

# 航道水陆一体化关键技术应用研究

王晓鹏, 郑亚运, 赵美玲, 曹 慧

(江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225002)

**摘要:** 基于高精度的点云、立体模型等数据成果在提升航道三维场景可视化、航道水下地形表达等方面提供数据支撑, 探索研究内河航道陆域、水下空间三维一体化、地形模型精细化建模及空间分析等相关技术应用, 研究成果对内河及航道信息化、智能化、合理化规划管理具有重要意义。

**关键词:** 水陆一体化; 三维建模; 水下地形; 空间分析

中图分类号: P23; TV697

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2024)10-0057-0005

## Research on the application of key technologies about integration of water and land based on navigation channels

WANG Xiaopeng, ZHENG Yayun, ZHAO Meiling, CAO Hui

(Jiangsu Province Engineering Investigation and Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225002, China)

**Abstract:** Based on high-precision point clouds, three-dimensional models, and other data achievements, data support is provided for improving the visualization of three-dimensional scenes in waterways and the expression of underwater terrain in waterways. The article explores the application of related technologies such as three-dimensional integration of land and underwater spaces in inland waterways, refined modeling of terrain models, and spatial analysis. The research results are of great significance for the informationization, intelligence, and rational planning and management of inland waterways and waterways.

**Key words:** integration of water and land; three-dimensional modeling; underwater terrain; spatial analysis

无人机摄影测量技术、多波束水下测量技术以及三维管理平台在智慧水利、水利数字孪生工作方面的应用, 可高效、快速地获取精准的陆域和水下地形数据并实现可视化表达及应用分析。

本文针对目前河湖和水利工程测量中存在的一些现实问题, 提出水陆三维一体化测量系统的解决模式, 即无人机机载设备和多波束测深仪的非接触式、高速、高精度等测量优点, 配合 GNSS、姿态仪等仪器, 能实现对管理范围内陆域和水下地形的快速测量, 直接获取地形的三维数据, 对河湖和水利工程的建设和利用及维护具有重要意义。水陆一体化整体架构, 见图 1。

## 1 三维模型精细化构建

无人机倾斜摄影实景三维建模具有还原度高、精度高、速度快、识图更容易等优点。但下视镜头倾斜角度受限, 对于三维模型接近地面的部分, 纹理模糊且不清晰、模型体凹凸不平甚至失真, 尤其是在水域面积较大的地方这种失真尤其明显。为解决这一问题, 本研究采用一种“无人机倾斜航拍+地面补摄”空地结合的自动化实景三维建模的解决方法, 高空大面积的影像数据通过多旋翼飞行平台搭载五镜头倾斜摄影相机来完成采集, 对于低空局部数据, 则采用搭载单镜头组合手持设备的方式来

收稿日期: 2024-06-26

作者简介: 王晓鹏(1993—), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为摄影测量与遥感。E-mail: 2676964637@qq.com

