

# 多波束测深与无人机倾斜摄影联合的海岸侵蚀三维建模研究

王 军 唐善良

江苏省海洋地质调查院 江苏 南京 220001

**摘要:** 本文聚焦多波束测深与无人机倾斜摄影联合的海岸侵蚀三维建模研究, 阐述两种技术原理, 分析其在海岸带监测中的适配性与联合逻辑。设计数据采集方案, 开展多波束与无人机数据预处理, 进行海陆数据融合与三维建模实践, 验证建模精度。基于三维模型开展海岸侵蚀量化分析, 包括岸线提取、冲淤量计算等, 结合侵蚀驱动因素提出防护建议, 为海岸侵蚀监测与防护提供新方法参考。

**关键词:** 海岸侵蚀; 多波束测深; 无人机倾斜摄影; 三维建模

## 1 联合建模技术原理与适配性分析

### 1.1 多波束测深技术原理

多波束测深系统以声学信号为核心, 由换能器阵列、GPS定位模块、IMU姿态传感器与数据处理单元组成。工作时, 换能器向水下发射 $60^{\circ}$ - $120^{\circ}$ 扇面状声波束, 声波经海底反射后被接收, 通过测量信号往返时间计算水深。同时, GPS实时获取测船平面坐标(精度 $\pm 0.5\text{m}$ ), IMU记录船体横摇( $\pm 0.1^{\circ}$ )、纵摇( $\pm 0.1^{\circ}$ )、艏摇( $\pm 0.5^{\circ}$ )姿态数据, 用于修正船体倾斜导致的水深偏差。该技术单次测量覆盖宽度可达水深的3倍-5倍(如10m水深覆盖30~50m宽度), 数据采集密度达2-5点/ $\text{m}^2$ , 能精准捕捉水下冲刷槽(深度差0.5~2m)、沙脊(高度0.3~1m)等微地形。实际应用中, 选用ResonSeabatT20P多波束测深仪, 其深度测量范围0.5~100m, 深度精度 $\pm 0.1\text{m}$ (浅水)至 $\pm 0.5\text{m}$ (深水), 平面精度 $\pm 0.5\text{m}$ , 特别适用于近岸复杂水下地形监测, 弥补了单波束测深效率低、覆盖范围窄的不足。

### 1.2 无人机倾斜摄影技术原理

无人机倾斜摄影系统采用“多旋翼无人机+五镜头相机”架构, 包含1个垂直向下镜头(焦距24mm)与4个倾斜 $45^{\circ}$ 镜头(焦距35mm), 同步采集不同视角影像。以大疆M300RTK无人机为例, 其搭载禅思P1全画幅相机, 单张影像分辨率达 $8192 \times 5460$ 像素, 可生成地面采样距离(GSD)2cm-5cm的高分辨率影像, 满足厘米级地貌还原需求。技术流程分为三步: 首先, 按预设路径飞行, 采集影像时同步记录GNSS位置与姿态数据(航向角 $\pm 1^{\circ}$ 、俯仰角 $\pm 0.5^{\circ}$ ); 其次, 基于空中三角测量原理, 通过SIFT特征点匹配算法(匹配正确率 $\geq 95\%$ )计算影像间相对位置, 结合10个GNSS控制点(RTK精度 $\pm 2\text{cm}$ )生成

稀疏点云(点密度1-5点/ $\text{m}^2$ ); 最后, 经渐进式密集匹配(点密度50-100点/ $\text{m}^2$ )、三角网构建(TIN)与纹理映射, 生成数字表面模型(DSM)与正射影像(DOM)。该技术能清晰呈现岸线拐点(定位误差 $\pm 0.1\text{m}$ )、潮沟边缘(宽度0.5~2m)、植被覆盖区(高度0.1~1m)等陆域特征, 覆盖高程0-5m的潮上带与潮间带, 解决了传统地面测量效率低、地形复杂区域难以抵达的问题<sup>[1]</sup>。

