

面向三维重建的点云与影像数据处理方法研究

同李冰¹, 程相君¹, 陈东^{2,*}, 聂昕晖¹, 付刚毅¹, 武浩¹

1. 洛阳市嵩县山金矿业有限公司运营管理部, 河南 洛阳, 471400
2. 山东科技大学, 测绘与空间信息学院, 山东 青岛, 266590

摘要: 三维激光扫描技术作为一种高效、高精度的主动式遥感手段, 在三维重建领域发挥着重要作用。针对复杂城市高层建筑三维重建中, 单一数据源存在固有局限性的问题, 本文采用地面激光点云与影像点云多源数据融合的研究方法。固定站式扫描系统可提供高精度的三维几何基准, 但存在架站局限及高层玻璃立面强反射导致的点云缺失; 无人机倾斜摄影能高效获取完整纹理, 但倾斜摄影模型存在几何精度不足。因此, 本研究通过坐标基准统一实现多源点云的初始对齐, 并结合迭代最近点算法进行精配准, 实现多源数据的协同与优化。实验表明, 该方法能够生成几何精确、纹理信息完整的城市高层三维模型, 有效克服了单一技术的不足与缺陷, 为城市实景三维重建提供了一套可靠的技术解决方案。

关键词: 三维激光扫描技术; 多源数据融合; 迭代最近点算法; 精配准; 三维重建

Research on Point Cloud and Image Data Processing Methods for 3D Reconstruction

Libing Tong¹, Xiangjun Cheng¹, Dong Chen^{2,*}, Xinhui Nie¹, Gangyi Fu¹, Hao Wu¹

1. Operation and Management Department of Shan jin Mining Co., Ltd. in Song xian County, Luoyang Henan, China, 471400
2. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong, China, 266590

Abstract: Three-dimensional laser scanning technology, as an efficient and high-precision active remote sensing method, plays a significant role in the field of three-dimensional reconstruction. Aiming at the problem that a single data source has inherent limitations in the 3D reconstruction of high-rise buildings in complex cities, this paper adopts the research method of multi-source data fusion of ground laser point cloud and image point cloud. The fixed-station scanning system can provide high-precision three-dimensional geometric references, but it has limitations in setting up stations and the loss of point clouds caused by strong reflection from high-rise glass facades. Oblique photography by drones can efficiently obtain complete textures, but oblique photography models have insufficient geometric accuracy. Therefore, in this study, the initial alignment of multi-source point clouds is achieved through the unification of coordinate references, and fine registration is carried out in combination with the iterative nearest point algorithm to realize the collaboration and optimization of multi-source data. Experiments show that this method can generate three-dimensional models of urban high-rise buildings with precise geometry and complete texture information, effectively overcoming the shortcomings and defects of a single technology, and providing a reliable technical solution for the three-dimensional reconstruction of urban real scenes.

Keywords: Three-dimensional laser scanning; Multi-source data fusion; Iterative closest point; Fine registration; Three-dimensional reconstruction

随着科技的不断发展,城市化进程的持续加快,城市实景三维建设的需求越来越高^[1]。在表征城市三维空间结构与形态方面,传统的二维地理信息表达方式存在明显局限性。实景三维模型作为重要的新型基础设施,可以提供即时、可靠、准确的地理信息数据^[2]。实景三维中国建设是推动城市智慧化转型的重要举措^[3]。如何快速、精确地获取城市空间三维数据,是亟待解决的核心问题^[4]。随着数据获取技术的不断进步,综合利用多源点云数据以增强三维模型的几何精度与场景完整性,日益成为学界关注的焦点。

地面三维激光扫描系统通过其高密度与高精度的数据采集能力^[5],在智慧城市和实景三维建设等项目中得到了广泛应用。在无人机平台集成的多视角倾斜摄影测量技术,展现出作业效率高、经济成本低等显著特点^[6]。然而,地面三维激光扫描技术因设站位置的影响,易在高层建筑顶部形成扫描盲区,且高层建筑物立面玻璃强反射会直接造成点云数据缺失。无人机航测则易受房檐、植被等障碍物的遮挡,造成底部或立面数据缺失^[7],进而使生成的实景三维模型在几何精细度上有所欠缺。融合来自地面激光点云与影像点云,可以弥补各自的数据缺失,最终获取一个完整性好且具备真实色彩的三维空间数据。

