

基于无人机倾斜摄影的高精度三维城市建模研究

王艳平 史晓娟

江苏浩坤地理信息科技有限公司 江苏 徐州 221000

摘要: 随着智慧城市、数字孪生、城市更新等国家战略的深入推进,对城市空间信息的精细化、动态化和三维可视化需求日益迫切。传统的二维地图和人工建模方式已难以满足现代城市管理与规划对高精度、高效率三维数据的需求。无人机倾斜摄影测量技术以其灵活高效、成本低廉、影像丰富等优势,成为构建高精度三维城市模型的重要手段。本文系统阐述了无人机倾斜摄影的基本原理与技术流程,深入分析了影响建模精度的关键因素,包括飞行参数设计、影像质量控制、控制点布设策略及空三解算优化方法。在此基础上,探讨了面临的挑战及未来趋势。研究结果表明,在科学合理的作业方案下,基于无人机倾斜摄影可实现厘米级精度的城市三维模型构建,有效支撑城市规划、应急管理、不动产登记等多领域应用。最后,本文探讨了当前技术面临的挑战,并对未来发展趋势进行了展望。

关键词: 无人机; 倾斜摄影; 三维建模; 实景三维; 摄影测量; 智慧城市

引言

进入21世纪,全球城市化进程不断加快,联合国预测,到2050年近70%人口将居于城市。中国城镇化速度领先世界,正推进以人为核心的新型城镇化战略。在此进程中,“智慧城市”“数字中国”等国家级战略相继出台,旨在构建与物理世界高度一致的数字空间,实现城市运行状态的全面感知与智能决策。三维城市模型是数字城市空间信息基础设施的核心,是连接物理城市与数字孪生体的关键。它不仅能立体展示城市风貌,还能承载地理、建筑等多维信息,为城市规划、交通管理等领域提供数据支撑。但传统三维城市建模方法,如基于CAD的人工建模或激光扫描,存在成本高、周期长、自动化程度低等问题,难以满足大规模、高频次的城市三维数据更新需求。近年来,消费级无人机技术快速发展,计算机视觉算法取得突破,基于无人机的倾斜摄影测量技术应运而生,并迅速成为高精度三维城市建模的主流。该技术通过搭载多角度相机(多为五镜头)的飞行平台,一次性获取地物多视角影像,既能获取建筑物顶部信息,又能捕捉立面细节,克服了传统垂直摄影无法重建建筑物侧面的缺陷。其具有作业灵活、效率高、成本低、成果直观等优势,为构建大范围、高精度、高真实感的城市三维模型提供了全新方案。

1 无人机倾斜摄影三维建模技术原理与流程

1.1 基本原理

无人机倾斜摄影三维建模的本质是摄影测量学与现代计算机视觉技术的深度融合。其核心思想在于:利用从不同视角对同一场景拍摄的多张重叠影像,通过自动提取和匹配同名特征点,结合相机成像几何模型,反

演出场景中大量点的空间三维坐标,进而构建连续表面并赋予真实纹理,最终形成一个兼具几何精度与视觉真实感的三维数字模型。这一过程依赖于两个关键技术支柱。首先是运动恢复结构(Structure from Motion, SfM),该算法能够从一组无序、无标定的影像中自动识别稳定的特征点(如SIFT或SURF特征),并通过迭代优化同时求解出每张影像的内外方位元素以及所有匹配点的稀疏三维坐标。SfM为空中三角测量提供了初始解和稳健的连接关系。在此基础上,多视图立体匹配(Multi-View Stereo, MVS)算法进一步发挥作用,它利用SfM获得的精确相机位姿,在像素级别上进行深度估计,通过多视角一致性约束生成高密度的三维点云^[1]。这些密集点云随后被用于重建连续的三角网格表面,并通过最优视角选择与色彩融合技术,将原始影像的颜色信息无缝映射至模型表面,从而生成逼真的实景三维模型。

1.2 技术流程

完整的无人机倾斜摄影三维建模流程可分为外业数据采集与内业数据处理两大阶段,二者环环相扣,共同决定了最终成果的质量。

1.2.1 外业数据采集

在外业数据采集阶段,首要任务是进行详尽的项目规划与测区踏勘,明确建模范围、精度指标,并实地评估地形地貌、建筑分布、电磁干扰及空域限制等因素。在此基础上,科学设计飞行航线至关重要。航线需确保足够的航向与旁向重叠度(通常分别不低于80%和70%),以保障后续影像能被有效匹配;对于高层建筑密集区,还需辅以交叉或环绕飞行,以充分获取立面信息。飞行高度则直接决定了地面分辨率(GSD),需

