

文章编号:1001-5078(2024)07-1053-06

· 激光应用技术 ·

# 多源 LiDAR 和 UAV 影像的塔式建筑物三维建模方法

李思情<sup>1</sup>, 刘佳佳<sup>2</sup>, 王伟鹏<sup>3</sup>, 段平<sup>1</sup>, 李佳<sup>1</sup>

(1. 云南师范大学地理学部, 云南昆明 650500; 2. 中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司, 云南昆明 650051;  
3. 云南省不动产登记中心, 云南昆明 650051)

**摘要:**塔式建筑物由于立面结构复杂,使用单一数据源进行三维建模时容易出现部分区域空洞、纹理拉花等情况。为解决此问题,本文提出一种将无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)影像、机载 LiDAR 数据和手持 LiDAR 数据进行配准融合的塔式建筑物三维建模方法。以云南省玉溪市新平县的五彩云楼为例,使用 UAV 和手持激光扫描仪作为数据采集设备,首先分别采集塔式建筑物的 UAV 影像、机载 LiDAR 和手持 LiDAR 数据,然后基于摄影测量原理生成 UAV 影像的点云,其次基于最近点迭代算法方法将三种数据进行配准融合,最后通过构建不规则三角网表示其三维模型。实验结果表明:将多源 LiDAR 和 UAV 影像点云配准融合后生成的三维模型结构更加完整,避免了单一数据源构建三维模型存在的空洞问题。

**关键词:**多源数据;激光雷达;塔式建筑物;三维建模

**中图分类号:**TN209;TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.07.007

## 3D Modeling approach for tower buildings using multi-source LiDAR and UAV imagery

LI Si-qing<sup>1</sup>, LIU Jia-jia<sup>2</sup>, WANG Wei-peng<sup>3</sup>, DUAN Ping<sup>1</sup>, LI Jia<sup>1</sup>

(1. Department of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;  
2. Yunnan Electric Power Design Institute of China Energy Construction Group, Kunming 650051, China;  
3. Yunnan Real Estate Registry Centre, Kunming 650051, China)

**Abstract:** Given the intricate design of tower facades, generating 3D models from a single data source often results in regional voids and exaggerated textural details. To address these issues, this paper proposes a 3D modeling method for tower buildings by integrating and synthesizing data from Unmanned Aerial Vehicles (UAV), airborne LiDAR, and handheld LiDAR. Illustrated by the case study of the vibrant Wucailou building in Xinping County, Yuxi City, Yunnan Province, data acquisition is conducted using UAVs and handheld laser scanners. Initially, separate collections of UAV imagery, airborne LiDAR, and handheld LiDAR data for the tower are undertaken. Subsequently, UAV image point clouds are generated adhering to photogrammetric principles. And then the three kinds of data are fused with alignment based on the nearest-point iteration algorithm method, and finally, the three kinds of data are fused with alignment by constructing an irregular triangular mesh to represent its 3D model. The experimental results validate that the 3D model derived from the harmonized multi-source LiDAR and UAV image data is more complete, which avoids the problem of voids that exists in the construction of 3D models from a single data source.

**Keywords:** multi-source data fusion; LiDAR; tower buildings; 3D modeling

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 41961061);云南省基础研究计划项目(No. 202301AT070061);“兴滇英才支持计划”经费支持项目(No. YNWR-QNBJ-2020-048; No. YNWR-QNBJ-2020-103)资助。

**作者简介:**李思情(2000-),女,硕士研究生,主要从事无人机影像处理与应用研究。E-mail:1345484999@qq.com

**通讯作者:**李佳(1984-),女,博士,副教授,博士生导师,主要从事无人机影像处理与应用研究。E-mail:keguigiser@163.com

**收稿日期:**2023-11-02; **修订日期:**2023-12-08

## 1 引言

塔式建筑物是一种高而细长的建筑,具有高耸的垂直结构、复杂的结构细节和多面性等特点。三维建模作为一种对地理场景进行真实、立体反映的数字重建方法,在智慧城市、文物保护、地籍测量和灾害评估等领域中获得了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。特别是对于塔式建筑物,三维建模不仅可以为修复、维护和重建提供详实参考,还能在城市规划、历史研究和虚拟现实展中展现其独特价值。深入研究塔式建筑物的三维模型构建方法具有重要的现实价值<sup>[4-5]</sup>。

