



多源数据融合在滩涂测绘中的应用

王建雄, 杨俊凯, 杨振林, 汪 酉

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 传统摄影测量及机载 LiDAR 扫测进行滩涂测绘时, 存在像控点布设难、空三难和地形图绘制难等问题。通过分析两种技术单独进行滩涂测绘的优势与不足, 提出将无人机摄影测量空三加密点云与机载 LiDAR 点云进行点云融合、构建基于滩涂地形特征的三维模型的方法。试验表明, 该方法可充分发挥摄影测量在地物识别、数据提取方面的能力, 克服传统测图过程直接从 LiDAR 点云上提取高程引起的数值随机性, 弥补两种技术手段单独作业的局限, 使其发挥各自的优势, 为滩涂测绘提供了一种便捷有效的新型作业手段。

关键词: 无人机; 数据融合; 实景三维模型; 滩涂测绘

中图分类号: U652.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)04-0170-06

Application of multi-source data fusion in intertidal zone surveying

WANG Jianxiong, YANG Junkai, YANG Zhenlin, WANG You

(CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: Traditional photogrammetry and airborne LiDAR scanning for intertidal zone surveying face challenges such as difficulty in image control points layout, producing aerial triangulation and creating topographic map. Based on the analysis of the advantages and shortcomings of using these two technologies independently for tidal flat surveying and mapping, a method is proposed to fuse the photogrammetric aerial triangulation point cloud and the airborne LiDAR point cloud to construct a real-time 3D model based on the terrain features of intertidal zone. Experiments demonstrate that the method can give full play to the capability of photogrammetry in object identification and data extraction, overcome the numerical uncertainty caused by extracting elevation from LiDAR point cloud in traditional map drawing, make up the limitations of the two individual techniques, make them play their respective advantages, and provide a convenient and effective new method for tidal flat surveying and mapping.

Keywords: unmanned aerial vehicle(UAV); data fusion; real-time 3D model; tidal flat surveying and mapping

滩涂测绘是航道维护、码头建设工作中的重要内容, 可为项目规划、环境评估、结构设计等提供重要基础数据支撑。但测绘区域位置的特殊性、环境的复杂性往往导致获取高精度的地形数据较为困难。

摄影测量及机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)等非接触式测量技术是地形测绘的

主流。摄影测量因其成果, 如数字正射影像(digital orthophoto model, DOM)、实景三维模型, 在地物识别方面的优势被广泛应用于地形图测绘、精细化三维建模等方面。但摄影测量进行滩涂测绘时, 在深入滩涂内部的大面积区域因像控点难以均匀布设及保留导致成果可靠性较差, 加之滩涂地形纹理较弱, 容易造成影像空三过程点云缺失, 重

收稿日期: 2024-06-19

作者简介: 王建雄(1993—), 男, 助理工程师, 从事航道勘察测量。

建后的模型易产生空洞、拉花甚至变形,所以摄影测量技术用于滩涂测绘仍存在诸多限制^[1-2]。

机载 LiDAR 扫测技术具有成果精确、数字化程度高且作业周期短等特点,被广泛应用于智慧城市、文物保护、测绘等领域^[3]。郭春海等^[4]、许宝华等^[5]利用无人机机载 LiDAR 扫测技术进行滩涂测绘,证实其在滩涂内部通行困难地区进行地形测绘具有明显优势。但实际地形测绘应用中,点云成果的离散性、无序性导致对地形要素的表达不够直观,难以用于潮沟、植被类型等关键地物信息的准确识别、提取,同时因点云厚度、噪点等因素的影响,直接利用测图软件进行点云提取的高程数值存在随机性,而如果将点云转化为具有更全面地形属性信息的连续的曲面再进行测图则可避免以上问题^[6]。

本文提出将无人机摄影测量与机载 LiDAR 扫测技术相融合,构建基于滩涂地形特征的实景三维建模方法,以期克服传统摄影测量及机载 LiDAR 扫测技术在滩涂地形测绘中存在的不足,实现二者优势互补,为相关水运工程建设提供一种新型的滩涂测绘的作业方案。

