

· 综合 ·



无人机 LiDAR 及倾斜摄影测量技术在复杂河道工程测绘中的融合研究 *

樊冰¹, 胡晓宁², 马良¹, 李福林¹, 李浩¹, 杨大伟¹

(1. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250014; 2. 山东省煤田地质局物探测量队, 山东 济南 250104)

摘要: 复杂河道工程测绘中往往受到植被茂盛、信号链接弱、山体遮挡等多种因素影响, 导致传统测绘手段难以开展, 通过在复杂河道工程测绘中对无人机 LiDAR 及倾斜摄影测量技术进行对比研究, 找出两者之间的互补优势及融合方法。经试验证明, 融合纹理影像信息的 LiDAR 数据既具有准确的空间地理信息, 又具有清晰的地物边界信息。采用 LiDAR 数据校正的倾斜模型细节表达明显改善, 模型轮廓表达清晰, 人工判读更加容易。该成果有效克服了无人机单一测量技术及传统测量技术的弊端, 可快速构建更加精准的河道数字孪生模型。

关键词: 无人机; 雷达; 倾斜摄影; 数字孪生模型; 数据融合

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0011-07

UAV LiDAR and tilt photogrammetry technology in complex river channels fusion research in engineering mapping

FAN Bing¹, HU Xiao-ning², MA Liang¹, LI Fu-lin¹, LI Hao¹, YANG Da-wei¹

(1. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250014, China;

2. Geophysical Survey Team of Shandong Coalfield Geological Bureau, Jinan 250104, China)

Abstract: Complex river engineering mapping is often affected by a variety of factors such as lush vegetation, weak signal link and mountain occlusion, which make it difficult to carry out traditional surveying and mapping means. Through the comparative study of UAV LiDAR and tilt photogrammetry in complex river engineering mapping, the complementary advantages and fusion methods between the two are found out. The experimental results show that the LiDAR data incorporating textured image information has accurate spatial geographic information and clear land boundary information. The detailed expression of the skew model corrected by LiDAR data is significantly improved, and the contour expression of the model is clear and manual interpretation is easier. The results effectively overcome the disadvantages of UAV single measurement technology and traditional measurement technology, and can quickly build a more accurate river digital twin model.

Keywords: UAV; LiDAR; tilt photography; digital twin models; data fusion

当前, 航空倾斜摄影测量技术已广泛应用, 但该技术易受天气等外界因素影响, 在高山峡谷、

植被茂密、交通不便的地区无法获得高精度的高程信息, 只能依靠人工采集, 往往无法满足水运

收稿日期: 2022-05-05

*基金项目: 山东省水利科学研究院自选课题(SDSKYZX202105); 山东水土保持学会重点领域创新基金项目(2019002); 山东省湖东滞洪区建设工程科学研究试验项目(HDZHQ-KY202001)

作者简介: 樊冰(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为地图制图与地理信息工程。

通讯作者: 马良(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 从事水土保持及水利信息化研究工作。

工程测绘精度的要求。激光 LiDAR 测量作为一种快速三维空间地理信息数据采集技术，可对目标物体进行准确判别，同时具有穿透植被、灵活性强、精度高以及作业安全等优点^[1]，但在光学纹理方面缺少细节特征。雷达与倾斜摄影两种方法在河道测绘中虽均有应用，但对两种模式的综合验证及数据匹配仍缺少数据支撑。本文在充分试验论证两种方法特点的基础上，发挥两种测绘技术的优点，对两种数据科学融合，将二者优势予以关联，可以为河道疏浚、船闸、护岸等工程设计及施工提供高精度的基础测绘数据，同时还可快速构建更加可靠的河道数字孪生模型。

