

无人机载激光雷达在复杂山区水利工程地形测绘中的精度优化策略

王君瑞

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: 随着水利工程向高山峡谷等地形复杂的地区推进, 传统的测绘方法因地形崎岖、通达性差、工作效率低下等问题, 逐渐暴露出弊端。在这种情况下, 具有穿透植被的能力并且可以主动发射激光进行测量的无人机载激光雷达 (UAV-LiDAR) 成为复杂山区水利测绘的理想选择。但是由于山区天气变化莫测、地形变化大以及卫星信号被遮挡等原因, 点云精度不足, 不能满足精密水利工程对于精度的要求。本文主要针对如何利用无人机载激光雷达进行复杂山区水利测绘进行思考, 分析其对工程建设的重要作用, 并从航线设计、基站设置以及数据后期处理等方面提出提高点云精度的方法。

关键词: 无人机载激光雷达; 水利工程; 复杂山区; 地形测绘; 精度优化

DOI: 10.69979/3060-8767.26.04.033

引言

随着我国水利水电建设向高山峡谷等深层腹地推进, 地形测绘的精度与效率直接影响着工程选址与大坝安全。在植被茂密、地势陡峭的复杂山区, 传统测量手段不仅效率低下且难以触及真实地表。无人机载激光雷达 (UAV-LiDAR) 作为一种主动式遥感技术, 凭借其强大的植被穿透力和非接触式测量优势, 为获取高精度地形数据提供了新路径。然而, 受山区极端地形及信号多路径效应影响, 原始点云往往存在几何畸变或噪点。因此, 系统探讨 UAV-LiDAR 在水利工程中的应用机理, 并针对航线、基站及后期算法提出全流程的精度优化策略, 对于提升水利测绘的数字化水平具有重要的现实意义。

1 无人机载激光雷达在水利测绘中的基本概述

1.1 UAV-LiDAR 技术的工作机制与系统组成

无人机载激光雷达系统由无人机、激光扫描仪、高精度惯导 (IMU)、GPS 等组成, 在水利水电工程勘测中, 利用激光扫描仪发射大量短周期脉冲, 同时记录回波信号飞行时间及强度, 再根据瞬时的姿态和位置求得地面物体的三维坐标。由于是主动式测量, 即使是在阴天或者茂密森林, 也可以获得高质量的地形数据。

1.2 复杂山区水利工程对地形数据的特殊需求

复杂山区的水利工程一般涉及大坝位置选择、水库

容量计算、引水隧洞设计等方面的工作, 对地形数据的比例尺有较高要求^[1]。而山区地形切割严重、坡度较大, 传统的航测方法容易受到影像上阴影和植被的影响, 导致“数字地面模型”的误差较大。因此, 水利工程的测绘不但要达到厘米级的空间分辨率, 而且需要具备很强的穿透力, 获取真实的地面高程信息, 以保证工程的安全性和合理性。

1.3 影响山区测绘精度的主要误差来源

在实际工作中, 造成精度降低的原因有以下几个方面: 一是环境原因, 在山地地区, 由于气流的影响, 无人机的姿态会发生偏移; 二是硬件原因, 由于 IMU 的漂移以及 GNSS 信号在山谷区域存在多路径效应, 会造成误差; 三是地形原因, 过高、茂密的树木会大大降低激光打到地面的可能性。找到并消除这些误差, 对于提高测绘成果的质量十分必要。

2 复杂山区应用 UAV-LiDAR 测绘的战略意义

2.1 突破传统测绘盲区并提升作业安全性

在复杂山区, 陡峭的悬崖以及湍急的河流使得野外测绘工作人员难以到达。利用 UAV-LiDAR 技术实现从“地面接触式”到“空中非接触式”的转变, 大大降低野外工作人员的安全风险。而且, 它具有良好的机动性, 在一些人迹罕至的地方也可以进行测量作业, 为水利工程勘测缺失的部分补充资料, 保证测绘成果的完整性和

全面性。无人机配备激光雷达可以很轻易地飞过山谷,穿过云层,在高山峡谷里自由穿梭,将危险地方的每个角落都记录下来,使测绘人员免受伤害。

为了满足对安全性和数据完整性的要求,UAV-LiDAR 技术不断进行改进。安装有高精度惯导和实时动态定位系统的 UAV-LiDAR,即使在信号较差的峡谷地带,也能保证不间断采集数据^[2]。避障雷达以及智能航线规划使得无人机可以避开危险,自行飞行,从而提高安全性。并且有应急预案,在出现意外情况时,无人机可以自动返航或者降落。当危险地方的数据被安全获取,并且每一处死角都已被准确测量,水利工程勘察就可以拥有完整可靠的资料。