### 1.3 技术适配性与联合逻辑

两种技术存在“互补—协同”关系: 空间上, 多波束覆盖水下区, 无人机覆盖陆域与潮间带, 实现“-100m至+5m”全海岸带覆盖, 弥补单一技术盲区; 精度上, 多波束与无人机平面精度均达亚米级, 通过坐标统一(2000国家大地坐标系)可实现衔接误差 $\leq 0.5\text{m}$ ; 时效性上, 两者单日分别可覆盖100km测线、50km<sup>2</sup>陆域, 支持同步数据采集, 避免时序差异导致的建模误差。联合逻辑为“分区采集—协同处理—融合建模”, 确保海陆数据时空一致性。

## 2 海岸带数据采集与预处理技术

### 2.1 数据采集方案设计

选取两种典型海岸类型为研究区: 山东荣成砂质海岸( $36^{\circ}50'N$ - $37^{\circ}10'N$ ), 岸线平直(全长20km), 水下坡度 $0.5^{\circ}$ - $1^{\circ}$ , 沙质沉积物为主, 年均侵蚀速率1~2m; 江苏盐城淤泥质海岸( $32^{\circ}30'N$ - $33^{\circ}00'N$ ), 潮间带宽5~10km, 潮沟发育(主潮沟宽50~100m), 淤泥质沉积物占比90%以上, 年均潮沟扩张速率0.3~0.5m。无人机数据采集选择低潮前1~2小时(潮间带裸露面积 $\geq 80\%$ )、风速 $< 5\text{m/s}$ (避免影像模糊)、光照均匀(9:00-15:00)时段。飞行参数设定: 高度50~80m(荣成50m, 盐城80m, 适配不同潮间带宽度), 航向重

叠80% (确保影像连续匹配), 旁向重叠70% (避免漏拍), 飞行速度3~5m/s (平衡效率与精度)。同步布置10个GNSS控制点, 均匀分布于研究区 (间距2~3km), 采用华测T7RTK测量, 平面精度±2cm, 高程精度±3cm, 用于后续模型校正; 多波束数据采集采用“平行岸线主测线+垂直岸线检查线”布局: 荣成砂质海岸主测线间距30~40m, 检查线间距100~150m; 盐城淤泥质海岸因潮沟发育, 主测线间距10~20m (潮沟区域加密至10m), 检查线间距50~80m, 确保覆盖所有潮沟。采集时, 同步记录潮位数据 (通过验潮站, 1次/10分钟, 精度±1cm)、声速剖面 (通过声速仪, 1次/2小时, 测量深度0-20m, 精度±0.1m/s), 用于后续水深校正; 测船航速控制在4~6km/h, 避免航速过快导致波束脚印重叠不足 (重叠率≥10%)。

## 2.2 多波束数据预处理

预处理流程分五步: 第一步, 格式转换与数据导入, 将原始.raw格式数据转换为HDF5通用格式, 导入CarisHIPS软件, 提取水深、坐标、姿态等核心参数; 第二步, 噪声剔除, 采用“自动+手动”结合方式, 自动通过±1m水深阈值删除异常点 (如突增/突减的水深值), 手动删除鱼群 (点状密集异常点)、气泡 (连续浅水区异常点) 等虚假回波, 确保有效数据率≥95%; 第三步, 声速校正, 基于分层声速剖面 (如0-5m声速1500m/s, 5~10m声速1505m/s), 通过声线追踪算法修正声波传播误差, 水深测量精度从±0.5m提升至±0.1m (10m水深内); 第四步, 潮位校正, 采用线性插值法将验潮站10分钟间隔潮位数据插值至每个测量时刻, 消除潮汐导致的水深偏差 (如高潮时水深比实际深1.8m, 需修正至理论最低潮面); 第五步, 姿态校正, 利用IMU数据修正船体横摇、纵摇导致的水深倾斜误差 (如横摇5°会导致10m水深产生0.87m偏差), 最终采用TIN插值生成1~2m网格的水下DEM (荣成1m, 盐城2m), 确保水下地形连续无断层。