1 研究方法

机载激光 LiDAR 是在无人机硬件设备上集成激光雷达探头、全球导航卫星系统(GNSS)、惯性导航系统(INS)、实时差分定位(RTK)、数码相机、机载计算机和飞控系统为一体的远程非接触式测量系统^[2]。倾斜摄影测量通过搭载多台相机或多镜头相机，利用影像拼接技术获取地物顶面及 4 个侧视的高分辨率纹理信息，经像控校正后可进一步生成三维模型、地形图及数字线划图(DLG)^[3-4]。

机载激光雷达与倾斜摄影测量的作业流程均包含飞行计划制订、外业数据采集和内业数据处理 3 个步骤^[5]。飞行计划主要制订飞行航线、飞行高度、飞行速度、重叠率等参数，倾斜摄影数据采集包括记录地面像控信息、无人机位置、扫描角、时间码、相机数据、高度信息、快门信息等，机载激光雷达除以上信息外还包括：姿态数据、IMU 数据、激光数据、扫描频率、原始 RAW 文件等。内业数据处理则是分别对两种测绘方式的数据进行初始化、POS 数据处理、拼接、误差校正等处理后，得到项目区三维模型。通过对两种模型进行对比分析，综合验证二者的工作效率及测绘精度，进一步提出融合改进措施，为河道工程及相关建筑物提供精度达到厘米级的三维地

形数据。研究技术路线见图 1。

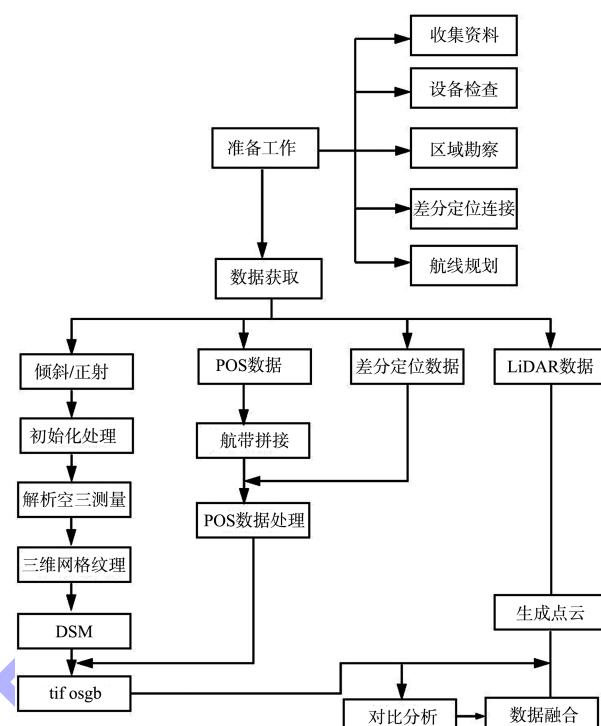
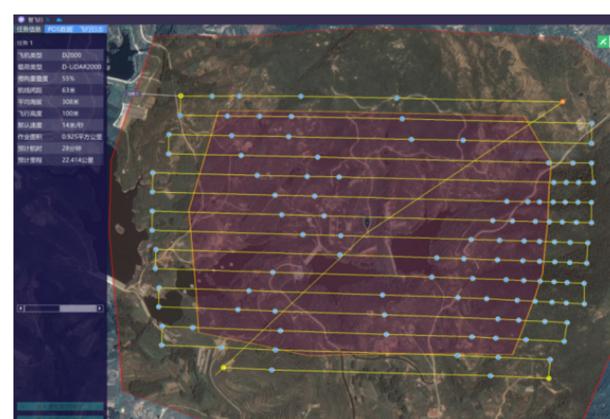


