

基于无人机倾斜摄影技术的水利工程勘测精度提升策略研究

杨书建

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司, 新疆乌鲁木齐, 830000;

摘要:针对水利工程勘测对高精度三维地理信息的需求,本文系统研究了基于无人机倾斜摄影技术的精度提升策略。首先分析了影响倾斜摄影测量精度的关键因素,涵盖数据采集、处理及水利工程特殊场景。在此基础上,提出了融合GNSS-RTK、激光雷达等多源数据的协同优化方法,并探索了改进空中三角测量、智能点云分类及水面区域处理等算法优化路径。通过典型水利工程案例验证,所提策略能有效克服水面反射、植被覆盖等难题,显著提升DOM与DEM的平面及高程精度,满足水利工程高精度勘测要求,为智慧水利建设提供了可靠的技术支撑。

关键词:无人机倾斜摄影;水利工程勘测;测量精度;多源数据融合

DOI: 10.69979/3060-8767.25.11.037

引言

在水利工程勘测中,无人机倾斜摄影作为先进智能的新型勘测手段,不仅效率高,成果满足真三维建模要求,而且受地形及植被影响较小,但是受飞行指标参数、测区控制点分布及影像匹配处理等影响,测量结果精度差,导致成果在工程测量、计算土石方、工程勘察等方面不能准确应用,急需系统调研并建立一定的精度提升方法与策略,突破使用困境,以实现将无人机倾斜摄影技术更贴近水利勘测的需求。

1 无人机倾斜摄影技术原理与系统构成

1.1 倾斜摄影测量基本原理

倾斜摄影技术是在同一架飞机上同时集成5个镜头传感器(前视、下视、后视、侧面1、侧面2),从垂直和4个倾斜方向,同步获取地物正摄和多个侧面影像的技术。倾斜摄影的机载传感器可以从不同的角度,将各种角度地物的形状和表面纹理信息采集在一起,便于真实完整地重建地物的3D模型。倾斜摄影测量主要依赖摄影测量的空间前方交会原理,即将同一地物点的不同像片影像,利用摄影机的内外方位元素,在该地物的物理空间上确定出点的精确位置的摄影测量方法。采集不同位置影像时利用像点的相关信息进行匹配,通过密集匹配方法计算出高密度三维点云数据,并包含精确的空间坐标和丰富的颜色和纹理等信息,在此基础上利用三角网与表面重建,形成了高精度和丰富的3D实景模型。

1.2 无人机倾斜摄影系统组成

无人机倾斜摄影系统主要包括无人机(机载平台)、

无人机倾斜摄影相机、导航定位设备和任务规划及飞行控制系统等。常用的无人机载平台为稳定系数较高的多旋翼无人机或者续航时长较长的固定翼无人机,一般视作业对象的范围及实际环境选取适用型;无人机倾斜摄影相机主要由5台不同角度的CCD相机组成,包含1个正上方视场以及4个不同倾斜角度的视场,通过搭载相机完成飞行过程中对目标区域获取多角度、方向的影像信息;机载GNSS和IMU通过集成无人机一体化导航组合获取所拍摄影像对应的每次曝光时的坐标以及姿态信息,供后期空三算法计算的初始值;地面站软件主要是用来编制航线、监测飞行及下载影像。

2 水利工程勘测中倾斜摄影精度影响因素分析

2.1 数据采集阶段影响因素

基于无人机倾斜摄影测量方式获取的数据在初始采集环节就已确定其精度水平,前期多个环节控制直接决定整个项目成果的精度水平。飞机飞行高度直接影响地面分辨率效果,高度越低地面像元数量越大,但也会影晌到飞行范围,会损失部分作业覆盖,需要根据测绘项目成果精度以及实际工作效率等因素进行合理把控。航向及旁向重叠度设置过小将会造成影像拼接出现困难,造成空中三角测量不稳定,要确保影像具有较高的重叠度才能有效保证数据的冗余率。测控点布设方案尤为关键,像控点的数量与分布点位及测量精度直接影响整个模型的绝对位置精度,缺乏足够的绝对测控点或者测控点分布不合理就容易造成模型拉伸现象。航空定位设备(GNSS/IMU)也会直接影响影像拍摄初期影像位置姿态的精准度,容易因为影像导航信号障碍等因素存在

累积误差。外因环节更加不容忽略，比如光照不均匀以及强烈的影子存在直接影响影像拍摄质量，大风天气情况下会影响影像后期飞行的稳定情况，而当侧视相机在水面上方进行飞行时会造成水面影像强烈反射干扰影像拍摄的成像，这些因素均可能造成系统或随机性误差。

