

基于无人机测绘的地形数据采集与成图技术研究

邵 琦 惠林超

河南省水利第一工程局集团有限公司 河南 郑州 450000

摘 要：无人机测绘凭借其机动灵活、响应迅速、成本可控的优势，已成为地形数据采集与成图的重要手段。本文系统阐述了无人机测绘的系统构成、数据采集流程、内业成图方法及精度控制要点。从飞行平台、传感器及导航系统的技术特性出发，分析了航摄规划、像控点布设、飞行作业实施及数据预处理的关键环节，进而探讨了空中三角测量、密集匹配、数字表面模型生成及数字线划图制作的技术逻辑。研究表明，无人机测绘技术的有效应用依赖于对全流程技术要点的精准把握与系统化管控。

关键词：无人机测绘；地形数据采集；航空摄影；数字成图；精度控制

引言

地形测绘是工程建设、资源调查及国土规划的基础性工作。传统航空摄影测量受限于飞行空域审批复杂、成本高昂、受天气制约显著等因素，而地面实测方法则面临效率低下、通视条件受限、人力投入大等不足。无人机测绘技术的出现，填补了低空遥感数据获取的空白，使高分辨率地形数据的快速采集成为可能。当前，随着飞控系统智能化、差分定位技术成熟及数据处理算法优化，无人机测绘已从辅助手段逐步演变为主流技术之一，在电力线路选线、道路勘测、矿山监测、地质灾害调查等领域得到广泛应用。然而，无人机测绘涉及飞行控制、摄影测量、计算机视觉与地理信息系统的交叉融合，技术链条较长，各环节的衔接质量与操作规范性直接影响最终成果的可靠性。部分作业单位因对技术原理理解不深、操作流程不规范、精度控制措施不到位，导致成果质量参差不齐。因此，从系统构成到数据采集再到成图输出，对无人机测绘的技术流程进行系统性梳理和分析，对于指导工程实践、提升成果质量具有现实意义。

1 无人机测绘系统构成与数据基础

1.1 飞行平台分类与选型原则

无人机测绘的飞行平台按气动布局可分为固定翼、多旋翼和垂直起降固定翼三种类型，不同类型在续航、载荷、起降方式和作业效率方面各有差异。固定翼无人机巡航速度快、续航时间长，单架次可覆盖较大面积，适合大面积带状或面状测绘任务，但起降需要相对开阔的场地^[1]。多旋翼无人机机动灵活、可悬停、起降不受地形限制，适用于小面积高精度测绘和复杂地形区域

的补测任务，但续航能力相对有限，单架次覆盖面积较小。垂直起降固定翼结合了两者优先，在有限的场地内完成起降同时保持较高巡航效率，近年来在大比例尺测图中得到快速推广。平台选型应综合考虑测绘面积、地形起伏、所需分辨率、空域条件及成本预算等因素。对于大面积平坦区域的 1:2000 比例尺测图，固定翼或垂直起降固定翼是合理选择；对于城区、山区或小范围 1:500 高精度测图，多旋翼更具备优势。选型还需关注平台的安全冗余设计、抗风能力和任务载荷兼容性，确保在预定作业环境下稳定可靠。

1.2 传感器与 POS 系统

光学相机是无人机测绘的主要传感器，按感光元件可分为 CCD 和 CMOS 两种类型。测绘用相机需具备足够的分辨率、低畸变镜头及机械式快门，以减少卷帘快门效应带来的影像变形。相机焦距的选择需与飞行高度和地面分辨率匹配，常用焦距为 20~35mm。多镜头倾斜相机可同时获取垂直和倾斜影像，为实景三维建模提供多视角数据。定位定向系统（POS）由 GNSS 和惯性测量单元（IMU）组成，在无人机测绘中承担获取曝光时刻外方位元素的核心功能。差分 GNSS 模式（PPK 或 RTK）可将相机曝光中心的位置精度提升至厘米级，大幅减少对地面像控点的依赖。其中，PPK（后处理动态差分）不依赖实时通信链路，适用于信号遮挡较多区域；RTK（实时动态差分）可提供实时高精度定位，便于飞行质量监控。IMU 提供的姿态数据（俯仰、横滚、偏航角）用于影像初始定向，其精度直接影响空中三角测量的收敛效率。