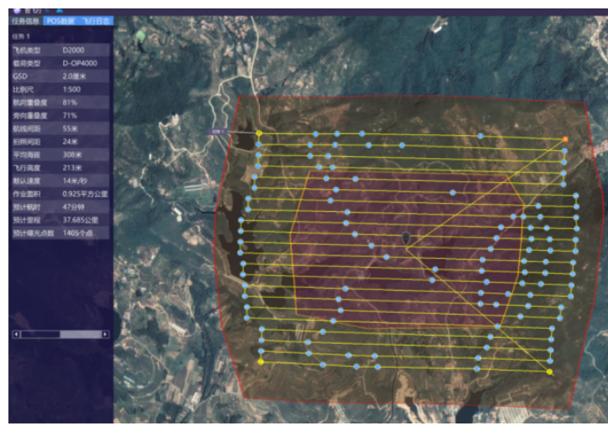
图 1 技术路线

2 试验数据采集

本研究将山东省栖龙湾流域河道作为试验场地，航测核心规划区面积 0.925 km²，选用飞马 D-LiDAR 2000 轻型机载激光雷达航测，航测高度 100 m，旁向重叠度 55%，航线间距 63 m；同时采用飞马全画幅倾斜模块 D-OP4000 进行倾斜摄影测量，飞行高度 213 m，航向重叠度 81%，旁向重叠度 71%，航线间距 55 m，作为对比分析及融合数据。航测线路规划见图 2。



a) 机载LiDAR航测



b) 倾斜航测

图2 飞行线路规划

3 数据处理

3.1 点云去噪

通过分离低于实际地形的粗差噪声点,对起始类别中低于周围邻近区域高程的点进行分类,同时将明显高于周围点的点云分类为空中噪声点,从而对点云进行去噪。两个邻近点之间如具有较大的高程差,则该类高点一般为非地面点类;反之如两个邻近点虽有较大高差,但随着两点距离的增加,为地面点的可能性随之增加。过滤函数用来定义地面点集,假设全部激光点云的集合为 A ,则组成数字高程模型(DEM)的地面点被定义为:

$$\text{DEM} = \{p_i \in A \mid \forall p_j \in A : h_{pi} - h_{pj} \leq \Delta h_{\max}[d(p_i, p_j)]\} \quad (1)$$

式中: p_i 和 p_j 分别为邻域内互不相同的激光点; h_{pi} 和 h_{pj} 分别为点 p_i 和 p_j 对应的高程; $d(p_i, p_j)$ 为点 p_i 和 p_j 间的距离; $\Delta h_{\max}[d(p_i, p_j)]$ 为点 p_i 和 p_j 间的最大高差,若点心和邻域内的点外之间的高差小于它们之间的最大高差,则点上被判定为地面点。假定地形坡度不超过 γ ,考虑到5%的地地面点云(标准差为 δ)会被拒绝,最大高差 Δh_{\max} 可表示为:

$$\Delta h_{\max}[d(p_i, p_j)] = dt \tan \gamma + 1.65\sqrt{2}\delta \quad (2)$$

在规定距离内的球体范围对比点间的高差即可。为了防止高程损失,采用Delaunay三角网组织点云数据;若某一节点被地面点类拒绝,则该节点的邻域即被确认,从而加速地面点云分类的

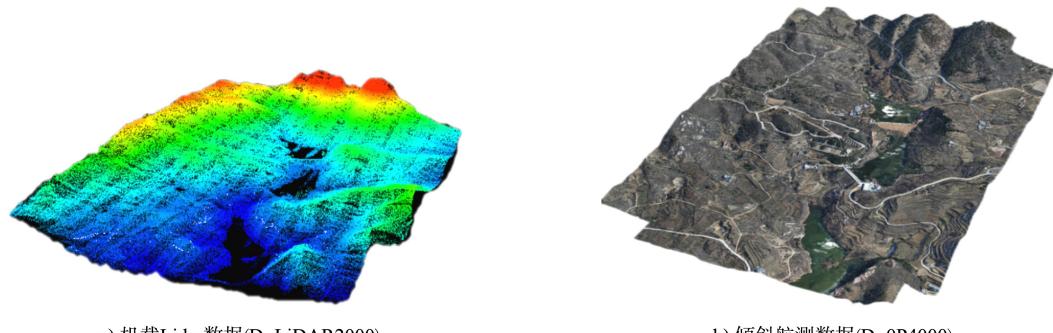
速度。本次处理采用LiDAR360软件,邻域点个数设定为10,标准差倍数设定为5。LiDAR360提供的统计去噪算法对每一个点搜索指定个数的邻域点,计算每个点到邻域点距离的平均值,再求得其中值和标准差,如果某点的平均值距离大于最大高差,则认为是噪点,将被去除。