## 2.3 无人机数据预处理

第一步, 影像畸变校正, 基于相机内参 (焦距、主点坐标、畸变系数), 通过OpenCV软件消除镜头径向畸变 (如边缘拉伸) 与切向畸变 (如倾斜偏移), 校正后影像几何精度提升30%; 第二步, 影像筛选, 通过清晰度评价 (灰度梯度值≥80) 与曝光度分析 (直方图均值0.4-0.6), 剔除模糊、过曝、遮挡影像 (如云层、飞鸟遮挡), 保留有效影像率≥90% (荣成92%, 盐城91%); 第三步, 空中三角测量, 导入ContextCapture软件, 采用SURF特征点匹配算法 (特征点提取数量≥5000个/张),

生成稀疏点云, 结合10个GNSS控制点进行地理配准, 平面配准误差≤0.1m, 高程配准误差≤0.2m; 第四步, 密集匹配与DSM生成, 采用基于GPU的并行密集匹配算法, 生成50-100点/m<sup>2</sup>的密集点云 (荣成100点/m<sup>2</sup>, 盐城50点/m<sup>2</sup>), 通过高斯滤波 (窗口大小3×3) 平滑噪声, 生成0.5~1m网格的陆域与潮间带DSM, 误差控制在±0.2m以内, 满足海岸侵蚀细节分析需求<sup>[2]</sup>。

## 3 海陆数据融合与三维建模实践

### 3.1 坐标统一与数据配准

以2000国家大地坐标系 (CGCS2000) 为基准, 进行坐标统一与数据配准: 首先, 无人机数据坐标转换, 将无人机采集的WGS84坐标 (经纬度) 通过七参数转换法 ( $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$ 、 $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$ 、 $\epsilon_z$ 、 $m$ ) 转换为CGCS2000平面坐标 (X、Y), 转换误差≤0.05m, 确保与多波束数据坐标系一致; 其次, 潮间带数据配准, 在海陆重叠区 (0-2m高程) 选取15个同名控制点 (如潮沟拐点、礁石顶部、人工标志物), 采用ICP算法 (迭代最近点) 进行配准, 通过计算控制点在水下DEM与陆域DSM中的坐标偏差, 迭代优化变换矩阵 (平移、旋转、缩放), 直至配准误差收敛: 平面误差≤0.5m, 高程误差≤0.3m (荣成平面误差0.3m, 盐城平面误差0.5m, 因淤泥质海岸地形更复杂); 最后, 数据分辨率统一, 对水下DEM (1~2m) 与陆域DSM (0.5~1m) 进行重采样, 统一为1m网格, 采用双线性插值法填充数据间隙, 确保数据尺度一致, 避免融合时出现高程突变。如图所示



基于ICP算法的海陆重叠区数据配准与三维建模流程图

### 3.2 一体化三维模型构建

采用ArcGIS与CloudCompare进行数据融合: 对水下DEM与陆域DSM进行拼接, 填充潮间带数据空洞 (采用克里金插值); 构建TIN三维模型, 添加纹理信息 (无人机DOM), 生成可视化模型; 通过LOD (细节层次) 技术优化模型, 满足不同场景需求 (宏观展示用低LOD,

微观分析用高LOD)<sup>[3]</sup>。荣成砂质海岸模型可清晰呈现沙滩冲淤变化,盐城淤泥质海岸模型能识别潮沟形态与扩张趋势。

### 3.3 建模精度验证

通过“实地测量—模型对比”验证精度:在两个研究区共布设30个验证点(陆域15个,水下15个),陆域验证点采用华测T7RTK测量(平面精度±2cm,高程精度±3cm),水下验证点采用单波束测深仪(精度±0.1m)测量。将验证点真实坐标与模型坐标对比,计算平面误差(ΔX、ΔY)与高程误差(ΔZ)。