目前,塔式建筑物三维建模的方法主要有:(1)人工建模,它是基于地理场景的图像或大比例尺地图,通过利用如 Auto CAD 之类的专业三维建模软件来完成的。该方法建模周期长、人工成本高,且无法满足模型的真实性和精度,尤其难以满足塔式建筑物这类复杂对象的三维建模。(2)无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)倾斜摄影测量技术,它是从不同视角同步获取塔式建筑物的无人机影像,基于摄影测量原理生成三维点云,构建其 TIN(Triangulated Irregular Network, TIN),结合影像纹理信息、POS 数据以及地面控制点数据完成三维重构<sup>[6-7]</sup>。由于塔式建筑物结构复杂,采用无人机获取其侧面信息时较为困难,容易受到遮挡,该方法的建模效果和模型精度仍需提高。(3)激光雷达扫描技术(Light Detection and Ranging, LiDAR),LiDAR 技术是基于激光束的反射原理来获取地表或物体的高精度三维点云数据,可以通过高效、快速地获取点云数据,生成较高精度的三维模型<sup>[8-10]</sup>。根据不同的应用场景, LiDAR 设备可分为机载、地面、手持等三种类型。手持 LiDAR 扫描仪移动灵活,适用于难到达的位置和捕捉建筑细节,但覆盖范围有限,如在塔式建筑中可能会遗漏顶部结构。机载 LiDAR 适合大面积扫描,但其从空中扫描可能导致较低的分辨率和由遮挡造成的数据缺失<sup>[11]</sup>。地面 LiDAR 采集塔式建筑数据时,能提供突显底部和近地结构细节的高分辨率点云,但受视野遮挡影响无法全面覆盖高塔顶部。

为了提高塔式建筑物三维建模的质量和精度,需将多源数据进行配准融合对塔式建筑物进行三维建模<sup>[12-13]</sup>。基于手持 LiDAR 数据建模能够提供高分辨率的塔式建筑物立面数据,但是缺失建筑顶部的信息,而机载 LiDAR 获取的数据能够较完整地表达塔式建筑物顶部的信息,弥补了手持 LiDAR 数据在建立塔式建筑物三维模型时顶部结构缺失这一缺陷。然而因为塔式建筑通常存在围栏,增加了对塔式建筑

立面数据采集的难度,导致被围栏遮挡的墙面数据缺失。而机载 LiDAR 和手持 LiDAR 的数据采集角度分别是垂直向下和从下方倾斜向上,两者在该区域均出现了数据采集盲区,所以仅使用这两种 LiDAR 数据所建立的塔式建筑物三维模型仍存在空洞,难以实现对塔式建筑物完整的三维建模。相比之下,无人机倾斜摄影技术主要采用由上而下的倾斜拍摄角度,恰好能够采集到上述两种 LiDAR 数据无法覆盖区域的 UAV 影像,基于 UAV 影像生成的密集点云可与上述两种 LiDAR 数据配准融合,有效地填补了数据空缺,从而显著提高了塔式建筑三维模型的质量与完整性。

基于此,本文以云南省玉溪市新平县的五彩云楼为研究对象,将手持 LiDAR、机载 LiDAR 和 UAV 影像生成的点云配准融合后进行三维建模,以构建更完整的塔式建筑物三维模型。

## 2 数据采集

以云南省玉溪市新平县的一塔式建筑物五彩云楼为研究对象。分别用 UAV 和手持扫描仪获取 UAV 影像、机载 LiDAR 数据和手持 LiDAR 数据。图 1 为研究区概况图。