3.2 倾斜摄影航测

倾斜数据处理采用pix4d软件,首先导入倾斜摄影原始照片,共计7260张。图像地理位置中基准面选择World Geodetic System 1984,对应坐标系为WGS 84 / UTM zone 50N(EGM 96 Geoid),地理定位精度选择标准,输出/控制点坐标单位为m,处理选项模板采用3D Maps,经初始化处理、解析空三测量,为应用实例生成DSM、倾斜及正射影像图。处理选项附加生成点云、纹理、三维网格及等高线,图像比例选择默认,点密度设置为最佳,匹配最低数值为3。倾斜试验区内共布设12个像控点,均匀分布在试验区内,经软件匹配优化后,控制点误差为0.039像素。此外,为保证生成模型边缘的控制效果,减少飞机快速飞行中拍摄产生的果冻效应,对控制不好的边缘以及由于项目角度不足导致扭曲的区域进行人工裁剪,并对由于特征点较少导致水面及个别平面产生的破洞进行人工修补,确保倾斜摄影测量数据可靠。

3.3 数据分析

经数据匹配、误差消除后的机载LiDAR及倾斜摄影模型见图3。选择试验区内规划建设闸门的河道作为试验对象,选取河道长度411.45 m,每隔50 m生成一个断面,每个断面长度100 m,倾斜摄影与LiDAR测绘各生成9个横断面和1个纵断面,见图4。随机选取3个相同位置横断面,另选取纵断面高程数据进行对比,见图5。从两种测绘方式对比可以直观看出,LiDAR测绘的点高程数据密度更大,因河道周边植被茂盛,倾斜摄影测量均为植被顶部高程,无法真实反映地形现状,而LiDAR测绘具有优秀的穿透性,可轻易穿透植被直接量测河道周边地形,在无植被区域LiDAR测绘也能更好地表达地表细节。



a) 机载LiDAR数据(D-LiDAR2000)

b) 倾斜航测数据(D-OP4000)

图 3 数据处理结果

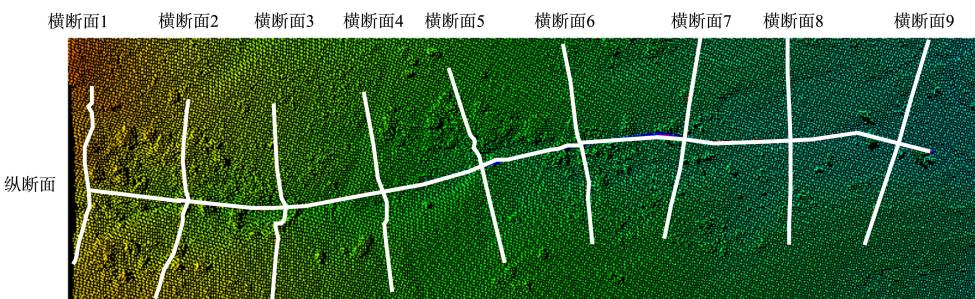
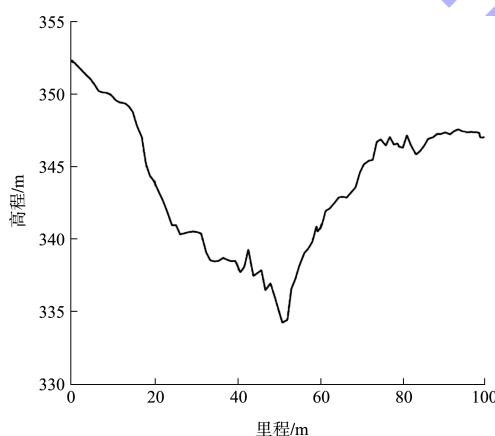
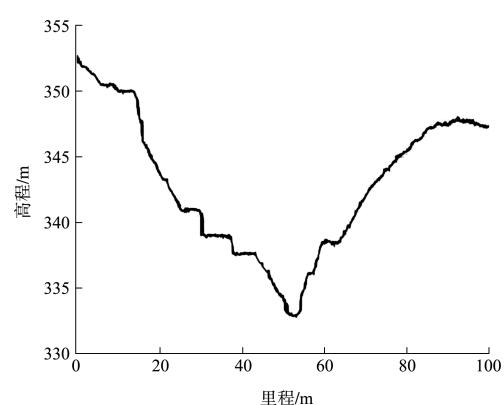