1 关键技术

摄影测量与 LiDAR 扫测融合建模技术曾在其他场景中取得过成功。张玉涛等^[7]针对结构复杂的拱桥,将地面三维激光与无人机影像进行数据融合,实现对拱桥的精细化建模。针对滩涂的地形特征及区域特点,同时考虑到多源点云在精度和密度方面的差异,以机载 LiDAR 点云为基准,空三加密点云作为源点云,将二者进行持续迭代以减小它们之间的系统性偏移,实现点云融合。

1.1 数据融合

为达到多源点云融合的目的,需将两组点云进行配准,常见的点云配准方法分为基于特征点的配准和无特征的配准两种。因摄影测量受外界因素的影响较大,导致空三加密点云相对机载

LiDAR 点云的相对位姿未知,所以将配准过程分为两步。首先,使用同名点将空三加密点云与机载 LiDAR 点云进行基于特征点的配准,为融合提供较为良好的初始转换值;然后将两组点云利用最近点迭代算法(iterative closest point, ICP)实现精确配准。

假设存在源点云上一点 $P(x, y, z)$ 经过一定的变换可转换至与激光点云上 $Q(X_0, Y_0, Z_0)$ 同一坐标系,变换过程表示为:

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = m\mathbf{R}(\alpha, \beta, \psi) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:

$$\mathbf{R}(\alpha, \beta, \psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: m 为尺度参数, $\mathbf{R}(\alpha, \beta, \psi)$ 为旋转矩阵, (x_0, y_0, z_0) 为平移矩阵。

引入 4 对及以上的同名点,按照最小二乘原理计算出源点云 $P(x, y, z)$ 转换到机载 LiDAR 点云 $Q(x_0, y_0, z_0)$ 同一系统中的转换参数,利用转换参数将源点云进行点云集转换达到粗配准的目的,以此转换结果作为精配准的初始值,根据 ICP 算法将 LiDAR 点云作为基础参考,对两组点云进行迭代优化,达到将两组点云融合的目的。

1.2 技术路线

多源数据融合建模实现过程分为 4 个阶段:数据采集、数据预处理、数据融合建模及产品制作。

1) 数据采集主要研究无人机飞行过程中获取外业数据的关键过程,包括设备安装调试、航飞参数设计、LiDAR 原始数据及摄影测量原始影像

等数据采集、数据整理及质量检查等。

2) 将外业获取的完整原始 LiDAR 数据结合全球定位系统(global positioning system,GPS)数据、惯性测量单元(inertial measurement unit,IMU)数据等进行联合,解算得到高精度 LiDAR 点云,并对其进行降噪处理,同时将采集的原始影像数据进行空三计算及点云加密处理得到空三加密点云,以完成数据预处理过程。

3) 将预处理的 LiDAR 点云与空三加密点云进行配准,得到融合点云,把融合点云导入三维建模软件中进行模型构建,生产 DOM 及实景三维模型等成果。

4) 借助常规测图软件,加载 DOM 和实景三维模型,提取所需数据并绘制数字线划图(digital line graphic,DLG),多源数据融合建模技术路线见图 1。

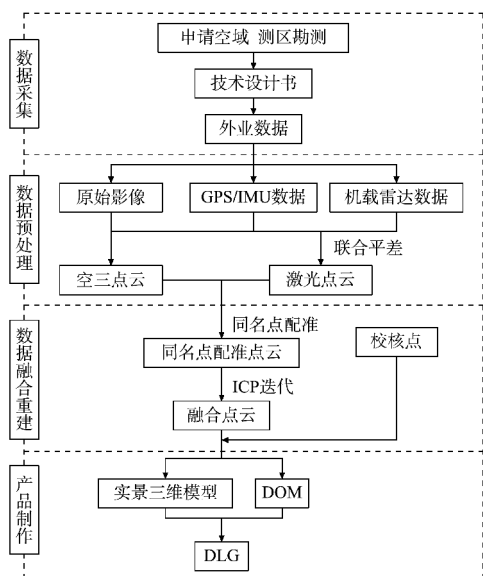


图 1 多源数据融合建模技术路线

Fig. 1 Technical route of multi-source data fusion modeling

2 试验验证与评估

2.1 试验概况

以江苏省盐城市东南沿海川东港入海口滩涂为例,该区域以淤泥质滩为主,植被覆盖较稀疏,低潮时滩涂裸露较为完整。外业飞行前使用标靶纸在测区均匀布设 4 个配准点、14 个检查点,由 Trimble SPS985 型全球导航卫星系统(global navigation satellite