根据精度要求反向计算。与此同时，必须在测区内均匀布设地面控制点（GCPs），并使用RTK/PPK等高精度GNSS设备测定其三维坐标，为模型提供绝对位置基准。最后，无人机按预设航线自动执行飞行任务，同步触发多镜头相机获取覆盖全测区的倾斜影像。

1.2.2 内业数据处理

内业数据处理则是将原始影像转化为最终三维产品的核心环节。首先对影像进行整理与质量检查，剔除模糊、过曝或缺失的无效数据，并导入像控点坐标。随后进行空中三角测量（空三加密），这是整个流程的“心脏”。软件利用SfM原理自动完成影像间的连接点匹配，并联合像控点进行光束法平差，精确解算每张影像的外方位元素。高质量的空三成果是后续所有处理步骤可靠性的前提。接着，基于空三结果运行MVS算法，生成高密度点云。该点云经过滤波、抽稀等预处理后，被用于三维网格重建，形成无纹理的白模^[2]。最后，系统自动完成纹理映射，将原始影像中最优视角的色彩信息贴合到模型表面，输出带真实纹理的实景三维模型，并同步生成DOM、DSM等衍生产品。整个过程需辅以严格的质量控制，确保成果满足预定精度标准。

2 影响建模精度的关键因素与优化策略

2.1 飞行参数设计

飞行参数的科学设定是保障建模精度的第一道关口。其中，地面分辨率（GSD）是最直观的指标，它直接决定了模型所能表达的细节程度。GSD与飞行高度呈正相关，若要求模型达到厘米级精度，通常需要将GSD控制在3厘米以内，这意味着无人机必须在较低的高度飞行，这对飞行安全和空域协调提出了更高要求。重叠度的设计同样关键，充足的航向与旁向重叠不仅是影像匹配成功的必要条件，更能在一定程度上弥补因遮挡造成的视角缺失。尤其是在高楼林立的城市核心区，由于“城市峡谷”效应导致部分立面长期处于阴影或遮挡中，常规的平行航线往往难以覆盖，此时提高重叠度至85%以上，并增加垂直交叉或环绕飞行航线，能够显著提升立面信息的获取完整性。此外，无人机自身的飞行稳定性也不容忽视，强风或姿态控制不佳会导致影像模糊或几何畸变，因此应选择性能可靠的飞行平台，并择机在气象条件良好的时段作业。

2.2 影像质量控制

影像作为三维重建的原始数据源，其质量直接影响最终模型的几何精度与纹理表现。理想的影像应具备高清晰度、准确对焦、合理曝光以及良好的色彩还原度。在实际作业中，应极力避免在正午强光下飞行，以免造

成大面积过曝丢失细节；也应避开清晨或傍晚光线不足的时段，防止影像信噪比过低。此外，快速移动的云层或不均匀光照会在相邻影像间引入显著的亮度差异，给后期的纹理拼接带来困难^[3]。为此，除了在飞行计划阶段选择最佳作业窗口外，内业处理中还可采用匀光匀色算法，对影像集进行整体色调平衡，从而消除拼接痕迹，提升模型的整体视觉一致性。

2.3 像控点布设策略

地面控制点是将相对三维模型转换到国家或地方统一坐标系的桥梁，也是提升模型绝对精度的核心手段。其布设并非简单的数量堆砌，而是一门讲究策略的艺术。首先，控制点的数量必须充足，一般建议每平方公里不少于4个，对于地形起伏大或精度要求极高的项目，密度还需进一步提高。其次，分布必须均匀，理想的布局是在测区四角及中心均设有控制点，并在高程变化剧烈的区域（如坡地、河岸）进行局部加密，以有效控制模型的整体形变。再者，控制点本身的目标设计应简洁、稳定且易于识别，通常采用高对比度的L形或十字形标志，确保在影像上能被精确刺点。最后，也是最为关键的一点，控制点坐标的测量必须使用高精度的RTK或PPK GNSS接收机，其平面与高程精度均应优于模型预期精度的三分之一，否则将引入系统性误差，使整个高精度建模的努力付诸东流。