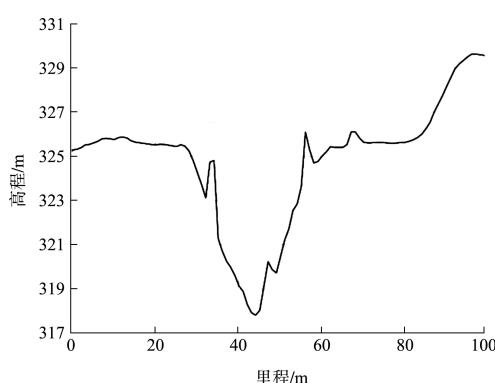
图 4 河道测量断面位置



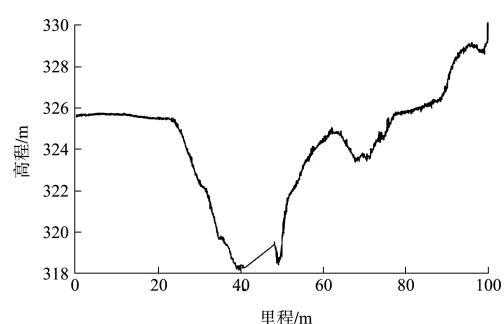
a) 倾斜, 横断面2



b) LiDAR , 横断面2



c) 倾斜 , 横断面4



d) LiDAR , 横断面4

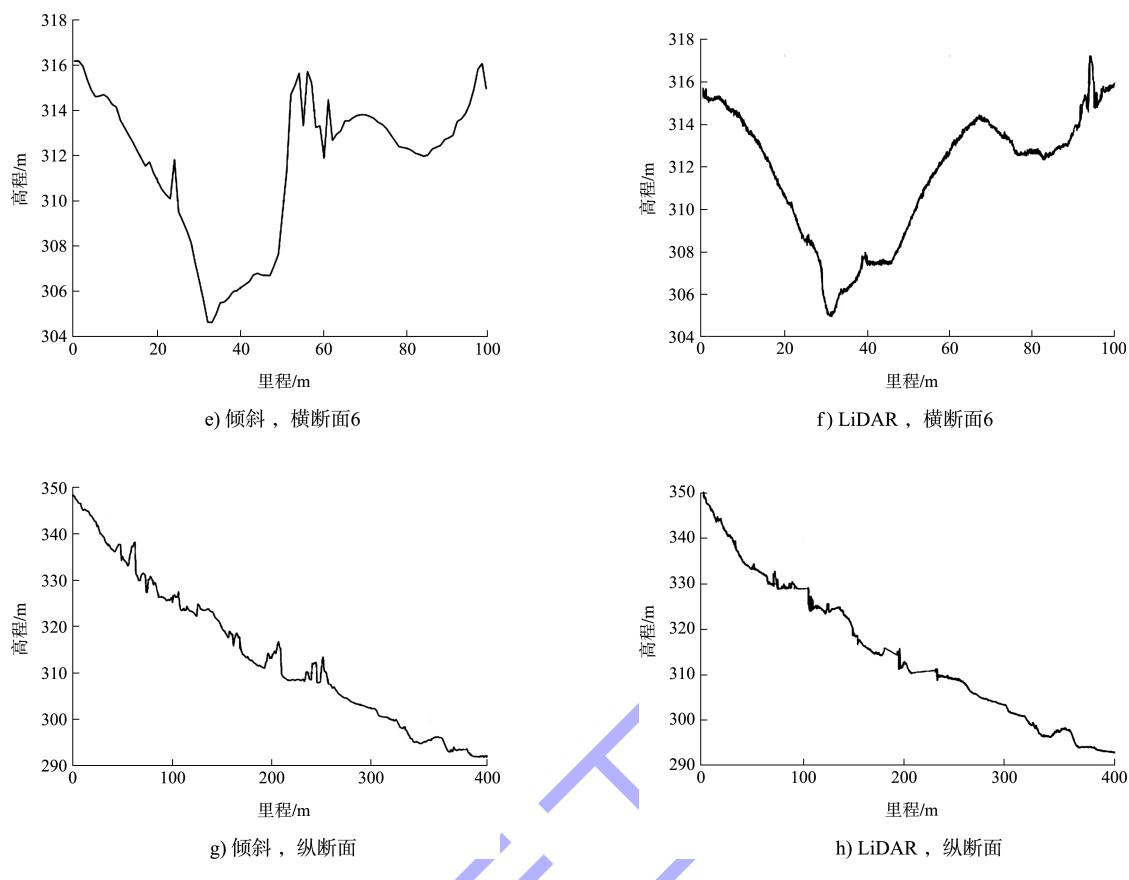


图 5 河道测量断面对比

3.4 对比验证

为验证数据准确性, 同期进行人工地面全站仪测量, 在整个测区范围内, 分别均匀选取机载 LiDAR 数据和倾斜摄影测量离散点数据 60 个, 同时使用全站仪测量方式获取 60 个点的三维坐标, 然后与 LiDAR 和倾斜摄影获取的同位置点的高程进行对比分析。以全站仪测量方式获取的高程数据作为基准, 分析机载激光 LiDAR 数据和倾斜摄影测量与其误差, 验证结果见图 6。