system,GNSS)接收机网络实时动态(real-time kinematic,RTK)模式进行绝对坐标采集,每个坐标点观测 4 组、每组观测历元数 ≥ 20 个。测量时使用支架式对中杆固定接收机,以排除手持对中杆测量结果的影响^[8]。飞行数据采集平台采用大疆 M300 RTK 无人机搭载大疆禅思 Zenmuse L2 激光雷达的测量系统,该系统将高精度激光雷达、4/3CMOS 测绘相机、高精度惯导、GPS 及三轴云台等模块高度集成,测距精度为 2 cm@150 m,可同步采集 LiDAR 原始数据、高清影像、GPS、IMU 等数据。

外业飞行时设置无人机飞行高度为 100 m。考虑到测区为滩涂,为保证同步采集的航摄影像的重叠率及 LiDAR 点云数据的完整性,数据采集时设置航带重叠率为 50%,高于国家标准规定的 20%的要求^[9],此时影像的旁相重叠率为 61%,航向重叠率设置为 80%。将 LiDAR 相机同步采集的影像数据直接进行空三处理,再进行数据融合,提高外业数据的采集效率。

利用大疆自研的数据处理平台 DJI Terra 将采集的 LiDAR 原始数据进行解算、拼接、并使用 LIDAR 360 进行点云降噪,预处理点云成果如图 2a)所示,除被大面积水体覆盖的区域外,点云整体分布均匀;原始影像经过空三解算、点云加密过程生产的空三加密点云如图 2b)所示,部分区域因地形纹理较弱导致点云稀疏或缺失;将预处理好的 LiDAR 点云和空三加密点云经过配准过程形成完整的测区融合点云如图 2c)所示, LiDAR 点云对空三加密点云进行了整体数据的补充;最后将其导入 ContextCapture Master 模块中,借助融合点云与原始影像之间的映射关系,完成 DOM 及实景三维模型的构建,如图 2d)所示,建模后的实景三维模型纹理清晰、完整性好,有助于对地物的判别,提高制图效率。