为实现真实的城市实景三维重建,本研究基于激光点云与影像点云进行深度融合。所获成果能够为智慧城市建设等领域提供有效的技术支撑。

1 地面激光扫描技术与无人机摄影测量技术原理

1.1 地面激光扫描技术

三维激光扫描技术作为一种高效、高精度的主动式遥感手段,其工作机理是通过向目标物体主动发出激光,并接收物体表面反射回来的信号,进而得到被测对象的空间三维坐标数据^[8-9]。地面激光扫描测距原理包含脉冲法与相位法,根本目的都是精确测量扫描仪与目标之间的直线距离 R 。结合扫描时记录的水平角 α 与垂直角 β ,可通过空间几何关系计算进一步确定地面点 P 的空间位置。坐标计算公式如(1),激光扫描点坐标示意图如图1所示。

$$P = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cos \beta \cos \alpha \\ R \cos \beta \sin \alpha \\ R \sin \beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

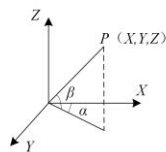


图1 激光扫描点坐标计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser scanning point coordinate calculation

1.2 无人机摄影测量技术

无人机摄影测量的主要任务是获取高分辨率数字影像^[10]。该系统通过在无人机上搭载高精度传感器,基于摄影测量原理对目标区域进行影像数据采集。随后,利用专业软件对获取的原始影像进

行处理, 最终输出数字正射影像图 (DOM)、数字高程模型 (DEM) 以及实景三维模型等多种基础地理信息产品。采用倾斜摄影技术, 通过内业数据处理, 可将采集的二维影像重建为具有真实色彩信息的三维点云。该重建过程主要包含空中三角测量与密集匹配两个核心环节^[1]。在空中三角测量阶段, 通过匹配影像中的特征点, 并联合地面控制点与无人机位置与姿态系统 (Position and Orientation System, POS) 提供的位姿参数, 可解算出每张影像精确的外方位元素。密集匹配阶段则基于这些外方位元素, 实施像素级的密集对应计算, 最终生成色彩逼真的高密度点云。即使原始影像不包含绝对地理坐标, 空中三角测量算法也能自动恢复相机曝光时刻的空间位置与姿态参数, 并同步求解出点云中各点的三维坐标。在此基础上, 进一步应用密集匹配算法进行深度处理, 即可生成细节丰富、纹理清晰的高密度影像点云数据。

2 点云与影像数据融合过程

2.1 激光点云与影像点云融合的实景三维重建流程

激光点云与影像点云融合的城市实景三维重建技术路线如图 2 所示。整个方案涵盖数据采集、数据处理与三维重建三个阶段。在数据采集环节, 利用地面激光扫描仪获取城市多站点云数据, 同时通过无人机搭载的多视角摄影系统采集城市航摄影像及相应的 POS 数据, 为后续建模工作奠定数据基础。数据处理阶段需对原始激光点云与航空影像分别进行预处理。通过统一坐标基准并实施迭代最近点算法 (Iterative Closest Point, ICP) 精细配准, 可实现不同点云数据的高精度融合。最后, 在三维重建环节, 基于融合后的点云数据构建三角网模型, 进而生成能够准确表达城市高层建筑形态的三维模型。

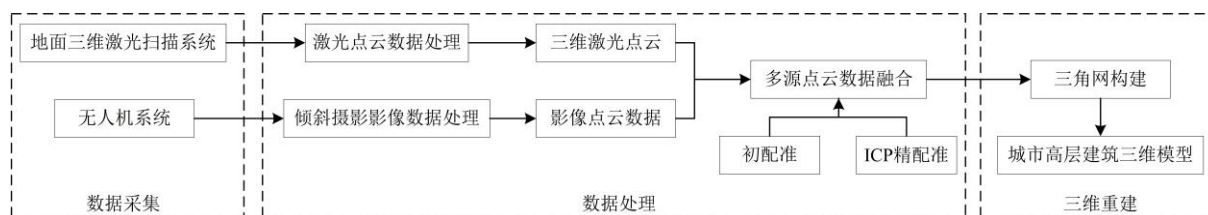


图 2 激光点云与影像点云融合的实景三维重建流程

Fig. 2 The real-scene 3D reconstruction process of laser point cloud and image point cloud fusion

2.2 激光点云数据采集

采用 Trimble X9 固定站式扫描仪采集城市某高层建筑激光点云数据。X9 能够捕捉横向 360° 、纵向 282° 的大范围环境信息, 并且能以高达每秒 100 万点的速度进行高速扫描, 在 1 分钟内即可完成一次全景扫描。在城市激光点云数据的采集中, 通常需要规划并设置多个扫描测站。多站点、多角度的数据获取方式, 有助于提升点云数据的冗余度与可靠性^[12]。