2.2 提升植被覆盖区域地面模型的真实度

水利工程一般会有大量的水源和植被,在传统的航空摄影测量得到的 DEM 上,是看不到林冠下面的地物的,林冠对地面的覆盖高度会有几米甚至更多。但是 UAV-LiDAR 具有重叠回波功能,可突破树冠的阻挡,获取地面点。这对水利工程中水库淹没面积的计算、库区发生滑坡的可能性分析以及库容曲线的研究有着重要的意义,能提高决策的合理性。激光脉冲穿过一层又一层的树叶,真实地反映地面上的情况,把藏匿于森林中的每一条小溪、每一道悬崖都展露无遗。

提高植被区地面模型的真实度,必须有良好的点云分类方法配合。利用机器学习方法,识别地面上、植被上以及建筑物上的点,去除树枝的影响,还原地表面貌。根据不同植被种类以及密度,调整滤波参数,在保证地表细节的情况下,尽量减少噪声。用少量地面控制点检查并改正模型误差,使模型更准确可靠。当茂密植被不再成为障碍物,真实地表面貌从点云中显现出来时,水利工程规划就拥有了更准确的地形资料,工程安排也就可以更加合理。

2.3 大幅缩减工期并降低综合勘测成本

相比传统的全站仪或者 RTK 打点,UAV-LiDAR 能在很短时间内获取大范围的高精度点云。在水利工程前期规划中,这种方法可以将原来几个月的工期缩减为几周甚至更短,大大节省人力时间。同时,大量的点云数据可以一次性地满足可行性研究、初步设计等多个环节的要求,使得数据得到充分利用和高效传递。一架无人机一天就可以获得几十平方公里甚至更多的数据量,相当于几十个人几个月的工作量,工作效率是非常高的。

成本效益最大化需要有标准的数据采集及处理方式。从航线规划、野外飞行到室内处理,有一套标准化的工作流程,节省人力成本,避免返工^[3]。建立点云数据库,把同一个地方的不同时间段的数据存入点云数据库,方便以后查阅或对比。培养复合型专业技术人才,既能测绘又能水利,提升工作效率。如果测绘周期大幅缩短,一份数据可以服务多个环节,那么水利勘察设计就可以抓住这个机会加快进度,在工期短、效率高的工程项目中占得先机。

3 复杂山区地形测绘的精度优化策略

3.1 针对复杂地形的仿地飞行与变速率航线优化

在山区,固定高度飞行会造成地面分辨率不均匀,这是传统无人机航测在复杂地形上遇到的问题之一,如果无人机以固定的绝对高程进行飞行,在经过山脊处距离地面太近容易发生坠机事故,在经过山谷处距离地面太高造成点云稀疏、精度差,在此情况下要尽量选择使用基于 DSM 的“仿地飞行”,即无人机与地面之间的距离保持不变,在进行航测之前先得到测区的大致 DSM 数据并把它加载到飞行控制系统中用来进行地形跟踪^[4]。无人机在飞行中不断获取 DSM 高程,从而改变自身高度,使得无人机始终与地面相距一定高度。这样做的好处是在整个测区范围内得到相同密度的激光点云,无论是山脊还是谷地,都是一样的精细化程度,有利于后期进行精细三维地形重建工作。

同时,在大斜坡的情况下,需要适当降低飞行速度以增加航线重叠率,使用多角度扫描减少激光盲区,提高陡峭山坡侧面点云采集率。在大于 30° 斜坡处,一般飞行参数无法获取足够地表信息,当激光几乎与地面成平行关系入射到斜坡上时,很多点云返回信号很弱甚至没有。将飞行速度降低 30%—50%,让激光在陡坡上停留更长时间,可以大幅提升有效点云数量。而且把航向重叠率提高到 70%以上,旁向重叠率提高到 70%,以便从不同方向对同一斜坡扫描。不同的航带所获得的点云彼此补充,可以很好地弥补某一个角度所产生的阴影区域,在一定程度上克服一些难以观察到的悬崖侧面以及深沟内部的情况。针对这种特殊地形的不同航道规划,最大限度地发挥无人机可操作性强的特点,在复杂的山地地区可以取得最好的测量效果。