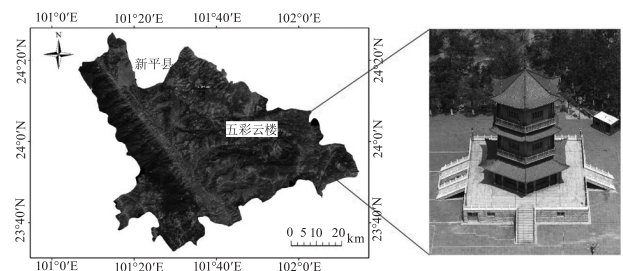


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of the study area

手持 LiDAR 数据获取采用飞马机器人 SLAM100 手持激光扫描仪。数据获取只需手持 SLAM100 围绕五彩云楼一周,即可测得手持 LiDAR 数据,共有 1745797 个点云,如图 2 所示。可以发现该数据包含了研究对象及其附近地理场景,塔式建筑物侧面信息丰富,但顶部结构存在明显缺失、缺少坐标参考。针对初始数据存在的问题,后期需要对其进行裁剪、重采样、去噪、配准等工作。

机载 LiDAR 数据获取采用飞马 D-LiDAR2000 进行数据采集。采集数据时,航线设计为一交叉航线,相对航高设置为 128 m,航线间距设置为 115 m。机载设备获取的 LiDAR 数据如图 3 所示。该点云数据有 8976029 个点云,顶部结构表达完整,但立面信息存在大量缺失,且初始点云的采集区域过大,后期需进行裁剪、去噪、配准等处理。



图2 初始手持 LiDAR 数据  
Fig.2 Initial handheld LiDAR data



图3 初始机载 LiDAR 数据  
Fig.3 Initial airborne LiDAR data

UAV 影像采用飞马 D2000 搭载 D-OP5000 相机模块进行获取,设备参数如表 1、2 所示。设置飞行相对航高为 100 m,航向重叠度为 80 %,旁向重叠度为 75 %。由于无人机影像不是点云数据,需将获取的影像通过 Context Capture 软件生成点云,本次实验总采集影像数为 65 张,共生成 504300775 个点云,如图 4 所示。

表 1 飞马 D2000 飞行平台参数

Tab.1 FeiMa D2000 flight platform parameters

| 名称                          | 参数       |
|-----------------------------|----------|
| 最大起飞/标准重量/kg                | 3.35/2.8 |
| 最大飞行速度/(m·s <sup>-1</sup> ) | 20       |
| 最长续航时间/min                  | 60       |

表 2 相机参数

Tab.2 Camera parameters

| 名称    | 参数   | 名称                    | 参数        |
|-------|------|-----------------------|-----------|
| 镜头数量  | 5    | 焦距/mm                 | 28        |
| 总像素/亿 | 1.26 | 传感器尺寸/mm <sup>2</sup> | 23.1×15.4 |

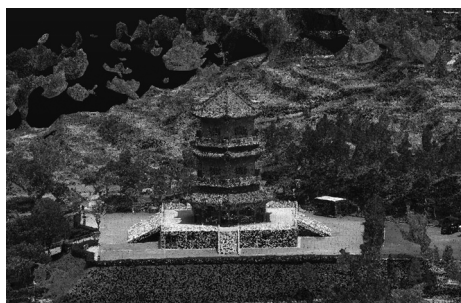


图4 UAV 影像原始点云  
Fig.4 UAV imagery original point cloud

### 3 多源数据配准融合三维建模方法

#### 3.1 技术流程

多源数据配准融合建模是指采用不同的设备和技术对同一物体进行数据采集,将获取的影像、LiDAR 数据等数据进行处理,从而建立更加精确、完整的三维模型,其相较于传统的单一数据源的建模有较大优势,提高了数据的完整性<sup>[14-15]</sup>。整体流程可分为 3 个步骤:(1)数据预处理,包括 UAV 影像的空中三角测量、生成密集点云,LiDAR 数据的预处理;(2)多源数据配准融合;(3)配准融合后的点云生成三维模型。多源数据配准融合建模的技术流程如图 5 所示。

