

基于无人机倾斜摄影测量的城市三维建模技术研究

韩超

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 陕西 西安 710100

摘要: 智慧城市等概念发展,对高精度城市三维模型需求迫切,传统建模方法有成本高、周期长等瓶颈。无人机倾斜摄影测量技术因灵活、高效、低成本和高精度,成为构建城市级实景三维模型核心手段。本文系统探讨其城市三维建模全流程技术体系:先阐述基本原理与核心优势;再详细剖析从前期航线规划、数据采集到后期空中三角测量等完整流程,针对城市环境关键难点提出优化策略;最后深入分析当前挑战,展望未来与激光雷达、人工智能深度融合及在新型测绘基准和实时建模方向的应用前景。研究表明,该技术是快速、精准、规模化获取城市三维空间信息的理想方案,技术体系日趋成熟,应用价值大。

关键词: 无人机;倾斜摄影测量;城市三维建模;实景三维;空中三角测量

引言

21世纪全球城市化加速,城市复杂性与动态性提升。“智慧城市”“数字中国”等国家战略提出,需构建与现实世界高度一致的城市三维空间信息底座以提升城市治理与公共服务水平。传统城市三维建模方法,如基于CAD的人工建模效率低、成本高且真实性难保证;车载移动测量系统受道路限制,无法获取建筑顶部等信息;卫星与有人机航测成本高、审批复杂、重访周期长且受天气影响大,难以满足城市动态更新与应急响应需求。而无人机倾斜摄影测量技术带来革命性方案,其在无人机平台搭载多角度相机组成的倾斜摄影系统,能一次性同步获取地物多视角影像,提高数据采集效率,完整记录建筑纹理信息,为生成高真实感、高精度实景三维模型奠定基础。因此,研究该技术对城市空间信息建设及智慧城市意义重大。

1 无人机倾斜摄影测量基本原理与技术优势

1.1 基本原理

无人机倾斜摄影测量的核心在于“多视角立体视觉”与“计算机视觉”的结合。其基本原理可以概括为以下三个层面:(1)数据采集层面:搭载五镜头倾斜相机的无人机按照预设航线飞行,每个曝光时刻,五个相机同步拍摄,分别获取垂直向下(Nadir)和四个倾斜方向(通常为前、后、左、右,倾角在 30° - 45° 之间)的影像。这使得地面任意一点至少能被三个不同视角的影像所覆盖,从而为后续的三维重建提供充足的冗余信息。(2)几何恢复层面:通过空中三角测量(AT),利用影像间的同名点(即同一地面点在不同影像上的投影点)建立连接关系,解算出所有影像的精确外方位元素(位置和姿态)以及加密点的三维坐标。这是一个基于光束

法平差的全局优化过程,是整个建模流程精度控制的关键。(3)三维重建层面:在获得精确的影像外方位元素后,利用密集匹配算法,对每张影像进行逐像素级别的匹配,生成海量的三维点云,即所谓的“密集点云”。这些点云精确地描述了地物表面的几何形态。最后,通过三角网构网(TIN)和自动纹理映射技术,将原始影像的纹理信息无缝贴合到TIN模型上,最终形成一个带有真实纹理的、连续的、可 360° 浏览的实景三维模型(通常称为“Mesh”模型)。

1.2 技术优势

相较于传统方法,无人机倾斜摄影测量在城市三维建模中展现出显著优势:一是高效率与低成本:无人机起降灵活,无需专用机场,单次飞行即可覆盖数平方公里的区域。数据采集周期短,人力成本和设备投入远低于有人机航测。二是高真实性与高信息量:直接利用真实世界的影像作为纹理,模型具有极高的视觉真实感。多角度影像完整记录了建筑物的顶部和立面细节,信息维度远超单一视角的正射影像。三是高精度:在合理的地面采样距离(GSD)和像控点布设下,模型的平面和高程精度均可达到厘米级,满足大比例尺(如1:500)地形图测绘的要求^[1]。四是自动化程度高:从数据处理到模型生成,大部分流程均可由专业软件自动完成,大大减少了人工干预,提升了生产效率。五是安全性与灵活性:可在危险、复杂或人员难以到达的区域(如高层建筑群、灾害现场)安全作业,适应性强。