2.3 倾斜影像采集

本研究所用的城市航拍数据, 由华测 BB4 四旋翼无人机平台采集完成, 如图 3 所示。该飞行系统集成实时动态载波相位差分定位技术, BB4 配备了双 DJI A3 IMU 惯性测量单元 (Inertial Measurement Unit, IMU) 和全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS), 该系统能够在快速获取城市多视角倾斜影像的过程中, 同时实现厘米级的空间定位精度。本研究在无人机航摄任务中采用东西走向的飞行航线规划。具体参数设置为: 航向与旁向重叠度为 80%, 同时将相机镜头倾角设定为 45° 。该设计方案旨在有效减弱因太阳高度角变化所产生的阴影干扰, 从而保障

所需多视角影像数据的质量与完整性。



图3 无人机倾斜摄影

Fig. 3 Drone oblique photography

2.4 数据融合

在数据处理阶段，首先对获取的地面激光点云与倾斜影像进行预处理，随后将所有数据的空间尺度进行归一化，并统一转换为“.las”格式，为后续的融合操作建立一致的数据基础。在完成数据预处理后，需对各测站获取的地面激光点云与影像点云进行坐标转换。当所有数据统一至同一空间参考系统后，便可实现多点云的粗配准。随后，应用ICP算法对两类点云进行精确的空间对齐，最终完成精细融合。

2.4.1 多源点云数据坐标基准统一

为实现多源点云数据的初始配准，首先需进行坐标基准的统一，即将所有数据转换至同一空间参考框架下。将 P_R 定义为地面激光点云数据集， $O-XYZ$ 为其所在坐标系， $P_i(X,Y,Z) \in P_R$ ； P_T 为城倾斜影像生成的点云数据集， $O'-X'Y'Z'$ 为其所在坐标系， $P_j(X',Y',Z') \in P_T$ 。

为实现两者坐标系的统一，需先在 P_R 、 P_T 中识别出对应于同一地面位置的若干组同名点对 (P_i, P_j) 。通过公式(2)实现原始坐标到目标坐标的转换， m 为尺度因子， R 和 T 分别表示旋转变换矩阵与平移变换矩阵。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = mR \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + T \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中， (x, y, z) 表示原始空间坐标， (X, Y, Z) 为目标空间坐标， (dX, dY, dZ) 为平移向量， (α, β, γ) 为旋转参数。通过间接平差法，并依据最小二乘准则对转换参数进行最优估计，可实现多源点云的初步配准。

2.4.2 ICP 精配准

ICP算法其核心是通过迭代寻找源点云与目标点云之间的最佳刚性变换，使得源点云在应用该变换后，与目标点云尽可能地重合。该方法旨在通过特定准则建立点云间的对应关系，基于最小二

乘原理进行迭代优化,从而求解出最优的坐标变换矩阵^[13]。

ICP 算法的数学思想是最小化配对点之间的欧氏距离平方和,即寻找一个旋转矩阵 R 和一个平移向量 t ,使得源点云经过变换后,与目标点云对应点之间的距离达到最小。给定源点云 $P = \{p_i | i=1,2,\dots,N\}$ 和目标点云 $Q = \{q_j | j=1,2,\dots,M\}$,ICP 算法通过以下步骤实现精配准:

(1) 最近点配对:对于源点云中的每个点 p_i ,在目标点云 Q 中寻找最近的对应点 $q_{c(i)}$,这一步通常采用高效的最近邻搜索算法(KD 树)来加速计算。

$$c(i) = \arg \min_j \|q_j - p_i\| \quad (4)$$

(2) 最优刚性变换估计:在找到配对点集 $\{(p_i, q_{c(i)})\}$ 后,目标是求解最优的旋转矩阵 R 和平移向量 t ,使源点云 P 在应用该变换后,与目标点云 Q 的对应点之间的距离最小化。即以下目标函数 $E(R,t)$ 最小化:

$$E(R,t) = \sum_{i=1}^N \|q_{c(i)} - (Rp_i + t)\|^2 \quad (5)$$

基于上述原理,将待配准的影像点云和地面激光点云的数据导入 Visual Studio 软件中,使用 pcl 库中的 KD-tree。通过 KD-tree 在目标点云中搜寻源点云的最近邻点以构建点对,利用 ICP 算法进行迭代计算,求得最优空间变换参数,从而实现两点云间距离误差平方和的最小。