在 EPS 数字测图平台中加载 DOM 和实景三维模型,可进行二三维联动测图,作业效率高,部分地形成果见图 3。

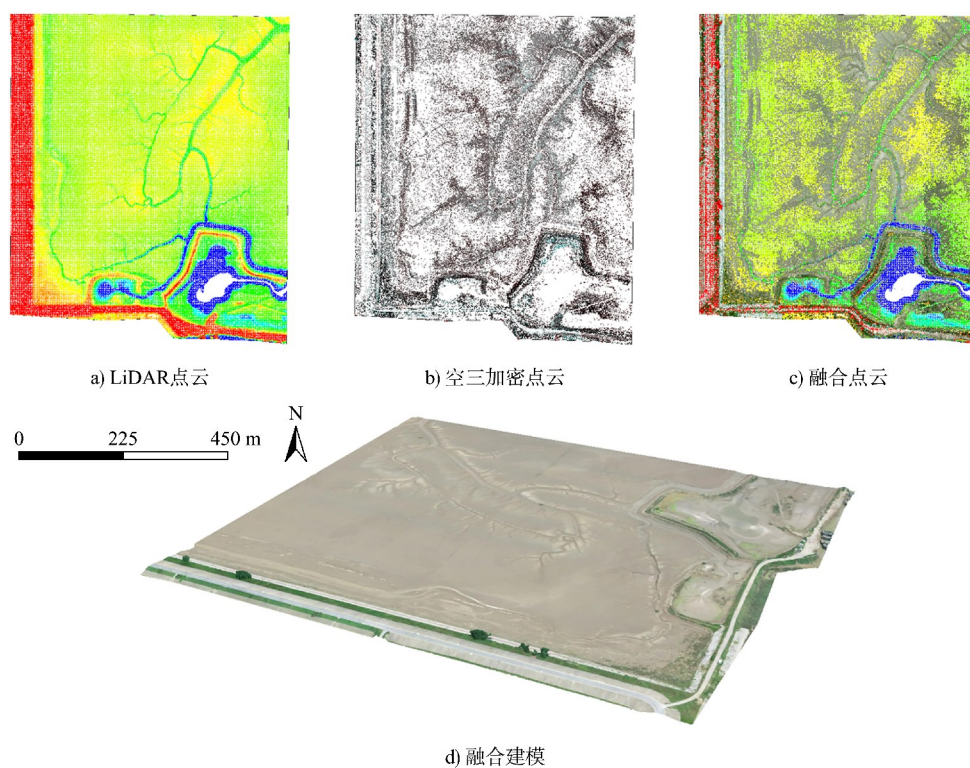


图2 点云融合建模过程

Fig. 2 Process of point cloud fusion modeling

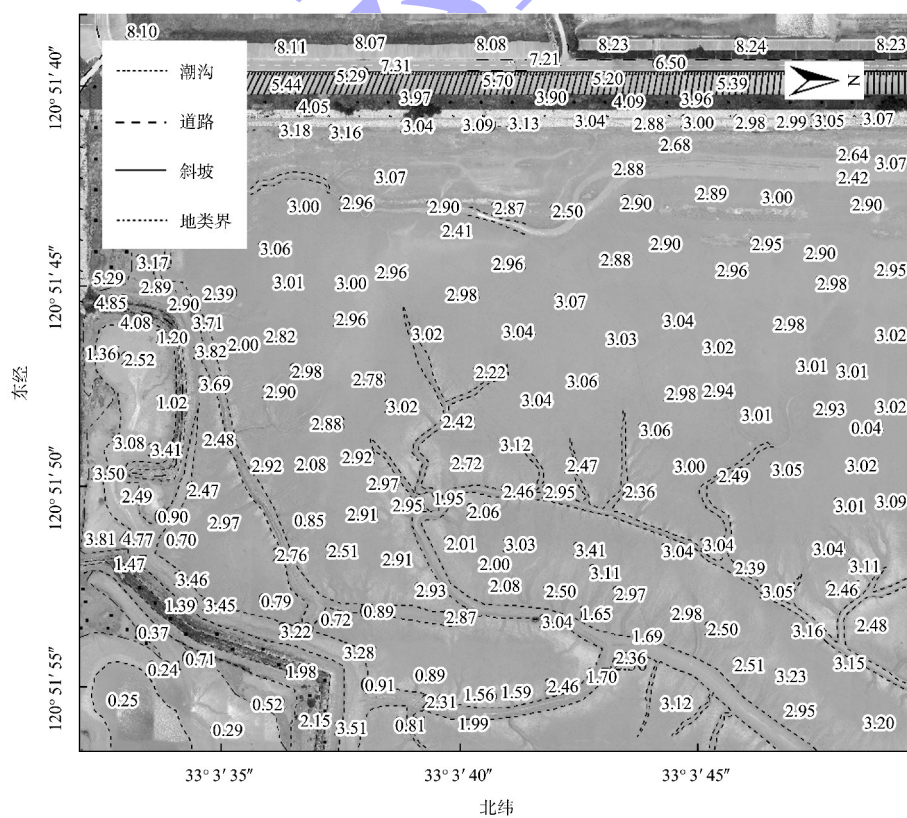


图3 部分地形成果 (单位: m)

Fig. 3 Partial topographic result (unit: m)