通过实测对比分析, 倾斜航测中受高大乔木树冠影响, 导致部分地面高程点误差巨大, 如直接引入河道相关工程设计中, 将对洪峰过流等结果造成误算; 机载 LiDAR 航测数据与地面人工测量数据接近, 误差均控制在 1:500 测绘标准范围内, 满足水运工程相

关计算要求。此外, LiDAR 数据导出后可直接进行分析计算, 倾斜摄影则需要首先在 3D 建模软件中进行模型拼接, 对电脑软硬件要求较高且需要大量的处理时间, 两种方法统计结果综合对比见表 1。

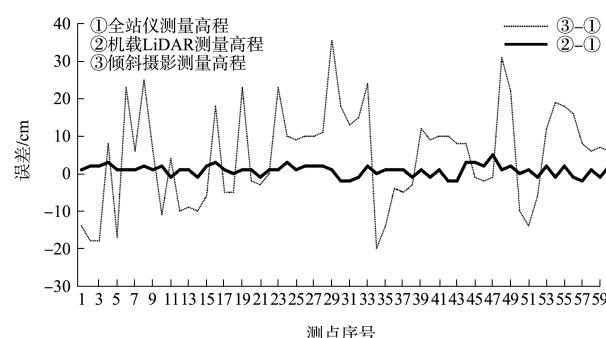


图 6 高程误差对比

表 1 机载 LiDAR 与倾斜摄影测量结果对比

名称	能量源	点测量	影像	水平精度	垂直精度	特征线	河道治理区
倾斜摄影测量	可见光	间接	黑白胶片/彩色 数码大相幅	高于垂直精度 1/3	焦距和航高 10~40 cm	直接提取	极少点
机载 LiDAR	激光	直接	点云 + 彩色小 相幅	垂直精度比水平 精度高 2~5 倍	5~15 cm	间接获取	多次回波点