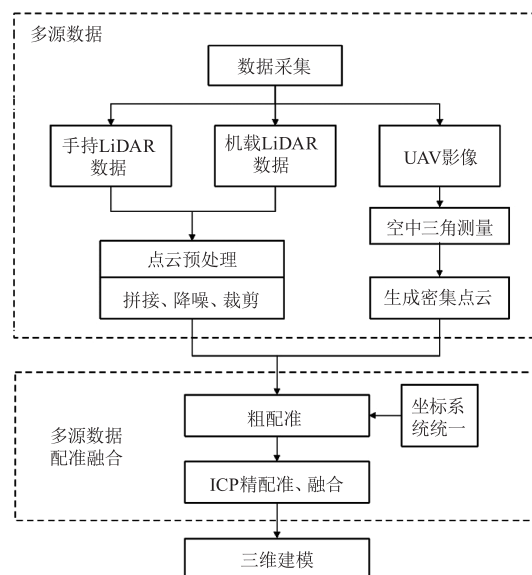


图5 技术路线图

Fig.5 Technology roadmap

#### 3.2 多源数据配准融合

##### 3.2.1 坐标系统与格式统一

多源数据包括 UAV 倾斜摄影影像、机载 LiDAR 数据和手持 LiDAR 数据。坐标系统是数据融合的基础<sup>[16]</sup>,因此需将不同坐标系下的 UAV 倾斜摄影影像、机载 LiDAR 数据和手持 LiDAR 数据进行坐标系统的统一。由于手持激光扫描仪是局部坐标系,所以选择以无人机数据的坐标系为基准,将三个数据的坐标系统一为国家 CGCS2000 坐标系。

数据格式的统一是指因为影像和 LiDAR 数据的本质不同,属于异维异质数据,很难进行同名点的匹配<sup>[17]</sup>,所以需要将影像转化为影像点云数据。将 UAV 影像数据通过 Context Capture 软件,进行空三解算,生成影像密集点云,实现将多种格式数据转换为统一的点云格式。

##### 3.2.2 多源数据配准融合

点云配准是指不同的点云数据通过旋转平移



等位置变换达到尽可能高的重合度,得到一个更完整的目标物点云。采用的精确配准方法是基于最近点迭代算法(Iterative Closest Point, ICP),由于 ICP 算法的配准效果取决于两个待配准点云数据的初始位置<sup>[18]</sup>,因此,为了更优的配准效果,需对点云首先进行粗略配准,再使用 ICP 算法完成精确配准,最后对点云数据进行融合处理。在数据预处理中对坐标系统进行了统一,相当于进行了点云粗配准。

ICP 是一种用于配准两个三维点云之间的迭代优化的方法<sup>[19]</sup>,目的是找到一个最佳的刚性变换(旋转和平移),使得源点云与目标点云之间的距离最小。假设机载 LiDAR 为参考点云,设为  $P$ ,包含  $m$  个点,手持 LiDAR 为待配准点云  $Q$ ,包含  $n$  个点。首先,为  $Q$  提供一个初始的估计位置。然后为  $Q$  中的每一个  $q_i$ ,在  $P$  中找到与其最近的点  $p_i$ 。根据这些点对,使用最小二乘法确定最佳的旋转矩阵  $R$  和平移向量  $t$ ,不断优化目标函数,以最小化  $P$  和  $Q$  之间的距离。其目标函数公式为:

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

通过不断迭代直到满足某个停止条件,例如达到预设的迭代次数或者距离误差小于阈值,就认为配准成功,算法终止。

### 3.3 三维建模

基于点云数据建立塔式建筑物三维模型的方法主要有构建 TIN 和曲面重建。构建 TIN 的核心原理在于通过搜索点云中每个点的邻域点,每三个点会组成一个三角形平面,以此构建一个由三角形组成的连续网络<sup>[20-21]</sup>(如图 6 所示)。曲面重建的核心原理是通过找一个数学表达方式,尽可能准确地表达点云数据所代表的实际形状,建立一个准确、光滑的曲面,例如泊松重建和基于径向基函数等。根据塔式建筑物和已有数据的特点,将已经配准融合的点云数据在 Context Capture 中生成 TIN 来建立塔式建筑物的三维模型(如图 7 所示)。

