

无人机倾斜摄影测量三维建模精度影响因素研究

王锦朝

西安腾达测绘科技有限公司 陕西 西安 710054

摘要：本文旨在系统性地剖析影响无人机倾斜摄影测量三维建模精度的关键因素，并深入探讨其内在影响机理。论文首先阐述了无人机倾斜摄影测量的基本原理与技术流程，为后续分析奠定理论基础。随后，将影响因素划分为硬件设备、外业飞行、环境条件、内业处理及控制点布设五大类，分别对相机标定误差、无人机平台稳定性、飞行参数（航高、重叠度）、光照与气象条件、空三加密算法、三维重建策略以及地面控制点（GCP）的布设密度与精度等核心要素进行详细论述。在此基础上，结合国家相关技术标准（如GB/T 39610-2020），明确了三维模型精度的评价指标体系，主要包括平面位置中误差与高程中误差。最后，本文构建了一个综合性的误差传播与影响机理模型，揭示了各环节误差如何逐级累积并最终体现在三维模型上，为从业者在实际项目中精准把控质量、优化作业方案提供了理论依据与实践指导。

关键词：无人机；倾斜摄影测量；三维建模；精度；影响因素；误差传播

引言

随着智慧城市、数字孪生等国家战略推进，高精度、高真实感地理空间信息需求激增，传统测绘手段难以满足大范围、高时效、高细节要求。无人机倾斜摄影测量技术由此兴起，成为实景三维建模的主流方法。该技术通过搭载五台多视角传感器同步采集地物顶部与四侧影像，全面记录真实纹理与几何信息，为生成测绘级精度三维模型提供数据基础。然而，其成果精度并非天然可靠，而是受相机标定、控制点布设、飞行参数、数据处理算法等多环节复杂因素影响，微小误差可能在处理中被放大，导致模型扭曲或精度不达标。因此，系统研究影响建模精度的关键因素，对提升理论认知与工程实践质量具有重要意义。

1 无人机倾斜摄影测量基本原理与技术流程

1.1 技术原理

无人机倾斜摄影测量的核心原理是摄影测量学中的“前方交会”。与传统垂直航空摄影仅能获取地物顶部信息不同，倾斜摄影通过在同一飞行平台上搭载多个（通常为五个）传感器阵列，包括一个垂直向下（下视）和四个朝向前后左右的倾斜镜头（倾角通常为 40° - 50° ），同步采集同一区域的多视角影像。这些从不同角度拍摄的影像包含了丰富的地物侧面纹理和几何信息。在数据处理阶段，软件首先通过特征匹配算法（如SIFT、SURF等）在相邻影像间寻找同名点，建立影像间的连接关系。随后，利用空中三角测量（Aerial Triangulation, AT）技术，结合POS（Position and Orientation System, 即GNSS/IMU）数据或地面控制点（GCPs），解算出每张影像精确的外方位元素

（即影像在空间中的位置和姿态）。最后，基于密集匹配算法，对所有影像进行逐像素的匹配，生成海量的三维点云，进而构建不规则三角网（TIN）并映射纹理，最终形成完整的实景三维模型。

1.2 技术流程

一个完整的无人机倾斜摄影测量项目通常包含以下关键步骤：（1）项目规划与准备：明确测区范围、精度要求、比例尺等任务目标，进行航线设计。（2）外业数据采集：执行飞行任务，获取多视角倾斜影像、POS数据及地面控制点坐标。（3）内业数据处理：一是数据预处理：包括影像格式转换、POS数据解算与融合等。二是空中三角测量（AT）：这是整个流程的核心，其目的是恢复所有影像的精确内外方位元素，建立严密的区域网平差模型^[1]。三是密集点云生成：在AT成果的基础上，进行密集匹配，生成高密度的三维点云。（4）三维模型构建与纹理映射：由点云构建TIN模型，并将原始影像的纹理贴附到模型表面。（5）成果精度验证与输出：利用检查点对模型的平面和高程精度进行评定，并输出符合要求的三维模型产品。整个流程环环相扣，任一环节的失误或不足都可能对最终精度产生决定性影响。

2 精度影响因素系统分析

2.1 硬件设备因素

硬件设备是数据采集的源头，其性能直接决定了原始数据的质量上限。（1）相机标定精度：相机标定是确定相机内部几何和光学特性的过程，包括焦距、主点坐标、径向畸变、切向畸变等内参。标定精度不足会导致影像坐标与真实世界坐标之间的映射关系失准。即使是