续表1

名称	GCP	飞行计划	飞行限制	生产效率	成本	处理时间/d	纹理特征
倾斜摄影测量	像控控制网	航向、旁向重叠、高差	白天晴朗	大量人工干预	-	3.5	优秀
机载 LiDAR	1~4	小航带、空白数据	云下、白天、黑夜、四季	快速、自动化	为摄影测量成本的 25%~33%	1.0	差

机载 LiDAR 点云数据对地面空间结构的空间描述有显著优势，并且具备多个回波信息，但由于在数据采集过程中考虑飞机续航时间等要求，飞机在快速飞行过程中导致采集的数据相对离散，并且激光发射随着距离增加而误差变大，导致对肉眼可见的简单地物边界有时描述不清晰，在自动特征提取时容易造成误判。无人机摄影遥感影像数据基于光学相机对地物直接拍照，所摄对象特征描述连续，分辨率高，纹理丰富，地物细节信息可以得到有效展示，但其相对于 LiDAR 数据因缺失高程信息极易造成拼接变形，尤其在水体、细长型地物方面失真严重，如何将两种数据融合、充分发挥各自优势特点^[6]，在构建河道数字孪生模型方面尤为必要^[7]。

4 数据融合

对实际应用而言，不同搭载平台在观测范围、提取参数的完整性及精细程度方面具有很好的互补性。因此，越来越多的学者开展了不同平台航测数据融合研究，除了不同扫描平台数据的融合，光学遥感、高光谱遥感、激光雷达等多源遥感数据的融合也可实现优势互补，充分发挥多源遥感数据的优势^[8-9]。相关研究表明，多源遥感数据融合可用于植被制图、土壤侵蚀计算、植物郁闭度计算、固碳量计算及生物物理参数高精度反演等，本次融合为流域河道治理范围内的光学纹理特征与激光 LiDAR 数据。通过将纹理特征融合到 LiDAR 数据，可显著增强地物的边界描述，通过融合点云数据到航空影像中，可利用 LiDAR 点云数据创建正射/倾斜纠正并镶嵌影像，生成真正射/倾斜影像，叠加正射影像到地面模型上。

4.1 融合原理

4.1.1 粗匹配

将结构特征分割成多个顶点特征，对于每个雷达点云顶点特征，获取其地面坐标，经坐标转换一致后投影到影像上(可利用 ArcGIS 投影坐标转换工具)，通过计算顶点特征的相似性测度，匹配点云顶点空间坐标对应的航空摄影图像的坐标，得到一组 Lidar 点云坐标与航测影像坐标共同组成的匹配数据。

4.1.2 精匹配

1) 计算直接线性变换法(direct linear transformation, DLT)初始参数。根据粗匹配结果，DLT 初始参数采用最小二乘平差方法进行计算，计算前需对地面坐标进行重心化，以确保解算稳定。2) 通过上一步的匹配结果，根据现有直接线性变换法参数，进行双点几何约束，进而得到新一组匹配点集，并计算新的直接线性变换参数。3) 循环迭代计算。若新旧直接线性变换参数之差小于阈值，则迭代收敛，从而获得一组正确的同名点；若新旧直接线性变换参数之差大于阈值，重复执行上一步骤，直到迭代收敛或达到最大迭代次数。4) 影像姿态参数计算。利用精匹配结果，采用空间后方交会方法解算航片姿态元素，从而实现两种数据的自动配准。