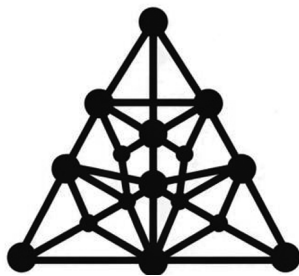


图 6 TIN 的边和节点

Fig. 6 Edges and nodes of TIN

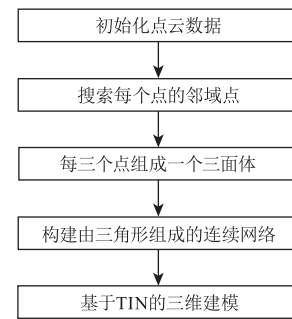
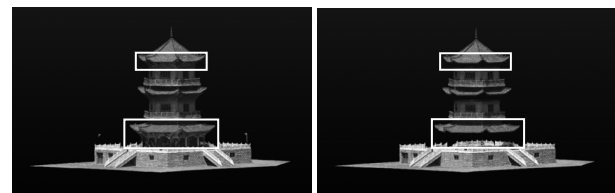


图 7 基于 TIN 构建三维模型的流程

Fig. 7 The process of building a 3D model based on TIN

## 4 建模结果与分析

将 UAV 影像、机载 LiDAR 数据、手持 LiDAR 数据以及配准融合后的点云数据分别进行三维模型的构建。其中,由于 UAV 影像点云数据在屋檐下方和底部柱子部分存在扭曲、拉花的现象,因此在点云配准前需对影像点云数据进行处理,处理前后结果如图 8(a)、(b) 所示。



(a) UAV影像点云处理前

(b) UAV影像点云处理后

图 8 UAV 影像点云处理前后对比

Fig. 8 Comparison before and after UAV image point cloud processing

通过图 9、10 可发现,基于手持 LiDAR 数据的塔式建筑物三维模型底部和建筑立面的数据较完整,但由于手持扫描仪移动的限制,建筑物顶部的数据缺失,造成模型顶部空洞的现象。而基于机载 LiDAR 数据的塔式建筑物三维建模模型对塔式建筑物顶部结构表达完整,但由于 UAV 采集数据时位置的限制,立面信息基本完全缺失。仅利用 UAV 影像进行建模的模型,建筑物轮廓完整,顶部结构也完整,但由于拍摄视角的限制和地物的遮挡,在建筑的立面与屋檐的连接处以及底部柱子的部分出现了扭曲、拉花和空洞现象,如图 11 所示。