很小的焦距误差（如1-2mm）或未校正的镜头畸变，在三维重建过程中也会被显著放大，造成模型整体缩放变形或局部扭曲，尤其在模型边缘区域表现更为明显。（2）无人机平台稳定性：无人机在飞行过程中的振动、悬停漂移等不稳定状态会直接影响影像的清晰度。强烈的振动会导致影像模糊，降低特征点提取的可靠性；悬停时的位置偏移则会引入额外的几何误差。高刚性的机臂结构、先进的飞控算法以及减震云台是保证平台稳定性的关键。（3）POS系统精度：POS系统（GNSS/IMU）为每张影像提供初始的外方位元素。高精度的RTK/PPK GNSS可以提供厘米级的位置信息，而高动态、低漂移的IMU则能精确记录无人机的姿态变化。POS数据的精度越高，空中三角测量的初始值就越准确，对地面控制点的依赖就越少，从而有助于提升整体模型的绝对精度和稳定性。

2.2 外业飞行参数因素

科学合理的飞行参数设置是保证数据覆盖完整性和几何强度的前提。（1）飞行航高与地面分辨率（GSD）航高直接决定了影像的地面分辨率（GSD）。航高越低，GSD越小，影像细节越丰富，理论上可获得更高的建模精度。但过低的航高会增加飞行风险，减少单次覆盖面积，提高作业成本。项目需根据精度要求反推所需的GSD，再据此计算最佳飞行航高^[2]。（2）航向与旁向重叠度：重叠度是保证影像间能成功匹配的关键。航向重叠度指同一条航线上相邻影像的重叠比例，旁向重叠度指相邻航线间影像的重叠比例。对于倾斜摄影，由于存在侧面视角，对重叠度的要求更高。通常建议航向重叠度不低于70%，旁向重叠度不低于65%。过低的重叠度会导致匹配点稀疏甚至失败，造成模型空洞或断裂；而过高的重叠度则会产生大量冗余数据，增加内业处理负担，延长生产周期。

2.3 环境条件因素

外部环境是不可控但必须考虑的重要变量。（1）光照条件：光照强度和角度直接影响影像的成像质量。理想的作业时间通常在上午10点至下午3点之间，此时太阳高度角适中，光照均匀，能有效避免长阴影对地物轮廓的遮挡以及强光造成的过曝或弱光导致的欠曝。清晨或傍晚的低角度阳光会产生长长的阴影，严重影响侧面纹理的识别与匹配。（2）气象条件：风速过大不仅会影响无人机的飞行安全与稳定性，还会导致影像位置偏移。雾、霾、雨、雪等天气会严重降低大气能见度，使影像模糊不清，信噪比下降，极大削弱特征匹配的可靠性，进而损害模型精度。因此，选择晴朗、微风的天气进行

航摄至关重要。

2.4 内业数据处理因素

内业处理是将原始数据转化为最终产品的核心环节，其算法和策略的选择对精度有决定性影响。（1）空中三角测量（AT）AT是内业处理的基石。其精度受影像质量、POS数据精度、控制点精度及分布、以及所采用的平差算法（如光束法区域网平差）等多种因素影响。AT解算失败或精度不足，会直接导致后续所有成果的几何失真。在建筑密集或地形起伏剧烈的区域，由于遮挡严重、透视畸变大，AT的难度和失败率会显著增加^[3]。

（2）三维重建算法：从稀疏点云到密集点云，再到TIN模型的构建，涉及复杂的计算机视觉和图形学算法。不同的软件平台（如ContextCapture, Pix4D, DJI Terra等）在匹配策略、点云滤波、模型简化等方面各有优劣。算法的鲁棒性和精度直接决定了模型的细节表现力、几何准确性和纹理贴合度。近年来，基于深度学习的匹配算法因其在处理弱纹理、重复纹理区域的优势，正逐渐成为提升重建精度的研究热点。

2.5 地面控制点（GCP）

GCP是实现模型绝对定位和提升精度的最直接、最有效的手段。（1）GCP精度：GCP本身的测量精度必须远高于项目要求的成图精度，通常需要使用高精度RTK-GNSS或全站仪进行测定。若GCP本身存在较大误差，会将错误引入整个区域网平差过程，导致模型整体偏移或扭曲。（2）GCP布设密度与分布：GCP的数量和空间分布对精度影响极大。规范（如GB/T 35645-2017）对不同比例尺测图的GCP布设提出了明确要求。一般来说，GCP应均匀分布在测区四周及中心，并在高程变化剧烈或建筑密集区域适当加密。合理的布设能有效约束区域网平差的自由度，抑制误差累积，确保模型在全域范围内保持高精度。反之，GCP数量过少或分布不均，会导致模型在远离控制点的区域精度急剧下降。

