

复杂地形条件下无人机航测作业方案优化探讨

贾谦

北京东方新星勘察设计有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v9i3.2485

[摘要] 随着无人机技术不断进步、测绘装备不断更新,无人机航测由于具有灵活机动、成本低、数据获取速度快等优点,已经成为地理信息数据采集的主要方式。复杂地形尤以山地为典型,地势起伏大、植被郁闭度高、气象条件多变,易造成无人机航测飞行隐患,且影响数据采集稳定性。因此,本文从复杂地形的作业角度出发,特别是以山地为主的地形,对无人机正射影像和机载激光雷达技术在复杂地形中的作业难点以及适用性进行系统性的分析,从而有针对性地提出优化措施,以期给复杂地形条件下无人机航测工程的应用提供一定的参考。

[关键词] 复杂地形; 无人机航测; 作业优化

中图分类号: V279+.2 **文献标识码:** A

Discussion on Optimizing Unmanned Aerial Vehicle Surveying Operations in Complex Terrain Conditions

Qian Jia

Beijing Dongxing Xinxing Engineering & Design Co., Ltd.

[Abstract] With the continuous advancement of drone technology and the constant updating of surveying equipment, drone aerial surveying has become a primary method for collecting geographic information due to its flexibility, cost-effectiveness, and rapid data acquisition capabilities. Complex terrain, particularly mountainous regions, features significant terrain variations, dense vegetation, and diverse meteorological conditions, which can pose risks for drone aerial surveying flights and affect data collection stability. Therefore, this paper, from the perspective of operations in complex terrain, specifically focusing on mountainous regions, provides a systematic analysis of the challenges and applicability of drone orthophoto and airborne lidar technology in such environments. This analysis aims to offer targeted optimization measures to provide some reference for the application of drone aerial surveying in complex terrain conditions.

[Key words] Complex terrain; Unmanned aerial vehicle (UAV) surveying; Operational optimization

引言

关于复杂地形无人机航测技术研究,国内外学者提出了一种地形跟随自适应航线算法,该算法可以按照地形起伏的变化来改变飞行高度。数据处理上把光学影像和激光雷达点云的优点结合起来。因此,本文结合山地无人机航测实际工况,依托正射影像与机载激光雷达协同作业模式,探究复杂地形下无人机航测作业优化方案,实现航线规划、飞行参数等内容的优化。

1 无人机航测技术原理的分析

1.1 无人机正射影像技术原理

无人机正射影像技术依靠摄影测量学理论基础,使用带有高分辨率数码航摄相机的无人机平台,按照预先设定好的航线规划,以一定的重叠率连续采集测区的垂直或者倾斜航空影像

数据。采用空中三角测量法,将像片控制点坐标信息和无人机POS系统记录的位置姿态参数结合起来,准确地解算出各个相片的外方位元素以及加密点的三维空间坐标,从而建立高精度的数字表面模型^[1]。因此,根据该模型使用数字微分纠正技术消除地形起伏、相机倾斜、镜头畸变等造成的影像变形,然后进行影像镶嵌、匀色和拼接等后续处理步骤,最后得到一个具有统一坐标系和真实地理信息的正射影像图。该技术可以得到大量的地物纹理特征,已经成为1:2000和更大的比例尺地形图测绘的重要手段。

1.2 机载激光雷达技术原理

机载激光雷达属于主动式三维测量技术的范畴,它是由激光测距装置、全球定位系统和惯性测量单元三个主要部分构成的。工作原理是激光发射器向地面目标发射高频激光脉冲,接收

器同步记录脉冲自发射到经过地面目标反射回来的时间间隔,根据这个时间间隔计算出传感器和目标点之间的准确距离。GPS和IMU系统可以实时得到激光发射时刻传感器的空间位置和姿态参数,利用坐标转换算法把激光脚点的相对坐标转换成绝对地理坐标,从而得到测区的高密度三维点云数据集。激光雷达技术具有主动发射信号、不受光照条件影响、可以穿透植被冠层得到真实的地面高程信息等特点,适合于植被覆盖密集的山地地区数字高程模型的高精度建立。

2 复杂地形条件下无人机航测作业装备选型

2.1 无人机平台选型

复杂地形环境下无人机平台选择要以高可靠性、强适应性、大载重为原则。垂直起降多旋翼无人机由于对起降场地的要求低,在山地狭窄地区可以灵活布置,具有很好的地形跟随和悬停性能,应该作为首选方案。为了保证平台在山地复杂的气象条件下可以保持稳定,必须达到6级以上的抗风能力。集成RTK和PPK两种定位模式的系统,在卫星信号被严重遮挡的峡谷里也能保持厘米级的定位精度^[2]。平台的有效载荷不得少于5kg,才能达到航摄相机、激光雷达传感器同时装机的目的。另外在飞行过程中使用双电池、双IMU等冗余系统来降低飞行过程中出现故障的风险,从而提高作业的可靠性、安全性。

