

低空无人机摄影测量技术在测绘工程中的精度影响因素与优化策略研究

李松

上海旻悦勘察设计有限公司

摘要: 低空无人机摄影测量技术凭借其高效率、低成本和灵活性等优势,已成为现代测绘工程的核心手段之一。然而,其成果精度受多重因素制约,在复杂地形与特殊地物条件下尤为显著。本文系统梳理了影响无人机测绘精度的关键因素,结合大型工程典型应用场景,运用“事前规划—事中控制—事后校验”的全流程优化策略。研究表明,通过科学设计航摄方案、采用RTK高精度定位、合理布设像控点并结合高密度点云进行数据处理,可有效将平面及高程误差控制在规范范围以内。实践证明,这可以充分满足地形图测绘的精度要求,为该技术在复杂工程环境中的可靠应用提供理论依据与实践指导。

关键词: 低空无人机; 摄影测量; 测绘精度; 像控点; 空中三角测量

DOI: 10.65976/3078-8145.2026.01.004

引言

随着信息技术与遥感科学的深度融合,低空无人机摄影测量技术以其操作灵活、适应性强、作业高效等无可比拟的优势,在测绘工程领域得到了广泛应用与快速发展。该技术不仅能够快速获取高分辨率影像,还能通过三维重建生成数字正射影像图(DOM)、数字表面模型(DSM)等多维地理信息产品,服务于城市规划、国土资源调查、应急救援及重大工程建设等多个方面。

然而,作为一种新兴技术,其成果的可靠性与精度稳定性仍面临诸多挑战。尤其是在地形起伏较大等复杂场景下,测绘成果的精度易出现波动,甚至难以满足工程规范要求。上海杨浦滨江某项目,项目范围南北宽约200~500米、东西长约5000米,呈狭长走向区域,面积合计约180万平方米。项目工区范围内有近南北走向道路20条,近东西走向道路4条,测区濒临黄浦江,测区范围内已有建筑分布较密集,景观绿化较多,地形起伏相对较大,地形高差近10米。本次测量任务主要是对项目范围内的地形进行修测,对范围内公共设施、绿化及建筑进行测量并统计。本工程按照传统工程测量模式,难以满足工程合同工期要求,故采用无人机测绘技术进行地形测量。影响本项目的因素主要有:(1)临江、陡坡等地形易造成GNSS信号失锁,导致POS(定位定姿系统)数据中断或漂移;部分区域因视角受限无法被有效覆盖,形成“盲区”。(2)茂密植被会遮

挡真实地面,使得生成的DSM(数字表面模型)反映的是树冠高度而非地表高程,需通过滤波算法提取DEM(数字高程模型),但精度损失不可避免。(3)江边常伴随强风、乱流,影响无人机姿态控制,导致影像旋偏角过大、重叠度不均,降低空三解算精度。

因此,深入剖析影响无人机测绘精度的内在机理,并提出针对性的优化策略,对于提升该技术的工程适用性和成果可信度具有重要的现实意义。本文旨在整合现有研究成果,系统性地探讨精度影响因素,并构建一套行之有效的全流程质量控制体系。

1 影响无人机测绘精度的关键因素分析

无人机测绘是一个涉及外业数据采集与内业数据处理的复杂系统工程,其最终成果精度是各个环节综合作用的结果。主要影响因素有飞行质量与航摄参数,传感器特性与影像质量,外业控制点布设,内业数据处理等方面,下文将对这些影响因素进行系统分析。

1.1 飞行质量与航摄参数

飞行质量是保证后续数据处理精度的基础。其中,影像重叠度是关键参数之一。研究表明,高重叠度能显著提升同名像点匹配的稳健性与精度。如表1所示,当航向重叠度从65.1%提升至89.1%时,匹配点数量从348个激增至940个,中误差也从0.8像素降至0.1像素。因此,规范通常要求航向重叠度不低于70%,旁向重叠度不低于60%,而在复杂工程等高精度需求场景下,重叠度甚至需高于80%和

70%。此外，飞行姿态的稳定性直接影响影像的几何畸变程度。无人机自身稳定性不足或遭遇强风扰动会导致旋偏角过大，增加影像匹配难度，降低相对定向精度。

表 1 影像重叠度与匹配点关系

航向重叠度 (%)	匹配点数	中误差
89.1	940	0.1
86.3	770	0.2
80.1	645	0.3
75.3	510	0.4
70	440	0.6
65.1	348	0.8

1.2 传感器特性与影像质量

目前，大多数测绘无人机搭载的是非量测数码相机。这类相机 CCD/CMOS 尺寸较小，且存在感光单元非正交、镜头畸变等问题，会引入系统性误差。同时，影像质量本身也至关重要。航摄必须在晴朗、能见度良好的天气下进行，以确保地面无云影、光照充足。不合理的曝光参数（由飞行高度、大气能见度、太阳高度角决定）会导致影像过曝或欠曝，影响地物轮廓的清晰辨识，进而降低成图质量。