3 三维建模精度评价指标与标准

为了客观、定量地衡量三维模型的精度，必须建立一套科学的评价指标体系，并参照相关国家标准进行评定。

3.1 核心评价指标

三维模型的精度主要通过以下两个核心指标来衡量：（1）平面位置中误差（RMSE_planar）指模型上检查点的平面坐标（X, Y）与其对应实地测量坐标的差值的中误差。它反映了模型在水平方向上的定位准确性。（2）高程中误差（RMSE_height）指模型上检查点的高程（Z）与其对应实地测量高程的差值的中误差。它反映了模型在垂直方向上的高程准确性。这两个指标通常通

过在测区内布设一定数量、且不参与空三平差计算的独立检查点, 将其在模型中的量测坐标与实地高精度测量坐标进行对比计算得出。

3.2 国家标准依据

我国已出台多项标准对无人机倾斜摄影测量的精度提出明确要求。其中, 《倾斜数字航空摄影技术规程》(GB/T 39610-2020) 和《无人机倾斜摄影测量技术规范》(GB/T 35645-2017) 是重要的技术依据。例如, GB/T 35645-2017规定, 对于1:500比例尺测图, 要求平面位置中误差不超过 $\pm 10\text{cm}$, 高程中误差不超过 $\pm 15\text{cm}$; 对于1:1000比例尺测图, 相应指标则放宽至 $\pm 20\text{cm}$ 和 $\pm 30\text{cm}$ 。这些量化指标为项目验收和质量控制提供了明确的基准。

4 精度影响机理与误差传播模型

无人机倾斜摄影测量的精度问题本质上是一个复杂的误差传播与累积过程。我们可以构建一个简化的误差传播链模型来理解其内在机理: (1) 源头误差: 硬件设备(相机畸变、POS误差)、环境因素(大气扰动、光照不均)和飞行参数(航高波动、重叠不足)共同作用, 产生了带有初始误差的原始影像数据集。(2) 传递与放大: 在内业处理的第一步——空中三角测量中, 这些初始误差会与GCP的误差一起, 通过区域网平差模型进行传递和调整。如果GCP布设合理, 可以在很大程度上修正这些误差; 反之, 则可能导致误差在区域内非线性地放大和扩散^[4]。(3) 最终体现: 经过AT解算后得到的、带有残余误差的影像外方位元素, 被用于后续的密集匹配和三维重建。此时, 任何微小的角度或位置偏差, 在进行前方交会计算三维坐标时, 都会因基高比(B/H)等因素被几何放大, 最终体现在三维点云和模型的平面及高程坐标上。这个模型揭示了各影响因素并非孤立存在, 而是相互耦合、共同作用于最终成果。例如, 一个不稳定的无人机平台(硬件因素)在大风天气(环境因素)下执行了重叠度不足的航线(飞行参数), 即使拥有高精度的GCP, 也可

能因影像匹配失败而导致AT解算崩溃, 从而使整个项目失败。因此, 要获得高精度的三维模型, 必须对全链条进行系统性、精细化的质量控制。

5 结语

无人机倾斜摄影测量三维建模的精度是一个受多源、多维因素共同影响的复杂系统工程问题。本文通过系统梳理, 将影响因素归纳为硬件设备、外业飞行、环境条件、内业处理和控制点布设五大方面, 并深入剖析了各因素的作用机理。研究表明, 相机标定、POS精度、飞行重叠度、光照气象、空三加密质量以及GCP的精度与布设是决定最终模型成败的关键。未来的研究方向应聚焦于: (1) 智能化误差控制: 利用人工智能技术, 在飞行前自动评估环境风险, 在飞行中实时监控数据质量, 在内业处理中智能诊断并修复潜在的精度问题。(2) 多源数据融合: 将激光雷达(LiDAR)、地面移动测量系统(MMS)等其他高精度传感器数据与倾斜摄影数据深度融合, 优势互补, 以克服单一技术在特定场景(如植被覆盖、弱纹理区域)下的局限性。(3) 标准体系完善: 随着技术的不断发展, 现有的国家标准也需要持续更新和完善, 以覆盖更多应用场景, 并对新兴技术(如免像控、AI辅助建模)的精度评定提供指导。

参考文献

- [1]涂荣杰.基于无人机倾斜摄影测量技术的城市实景三维建模及精度评估[J].城市建设理论研究(电子版),2026,(07):175-177.
- [2]杨恒伟.无人机倾斜摄影测量在三维实景建模中的应用及精度分析[J].无人机,2026,(02):109-111.
- [3]李楠,王小通,李少杰.基于无人机倾斜摄影测量的复杂地形三维建模精度优化研究[J].技术与市场,2026,33(02):44-48+52.
- [4]钟伟雄,杨东.无人机倾斜摄影测量三维建模精度提升研究与实践[J].机电工程技术,2025,54(17):46-51.