1.3 地面分辨率与成图比例尺的关系

地面分辨率是无人机测绘的核心指标,指影像上一个像素对应的地面实际尺寸,通常以 GSD (地面采样距离)表示。GSD 由飞行高度、相机焦距和像元尺寸共同决定,三者关系为飞行高度等于焦距与像元尺寸之积除以 GSD。按航空摄影测量规范要求,成图比例尺与 GSD 之间应满足约 3 至 5 倍的对应关系,即 1:500 比例尺测图对应 GSD 优于 0.05m, 1:1000 对应 GSD 优于 0.08~0.10m, 1:2000 对应 GSD 优于 0.15~0.20m。飞行高度的确定需在分辨率和效率之间取得平衡。飞行过低虽可提高分辨率,但会导致覆盖幅宽减小、航线和像片数量激增,降低作业效率;飞行过高则分辨率不足,可能达不到成图精度要求。此外,地形起伏也是影响 GSD 均匀性的重要因素,在地势高差较大的测区,同一航高下不同区域的 GSD 差异显著,需根据地形特征分段规划航高或采用变高飞行模式。

2 地形数据采集流程与技术要点

2.1 航摄规划与航线设计

航摄规划是数据采集的首要环节,直接决定原始影像的质量和覆盖完整性。规划内容包括测区范围确定、航高设定、航线方向选择、航向重叠度和旁向重叠度设定以及分区划分等。航向重叠度一般为 60%~80%,旁向重叠度为 30%~60%。较高的重叠度有利于后续空中三角测量的同名点匹配,尤其在纹理贫乏区域(如荒漠、水面)应适当提高重叠度以保证匹配成功率。航线方向一般平行于测区长边,以减少转弯次数,同时在有显著地形起伏时,宜使航线垂直于等高线方向,以减少阴影遮挡^[2]。对于大面积测区,需根据地形高差进行分区设计。同一分区内高差不宜过大,一般不超过航高的 1/6,否则需按不同基准面分别规划航高。分区之间应设置不少于两条航线的重叠覆盖,确保接边处数据完整。弯道和起降段通常不计入有效覆盖范围,规划时应在测区边界外扩充不少于一条航线的飞行范围,以保障边界区域满足重叠度要求。

2.2 像控点布设与测量

像控点是连接航测成果与地面坐标系的基准,其布设方案直接影响空三精度和最终成图质量。像控点的布设应遵循“均匀分布、位置明确、易于辨识”的基本原则。在测区四角及中心区域必须布设控制点,测区内部按一定格网间距加密,一般每平方公里布设 5~9 个点,对于高精度测图可适当加密。像控点应选在平坦、无反光、纹理清晰的位置,如斑马线角点、喷漆标记中心等,避免选在阴影区、树冠或建筑物顶部等特征不稳定处。像控点的坐标测量需采用 RTK 或静态 GNSS 方法,

平面和高程精度应优于成图精度的 1/5。测量时需对平整平,每个点独立观测两次以上,取平均值作为最终成果。对于采用差分 GNSS 辅助空三的作业模式,像控点数量可适当减少,但测区四角和中心仍必须保留不少于 5 个检查点用于精度验证。

2.3 飞行作业实施与数据获取

飞行作业需综合考虑气象条件、空域审批和地面安全。适宜作业的气象条件为风力小于 5 级、能见度良好、无降水或雾霾。飞行前应应对无人机进行系统检查,包括动力系统、飞控系统、链路通信、相机参数及存储卡容量等。起飞后应监控飞行轨迹与预定航线的偏差,确保航迹偏差不超过设计间距的 10%。相机曝光采用定点曝光模式,以保证重叠度均匀,避免因风速变化导致的曝光点漂移。数据获取的质量验收需在飞行现场初步完成。检查内容包括:影像清晰度(无运动模糊或对焦失准)、覆盖完整性(无漏片或缺口)、航向和旁向重叠度是否达到设计要求以及 POS 数据记录是否完整。对于存在大面积水域、雪地或沙地的区域,可适当增加曝光补偿以改善影像对比度。不合格的航线应在现场安排补飞,避免二次进场。

2.4 数据预处理与质量检查

原始数据下载后需进行系统性的预处理。首先对影像进行畸变校正,利用相机检校参数消除镜头径向畸变和切向畸变的影响,恢复影像的透视几何关系。其次检查影像色彩一致性,对同测区影像进行匀光匀色处理,消除因光照变化引起的色调差异。POS 数据需进行时间同步检查,确保每张影像的曝光时刻与位置姿态记录严格对应,时间同步偏差可能引入数米的位置误差。数据质量检查的重点在于重叠度核算和影像覆盖分析^[3]。可利用航迹图计算实际航向重叠度与旁向重叠度,若低于设计值 5%以上,应评估对空三的影响并决定是否需要补拍。影像中若存在大面积云影或反光区域,也应在预处理阶段标记,供后续处理时参考。

3 内业成图技术流程与方法

3.1 空中三角测量与稀疏重建

空中三角测量是无人机摄影测量成图的核心环节,其目的是通过影像间的同名点匹配和像控点约束,解算每张影像精确的外方位元素,并加密出密集的连接点坐标。空三计算的基本步骤包括特征点提取、特征匹配、相对定向、绝对定向以及光束法平差优化。特征点提取常用 SIFT、SURF 等尺度不变特征变换算法,这些算法对影像的旋转、缩放和光照变化具有一定鲁棒性。匹配