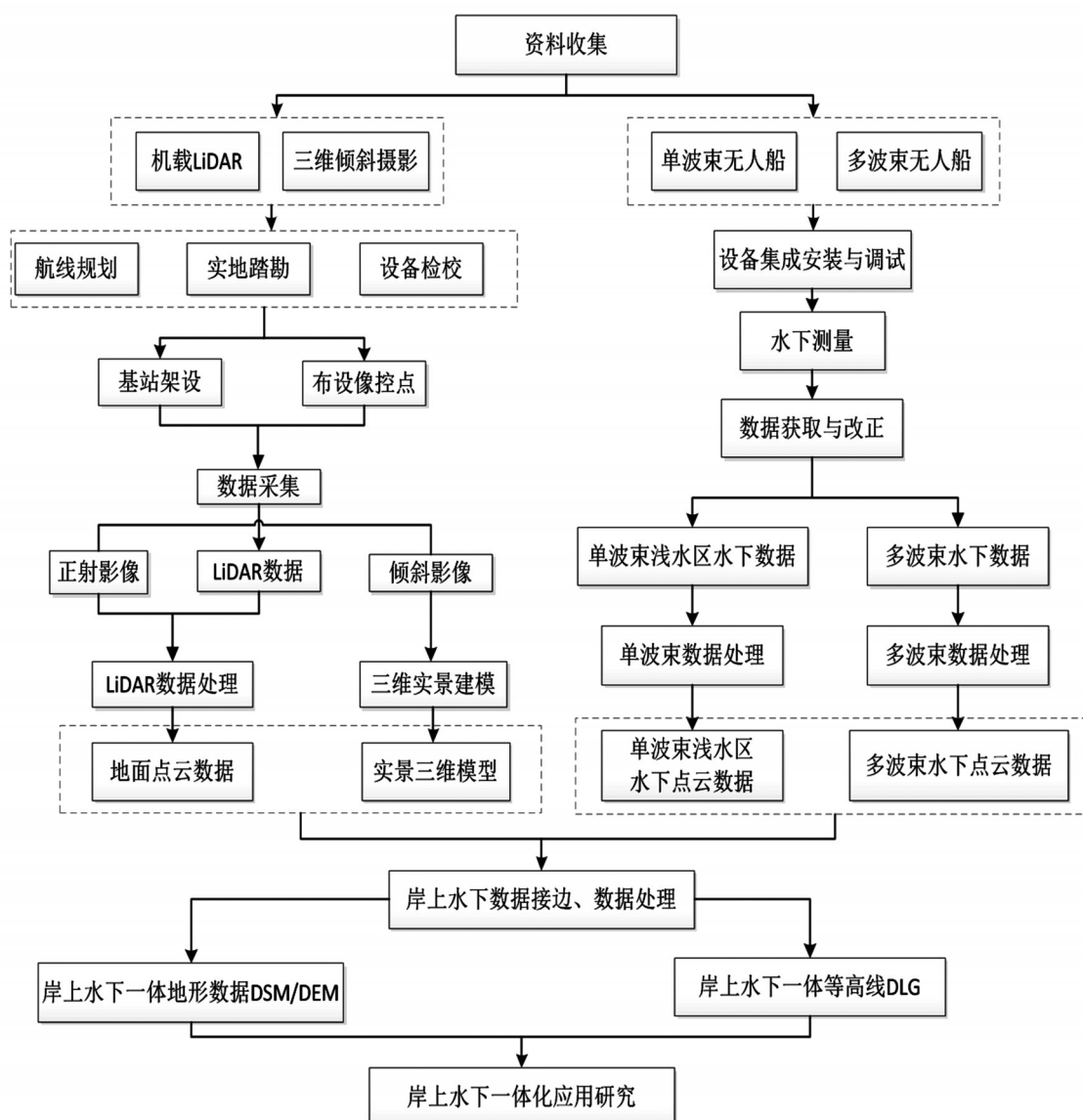


图1 水陆一体化整体架构

完成采集,对整个测区采集3种不同分辨率影像,分别进行有像控点和无像控点空三加密,然后将空三结果通过人工添加方式进行空地两类空三成果融合,最终生成实景三维模型。

由于不同建筑结构存在差异,补拍数据需要满足一定要求才能够作为融合数据进行后期融合处理。具体方法如下:(1)拍摄传感器镜头与建筑保持适中距离;(2)拍摄方式分为建筑上部、中部、下部3种;(3)照片与照片之间保证60%以上重叠度;(4)照片中避免出现大面积水域或者天空等无特征区域。

### 1.1 模型构建

基于空三成果建模模块进行三维重建,通过数据融合和误差阈值设定机制,保证了建模结构的

完整性和贴图的真实性的。多源异构数据融合能够将空地一体多源影像数据全自动地空三和三维重建,生成高精度的实景三维模型,保证建筑物几何形状(面、线、角)和纹理完整、正确,为高精度的三维建模提供了一种新的切实有效的方法,模型成果TIN格网三维结构更加精细,贴图效果更加清晰。