2.2 航摄相机选型

航照相机的选择要综合考虑成像质量、运动模糊抑制能力、时间同步精度等各方面因素来适应山地地形起伏大、光照条件变化多端的作业环境。全局快门相机可以很好地避免卷帘快门在高速飞行和地形跟随时出现的果冻效应以及几何畸变,应该作为首选配置。相机像素分辨率不能小于4200万,像元尺寸控制在 $3.76\mu\text{m}$ 以下,才能满足1:2000以上正射影像的分辨率要求。高速快门和高动态范围成像功能相结合,在阴影区和强光环境下都能得到清楚的地物纹理细节。相机和POS系统之间时间同步精度要优于1ms,给空中三角测量提供准确可靠的基数据。

2.3 激光雷达传感器选型

激光雷达传感器的选择要从山地植被穿透能力、点云数据精度、作业效率等主要方面进行考虑。具有三次以上回波探测能力的传感器可以穿透山地茂密植被冠层,得到真实的地面高程信息,克服了光学影像在植被穿透方面存在的技术缺陷。传感器的最大测距不能少于200m,点云发射频率需达到100万点/秒以上,保证在合理的飞行高度上得到足够的点云密度。扫描角度一般控制在 $\pm 30^\circ$ 以内,防止边缘处点云精度下降。传感器重量不能超过3kg,功率要合适,具备IP54及以上防护等级,能适应山地各种各样的野外作业环境。

3 复杂地形条件下无人机航测作业方案优化

3.1 航线规划算法优化

根据高精度数字高程模型的地形跟随航线规划属于复杂地形航测作业的重要技术改进途径。作业开始之前需要导入测区1:10000以上精度的预生成数字高程模型数据来代替传统的等高度直线航线模式。利用专用算法对各个航点逐点求得传感器

相对于地面的真高值,并以此为依据来不断改变飞行高度来保持传感器和地面的距离始终一致^[3]。该技术方案可以很好地解决山地地形起伏造成的航摄比例尺不一致、影像重叠度分布不均匀、投影差过大等技术问题,也可以避免飞行高度过低造成撞山的风险或者高度过高造成数据分辨率不够的问题。

根据地形坡度、植被覆盖密度、地物复杂程度等因素,在地形跟随航线规划的基础上,将测区划分成若干个网格单元。对于坡度大于 30° 的陡坡地区、深切峡谷处以及高植被覆盖区,飞行速度要降到5m/s以下,并将航向重叠度与旁向重叠度均提高到80%,航带间距变小。对于地形比较平缓、植被较少的地区,使用常规作业参数配置可以达到数据质量与作业效率的最好状态。

另外在悬崖、高压输电线路、通信塔等可能的障碍物附近,设置不少于50米的三维安全缓冲区,用算法自动生成规避缓冲区的最佳飞行路径。另外还要提前规划出多条不同的应急返航航线,在遇到卫星信号被遮挡、电池电量突然降低或者受到强气流影响等情况的时候,无人机系统可以自动切换到最近的安全航线返回起降点,以此来提高山地航测作业的飞行安全性以及可靠性。

3.2 飞行参数动态调整优化

复杂地形无人机航测作业要创建飞行参数和地形特点之间的动态匹配模型,冲破传统固定参数作业模式的束缚。飞行高度和地形坡度之间要进行匹配设计,对于坡度在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 之间平缓区保持基准相对航高。当坡度在 15° 到 30° 之间时,每增加 5° 坡度就会使相对高度提高10到15米,对于坡度大于 30° 的陡坡和峡谷地带,采用阶梯式的高度调整方式,保证传感器处在最佳的成像距离上,同时防止边缘出现数据空白的情况发生。

重叠度参数的设置要根据地形起伏程度做差异化的配置,航向重叠度由平缓区的65%逐渐上升到陡坡区的85%,旁向重叠度也由60%提高到75%。对于山脊线、山谷转弯等特殊的地形部位要多增加10%的重叠度来保证影像拼接不出现断裂、点云数据丢失的情况^[4]。分区控制策略可以防止因为数据量过大而造成处理效率的下降,从而达到数据质量和处理效率的平衡。

另外飞行速度和扫描频率的协同联动机制也应加以细化,低坡度区飞行速度设为8~10m/s,匹配基本扫描频率。在高坡度、高植被覆盖区把飞行速度降到4~6m/s,同时把激光雷达扫描频率和相机快门频率提高20%~30%。该参数设置可以保证单位面积上点云密度、影像帧数都达到1:2000比例尺精度的要求,在保证数据质量的基础上提高作业效率。

3.3 多传感器数据采集与融合优化

复杂地形无人机航测作业要创建起光学遥感和激光雷达技术的综合数据采集与融合体系,充分发挥两种技术的互补优势。采用硬件级时间同步技术,把航摄相机和激光雷达传感器用触发信号线缆集成到同一个POS系统中,得到毫秒级的时间同步精度,保证同一个空间位置的影像数据和点云数据在时间基准上具有很高的 consistency。另外,采用单航次同步采集的方式,可以较

