息,建筑物表面纹理信息丰富。



图 1 UAV 影像点云

Fig. 1 UAV image point cloud

LiDAR 点云数据使用飞马 D20 无人机搭载 DV. LiDAR 激光雷达模块采集,其内部集成了多个高精度系统,包括 GNSS 卫星定位系统、高精度惯性导航系统、激光传感器、POS 解算系统以及高速存储控制系统。RTK 水平精度为 1 cm + 1 ppm,垂直精度为 2 cm + 1 ppm,激光雷达的回波次数为 3 回波,确保了点云数据的高一致性和精准度。图 2 为采集到的机载 LiDAR 点云数据,从图中可以看出机载 LiDAR 采

集到的数据立面信息丰富,尤其是拐角处结构清晰。

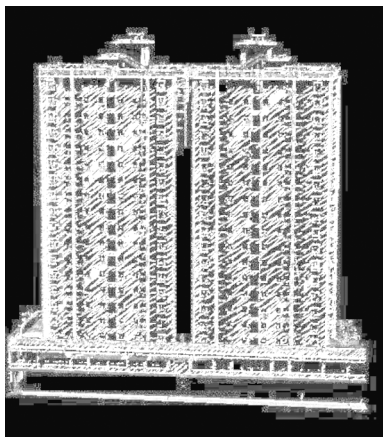


图2 机载 LiDAR 点云数据

Fig. 2 UAV-borne LiDAR point cloud

3 机载 LiDAR 点云与 UAV 点云融合三维建模方法

3.1 技术流程

机载 LiDAR 点云与 UAV 点云融合建模是指将分别获取到的点云数据进行预处理、配准、融合工作后再进行三维建模,从而构建出更加完整、精细的三维模型,相比单一数据源构建三维模型,能够综合利用多源数据的优势,提高建模数据的完整性。具体流程包括三部分:(1)数据预处理:对 UAV 影像进行生成处理、生成稠密点云和机载 LiDAR 点云格式保持一致;(2)数据配准:将统一格式后的数据先进行点云粗配准,再基于 KD-tree 改进的 ICP 算法进行点云精配准;(3)融合建模:将融合后的机载 LiDAR 点云与 UAV 点云进行建模。具体技术路线如图 3 所示。

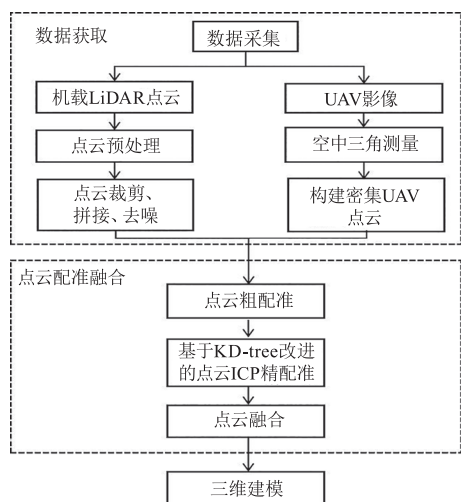


图3 技术路线

Fig. 3 Technical workflow

3.2 机载 LiDAR 点云与 UAV 点云配准融合

3.2.1 坐标系统与数据格式统一

坐标系统一是数据配准融合的基础。为实现数据配准融合工作,要先将两种数据的坐标系统一为

同一坐标系,在此将两个数据的坐标系统都统一为 CGCS2000 坐标系。由于机载 LiDAR 数据为点云数据,无人机倾斜摄影测量获得的数据为影像数据,两者数据存在本质上的区别。因此首先对 UAV 影像数据进行空三解算,生成影像对应的密集点云,以确保两者数据格式统一均为点云数据。