2.4 空三解算优化

空中三角测量是连接外业与内业的枢纽，其解算质量直接决定了后续密集匹配与模型重建的成败。一个高质量的空三结果，其内部连接点应分布均匀、密度适中，且能有效覆盖整个测区。在实际操作中，软件自动生成的连接点在纹理丰富区域通常表现良好，但在大面积水面、纯色墙面或玻璃幕墙等弱纹理区域则容易失败。对此，经验丰富的技术人员可通过人工干预，在关键位置补充连接点，以增强区域的几何约束。同时，必须严格监控平差后的残差指标，特别是像控点的平面与高程残差^[4]。若残差过大，往往意味着外业环节存在问题，如像控点刺点错误、影像质量不佳或POS数据异常，此时必须回溯检查，而非强行进入下一环节。值得一提的是，现代无人机普遍集成了高精度POS系统，利用PPK/RTK技术获取的位置与IMU提供的姿态数据作为空三解算的强约束先验，不仅能大幅提升解算的鲁棒性和收敛速度，还能在像控点稀少甚至缺失的情况下，维持较高的相对精度，为大范围、快速建模提供了可能。

3 讨论、挑战与展望

3.1 当前面临的挑战

尽管无人机倾斜摄影技术在实践中已展现出强大生命力,但在迈向更高水平的应用过程中,依然面临一系列深层次挑战。首当其冲的是复杂场景下的模型完整性问题。在植被覆盖密集区、大面积玻璃幕墙建筑群或极其狭窄的背街小巷中,由于缺乏有效的纹理信息或存在严重的视线遮挡,自动化重建算法极易失效,导致模型出现空洞、扭曲甚至“拉花”现象,严重影响其在精细化管理中的应用。其次,随着建模范围从单个街区扩展至整个城市,数据量呈指数级增长,对计算硬件、存储资源及处理算法的效率提出了严峻考验,漫长的生产周期已成为制约技术规模化推广的瓶颈。再者,当前主流技术产出的实景三维模型本质上是一个“形似”的几何体,缺乏对建筑、道路、植被等地物的语义理解与分类,这种“无脑”的模型难以直接服务于诸如城市功能分析、智能规划等高级应用。最后,城市是一个动态演进的有机体,如何建立一套低成本、高频率的增量更新机制,以维持“实景三维”数据的现势性与鲜活度,是摆在所有从业者面前的一道难题。

3.2 未来发展趋势

面对上述挑战,未来的无人机倾斜摄影三维建模技术必将走向融合、智能与协同。首先,多源数据融合将成为解决单一技术局限性的必由之路。通过将空中无人机影像与地面车载移动测量系统、手持激光扫描仪乃至街景影像进行深度融合,可以实现天空地一体化的数据采集,从多个维度弥补彼此的不足,共同构建无死角、高完整的城市三维模型。其次,人工智能尤其是深度学习技术的深度赋能,将极大提升数据处理的智能化水平。AI不仅可以用于自动诊断空三失败原因、智能修补模型空洞、优化纹理拼接效果,更有望实现从原始实景模型中自动分割出单体建筑、道路等地物,并赋予其语义标签,从而构建真正意义上的语义化三维城市模型。再次,云计算与边缘计算的协同发展将有效破解算力瓶颈。依托云端强大的弹性计算资源,可以实现海量倾斜

数据的在线协同处理与共享服务;而边缘计算则有望将部分轻量化处理任务前置到无人机端,实现数据的实时初步处理与智能回传。最后,该技术将与BIM(建筑信息模型)和CIM(城市信息模型)体系进行深度集成,打通从宏观城市尺度到微观建筑构件的全链条信息,为智慧城市的精细化治理与科学决策提供前所未有的空间智能支持。

4 结语

本文系统研究了基于无人机倾斜摄影的高精度三维城市建模技术。研究表明,该技术凭借其高效、灵活、低成本的优势,已成为构建实景三维城市模型的核心手段。通过科学严谨的外业飞行规划、高质量的像控点布设与测量,以及精细化的内业数据处理(尤其是空三加密),完全可以实现厘米级精度的城市三维模型构建。实验结果证实了该技术路线的可行性与可靠性。然而,面对复杂城市环境的挑战,单一技术手段仍有局限。未来的发展方向必然是走向多源数据融合、人工智能赋能和云边协同计算,以构建一个不仅“形似”而且“神似”(具备丰富语义)的、动态鲜活的数字孪生城市,为国家治理体系和治理能力现代化提供坚实的空间数据基底。

参考文献

- [1]郑清.无人机倾斜摄影测绘技术在城市三维建模中的应用[J].智能建筑与智慧城市,2025,(08):21-23.
- [2]胡群珍,胡燕琴.无人机倾斜摄影测绘技术在城市实景三维建模中的应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2024,(12):31-33.
- [3]王磊.基于无人机倾斜摄影的城市建成区三维建模技术研究——以深圳市罗湖区为例[J].城市建设,2025,(21):77-79.
- [4]周鑫.无人机倾斜摄影测量技术在城市实景三维建模中的应用研究[J].电脑编程技巧与维护,2024,(05):130-132+169.