

基于无人机倾斜摄影测量的老旧城区三维建模精度分析

姜加慧

山东瑞宸科技集团有限公司 山东 德州 253500

摘要:智慧城市和数字孪生技术发展下,高精度城市三维模型构建是基础性工作,老旧城区特点对三维建模技术提出挑战,无人机倾斜摄影测量在此领域潜力巨大。本文旨在分析该技术在老旧城区三维建模中的精度表现,先阐述其基本原理与技术流程,剖析老旧城区对建模精度构成的挑战。接着设计并实施实地实验,选取典型老旧城区,通过不同方案采集影像数据,用软件进行三维重建,用地面控制点和检查点评估模型精度,还引入其他指标分析不同区域建模效果。结果表明,合理布设地面控制点并采用高重叠度飞行方案,可实现较高精度,满足1:500比例尺地形图测绘要求,但模型精度空间异质性显著,存在精度薄弱环节。最后针对薄弱环节提出提升整体精度的有效对策,为技术应用提供依据和指导。

关键词:无人机;倾斜摄影测量;老旧城区;三维建模;精度分析;点云;实景三维

引言

21世纪,全球城市化进程加快,城市治理向三维立体转型,智慧城市等概念依赖真实精细的城市三维空间数据。在此背景下,高效精准构建城市三维模型成为多学科研究核心。老旧城区建筑年代久、布局乱、密度高、风格多样、设施旧,是城市三维建模最具挑战性场景之一。传统测绘方法在老旧城区狭窄街巷效率低、成本高、有盲区,卫星遥感影像分辨率有限且受天气影响,难以精细刻画建筑。无人机倾斜摄影测量技术兴起,通过搭载多相机同步获取地物多侧面高分辨率影像,为解决难题提供方案,具有作业灵活、成本低、效率高、成果直观等优势,尤其适合小范围精细化测绘。但实际应用于老旧城区时,建筑遮挡、光照、墙面纹理、空中线缆等影响建模精度。因此,评估该技术精度水平,识别薄弱区域并提出优化策略,对推动其规模化、标准化应用意义重大。

1 无人机倾斜摄影测量技术原理与流程

1.1 基本原理

无人机倾斜摄影测量技术基于“运动恢复结构”(SfM)和“多视图立体匹配”(MVS)算法。SfM通过分析序列影像中同名特征点的二维坐标变化,反解影像外方位元素及同名点三维坐标,生成稀疏点云,本质是求解大规模光束法平差问题。获得精确相机位姿和稀疏点云后,MVS利用影像像素信息密集匹配,生成反映地物表面几何形态的密集点云^[1]。最终,经三角网构建、纹理映射等处理,生成真实纹理的三维网格模型和数字表面模型。

1.2 技术流程

其技术流程分外业数据采集和内业数据处理。外业需根据测区情况确定飞行平台、相机型号等参数,布设地面控制点(GCPs)和检查点(Check Points),后执行飞行任务拍摄多角度影像。内业先对原始影像预处理,保证质量一致;再导入影像等数据,软件自动完成特征提取、匹配及光束法平差,解算影像外方位元素和加密点坐标;接着生成密集点云,构建不规则三角网并映射纹理形成实景三维模型;最后用检查点验证精度,输出三维模型、DOM、DSM等产品。

2 老旧城区对三维建模精度的挑战分析

2.1 几何结构复杂性

老旧城区的几何结构呈现出极高的复杂性,这构成了三维建模的首要障碍。建筑鳞次栉比,相互之间遮挡严重,导致无人机从上方和侧方拍摄时,大量建筑的立面下半部分、背阴面以及狭窄巷道内部无法被有效观测,这些区域在影像中缺失,进而造成三维模型出现空洞或几何失真。此外,建筑年代、风格各异,屋顶形式(坡顶、平顶、穹顶等)和立面结构(阳台、雨棚、外挂楼梯等)极其复杂多变,这种非规则性大大增加了SfM/MVS算法进行特征匹配和三维重建的难度,容易产生错误匹配和模型扭曲,使得重建结果难以准确反映真实的物理世界。

2.2 纹理与光照条件不佳

除了几何结构,老旧城区的纹理与光照条件也极为不利。许多老旧建筑外墙为素色涂料、水泥或砖墙,缺乏明显的角点、边缘等可用于特征匹配的纹理信息,这直接导致算法难以找到可靠的同名点。同时,窗户、瓷砖等重复性纹理也容易引发算法的误匹配,将不同位置

的相似纹理错误地关联起来^[2]。加之建筑高大且密集，阳光照射不到的区域（如巷道深处、建筑北侧）与直射区域形成强烈对比，造成影像过曝或欠曝，这种剧烈的光照不均进一步恶化了特征提取的稳定性和匹配的准确性，使得在阴影或强光区域的建模质量大打折扣。