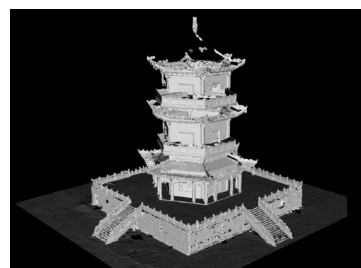


图 9 手持 LiDAR 数据三维模型

Fig. 9 3D model of handheld LiDAR data

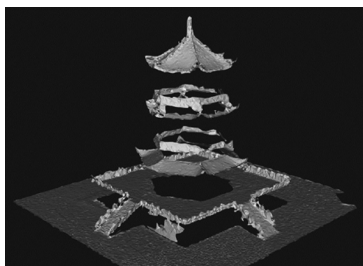


图 10 机载 LiDAR 数据三维模型

Fig. 10 3D model of airborne LiDAR data

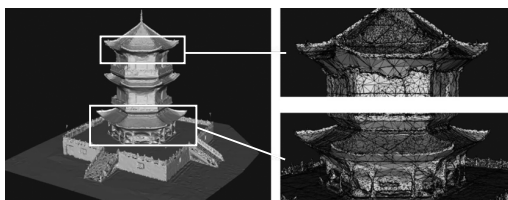


图 11 UAV 影像点云数据三维模型及局部 TIN 图

Fig. 11 3D model and partial TIN of UAV image point cloud data

通过将多源数据进行配准融合建模来弥补单一数据源建模造成的数据缺失,将手持 LiDAR 数据和机载 LiDAR 数据进行配准融合后,建立的三维模型虽然能较完整地表达塔式建筑物顶部结构和立面信息,但顶部仍有少量空洞,墙面被围栏遮挡的部分也还存在大量空缺,如图 12 所示。因此,为解决上述方法建模的空缺,将基于 UAV 倾斜摄影测量影像所获取的点云数据与上述 LiDAR 数据进行配准融合,进行三维建模。加入 UAV 影像点云数据所构建的模型完整地表示了顶部、立面纹理、细节,能够建立更全面、更完整的三维模型,如图 13 所示。整体未出现空洞与扭曲现象,良好地还原了塔式建筑物的真实情况。

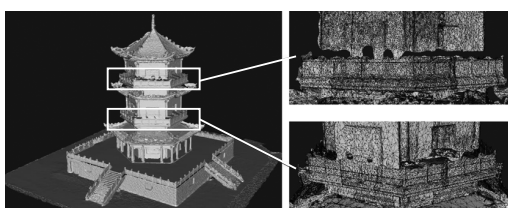


图 12 手持 LiDAR 和机载 LiDAR 配准数据三维模型及局部 TIN 图

Fig. 12 3D model and partial TIN of handheld LiDAR and airborne LiDAR registration data

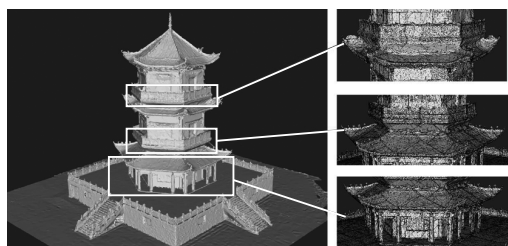


图 13 手持 LiDAR 和机载 LiDAR、UAV 影像点云配准融合数据三维模型及局部 TIN 图

Fig. 13 3D model a partial TIN of handheld LiDAR, airborne LiDAR, and UAV image point cloud registration and fusion data

## 5 结 论

本文以玉溪市五彩楼作为研究对象,实现了多源数据配准融合的塔式建筑物三维建模方法,实验结果表明:相较于单一的点云数据建模、UAV 影像建模以及两种 LiDAR 数据配准融合建模,本文提出的多源 LiDAR 和 UAV 影像点云配准融合的方法三维建模效果更好,弥补了单一数据源建模时顶部和立面信息缺失产生大量空洞的不足,也克服了影像建模时对于立柱和小部件建模扭曲拉花等问题。

## 参考文献:

- [1] Li Xiaobin, Lin Zhijun, Yang Xi, 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.
- [2] Yao Yongxiang, Li Jia, Duan Ping, et al. Research on three dimensional modeling method of UAV loop shooting for tower building [J]. Geography and Geo-Information Science, 2019, 35(6): 38 - 43. (in Chinese)  
姚永祥,李佳,段平,等. 面向塔式建筑物的无人机环拍三维建模方法研究[J]. 地理与地理信息科学, 2019, 35(6): 38 - 43.
- [3] Namouchi S, Farah I R. Graph-based classification and urban modeling of laser scanning and imagery; toward 3D smart web services [J]. Remote Sensing, 2021, 14(1): 114.
- [4] Hamid M, Ismail G, Kemal A, et al. UAV-enabled intelligent transportation systems for the smart city: applications and challenges [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(3): 22 - 28.
- [5] Zhang Maozheng, Yan Ningna, Yuan Yihong, et al. The real 3D modeling method of UAV video loop shooting for towering ancient pagodas [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022, (9): 86 - 92. (in Chinese)  
张茂正,燕宁娜,袁宜红,等. 面向高耸古塔的无人机视频环拍实景三维建模方法[J]. 测绘通报, 2022, (9): 86 - 92.
- [6] Li J, Yao Y, Duan P, et al. Studies on three-dimensional (3D) modeling of UAV oblique imagery with the aid of loop-shooting[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2018, 7(9): 356.
- [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]. Re-