### 1.2 质量分析

(1)纹理结构分析:单纯无人机倾斜摄影建模与多源数据三维建模对比可以看出,融合建模的模型纹理较倾斜摄影模型清晰度更高,融合建模的纹理效果要比单纯无人机倾斜摄影建模精度更高。

(2)模型精度:在融合建模方法中采用倾斜摄影测量及地面补拍建数据,可达到较高的模型配准

精度,但几何精度未知,在选定试验区内使用全站仪、RTK和钢尺获取的坐标、距离值作为真值,在模型中测定对应坐标、距离。在此基础上,对融合模型与全站仪、RTK及钢尺之间的差值进行中误差计算,计算数据详见表1。通过5组检测点对比可以看出,相对于传统的倾斜摄影测量建模方式,融合建模在精度上具有明显优势。

表1 检测点精度

单位:cm

组别	融合建模 平面中 误差	单一倾斜 建模平面中 误差	融合建模 距离中 误差	单一倾斜 建模距离中 误差
1	2.2	3.4	3.0	3.9
2	2.3	4.0	2.5	3.5
3	2.5	4.2	1.9	2.9
4	2.9	3.9	2.3	4.3
5	2.7	5.1	2.6	3.5

三维实景融合建模实验表明,融合建模在精度上优于倾斜摄影测量建模,且纹理结构更加完整,有效解决了模糊、失真情况,相对于传统建模方法具有显著优势,具有可行性和适用性。

### 1.3 模型修饰

受航摄盲区及POS参数的质量问题等因素影响,会对空三和建模质量造成一定影响,从而造成三维模型的空洞、拉花、变形等问题,经人工修补优化后,三维模型满足精度和可视化表达要求。

## 2 水陆一体连续地形构建

机载Lidar技术通过GNSS系统提供飞行平台的位置同时地面架设基准站提供后差分数据处理所需的同步相对地理信息,激光雷达测距系统根据激光反射测定地物与雷达距离、惯导提供姿态数据,并利用相关数据预处理软件计算从而获取精确地表地物三维地理坐标,再通过测区参数转换得到目标三维坐标成果。

### 2.1 多波束与单波束相结合的水下地形获取

水下地形测量常用的数据采集设备包括多波束深度仪和单波束深度仪,测量范围较大,可对水下地形地貌进行全覆盖测量,作业效率高,同时精度也很高,但是其价格比较昂贵、外接设备多,多用于大范围的海洋、湖泊和河道测量。单波束测深仪外接设备少、操作简单、价格较为低廉,但是单波束测深采用的是线性模式测量,不能完全反映水底的

地形变化,仅适用于小范围的水域和河道测量。

本文研究采用多波束和单波束组合测量模式,对于深水区域,通常使用多波束换能器垂直扫描测量,浅水区域则使用单波束回声测深仪测量,相互配合弥补彼此不足,获取高精度的水下地形数据。对于测量船难以到达的地方,借助测量船到达指定水域,利用测深杆量取水深并求取水下地表高程。

### 2.2 水陆一体连续地形模型构建

针对传统的格网法在整合结果中在岸线边缘处具有较大的缝隙等问题,提出基于Delaunay三角网方法,在整合时能够实现水陆地形数据无缝拼接。利用迭代交换法实现岸线的嵌入,从而构建约束Delaunay三角网。本文提出的方法在岸线约束条件下构建的三角网能更好地表达水陆边缘处地形,平滑效果较好,并且三角形在形状和大小方面有很大灵活性,很容易融合边界线数据,随地形起伏变化表达地形特征,具有一定的应用价值。

在水陆DEM拼接时,重叠区域的输出像元值为叠置像元的平均值。但陆域水下点云数据在获取时会存在一定的系统误差,陆域水下数据在数字化的过程中也会存在一定的差异,因此陆域水下DEM数据拼接后在重叠区域边缘会存在DEM失真的问题。针对这一问题,提出了关键技术对水陆DEM一体化融合进行处理。