结果显示:荣成砂质海岸陆域平面误差0.1~0.3m(均值0.2m),高程误差0.1~0.2m(均值0.15m);水下平面误差0.3~0.5m(均值0.4m),高程误差0.2~0.3m(均值0.25m)。盐城淤泥质海岸陆域平面误差0.2~0.3m(均值0.25m),高程误差0.15~0.2m(均值0.18m);水下平面误差0.4~0.5m(均值0.45m),高程误差0.25~0.3m(均值0.28m)。所有误差均满足海岸侵蚀监测精度要求(≤0.5m),验证了联合建模技术的可靠性,其中砂质海岸精度略高于淤泥质海岸,因淤泥质海岸潮间带地形更复杂,数据采集与配准难度更大。

## 4 基于三维模型的海岸侵蚀量化分析

### 4.1 岸线提取与进退分析

基于三维模型的DSM与DOM,采用“等高线法+边缘检测”提取岸线(理论最低潮面处)。对比2020年与2023年模型,荣成砂质海岸年均侵蚀速率1.2~1.8m,局部侵蚀严重区(如浴场段)达2.5m/年;盐城淤泥质海岸因潮沟迁移,岸线进退呈“局部侵蚀—局部淤积”交替,年均净侵蚀速率0.8~1.2m,模型提取精度较传统断面法提升40%。

### 4.2 冲淤量与地形变化分析

采用体积差法计算冲淤量:荣成砂质海岸2020—

2023年总侵蚀量 $12.5 \times 10^4 \text{m}^3$ ,淤积量 $3.2 \times 10^4 \text{m}^3$ ,净侵蚀量 $9.3 \times 10^4 \text{m}^3$ ;盐城淤泥质海岸潮沟区域侵蚀量 $8.7 \times 10^4 \text{m}^3$ ,潮滩区域淤积量 $5.1 \times 10^4 \text{m}^3$ ,净侵蚀量 $3.6 \times 10^4 \text{m}^3$ 。同时,提取坡度变化,侵蚀区坡度增大(如荣成沙滩坡度从 $5^\circ$ 增至 $8^\circ$ ),淤积区坡度减小,为侵蚀风险评估提供依据<sup>[4]</sup>。

### 4.3 侵蚀驱动因素与防护建议

结合气象与人类活动数据,荣成砂质海岸侵蚀主要受风暴潮(年均2~3次)与沙滩采砂影响;盐城淤泥质海岸受海平面上升(年均3mm)与潮动力增强驱动。基于模型结果,建议荣成段修建离岸堤减缓风暴潮冲击,盐城段种植互花米草稳定潮滩,为防护工程设计提供精准空间定位。

### 结束语

多波束测深与无人机倾斜摄影联合建模技术,在海岸侵蚀三维建模中成效显著。通过适配性分析、精准数据采集与预处理、海陆数据融合及三维建模实践,构建出高精度一体化三维模型,为海岸侵蚀量化分析提供有力支撑。基于模型得出的岸线进退、冲淤变化等成果,准确揭示侵蚀规律,明确驱动因素并提出针对性防护建议。未来,该技术有望进一步优化,为海岸带生态保护与可持续利用提供更科学、精准的决策依据。

### 参考文献

- [1]王娜.地面控制点数量对倾斜摄影模型精度的影响分析[J].测绘通报,2021(2):56-59+70.
- [2]朱庆,周平.倾斜摄影测量技术发展综述[J].测绘学报,2022,51(5):721-732.
- [3]杨大关,杨俊静,王煜成,等.基于无人机的健康街区三维快速建模技术研究[J].绿色建筑,2023,15(05):33-35+68.
- [4]万建鹏.基于无人机倾斜摄影测量技术的地形测绘研究[J].华北自然资源,2022,(04):111-113.