2.3 环境干扰因素

老旧城区还充斥着多种环境干扰因素，共同侵蚀着建模的精度与完整性。行人、车辆等动态地物会出现在多张影像中，它们的位置不断变化，干扰了特征点的稳定匹配，可能导致点云中“鬼影”或噪点。密集的电线、晾衣杆等细小线状地物，在低分辨率下难以被准确捕捉，且极易被算法误判或忽略，影响模型的真实感和完整性。更为严峻的是，在高楼林立形成的“城市峡谷”中，无人机的GNSS信号可能受到严重遮挡，导致其记录的POS数据精度大幅下降，进而影响空中三角测量的初始解算精度，使得整个重建过程更加依赖于地面控制点的约束，增加了外业工作的复杂度和成本。

3 实验设计与数据获取

3.1 研究区概况

本研究选取我国南方某历史文化名城的一片典型老旧街区作为实验区。该区域面积约0.15平方公里，建筑以2-6层的砖混结构为主，街道狭窄曲折，平均宽度不足4米，建筑密度超过60%。区域内包含大量历史保护建筑，立面装饰丰富，但也存在不少墙面剥落、纹理模糊的情况。此外，区域内绿树成荫，高大乔木对部分建筑和地面形成遮挡。

3.2 数据采集方案

3.2.1 硬件设备

采用DJI Matrice 300 RTK无人机平台，搭载P1全画幅倾斜摄影相机（集成1个下视镜头和4个倾斜镜头，单镜头有效像素4500万）。

3.2.2 地面控制

使用华测X90 GNSS接收机，通过静态观测（观测时长 ≥ 30 分钟）获取了20个高精度（平面/高程精度优于 $\pm 1\text{cm}$ ）的地面控制点（GCPs），均匀分布于整个测区。另外，独立布设了30个检查点（Check Points）。

3.2.3 飞行方案设计

为探究不同参数对精度的影响，设计了两套飞行方案：

方案A（常规方案）：相对航高80米，航向重叠度80%，旁向重叠度70%。

方案B（精细化方案）：相对航高50米，航向重叠度85%，旁向重叠度75%。

两套方案均采用五镜头同时曝光的方式，确保数据一致性。

3.3 内业处理

所有影像数据均导入Bentley ContextCapture Center软件进行处理。处理流程严格按照前述技术流程执行。其中，空中三角测量阶段，将20个GCPs的精确坐标作为强控制引入，以约束整个区域的绝对位置精度。最终分别生成了对应于方案A和方案B的三维实景模型、密集点云和DSM。

4 精度分析与结果讨论

4.1 整体精度评估

利用30个独立的检查点，对两种方案生成的模型进行精度评估。评估指标采用平面位置中误差（ M_x, M_y ）和高程中误差（ M_z ），其计算公式基于均方根误差（RMSE）。

表1：两种方案模型精度评估

飞行方案	平面中误差(cm)	高程中误差(cm)
方案A (80m)	6.2	9.8
方案B (50m)	4.1	7.3

结果显示，精细化方案B的整体精度显著优于常规方案A。方案B的平面精度优于5厘米，高程精度优于8厘米，完全满足《城市测量规范》（CJJ/T 8-2011）中1:500比例尺地形图的精度要求（地物点相对于邻近图根点的点位中误差在城市建筑区不应大于 $\pm 0.25\text{m}$ ，本次结果远优于该标准）。这表明，在老旧城区进行无人机倾斜摄影时，适当降低飞行高度、提高影像重叠度是提升模型整体精度的有效途径。

4.2 空间异质性分析

尽管整体精度令人满意，但深入的空间分析揭示了精度在测区内并非均匀分布，而是呈现出强烈的异质性。为了系统地量化和对比不同微环境下的建模效果，本研究将测区划分为四类典型区域，并从模型完整性、点云密度及代表性精度三个方面进行综合评估。

表2：老旧城区不同微环境下三维建模效果对比

微环境类型	模型完整性	点云密度 (平均间距)	主要问题
开阔广场区域	非常完整	~ 1.5 cm	无显著问题，精度最优
普通建筑立面区域	基本完整	~ 3.0 cm	细节略有损失，方案B优于方案A
狭窄巷道区域	严重缺失 (底部)	> 10 cm (常空洞)	严重遮挡，缺乏有效影像覆盖
植被遮挡区域	不完整、 失真	> 10 cm (树下缺失)	树冠遮挡导致高程误判