2.5 实景三维重建

本文在 Context Capture 平台中实现实景三维重建,将激光点云数据与经过匹配处理的倾斜影像点云数据进行整合,基于坐标基准统一并经过 ICP 精配准的多源融合点云如图 4 所示。随后对融合点云实施三角网构建与网格优化,最后通过自动纹理映射技术附加真实影像纹理,最终获得高精度的城市实景三维模型如图 5 所示。



图 4 多元融合三维点云数据

Fig. 4 Multi-fusion three-dimensional point cloud data

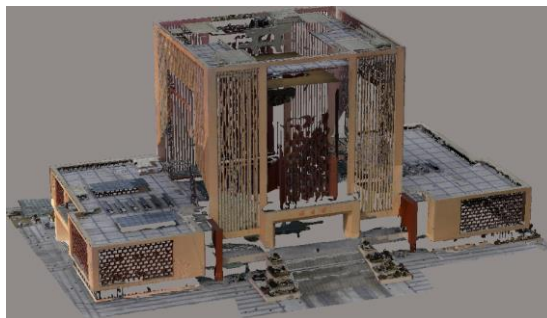


图 5 城市实景三维模型

Fig. 5 Three-dimensional model of the real scene of the city

3 结论

(1) 本文集成地面激光扫描与无人机摄影测量两种技术,构建了多源数据融合的技术体系。该体系充分发挥激光点云在几何精度与无人机影像在纹理与结构完整性方面的各自优势,为城市实景三维重建提供了可靠的数据基础。

(2) 提出了基于坐标基准统一与 ICP 精配准的融合方法。通过 POS 数据与扫描站点坐标实现点云自动初始定位,结合 ICP 算法完成局部优化,实现了多源点云的高精度融合,有效提升了配准效率与精度。

(3) 最终生成的实景三维模型兼具几何精确性与视觉真实性, 验证了本技术路线的可行性。融合模型有效解决了单一数据源导致的纹理缺失与几何失真问题, 为智慧城市建设提供了高质量模型支撑。

参考文献

- [1] 陈军, 田海波, 高崑, 等. 实景三维中国的总体架构与主体技术[J]. 测绘学报, 2025, 54(04): 636-649.
- [2] 张前, 王健, 齐智宇, 等. 改进 Crust 算法的点云复杂曲面精细化三维重建[J]. 激光与红外, 2024, 54(12): 1827-1833.
- [3] 谭金石, 祖国, 刘丽. 激光扫描与倾斜摄影空地协同的建筑物三维模型构建方法[J]. 应用激光, 2023, 43(07): 107-115.
- [4] 鲍国, 张书毕, 陈强, 等. 基于地面 LiDAR 的建筑物精细化三维重建及精度分析[J]. 金属矿山, 2023, (09): 140-144.
- [5] 刘艺, 王健, 李强, 等. 基于多元线性模型的水杉树高估测方法[J]. 应用激光, 2024, 44(12): 126-137.
- [6] 齐智宇, 王健, 赵艺龙, 等. 基于改进空间密度聚类的电力线自动提取[J]. 应用激光, 2025, 45(02): 141-147.
- [7] 丁亚洲, 冯发杰, 吏军平, 等. 点线特征约束的 LiDAR 点云与航空影像自动配准[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(06): 1207-1214.
- [8] 李峰, 米晓楠, 孙广通, 等. 地面激光扫描联合无人机影像的三维模型重建[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(09): 9-12.
- [9] 彭仪普, 李剑, 邹魁, 等. 地面激光扫描点云与无人机影像点云融合应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(07): 2804-2814.
- [10] 晏磊, 廖小罕, 周成虎, 等. 中国无人机遥感技术突破与产业发展综述[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(04): 476-495.
- [11] 李德仁, 肖雄武, 郭丙轩, 等. 倾斜影像自动空三及其在城市真三维模型重建中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(06): 711-721.
- [12] 刘亚坤, 刘会云, 李永强, 等. 基于多源激光点云融合的建筑物 BIM 建模[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(05): 764-773.
- [13] 刘德儿, 刘鹏, 肖健. 基于 PCA-TrICP 的多源点云无缝三维重建[J]. 激光与红外, 2021, 51(04): 447-453.

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2023MD027)。

¹ **第1作者简介:** 同李冰(1990-), 男, 学士, 工程师, 研究方向: 地质测绘。 E-mail: 15290568522@163.com。

* **通讯作者简介:** 陈东(2002-), 男, 硕士在读, 山东科技大学, 研究方向: 三维激光点云数据处理。 E-mail: cdong0315@163.com。