3.2.2 数据配准与融合

点云配准是指将格式统一后的两种点云通过平移旋转等操作进行对齐,具有较高的重叠度,能够在同一个坐标系下表示相同的物体,使目标物的点云信息更加丰富。

点云配准包括粗配准和精配准两个步骤,粗配准是在完全未知点云姿态的情况下找到一个让机载 LiDAR 点云和 UAV 点云相近的旋转平移变换矩阵,对点云进行粗配准使两者大致对齐,为精配准提供良好的初始值。精配准是在粗配准的基础上找到最佳的旋转平移矩阵,使机载 LiDAR 点云和 UAV 点云之间的位置差异最小。

粗配准阶段考虑到 UAV 点云具有丰富的纹理信息,因此以 UAV 点云为基准将机载 LiDAR 点云手动往 UAV 点云上配准,使两者大致对齐。精细配准采用最近点迭代算法 (Iterative Closest Point, ICP)。ICP 算法能够找到最佳的旋转平移矩阵使参考点云和待配准点云之间的位置差异最小^[14]。定义 UAV 点云集合为参考点云 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$,机载 LiDAR 点云为待配准点云 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 。首先计算出 Q 的初始位置,然后对 Q 中的每一个点云 q_i ,在 P 中找到距离其最近的点 p_i ,形成匹配点对。然后根据匹配点对利用最小二乘法确定最佳的旋转矩阵 R 和平移向量 t ,不断对目标函数优化。通过不断迭代,当达到设定的阈值或设定的迭代次数时,求出此时使目标函数的误差的平方和达到最小的 R 和 t ,此时 P 和 Q 间的距离即为最小值,则点云配准成功。具体公式如下:

$$E(R, t) = \sum_{i=1}^n \|Rq_i + t - p_i\|^2 \quad (1)$$

式中, R 为旋转矩阵, t 为平移向量。

本研究采用 KD-tree 改进的 ICP 算法提升配准效率,具体步骤为:

- 1) 对待配准点云 Q 构建 KD-tree;
- 2) 对参考点云中的每个点 $p_i \in P$,使用 KD-tree 查找最临近邻点 $q_i \in Q$;
- 3) 若步骤 2) 没有搜索成功,则继续使用 KD-tree 查找最临近邻点 $q_{i+1} \in Q$;

4) 迭代步骤 3)、4), 直到搜索完 P 中每一个点云, 停止迭代。

5) 计算出此时的旋转矩阵 R 和平移向量 t , 使得点云 P 和 Q 最优地对齐。

3.3 融合建模

机载 LiDAR 点云经过粗配准和基于 KD-tree 改进的精配准后与 UAV 点云位置基本无偏差, 可将两者融合进行三维建模。通过点云构建三维模型要先构建 TIN 再进行建筑物面重建。基于点云数据构建 TIN 的原理为: 通过搜索每一个点云及其邻域点将其连接成三角形, 构建出连续的三角形网络, 每个三角形的顶点由点云中的点构成, 三角形之间通过共享边连接从而重建三维模型。最后将 UAV 点云的纹理信息赋在构建好的三维模型表面, 即可得到最终完整的三维模型。

4 实验结果与分析

首先对 UAV 点云和 LiDAR 点云进行粗配准, 粗配准结果如图 4 所示。从图中可以看出经过粗配准 UAV 点云与 LiDAR 点云已大致对齐重合度较高, 但仍存在错位偏移, 因此需通过精配准使两者对齐。

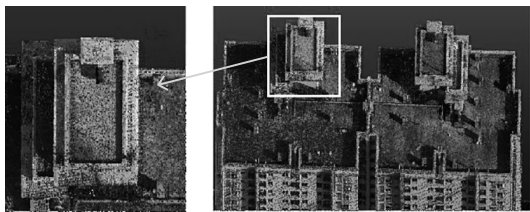


图 4 粗配准结果

Fig. 4 Coarse registration result

在粗配准的基础上基于 KD-tree 改进的 ICP 配准算法进行精配准, 精配准结果如图 5 所示。从图中看出, 经过精配准两者已对齐, 为下文进行融合建模提供了数据基础。