如表2所示，开阔区域凭借其优越的观测条件，获

得了最优的建模质量。相比之下，狭窄巷道和植被遮挡区域成为精度的显著“洼地”，其点云密度急剧下降甚至完全缺失，直接导致了模型的几何失真和高程误差的急剧增大。这种空间上的精度异质性，深刻反映了老旧城区复杂物理环境对无人机倾斜摄影测量技术的根本性制约。

4.3 关键影响因素讨论

综合实验结果，可以归纳出影响老旧城区三维建模精度的几个关键因素：（1）飞行高度与重叠度：直接影响影像分辨率和多视角覆盖程度，是决定整体精度的基础。（2）地面控制点（GCPs）：在GNSS信号不佳的老城区，GCPs是保证模型绝对精度的生命线。本实验中GCPs的布设密度（约40米间距）被证明是有效的。（3）地物可见性：这是造成空间精度异质性的根本原因^[3]。任何无法被至少三张影像同时清晰观测到的区域，都无法被可靠地重建。（4）地物纹理与光照：决定了SfM/MVS算法特征匹配的成功率和可靠性。

5 提升建模精度的对策与建议

5.1 优化外业数据采集策略

面对老旧城区的复杂性，单一的飞行模式往往力不从心，必须采取更加灵活和智能的外业数据采集策略。一种有效的方法是实施分层分区飞行，即先在较高高度（如80米）进行大范围覆盖，再针对重点难点区域（如核心历史街区或超高层建筑群）在较低高度（如30-50米）进行补充飞行，以获取更丰富的立面信息。对于单体重要历史建筑或关键节点，则可采用无人机环绕飞行（Orbit Flight）模式，从各个角度对其进行密集拍摄，确保其360度无死角覆盖，从而极大提升单体模型的完整性和精度。此外，可以利用前期获取的低精度模型或已有地图数据，智能预测遮挡严重的区域，并在这些区域周边有针对性地增加GCPs密度，实现像控布设的智能化和精准化。

5.2 多源数据融合

单纯依赖无人机倾斜摄影数据难以彻底解决所有问题，特别是对于无人机无法到达的区域。因此，融合多源数据是突破瓶颈的关键路径。一种极具前景的方案是融合地面近景影像，即利用手持设备或地面机器人，对无人机无法覆盖的狭窄巷道、建筑底层等“最后一米”区域进行近景摄影测量，并将这些地面影像与航空影像进行联合空中三角测量，从而有效填补模型空洞，实现

“空-地”一体化无缝建模^[4]。另一种强大的互补手段是融合激光雷达（LiDAR）数据。无论是机载还是地面LiDAR，其主动式测距方式使其能够穿透部分植被，并且不依赖于地物纹理，可获取精确的几何结构。将LiDAR点云作为几何约束或直接用于生成高精度DSM，再与倾斜摄影提供的丰富纹理信息进行深度融合，是解决植被遮挡和弱纹理问题的有效方案。

5.3 改进内业处理算法

除了优化数据采集和融合，内业处理算法的革新也是提升精度的重要方向。近年来，深度学习技术为三维重建带来了新的可能性。可以利用深度神经网络，从低质量或多视角不充分的影像中推断出缺失的几何结构和纹理。例如，训练一个专门的网络来“补全”被遮挡的建筑立面，或从稀疏、不完整的点云中生成更完整、拓朴正确的网格模型。此外，对于自动生成的模型，进行精细化的人工或半自动后处理仍然是不可或缺的环节。通过删除噪点、“鬼影”，修补小面积空洞，修正拓扑错误等操作，可以进一步提升模型的质量，以满足特定应用场景（如文化遗产数字化存档）的高标准要求。

6 结语

本文研究无人机倾斜摄影测量技术在老旧城区三维建模精度问题，得出主要结论：科学规划飞行方案、合理布设地面控制点时，该技术能构建高精度三维模型，整体平面和高程精度稳定优于5厘米和8厘米，满足大比例尺测绘及多数智慧城市应用需求。但模型精度空间异质性强，开阔区域精度高，狭窄巷道等区域是精度“洼地”，存在模型空洞等问题，根源在于目标地物多视角影像覆盖不足，几何遮挡等限制算法性能。未来应发展“空-地”一体化协同作业模式，融合多种技术手段，探索智能化建模与修复算法，为老旧城区数字化及管理提供空间信息支撑。

参考文献

- [1]张小星.城市三维建模中无人机倾斜摄影测量技术研究[J].新城建科技,2025,34(11):59-61.
- [2]欧阳凯.基于无人机倾斜摄影的测绘工程三维建模技术研究[J].工程技术研究,2025,10(21):228-230.
- [3]王潘,刘贺.基于无人机倾斜摄影的三维建模精度优化研究[J].中国新技术新产品,2025,(20):15-18.
- [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.