4.1.3 特征匹配

由于匹配结果中可能仍然存在粗差，继续采用选择权迭代法的粗差检测方法降低粗差产生的影响，见公式(3)(4)，其中 $p_i^{(z+1)}$ 为加拿大哈金提出的权函数。

$$p_i^{(z+1)} = \begin{cases} \frac{1}{\omega_i^2} & (\omega_i \geq 4.13) \\ 1 & (\omega_i < 4.13) \end{cases} \quad (3)$$

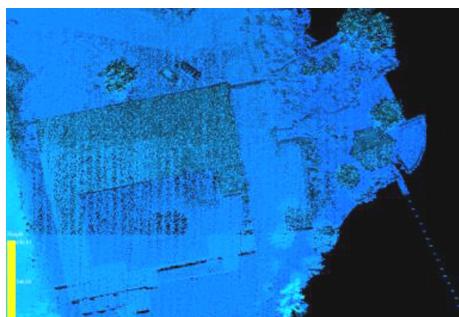
$$\omega_i = \frac{|z_i|}{\hat{\sigma}_0 \sqrt{Q_{vii}}} \quad (4)$$

式中: z_i 为第 i 观测值残差; $\hat{\sigma}_0$ 为单位权中误差估值; Q_{vii} 为改正数协因数矩阵的变量。将匹配数据作为观测值进行最小二乘平差, 当大多数结果为正确匹配, 通过选择权迭代法可自动剔除粗差。

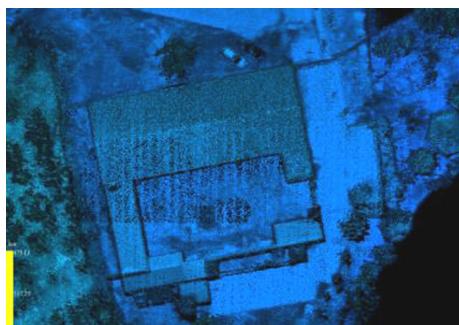
4.2 融合结果

分别选取河道管理房及河道堰坝为研究对象, 融合结果如下:

1) 单纯的管理房 LiDAR 数据虽然能准确反映各位置高程信息, 但无法判断建筑物的边缘, 周边地物边界模糊。以 LiDAR 数据为底图, 经坐标校正后叠加倾斜摄影的纹理信息, 融合纹理影像信息的 LiDAR 数据既具有准确的空间地理信息, 又具有清晰的地物边界信息, 经融合后提取的数字线划图更加精准, 融合结果对比见图 7。



a) 管理房LiDAR点云融合纹理前



b) 管理房LiDAR点云融合纹理后

图 7 LiDAR 点云融合纹理效果

2) 河道中堰坝的倾斜摄影模型仅通过少量像控点进行校正, 细节存在变形、模糊、信息表达不清晰不完整, 除畸变外还存在模型缺损情况,

经 LiDAR 数据校正的倾斜模型细节表达明显改善, 模型轮廓表达清晰, 人工判读更加容易, 融合结果见图 8。



a) 未经LiDAR数据校正



b) 经LiDAR数据校正

图 8 河道堰坝倾斜模型融合 LiDAR 数据效果

5 结论

1) 机载激光 LiDAR 技术可进行高效率、高便捷、高精准、高密集、高可靠、高穿透性的远距离三维空间测量, 但光学纹理特征较弱。

2) 倾斜摄影可真实、多角度反映地物周边的实际影像, 但作业流程及生产过程需要大量人工干预及校正, 对硬件要求高, 部分地物细节会产生变形。

3) 通过数据融合技术, 可将三维激光点云与倾斜摄影模型、正射纹理等数据精确匹配, 既可得到具有清晰边界信息的点云数据, 又可对倾斜模型细节进行快速批量校正, 实现两种测量技术的优势互补, 解决复杂河道区域的测绘难题。

参考文献:

- [1] 江木春, 韩亚民, 林剑锋. 无人机机载激光雷达测绘技术在航道整治工程中的应用[J]. 水运工程, 2022(4): 157-160, 165.

(下转第 28 页)