2 城市三维建模技术流程与关键环节

2.1 外业数据采集

2.1.1 项目需求分析与技术设计

这一阶段始于详尽的项目需求分析与技术设计,需

明确模型的具体用途（如用于城市规划、不动产登记还是仿真推演）、所需的精度指标（通常以地面采样距离GSD来衡量）、覆盖范围以及最终成果的格式要求。在此基础上，选择合适的飞行平台（多旋翼或固定翼无人机）和倾斜相机载荷至关重要，这直接关系到作业效率和数据质量。为了保证模型的绝对地理精度，必须在测区内均匀布设地面控制点（GCPs），这些像控点应选择清晰、稳定、易于判读的地物拐角处，并使用RTK/PPK等高精度定位技术精确测定其三维坐标，同时布设独立的检查点用于最终的精度评估。

2.1.2 智能航线规划

对于平坦、规则的区域，常规的格网航线即可满足要求，但需仔细设置航高（以确定GSD）以及航向和旁向重叠度（城市区域通常建议不低于80%和70%，甚至更高以应对复杂的遮挡情况）。面对起伏较大的城市地形，则应采用仿地飞行航线，利用已有的数字表面模型（DSM）数据驱动无人机沿地形起伏飞行，从而确保整个测区GSD的一致性^[2]。而对于高楼林立的重点区域或单体建筑，仅靠常规格网航线往往不足以获取完整的立面信息，此时需要增加垂直或倾斜的环绕飞行（如井字形或十字交叉航线），以从更多角度捕捉被遮挡的细节。

2.1.3 数据采集执行

在具体的数据采集执行过程中，气象条件的选择至关重要，应尽量选择晴朗、无风或微风的天气，并避开雨、雪、雾以及会产生强烈阴影的侧光时段（通常上午10点至下午2点为佳）。飞行期间，机载的GNSS/IMU系统会持续记录每张影像的初始外方位元素（POS数据），为后续的天空三角测量提供可靠的初始值。飞行任务结束后，必须立即对采集的影像进行现场核查，检查其清晰度、是否存在模糊或过曝/欠曝现象，以及覆盖范围是否完整，一旦发现问题，应及时安排补飞，以免返工造成更大损失。

2.2 内业数据处理

2.2.1 数据预处理

首先进行数据预处理，包括将原始影像按不同相机视角进行分类整理，并导入对应的POS数据文件。随后，将外业精确测量的像控点坐标，在专业软件中准确地刺在所有包含该点的影像上，这是连接实地坐标系与影像坐标系的桥梁。

2.2.2 空中三角测量（空三）

软件首先会自动提取每张影像上的特征点（如SIFT、SURF等），并通过复杂的算法进行跨影像匹配，建立起大量的同名连接点。接着，系统会进行自由网平

差，仅利用这些影像间的内部几何关系，初步解算出各影像间的相对位置和姿态。最关键的一步是引入刺好的像控点，进行绝对定向，并执行全局的光束法平差^[3]。此过程通过迭代优化，同时调整所有影像的外方位元素和所有连接点的空间坐标，以最小化整体的重投影误差。空三报告中的各项精度指标，如控制点残差和均方根（RMS）误差，是评判此阶段成果质量的核心依据。

2.2.3 密集匹配与点云生成

在获得高精度的影像外方位元素后，系统进入密集匹配阶段。依托多视立体视觉（Multi-View Stereo, MVS）算法，软件会对影像进行逐像素级别的密集匹配，生成一个包含数亿乃至数十亿点的密集点云。这个点云极其精细地刻画了地物表面的真实几何形态，是后续三维模型构建的直接数据源。

2.2.4 三维网格（Mesh）构建与纹理映射

随后，基于该密集点云，通过泊松重建等先进的曲面重建算法，生成连续、封闭的三角网（TIN）模型，即三维网格（Mesh）。紧接着，自动纹理映射技术会为Mesh模型的每一个三角面片，智能地选择最优的、无遮挡且光照均匀的原始影像进行纹理贴图，从而赋予模型逼真的视觉效果。

2.2.5 模型修饰与单体化

自动生成的Mesh模型虽已初具规模，但往往存在一些瑕疵，如因遮挡或弱纹理导致的破洞、水面扭曲形成的不规则几何、或因匹配错误产生的悬浮物等。因此，模型修饰成为不可或缺的环节，需要借助DP-Modeler等专业工具进行人工或半自动的修补、平整和清理，以提升模型的整体整洁度和可用性。最后，为了让模型具备GIS属性查询和空间分析能力，还需对其进行单体化处理。常见的做法有两种：一种是在模型上叠加人工绘制的二维矢量轮廓，实现逻辑上的单体分离；另一种则是直接在三维模型上进行切割和重构，生成独立的三维实体，实现物理意义上的单体化，后者效果更佳但工作量也相应更大。