好地避免由于气象条件改变、地形遮挡等原因造成的多次飞行作业中数据匹配出现误差的情况,提高多源数据融合的可靠性、准确性。

多源数据配准精度提高使用的是“初始配准和精细配准”两级方法。根据POS系统给出的外方位元素来完成初配准,得到多源数据之间的初步空间对应关系。接着根据山地地形特点,选择岩石露头、山脊线、人工建筑物等有明显几何特征、空间位置稳定的地物作为控制点,提取同名特征点对,用改进的迭代最近点算法进行精细配准优化^[5]。在配准过程中需要剔除由于植被遮挡、地形突变等原因造成的错误匹配点,使最终的配准误差控制在2个像素以内,为后面的数据融合处理打下良好的基础。

基于激光雷达点云和光学影像融合的正射影像生成技术,用激光雷达点云构建的高精度数字地面模型作为主要基础,代替传统的基于光学影像生成的数字表面模型来完成数字微分纠正。该技术方案可以很好地消除由于山地地形起伏、植被覆盖造成的投影差,大大提高正射影像的几何精度。在此基础上,用高分辨率光学影像丰富的纹理信息准确地映射到三维点云模型上,得到具有高精度几何定位能力和丰富地物纹理特征的融合正射影像产品,给复杂地形条件下地形图测绘和地物信息提取提供高质量的数据支持。

3.4 作业流程标准化优化

复杂地形无人机航测作业要创建起包含前期准备、外业采集、内业处理等全部环节的全流程标准化作业体系,从而达成作业过程的闭环管理以及质量把控。前期踏勘及准备工作采取的是“数字化预踏勘+重点区域实地核查”的技术方式。作业实施之前,先用谷歌地球、天地图等卫星遥感影像和历史数字高程模型数据做室内预分析,大致确定起降点位置和作业范围边界。因此对陡坡区、深切峡谷、高压输电线路密集区等重要风险区进行实地踏勘验证,得到地形情况及障碍物的空间分布。同时系统获取测区近一个月的气象观测数据,根据地形特点制定分时段作业计划,编制极端天气条件下应急预案,给外业作业提供全方位的技术支持和安全保障。

外业数据采集流程需创建“三阶段质量控制”,第一阶段为作业前设备检查,对无人机平台、航摄相机、激光雷达传感器等设备工作状态展开全面检测,查看电池电量储备和POS系统定位精度^[6]。第二阶段起飞前环境检查,看气象情况、空域许可、起降场地安全情况。第三阶段就是飞行过程中实时监控无人机三

维位置、通信信号强度、数据采集质量参数。每完成一次飞行作业之后,马上实施数据质量快速评定工作,对重叠度不够、影像模糊等质量问题展开及时发现和补飞操作,保证外业采集的数据完整可靠。

内业数据处理流程采用模块化、标准化作业方式,首先要制定统一的数据命名规则和处理参数标准,使数据处理过程有条理、可追溯。其次使用分块并行处理的方式来加快大数据集的处理速度,提高计算资源利用率。最后创建起三级质量检查体系,一级检查主要针对空中三角测量精度进行验证,二级检查侧重于云数据品质评判,三级检查则把正射影像成果当作综合性检验对象。经由创建问题回馈并加以改进的闭环体系,从而保证最终成果完全契合有关的技术规范以及质量标准。

4 结语

通过对复杂地形下无人机航测作业各方面影响进行系统的分析,可以清楚地认识地形起伏、植被覆盖等因素对飞行安全和数据质量的影响机理,相比于光学影像和激光雷达技术在山地作业的优势,可以有效地确定多传感器协同作业的技术路线。随着科技的迅猛发展,在后续的无人机航测作业中还可以融合人工智能、边缘计算等技术,使无人机航测达到智能化、自主化的发展,给我国山区地理信息数据的快速获取和高效利用提供更有力的技术支持。

【参考文献】

- [1]张毛.无人机航测在复杂地形勘测定界中的应用研究[J].中国高新科技,2025,(21):158-160.
- [2]仝峰,卢雪玉.无人机航测技术在复杂地形测绘中的应用研究[J].坦克装甲车辆,2025,(16):83-84.
- [3]魏涛,韩磊.无人机航测技术在复杂地形测绘中的精度分析[J].北斗与空间信息应用技术,2025,(2):87-89+106.
- [4]孙鑫超,骆奇峰,何宗友,等.面向条带状航测区域的无人机曲线航线设计方法探索[J].自然资源遥感,2025,37(1):68-75.
- [5]刘安兴,李志军.无人机机载LiDAR航测技术在地形地貌复杂区的应用研究[J].测绘与空间地理信息,2022,45(5):74-76.
- [6]韩芬.浅析无人机航测在复杂港区地形测绘中的应用[J].测绘与空间地理信息,2020,43(7):181-183.

作者简介:

贾谦(1996—),男,汉族,河北邯郸人,助理工程师,大学本科,主要研究方向:无人机航测。