2.2 点云融合评估

2.2.1 点云融合可视化

分别在粗配准与精配准过程点云集中地形变化较大处选取一条相同断面进行剖面分析,图4a)为同名点粗配准后的点云集剖面,可见粗配准过程较好地保持了两点云整体趋势的一致性。但受滩涂地形特征的影响,空三加密点云较为稀疏且不均匀,且因误差影响,粗配准后 LiDAR 点云与空三加密点云出现明显分层现象,分层距离约为 4.2 cm。如图 4b)所示,经过 IPC 算法精配准融合后, LiDAR 点云与空三加密点云的分层情况得到明显改善,平均距离降至约 1.3 cm,证明二者得以有效融合。

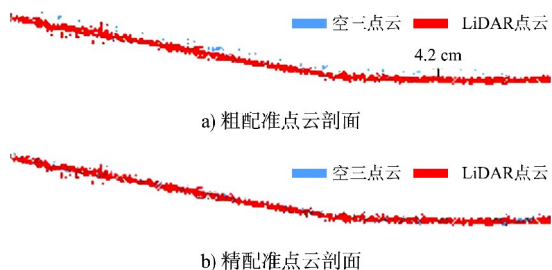
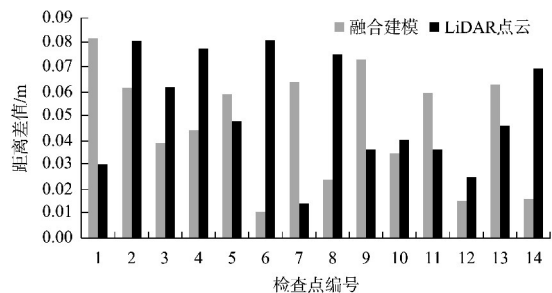


图4 点云融合效果分析

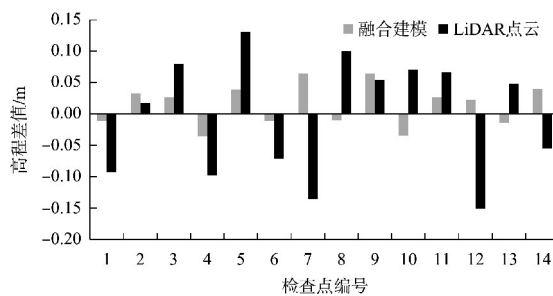
Fig.4 Effects analysis of point cloud fusion

2.2.2 模型精度分析

将外业采集的 14 个检查点用于数据精度的评估。利用 EPS 数字测图平台分别量测 LiDAR 点云与融合建模中检查点相较量测值的平面距离及高程差值,如图 5 所示,数据对比分析如表 1。



a) 检查点与量测值的距离差值



b) 检查点与量测值的高程差值

图5 检查点精度分析

Fig.5 Accuracy analysis of checkpoints

表1 检查点误差统计

Tab.1 Error statistics of checkpoints

类别	量测值与检查点 距离差值/m		量测值与检查点 高程差值/m	
	融合建模	LiDAR点云	融合建模	LiDAR点云
标准差	0.02	0.02	0.03	0.09
中误差	0.05	0.06	0.04	0.09

根据精度分析,融合建模与 LiDAR 点云相对检查点平面距离的标准差均为 0.02 m 左右,中误差分别为 0.05、0.06 m;二者相对检查点高程差值的标准差分别为 0.03、0.09 m,中误差分别为 0.04、0.09 m。由此可知,融合建模与 LiDAR 点云平面精度相近,虽然大疆 M300 RTK 无人机搭载大疆禅思 Zenmuse L2 激光雷达测量系统获取的 LiDAR 点云成果精度优于 5 cm,但测图软件直接从点云上提取的高程成果精度仅能维持在 10 cm 左右,而融合建模提取的高程不仅能有效保持 LiDAR 点云优于 5 cm 的成果精度,且避免了利用点云直接提取高程存在的数值随机性问题,所以,利用融合建模的方法进行滩涂测绘具有明显的精度优势。