1.3 外业控制点布设

像控点是连接影像空间与地面真实坐标的桥梁，其布设的合理性直接决定了绝对精度。文献普遍指出，像控点应全部布设为平高点，并遵循“先周边、后中间”的区域网布设原则。在平坦地区，像控点间距可控制在 300 米左右一个。然而，在高差变化剧烈的区域，必须加密布点，否则会因控制不足而导致模型扭曲。航线末端上下两个控制点需对应设置，以有效控制模型变形。

1.4 内业数据处理

内业处理是精度实现的最后也是最关键的环节。

空中三角测量（空三加密）：其精度依赖初始参数（如 GPS 曝光点坐标、相机主点）的准确性以及像控点的有效约束。若空三结果精度不足，需回溯调整控制点或校验参数。

点云密度：点云密度对建模精度和效率有显著影响。研究表明，当点云密度从 50 pts/m² 增至 100 pts/m² 时，精度达标率显著提升，但建模耗时也随之增加。针对不同地形，需权衡精度与效率，选择最优密度。例如，在煤堆等高反射区域，需要更高的点云密度来克服特征匹配困难。

2 提升测绘精度的全流程优化策略

为系统性解决上述精度瓶颈，本文提出一套贯穿

项目全周期的优化策略。

2.1 精细化飞行方案设计

首先要科学勘察测区基本情况，全面了解测区地形、地貌、气候及障碍物分布等基本信息，科学合理地为后续的航线规划提供依据。

其次要动态航线规划，通过搜集的地形导入专业软件后，自动生成初步飞行航线，并通过人工优化初步飞行航线，避开高峰、高大建筑。对于高差大的区域，采用“仿地飞行”模式，保持恒定的相对航高。

最后要设定无人机摄影测量参数，根据勘察结果，采用 ≥ 80% 航向 / 70% 旁向重叠度；高差起伏较大区域启用仿地飞行。

2.2 强化外业质量控制

首先在无人机测量过程中，通过无人机集成 RTK 技术，直接获取厘米级精度的摄站坐标信息，这大幅减少了对地面像控点的依赖。

其次优化测区中像控点布设密度，在遵循 300m 间距原则的基础上，针对高差起伏较大的特殊区域进行加密。确保控制点分布均匀，有效控制了整个测区。

最后进行实时质量监控，在航摄结束后，立即利用飞行管理软件对获取的 GPS 坐标数据进行技术处理，当天评价飞行质量，对不合格航线及时组织进行补飞等流程操作。

2.3 智能化内业数据处理

选用先进软件平台进行数据处理，采用 Smart3D 等成熟软件进行空三加密与三维建模。这些软件能自动计算缺失的姿态参数，并可以利用控制点进行地理坐标纠正。

利用软件平台，明确空三加密工作流程，实现从数据导入、控制点刺点到整个区域平差计算的自动化，提高处理效率与一致性。做好精度的验证与反馈工作，数据处理中心应在第二个飞行日前提交质量检验报告，形成“外业—内业”闭环，如果达不到精度要求，应及时修正作业方案。

3 精度验证

通过在外业布置高精度控制点进行检核，在测区内独立布设检查点（非参与空三平差的控制点），数量不少于 9 个，均匀分布。利用 RTK-GPS 或全站仪精确测定其三维坐标。将无人机生成的数字成果上对应点位坐标与实测值比对，计算中误差：

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}}$$

其中, Δ_i 为第 i 个点的平面或高程残差, 通过无人机测量成果对应点位坐标与实测值比对结果表明, 本次测量的结果平面位置中误差 1.05cm, 高程中误差 3.26cm, 满足误差要求。

4 结论

低空无人机摄影测量技术虽已广泛应用于测绘工程, 但其成果精度并非天然可靠, 而是受飞行质量、传感器性能、外业控制和内业处理等多重因素共同影响。本文通过系统分析, 明确了各环节的关键影响因子, 并基于不同地形的实测精度数据, 验证了技术的适用边界。在此基础上提出的“事前—事中—事后”全流程优化策略, 为保障测绘成果的高精度与高可靠性提供了可操作的路径。未来, 随着 RTK/PPK 技术的普及、智能避障算法的成熟以及多源数据融合处理能力的提升, 低空无人机测绘的精度瓶颈将进一步被突破, 其在智慧项目工程等国家重大战略领域的应用前景将更加广阔。

参考文献:

- [1] 刘建国. 无人机在测绘工程中的应用 [J]. 智慧地球, 2019(19):70-71.
- [2] 韩晋榕. 无人机技术在测绘工程测量中的应用 [J]. 科技与创新, 2020(2):156-157.
- [3] 何明洋. 地形测绘中无人机摄影测量技术的应用 [J]. 发展与创新, 2025(17):223-225.
- [4] 张军. 影响无人机测绘技术获取测绘成果精度的因素分析及实用性处理方案研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [5] 王迪. 航空摄影测量技术在水利工程地形测绘中的运用 [J]. 科技资讯, 2025(1):21-23.
- [6] 姜伟. 低空无人机在测绘工程中的应用 [J]. 模型世界, 2024(8):24-26.
- [7] 徐骏. 无人机摄影测量测绘大比例尺地形图的精度分析 [J]. 支撑技术, 2018(13):45-47.