#### (1)接边处像元漏洞插值

对于水陆接边区域数据缺失的部分,将陆上边缘位置的节点与岸线边缘位置的节点进行一对多、多对多等形式的相互连接,创建非约束三角网,将岸线作为约束边嵌入到非约束三角网中。岸线通常表现为多段线,由多个约束线段组成,首先在岸线上任取相邻两点和陆上边缘处的点云构建不规则三角形,循环处理所有约束线段,直到整个岸线嵌入到非约束三角网中。对新生成的三角网进行进一步的局部优化,得到基于约束边界的Delaunay三角网。这种通过岸线作为边界约束来构建不规则三角网的方式,可以更好地表达地形的细节特点,构建的三角网与实际地形更接近。

#### (2)接边处的有效拼接

可以分别任意提取陆上和水下岸线边缘处的提取的节点数据的坐标和高程信息,统计和分析两者之间的空间相关性,根据两者节点的位置坐标信息计算岸线与陆上边缘之间的延伸坡度方向角;岸线节点沿着计算后的空间坡度角方向,在陆上边缘处搜索最邻近节点,基于搜索到的岸线与陆



上边缘处的邻近节点,通过构建最小三角形进行相互连接,循环处理所有的岸线约束线段,直到所有的三角形自适应构建完成,不仅保证了接边三角形的规则美观性,也实现了陆上和水下两者之间的有效銜。

### (3)精度分析

为检验陆上和水下一体化DEM数据融合精度,通过RTK进行接边区域的高程数据测取,选取水岸线两侧范围内的点作为检测点,确保检测点分布在DEM融合时的带状重叠区域内,在采样点确定以后,根据实地情况进行调整。为了对精度进行充分验证,选取了测区内5组数据,每组包含150个检查点,将DEM的高程与RTK实地测量的高程点进行对比,如表2所示。

表2 水陆一体化DEM高程精度检验

组别	高程中误差/m	高程最大误差/m
1	0.181	0.242
2	0.158	0.195
3	0.167	0.271
4	0.132	0.192
5	0.175	0.220

由表2可以看出,各组水陆一体化DEM高程中误差均小于0.2 m,高程最大误差0.271 m,水陆一体DEM高程精度满足《基础地理信息数字成果1:500、1:1000、1:2000、1:5000、1:10000数字高程模型》规范精度要求。

### (4)试验区应用与分析

基于倾斜摄影模型提取的岸线作为约束数据,利用Delaunay三角网水陆数据融合方法研究陆上和水下地形融合效果。在岸线约束条件限制下,地形特征表现效果得到增强,尤其是在接边处的地形特征得到一定的改善,从而构建的三角网与实际地形更加贴近,实现水上与水下地形自然平滑且无漏洞的有效拼接。

基于Delaunay三角网水陆一体化融合方法能够保证水陆地形数据有效连接,解决传统水陆拼接方法在接合处像元间隙明显、不能有效构网的问题。融合效果能够更好地表达地形细节信息,实现水陆一体化的表达,为水陆地形的可视化、陆域和水下地形图的修测、智慧水利建设中的规划分析等提供精准地形信息。

## 3 成果展示与平台应用

水陆一体化测量成果数据具有多源性和海量存储的特点,根据水利行业应用分析的需要,注重技术和实用相结合的原则,采用统一设计、分模块开发的思路,自主研发了水陆一体化三维管理平台。系统采用了最新的虚拟地球引擎Cesium、Web GIS框架技术,通过数据管理中心,实现海量多源数据的导入、存储、管理等功能;实现水陆一体DEM、点云渲染及可视化表达;实现断面分析、缓冲区分析、淹没分析等强大的空间分析功能。

### (1)水陆一体化点云及DEM渲染

利用高性能点云数据引擎处理工具Cesium Lab,将Las文件转换为模型文件,以点云对象属性为基础细化分层渲染。根据水下多波束获取的深度属性值用不同的颜色区分深度,展示水下地形数据(图2);激光雷达获取的点云数据,根据点云高度字段实现分层分等可视化表达(图3);DEM渲染是通过对数字高程模型的灰度单元行分级渲染,用户可以根据待渲染区域最小与最大高差设置分级颜色,从而直观展示河道范围内的地形状况。