2.2 数据处理阶段影响因素

计算与处理中的方法选择与参数设定直接影响精度的优化。航标影像空三平差模型没考虑到影像镜头畸变或是影像姿态误差会造成整体模型发生漂移或是局部形变；密集点匹配算法易在纹理特征不足地区（例如空旷的土坡、水面等）或者重复纹理环境（例如规整建筑区）产生匹配漏洞或匹配错位，产生的点云出现缺失或是突起；点云数据滤波是生成数字高程模型（DEM）必须的环节，传统点云滤波方法在地形复杂或是高植被茂密区域，不容易区分地面点和非地面点，从而产生DEM高程的偏差。从DSM到DEM的转化在处理不好时直接影响土方量计算等工程应用的可靠程度。

3 基于多源数据融合的精度提升策略

3.1 多源数据融合框架

通过引入其他传感器获取的方法与数据，综合分析多元化的信息来弥补单一信息的缺点，将多种传感器资料的数据和信息进行有效的融合、优化与增强。这在水利工程勘测中的应用为多源数据融合的信息处理系统，实现对勘测多源信息融合与优化的方法。按照数据级融合、特征级融合和决策级融合3个层次进行融合处理，同时根据具体分析工作的实际状况选择合适的技术方案。水利工程勘测中采用的多源数据融合系统主要是基于无人机倾斜摄影技术、地面勘测技术、激光检测技术及遥感平台遥感数据的资料，通过统一的空间坐标系及数据信息处理过程，将不同源的倾斜摄影数据、地面测量数据、激光扫描数据及遥感平台的数据进行有效融合。充分利用控制点对模型几何建立高精度条件，并对穿透能力较强的传感器数据所覆盖影像缺失的信息进行数据弥补及特征拓展，能够将多源数据有效融合分析，从而形成比单一数据信息更加完整、有效的数据资源，并可获得满足水利工程勘测对高精度地形、水利环境等信息需求的多元多维和高品质的数字产品。

3.2 倾斜摄影与GNSS-RTK/静态测量融合

采用高精度地面测量数据是对倾斜摄影成果绝对

精度进行较优控制的前提保障，通过使用GNSS-RTK技术快速得到厘米级精度的像控点坐标，在布设得当、满足均匀分布要求的前提下，可进一步提高空三平差精度控制和消除模型的总变形误差。在一些地形大、布设像控点较困难的地区，可以通过静态测量少量高精度控制点，联合机上PPK（后处理动态差分）技术，降低对地面控制点的需求，可以实现不控测、少控制下的高精度成图。采用地面实测水边线、堤顶线等特征点作为约束条件对数据进行处理，可有效修正水面区域的几何变形问题，提升线性工程要素平面位置误差精度。以上方法都是对成果的几何可靠性和真实性进行直接加强，是保证工程勘测设计用图的关键。

3.3 倾斜摄影与激光雷达（LiDAR）数据融合

激光雷达技术具备主动发射激光脉冲并穿透植被的能力，能有效获取林下或灌木覆盖区域的真实地面点。将其与倾斜摄影数据融合，可显著改善植被茂密区的数字高程模型（DEM）质量。通过精确的空间配准，将LiDAR点云中的地面点作为补充数据融入倾斜摄影生成的点云中，利用其高程精度修正因植被遮挡导致的高估误差。在水库库盆、河岸带等植被覆盖普遍的区域，该融合策略能生成更接近真实地形的DEM，为库容计算、淹没分析提供更准确的依据。同时，LiDAR数据对水面具有一定的探测能力，结合多时相飞行，可辅助推断浅水区地形变化，弥补光学影像在水面信息获取上的不足。

3.4 倾斜摄影与多光谱/热红外数据融合

倾斜摄影所生成的三维实景模型的高精度纹理可以借助多光谱及热红外传感器额外获取地物的物理特征信息，对水利工程进行更加丰富的探测和分析。多光谱可以区分土地类别，以地面覆盖类型为基础，进行植被生长情况判断，对于渠道渗漏和库岸坍塌等地貌形态的地表物理特征可以作出风险判断；热红外影像可以对于地面温度的反差敏感，对于暗藏的渗漏及管道的漏水都有不可替代的意义，专题信息丰富了叠加模型的信息维度，并且可以在模型的进一步利用上服务于工程安全评价。倾斜摄影的多光谱和热红外影像并不能起到几何正射化处理，但为模型的进一步应用与解读提供了更加有力的支撑，使得更加丰富的结果服务于更为完善的水利工程决策。