3 关键技术难点与优化策略

3.1 建筑物遮挡问题

高楼林立的城市峡谷效应，使得部分建筑立面、内部庭院、底层商铺等区域在常规航摄条件下无法被有效覆盖，从而在最终模型中形成数据缺失的“黑洞”。为应对这一难题，实践中通常采取多层次、多角度的综合飞行策略，即在常规格网航线的基础上，增加不同航高、不同倾角的补充航线，特别是针对重点区域进行低空环绕飞行，以最大限度地获取被遮挡面的信息。在极

端情况下,还可以辅以地面人员的手持设备进行贴近摄影,将地面影像与航拍影像进行联合空中三角测量,实现空地一体化的数据融合^[4]。未来,随着人工智能的发展,利用深度学习模型根据已有立面信息智能推断并补充缺失区域的几何与纹理,也将成为一种极具潜力的解决方案。

3.2 弱纹理与重复纹理区域

城市中大面积的玻璃幕墙、素色墙面、平静水面等区域,由于缺乏有效的纹理特征或存在高度相似的重复图案,使得密集匹配算法难以找到可靠的同名点,极易导致匹配失败,进而在模型上表现为孔洞或噪点。对此,一方面可以通过优化数据采集策略,例如在特定光照条件下飞行以增强纹理对比度;另一方面,在数据处理阶段,可以尝试融合其他数据源,如引入不受光照和纹理影响的机载或车载LiDAR点云数据,为这些困难区域提供坚实的几何约束。此外,针对特定区域,手动调整密集匹配算法的参数,如增大匹配窗口或放宽相似性阈值,有时也能取得一定的改善效果。

3.3 水面与透明物体处理

水面的镜面反射特性会干扰影像匹配,导致生成的水面几何形态扭曲失真;而透明的玻璃幕墙则几乎无法被光学影像有效记录,其背后的空间信息完全丢失。目前,最有效的处理方式仍是依赖后期的人工修饰。对于水面,通常将其简化为一个平整的平面,并赋予统一的水体材质,以保证视觉效果合理性。对于玻璃幕墙等透明结构,则可以结合城市规划或建筑设计的先验知识,用标准的几何体(如立方体)进行替代,并在可视化时赋予其半透明材质,从而在保证模型结构完整性的同时,兼顾一定的真实感。

4 挑战与未来展望

尽管无人机倾斜摄影测量技术已取得巨大成功,但仍面临一些挑战:一是数据处理效率:面对城市级海量数据,处理时间依然较长,对计算资源要求高。二是自动化与智能化水平:模型修饰、单体化等环节仍需大量人工干预。三是标准与规范缺失:在数据格式、精度评定、成果交付等方面缺乏统一的行业标准。未来发展趋

势主要体现在以下几个方面:(1)多源数据深度融合:无人机倾斜影像与LiDAR点云、地面街景、BIM模型的深度融合将成为主流。LiDAR提供精准几何骨架,倾斜影像提供真实纹理,BIM提供语义信息,共同构建“几何-纹理-语义”一体化的城市信息模型(CIM)。(2)人工智能深度赋能:AI将在各个环节发挥更大作用。例如,利用深度学习进行全自动、高精度的空三连接点匹配;智能识别并修复模型缺陷;实现建筑物、道路等地物的全自动语义分割与单体化。(3)云边协同与实时建模:借助5G和边缘计算技术,有望实现“飞行即建模”,即无人机在飞行过程中,数据实时回传至边缘服务器进行快速处理,生成初步模型,极大提升应急响应能力。

5 结语

本文系统地研究了基于无人机倾斜摄影测量的城市三维建模技术。研究表明,该技术通过其独特的多视角成像方式,能够高效、低成本地获取城市地物全方位的影像数据,并依托成熟的计算机视觉算法,自动化地生成高精度、高真实感的实景三维模型。文章详细阐述了从外业航线规划、数据采集到内业空三、密集匹配、模型构建与修饰的完整技术流程,并针对城市环境中普遍存在的遮挡、弱纹理等难点,提出了有效的优化策略。展望未来,随着多源数据融合、人工智能、云计算等前沿技术的不断融入,无人机倾斜摄影测量技术将变得更加智能、高效和强大。

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]肖梅萍.无人机倾斜摄影测量技术在城市实景三维模型重建中的应用[J].测绘与空间地理信息,2025,48(10):126-128.
- [3]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.
- [4]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.