3 结语

1) 随着科技的发展,无人机搭载激光雷达的测绘系统可获取厘米级的点云数据,可直接作为多源点云融合的基准,为困难地区的地形测绘提供基础数据支撑。

2) 从数据融合方面分析, LiDAR 点云对空三加密点云进行了整体数据的补充, 可有效改善融合建模网格模型的相对精度, 同时本文的融合方法使得融合后的 LiDAR 点云与空三加密点云分层仅为 1.3 cm, 能较好地保持 LiDAR 点云的精度。

3) 从数据提取方面分析, 融合建模可充分发挥实景三维模型在地物识别、高程提取方面的优势, 避免从点云中提取高程造成的数值随机性问题, 提高内业成图的整体精度和效率。

4) 基于多源数据融合的三维建模方法, 将融合点云转化为具有更全面地形属性信息的连续曲面, 实现对滩涂困难地区地形的免像控实景三维建模, 克服了传统作业方法像控点布设难、空三难及地形图绘制难等问题, 在实际工程建设中具有较好的应用价值。

参考文献:

- [1] 张勇勇. 多源数据融合在滩涂地形测量中的应用[J]. 工程勘察, 2021, 49(11): 67-71.
ZHANG Y Y. Application of multiple source data fusion in topographic survey of tidal flats [J]. Geotechnical investigation & surveying, 2021, 49(11): 67-71.
- [2] 张荣华, 林昀. 基于机载激光雷达的滩涂测绘关键技术研究[J]. 测绘工程, 2015(1): 33-35.
ZHANG R H, LIN Y. Key technology research of intertidal zone survey based on airborne LiDAR[J]. Engineering of surveying and mapping, 2015(1): 33-35.
- [3] 江木春, 袁锐, 牛作鹏. 三维激光扫描技术在北江航道沿线水上物外观测量中的应用[J]. 水运工程, 2022(11): 160-164.
JIANG M C, YUAN R, NIU Z P. Application of 3D laser scanning technology in appearance measurement of aquatic objects along Beijiang channel [J]. Port & waterway engineering, 2022(11): 160-164.
- [4] 郭春海, 张英明, 丁忠明. 无人机机载 LiDAR 在沿海滩涂大比例尺地形测绘中的应用[J]. 测绘通报, 2019(9): 155-158.
GUO C H, ZHANG Y M, DING Z M. Application of unmanned aerial vehicle airborne LiDAR in large scale topographic mapping of coastal beach [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2019(9): 155-158.
- [5] 许宝华, 刘世振. 机载 LiDAR 测量技术在潮间带测量中的应用[J]. 人民长江, 2019, 50(11): 95-98, 112.
XU B H, LIU S Z. Application of airborne LiDAR measurement technology in intertidal zone measurement[J]. Yangtze River, 2019, 50(11): 95-98, 112.
- [6] 冯鸣, 杨明龙, 夏永华, 等. 三维激光扫描与倾斜摄影测量的高陡崖三维建模[J]. 测绘科学, 2020, 45(1): 99-107, 122.
FENG M, YANG M L, XIA Y H, et al. 3D modeling of high-steep cliffs combining with 3D laser scanning and oblique photogrammetry [J]. Science of surveying and mapping, 2020, 45(1): 99-107, 122.
- [7] 张玉涛, 孙保燕, 莫春华, 等. 无人机与三维激光扫描融合的拱桥三维重建[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(6): 2274-2281.
ZHANG Y T, SUN B Y, MO C H. et al. 3D reconstruction of arch bridge based on fusion of UAV and 3D laser scanning [J]. Science technology and engineering, 2023, 23(6): 2274-2281.
- [8] 陈尚登, 宋焄, 杨俊凯, 等. 基于地面三维激光扫描技术的跨河建筑物测量[J]. 水运工程, 2019(12): 99-102.
CHEN S D, SONG H, YANG J K, et al. River-crossing structure surveying based on ground 3D laser scanning technology [J]. Port & waterway engineering, 2019(12): 99-102.
- [9] 机载激光雷达数据获取技术规范: CH/T 8024—2011[S]. 北京: 测绘出版社, 2012.
Specifications for data acquisition of airborne LIDAR: CH/T 8024-2011 [S]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2012.

(本文编辑 王传瑜)