- mote Sensing,2023,15(8):2026.
- [8] Li Meng, Cui Ximin, Ma Xu, et al. Building modeling method and application of SLAM laser scanning[J]. Laser & Infrared,2019,49(11):1299-1304. (in Chinese)  
李猛,崔希民,马旭,等. SLAM 激光扫描的建筑物建模方法与应用[J]. 激光与红外,2019,49(11):1299-1304.
- [9] Liu Bin, Zhang Jun, Lu Min, et al. Research progress of laser radar applications[J]. Laser & Infrared,2015,45(2):117-122. (in Chinese)  
刘斌,张军,鲁敏,等. 激光雷达应用技术研究进展[J]. 激光与红外,2015,45(2):117-122.
- [10] Yuan L, Long Z, Yiping C, et al. 3D LiDAR and multi-technology collaboration for preservation of built heritage in China; A review[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2023,116.
- [11] Michael K, Dominik L, Stefan 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.
- [12] Liu W, Zang Y, Xiong Z, et al. 3D building model generation from MLS point cloud and 3D mesh using multi-source data fusion[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023, 116:103171.
- [13] Duan Ping, Li Jia, Li Haikun, 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.
- [14] Hu W, Hu R. Creating historical building models by deep fusion of multi-source heterogeneous data using residual 3D convolutional neural network[J]. International Journal of Architectural Heritage,2023,1:1-17.
- [15] Wang Shuzhen, Zheng Guoqiang, Wang Guangsheng, et al. Building fine modeling based on multi-source point cloud data fusion[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020,(8):28-32,38. (in Chinese)  
王树臻,郑国强,王光生,等. 多源点云数据融合的建筑物精细化建模[J]. 测绘通报,2020,(8):28-32,38.
- [16] Huang Liming. 3D reality construction modeling with multi-source data fusion and its applications for building deformation monitoring[D]. Ji'nan: Shandong University of Architecture,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.
- [17] Wang Yanmin, Huang Ming, Guang Guoli. Ground LiDAR and photogrammetric three-dimensional reconstruction [M]. Beijing: Science Press,2018. (in Chinese)  
王晏民,黄明,王国利. 地面激光雷达与摄影测量三维重建[M]. 北京:科学出版社,2018.
- [18] Li Huihui, Liu Chao, Tao Yuan. A laser point cloud precise registration method with improved ICP [J]. Laser Journal,2021,42(1):84-87. (in Chinese)  
李慧慧,刘超,陶远. 一种改进的 ICP 激光点云精确配准方法[J]. 激光杂志,2021,42(1):84-87.
- [19] Li P, Wang R, Wang Y, et al. Evaluation of the ICP algorithm in 3D point cloud registration [J]. IEEE Access, 2020,8.
- [20] Jin Xinyang, Wang Suyuan, Nie Jianliang, et al. Building facade structure extraction based on the threshold of lengths of Delaunay triangulation's sides and laser point cloud[J]. Geography and Geo-Information Science,2019,35(5):80-84. (in Chinese)  
靳鑫洋,王素元,聂建亮,等. 一种基于 Delaunay 三角网边长阈值与激光点云的建筑物立面结构提取方法[J]. 地理与地理信息科学,2019,35(5):80-84.
- [21] Chen Shijie, Zhang Linlin, Liu Meiqin, et al. Underwater terrain three-dimensional reconstruction algorithm based on improved delaunay triangulation [J]. Computer Science,2020,47(11):137-141. (in Chinese)  
陈士杰,张森林,刘妹琴,等. 基于改进 Delaunay 三角剖分的水下地形三维重建算法[J]. 计算机科学,2020,47(11):137-141.