图2 水下点云渲染



图3 激光雷达点云可视化

### (2)任意断面提取与分析功能

断面是水下测量的重要内容,基于DEM环境在

河道的三维空间中任意选取断面线。系统根据拾取当前DEM高程,实时生成断面模型,得到断面的剖面图(图4)。根据水陆一体化成果,实现淹没分析功能,模拟水位上升过程。连接水位监测传感器,在三维场景下实时监测并反映水位变化情况。结合实时雨水情信息、蓄水排水效率参数等进行实时动态险情场景监测,并通过模型动态预演对超标标准洪水出现的可能性、出现的时间和地点进行预警,利用高精DEM、实景三维模型数据对潜在险情位置进行分等定级(图5)。

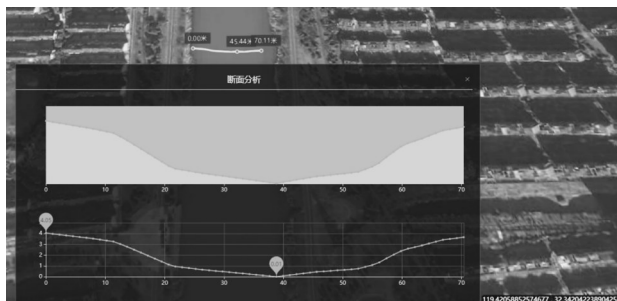


图4 断面提取与分析功能展示



图5 淹没分析

### (3)系统平台应用前景

在大数据时代,多源化信息采集及应用需求不断增加,基于智能化感知手段快速获取,融合多源多维多尺度数据,面向水利行业提出水陆三维一体化数据采集、加工、应用的解决方法,成果可运用到智慧水利、水利数字孪生等行业应用中,并可在交通设计施工等行业进行大范围推广。未来集成更

多的传感器、采用更先进的采集方法、与相关部门实现基础设施和空间数据共享共建,其成果也将服务于河道及闸站等日常管理与决策,也为水利数字孪生、智慧水利建设提供数据支持和平台保障。

## 4 结 语

本文以扬州古运河为例,研究陆地和水下DEM数据构建与融合关键技术,通过对水陆一体化关键技术研究,对城市航道断面设计、水下土方计算、规划治理及整治前后对比提供了数据和技术支撑。在陆地DEM成果和水下DEM构建的基础上进行多源数据融合,解决接边数据缺失等问题,实现了水陆一体化集成。通过三维WebGIS数据集成管理系统,实现了三维可视化表达、场景漫游、倾斜摄影单体化模型属性查询、缓冲区分析、淹没分析、断面实时提取等功能,今后也将结合具体的管护应用进行对应的功能拓展。

在对陆域水下一体化DEM接边区域精度评价时,未对其进行误差来源分析,探索误差来源分析可确定各个系统(如机载LiDAR系统、多波束系统)误差的权重,对提升水陆一体化DEM的拼接精度有一定帮助。

### 参考文献:

- [1] 张富玲,高利鹏. 基于DP-Modeler的倾斜影像实景三维建模技术分析[J]. 测绘与空间地理信息,2018,41(3): 196-198.
- [2] REMONDINO, FABIO. Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning[J]. Remote Sensing, 2011, 3(6): 1104-1138.
- [3] 胡永杰,程朋根,陈晓勇,等. 机载激光雷达点云滤波算法分析与比较[J]. 测绘科学技术学报, 2015(1): 72-77.
- [4] 杨安秀. 机载LiDAR测深点云滤波与分类方法研究[J]. 测绘学报, 2023, 52(7): 1234-1234.
- [5] 鲁晨阳. 基于机载LiDAR与单波束测深数据建立河道DEM的研究[D]. 长春: 长春工程学院, 2020.
- [6] 韩红,周兴华,邹宏亮,等. 水库水陆一体化三维模型构建与展示[J]. 浙江水利科技, 2023, 51(1): 9-12.