3.2 基站协同与 GNSS 辅助增强的定位方案

峡谷区域卫星信号易丢失,需要采用多基站联合作

业方式。高山峡谷内,两侧陡峭山体阻挡造成可见卫星数量骤减,卫星分布不合理,多路径严重,单基站RTK无法得到可靠解,定位精度差。多基站联合作业通过在测区周围不同的位置以及不同的高度布置多个连续工作的基准站,组成一个基站群。所有基站同时观测卫星并把观测数据实时发送到中心站,然后进行网络RTK计算,产生覆盖整个测区的虚拟参考站改正数。流动站接收机不再仅从一个基站获取改正信息,而是同时从多个基站接收联合改正信息,从而大大降低由于卫星轨道误差以及大气延迟误差导致的空间相关性问题,进一步降低流动站与基站之间由于对流层及电离层引起的系统误差,在信号受到严重阻挡的峡谷底部也可实现厘米级定位精度。

同时,在后处理中加入精密星历以及使用双向滤波对IMU数据进行平滑可以很好地解决由于信号丢失导致航迹漂移问题。在飞行过程中,由于无人机进入无GNSS信号覆盖区域,GNSS接收机会长时间失去锁定状态,只靠IMU进行航位推算,会造成随着时间推移越来越大漂移误差,在后处理中加入高精度的精密星历代替广播星历消除卫星轨道误差源,然后利用双向滤波即先进行前向卡尔曼滤波再进行后向RTS平滑结合失锁前后两部分观测值对失锁期间IMU数据进行重新计算。此种方法可以很好地抑制漂移误差扩大,使得失锁部分的精度与正常部分处于同一水平。并且利用基站协同以及后处理增强的方法,在源头上保证点云的空间位置精度,从而为库区高精度地形测绘提供良好的定位基础。

3.3 点云精细化去噪与布料模拟滤波算法应用

原始点云中有大量的植被、建筑物等噪声,需进行处理,得到纯净的地表点。而在水库复杂山区,由于茂密植被的存在,数字地面模型难以准确获取,因为植被点和地表点相互掺杂,如果不能有效区分,生成的地表模型为植被顶部,而不是真正的地表。在这种情况下,推荐使用改进的布料模拟滤波(CSF)方法,即给定合适的参数,让“布料”从上向下覆盖到倒转后的点云表面上,然后像释放重物一样让布料自由下落,最后停下的位置就是地表点拟合出的一个平面^[9]。通过设定布料的硬度以及迭代次数,可以使得布料去适应不同大小地形变化,柔软的布料可以很好地紧贴在细小地形上,适合细粒度微地貌,而坚硬的布料可以越过植被,看到下面真实地面,这样就可以很好地区分出植被点和地面点,

而且算法中的参数都有一定实际含义,方便不同种类植被进行调节。

另外,根据山区地形特点,在陡峭边缘处要进行人工干预检查以及局部加密,避免在滤波的过程中把地形突变处当成噪声去除。自动滤波方法对于地形突变区,比如悬崖边沿、陡坡、沟壁等地形突变部分容易把它们当作噪声去除,造成生成的地表面过度光滑。此时就需要在自动滤波之后增加一个人工干预的过程,让有经验工作人员在三维环境中观察陡峭边缘以及地形突变处,对于可能被误去除点,从原始点云中选取并恢复;而对于点云密度较低的陡坡部分,可以适当增加局部加密扫描,来弥补缺少地形信息。这样一种“以自动滤波为主,手动筛选为辅”的方式,在大大提高了工作效率的同时也保证了重要地形细节被正确保留下来,最后使得生成的数字地面模型真实可靠。

4 总结

无人机载激光雷达技术在复杂山区水利工程的应用,不仅是技术上的突破,而且是提高水利信息化、精确化程度的需要。通过对航线方式、定位系统以及点云数据处理方法进行研究,可以较好地解决高差大、障碍物多的问题。将来,随着传感器重量减轻以及算法更加快速智能,UAV-LiDAR一定在数字孪生流域建设和水利工程全生命周期管理等方面起到更大的作用。

参考文献

- [1]姜丙波,柳忠伟,彭云,等.无人机机载激光雷达在抽水蓄电站大比例尺地形图测绘中的应用[J].测绘通报,2021(S1):248-251.
- [2]皮鹤,唐世豪.无人机影像和机载激光雷达技术在南方线状工程带状地形图中的应用[J].测绘与空间地理信息,2022(002):045.
- [3]莫濠华,韦北海,叶德谦.无人机载激光雷达在福旺水库工程中的应用[J].广西水利水电,2025(1):10-14.
- [4]刘秀朋.无人机载LiDAR在水利工程勘测中的应用研究[J].中国地名,2025(10):0100-0102.
- [5]雷贯辉.无人机载激光雷达在地形图测绘中的应用研究[J].西部资源,2022(1):90-91.

作者简介:王君瑞(1995.11-),男,汉族,甘肃兰州人,本科,助理工程师,研究方向:测绘相关类。