图 5 精配准结果

Fig. 5 Fine registration results

为了验证本文提出的配准算法的有效性与传统的 ICP 算法做对比, 两者精度分析如表 2 所示。

从表 2 可以看出, 本文改进的算法在配准效率和精度上均优于 ICP 配准算法, 其中耗时缩短 58%, 配准误差精度提高 32%, 可见本文算法可有效缩短时间及提高精度。

表 2 配准精度分析

Tab. 2 Registration accuracy analysis

参数	ICP 配准算法	本文改进的 ICP 配准算法
时间/s	0.036	0.015
配准误差/m	0.0053	0.0036

为验证本文融合建模方法的优势, 分别基于 UAV 影像点云、机载 LiDAR 点云以及将两者配准融合后的点云构建三维模型。如图 6 所示, 基于 UAV 影像点云构建的三维模型整体几何连续性表现良好, 模型的纹理信息丰富。但是模型立面数据如窗户细节结构模糊, 出现“变形”“空洞”和“拉花”现象。

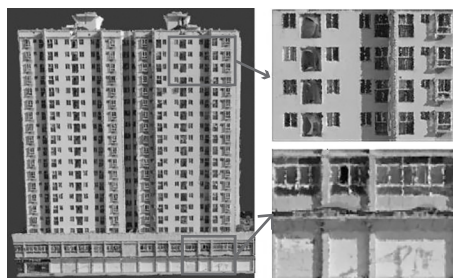


图 6 UAV 影像构建三维模型结果

Fig. 6 3D modeling results from UAV images

由图 7 可知, 基于机载 LiDAR 点云构建的建筑物三维模型立面数据丰富, 能够弥补 UAV 三维模型出现的细节结构模糊问题。由于其采集数据视角为垂直向下, 造成模型底部出现空洞的现象, 而 UAV 模型底部数据较为完整能够弥补此问题, 其次基于机载 LiDAR 点云构建的三维模型纹理信息模糊。可见两者在采集数据方面各有优劣, 将两者构建的模型进行融合可提高三维建模的效果。

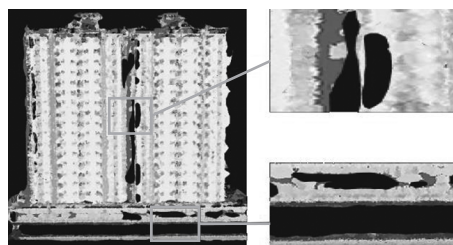


图 7 LiDAR 点云构建三维模型结果

Fig. 7 3D modeling results from LiDAR point cloud

将 UAV 影像点云与 LiDAR 点云配准融合后构建的三维模型如图 8 所示。从图中可以看出 UAV 影像点云有效弥补了机载 LiDAR 因垂直视角导致的建筑底部空洞, LiDAR 点云丰富了 UAV 模型的立面信息使细节特征更加完善。融合后的模型既保留了 UAV 影像丰富的纹理信息, 又通过 LiDAR 点云增强了建筑物立面窗框的细节特征, 构建出了更完整、全面的三维模型。



图8 UAV影像点云和LiDAR点云融合建模结果
Fig.8 Fusion modeling results of UAV image point cloud and LiDAR point cloud

5 结论

本文基于 UAV 影像点云与机载 LiDAR 点云,提出了一种将两种点云配准融合对城市建筑物进行三维建模的方法。试验结果表明:基于 KD-tree 优化的 ICP 配准算法能够有效提升配准精度和速度,可提高城市级实景三维建设效率。与单一数据源三维建模方法相比,UAV 影像点云和 LiDAR 点云数据融合建模,能够显著提升三维模型建模的完整性和精细度。

参考文献:

- [1] Zeng Z X, He J J, Zhang J, et al. City-level high-precision modeling technology integrating laser point clouds[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(3):133-138. (in Chinese)
曾政祥,何晶晶,张婧.融合激光点云的城市级高精度建模技术[J].测绘通报,2023(3):133-138.
- [2] Chen G L, Zhu L, Chen S N. The construction path of 3D underground pipelines in megacities for new quality productivity[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024(12):178-182. (in Chinese)
陈功亮,朱律,陈赛楠.面向新质生产力的超大城市实景三维地下管线建设路径[J].测绘通报,2024(12):178-182.
- [3] Wang S F. Research on the construction of geographic information spatio-temporal cloud platform under the background of realistic 3D China[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2024,47(5):34-36,40. (in Chinese)
王守芬.实景三维中国背景下的地理信息时空云平台建设研究[J].测绘与空间地理信息,2024,47(5):34-36,40.
- [4] Duan P, Li J, Li H K, et al. 3D modeling method of UAV image point cloud and ground laser point cloud registration[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2020, 29(4):44-47. (in Chinese)
段平,李佳,李海昆,等.无人机影像点云与地面激光点云配准的三维建模方法[J].测绘工程,2020,29(4):44-47.
- [5] Li S Q, Liu J J, Wang W P, et al. 3D modeling approach for tower buildings using multi-source LiDAR and UAV imagery[J]. Laser & Infrared, 2024, 54(7):1053-1058. (in Chinese)
李思情,刘佳佳,王伟鹏,等.多源 LiDAR 和 UAV 影像的塔式建筑物三维建模方法[J].激光与红外,2024,54(7):1053-1058.
- [6] Li X B, Lin Z J, Yang X, et al. Research on 3D real scene fusion modeling based on laser scanning and oblique photography[J]. Laser Journal, 2021, 42(8):166-170. (in Chinese)
李晓斌,林志军,杨玺,等.基于激光扫描和倾斜摄影技术的三维实景融合建模研究[J].激光杂志,2021,42(8):166-170.
- [7] Kang J, Kim D, Lee C, et al. Efficiency study of combined UAS photogrammetry and terrestrial LiDAR in 3D modeling for maintenance and management of fill dams[J]. Remote Sensing, 2026, 15(8):2026.
- [8] Kölle M, Laupheimer D, Schmohl S, et al. The hessigheim 3D (H3D) benchmark on semantic segmentation of high-resolution 3D point clouds and textured meshes from UAV LiDAR and multi-view-stereo[J]. ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 1(11):100001.
- [9] Kan Y X. Research on 3D reality reconstruction technology based on multi-sources measurement data fusion[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017. (in Chinese)
阚酉浔.基于多源测量数据融合的三维实景重建技术研究[D].武汉:中国地质大学,2017.
- [10] Zeng Z X, Qin W X, Zhang J, et al. Small object modeling technology based on aerial multi-source data fusion[J]. Remote Sensing Information, 2024, 39(6):48-55. (in Chinese)
曾政祥,秦卫祥,张婧,等.航空多源数据融合的细小物体建模技术[J].遥感信息,2024,39(6):48-55.
- [11] Shan X P, Su J Q, Liu L Q, et al. A 3D LiDAR point cloud ICP registration algorithm based on dual-constraint feature extraction[J]. Applied Laser, 2025, 45(1):143-152. (in Chinese)
单馨平,苏建强,刘利强,等.基于双约束特征提取的三维激光雷达点云 ICP 配准算法[J].应用激光,2025,45(1):143-152.
- [12] Chen W, Liu J, Yang H M, et al. Aircraft blade point cloud registration based on surface edge extraction[J]. Applied Laser, 2024, 44(10):196-203. (in Chinese)
陈伟,刘瑾,杨海马,等.基于曲面边缘提取的航空叶片点云配准[J].应用激光,2024,44(10):196-203.
- [13] Huang L M. 3D reality construction modeling with multi-source data fusion and its applications for building deformation monitoring[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2021. (in Chinese)
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].济南:山东建筑大学,2021.
- [14] Li P, Wang R S, Wang Y X, et al. Evaluation of the ICP algorithm in 3D point cloud registration[J]. IEEE Access, 2020, 8:68030-68048.