4 基于优化算法与智能处理的精度提升策略

4.1 飞行规划与数据采集优化

合理的影像飞行规划是倾斜影像获取质量的基础，对水利工程线性、面性分布特点的测区，规划航线时需综合考虑地形差异及目标建筑，采用仿地飞行模式以保证飞行相对高程的高度相等，避免因高程悬殊而使成像的分辨率产生变化。结合测区的地形复杂程度和精度需求，在航高、航向与旁向重叠度上进行合理规划，复杂地域适当采取降低飞行高度或增加重叠度措施，有效保证影像间的精确匹配性。对于水体区域或者纹理不明显区域，适当增加倾斜角的覆盖对提高影像的有效视角有效补充。对于随时间不断变化的水利工程，合理规划多时相影像数据飞行任务，结合不同时期的水位与光照条件，为后期多源数据融合分析与变化检测打下基础。科学配置飞行时序，择其光照均匀、气流较弱的时候，采集作业以减少影像的阴影部分与影像模糊现象，从获取源头控制数据错误。

4.2 数据处理算法优化

后期数据的处理方法会对处理成果的最终精度起到十分重要的影响，优化的空三处理算法能够更加准确地进行相机畸变和姿态误差的平差补偿，提高立体模型的整体几何可靠性；优化的立体匹配算法，尤其是当匹配过程中弱纹理像元较多时，选择鲁棒性较强的匹配算法进行立体匹配，通过多视图像信息提高点云建模的完整性和可靠性；优化的点云滤波算法，尤其是引入坡度、高程变异等滤波策略的适应性滤波方法，更加能够有效地区分点云中的地面点和非地面点，降低非地面点在地表模型构建以及 DEM 生成中对地表起伏的影响；在 DSM 生成 DEM 的过程中，引入已知地形规律和人工干预规则，提高 DEM 内插的精度，生成真实地表形态的数字高程模型，实现后期的土方量计算等工程应用。

4.3 水面区域特殊处理技术

水利建筑设施以平面为常见特征，如水坝等结构，平面相对较为平缓，水坝等工程在水坝处均有不同程度的水体，常见的水面提取为水利工程的难点。因水面处无法寻找稳定的纹理，在相机角度下也存在镜面反射特性，直接搜索匹配精度不高或无法得到有效点云。一种方法是通过水边较为干净的直线作为几何约束，在数据处理过程中，作为固定的高程线，在该约束基础上进行内插或者拟合以得到平面的全部高程值，结合水文测站

中的实时的或者历史水位信息，将水体处赋予水的统一高程，提升整体模型的高程稳定性。对于湖水、河水中浅水处水面的提取也可考虑合成多时相影像，分析水下地表对于湖面波形产生的影响，进而间接推算出水下地形。

5 结论

通过使用倾斜无人机完成水利工程勘测工作，为勘测成果提供了一种快速、便捷的三维数据源。而影响勘测成果精度的因素主要有飞行参数、像控点布设、影像数据预处理算法和特殊场景下的几何精度（如水域、植被）等。通过多种数据（GNSS-RTK、Lidar 等）和几何模型的多源数据融合，可以获得更高的几何精度，补足单一传感器的不足。合理的飞行规划、空中三角测量和点云算法的优化，可以提高模型的精确度和可靠性；针对水面、植被、冰川等地形复杂情况，采用水边线约束或多次时间数据的处理分析，可以间接获取水面的高程信息；通过使用深度学习算法，实现目标地物的智能提取，优化影像匹配效率与特征提取效率。采用多源数据融合技术、智能方法可以有效提升倾斜摄影成果的精度及水利工程应用价值，是智慧水利数据建设中重要的基础性工作。

参考文献

- [1] 于翔. 水利工程无人机倾斜摄影测量技术应用研究 [J]. 珠江水运, 2024, (19): 122-125.
- [2] 陈佳佳. 无人机在水利工程测量中的应用研究 [J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(10): 109-111.
- [3] 钱硕. 无人机倾斜摄影测量技术在中国水利工程中的应用 [J]. 中国高新科技, 2023, (12): 153-155.
- [4] 袁启伦. 无人机倾斜摄影技术在河道高风险地形勘测中的应用研究 [J]. 水利技术监督, 2023, (01): 56-59+111.
- [5] 谈政, 邱国辉, 万年峰, 等. 倾斜摄影技术在水利勘测设计中的应用 [J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(07): 232-234+238.

作者简介：杨书建，1999年5月，男，汉族，新疆博乐人，本科，初级职称，研究方向：无人机倾斜摄影技术精度提升。