策略通常采用 kd 树最近邻搜索结合 RANSAC 算法剔除误匹配点对,确保匹配可靠性。相对定向利用相邻影像间的同名点恢复像对之间的相对位置关系,绝对定向则引入像控点坐标,将模型坐标转换至地面坐标系。光束法平差以共线方程为数学模型,将所有影像的外方位元素和加密点坐标作为未知数进行整体最优化解算,使重投影误差最小化。平差后需检查像控点的残差和连接点的中误差,若超限则需排查粗差并重新平差。

3.2 密集匹配与点云生成

经空三解算获得精确外方位元素后,即可进行密集匹配生成三维点云。密集匹配的核心算法包括多视角立体匹配(MVS)和半全局匹配(SGM)。MVS 利用多张影像对同一目标进行冗余观测,通过立体视差计算深度值,再融合多视角深度图得到稠密点云。SGM 则通过优化像对的全局能量函数,在核线影像上逐像素计算视差,生成高密度深度图。点云的质量取决于影像重叠度、纹理丰富程度以及匹配算法的参数设置。在弱纹理区域或重复纹理区域,匹配容易出现误匹配或空洞,可通过增加影像曝光补偿或优化匹配窗口大小加以缓解。生成的初始点云通常包含大量噪声和离群点,需经过滤波和去噪处理,常用方法包括统计离群点去除和基于局部曲面拟合的平滑滤波。

3.3 DEM 与 DOM 产品生成

数字表面模型和数字正射影像是地形测绘的两类基础产品。DSM 的生成基于密集点云的内插,采用反距离加权、克里金或不规则三角网等插值算法,将离散点云转换为规则格网的表面高程模型。格网间距一般与 GSD 相当或略大,以保留地形细节同时控制数据量。数字正射影像的生成原理是将原始中心投影影像通过数字微分纠正转换为正射投影影像,消除地形起伏和倾斜引起的变形^[4]。纠正过程需利用 DSM 提供的高程信息,将每个像素投影至地面格网,再重采样生成无缝正射影像。多张正射影像之间需进行色彩均衡和接边线优化,消除拼接缝和色彩差异。DOM 的平面精度取决于 DSM 精度和原始影像分辨率,通常可达到 1~2 个 GSD 的水平精度。

3.4 数字线划图的采集与编辑

数字线划图是地形测绘的最终交付成果,以矢量形式表达地物和地貌要素。DLG 采集通常在立体测图环

境中进行,操作人员佩戴立体眼镜,在立体像对或立体模型上对地物进行三维矢量化。主要采集内容包括建筑物轮廓、道路边线、水系边界、植被分布及地形等高线等。立体测图的精度依赖于立体模型的几何质量,人眼立体观测的判读误差一般在 0.1~0.3mm(像方)范围内。当前,基于密集点云和 DOM 的半自动化矢量采集技术日趋成熟。利用点云的分类算法可自动提取建筑物、树木和地面点,进而生成建筑物轮廓和植被区域;利用深度学习方法可对 DOM 进行语义分割,自动识别道路、水体等地物类别。但自动提取成果仍需人工检查与编辑,尤其是复杂地物遮挡和阴影区域的矢量化精度尚不能完全满足大比例尺测图要求。DLG 采集完成后需进行拓扑检查、属性录入和接边处理,确保各要素之间的空间关系正确。

4 结语

无人机测绘技术将飞行平台、传感器和摄影测量算法有机整合,构建了从低空数据获取到地形图成图的完整技术链条。本文从系统构成、采集流程、成图方法和精度控制四个方面系统论述了该技术的核心内容,明确了各环节的关键技术要点和操作规范。研究表明,高质量的无人机测绘成果是硬件性能、流程规范和人员经验协同作用的结果,任一环节的薄弱都可能导致成果质量下降。面对日益增长的精细化测绘需求,无人机测绘技术仍需在传感器小型化、实时处理能力、复杂环境适应性及自动化成图水平等方面持续提升。未来,随着 5G 通信、边缘计算和人工智能技术的进一步融入,无人机测绘有望实现从数据采集到成图输出的全流程智能化,为工程建设提供更加高效、精准的地形信息服务。

参考文献

- [1] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,49(5):721-730.
- [2] 张继贤,王坚. 低空无人机航测关键技术及发展趋势[J]. 测绘学报,2023,52(8):1234-1243.
- [3] 赵红蕊,程承旗. 无人机影像空中三角测量的关键问题研究[J]. 地理信息科学学报,2023,25(6):1123-1132.
- [4] 吴云东,张永军. 无人机测绘数字线划图采集技术优化[J]. 工程勘察,2024,52(4):56-63.