

并将该均值作为当前像素的分割阈值。这种方式能够敏锐地捕捉到图像中不同区域的灰度变化,即使在光照条件剧烈变化的情况下,也能精准地适应局部特征。比如在测量受潮汐影响的泥质海岸时,海水退潮后留下的湿润沙滩与干燥沙滩在灰度上存在差异,同时不同区域的光照强度也不一致,均值自适应阈值法就可以针对每个像素的局部环境计算阈值,从而准确区分海水、沙滩与海岸线,极大地提高了分割的准确性和可靠性。

3.3 区域生长算法

区域生长算法在无人机海岸线测量数据处理中,以独特的“由点及面”的方式实现海岸线提取。该算法就像一位“画家”,从精心选定的“落笔点”(种子点)开始,按照特定的“绘画规则”(相似性准则),逐步将相邻且相似的像素“涂抹”在一起,最终勾勒出完整的海岸线区域轮廓,在处理复杂多变的海岸图像时展现出独特优势^[5]。

在无人机获取的海岸线测量图像中,种子点的选取是算法运行的起点,直接影响着最终的分割效果。种子点的获取方式主要有人工选取和自动检测两种。人工选取适用于对精度要求极高、图像特征复杂的测量任务。技术人员会根据自身经验和对测量区域的了解,在已知海岸线大致位置的区域,通过图像编辑软件手动标记像素作为种子点。例如,在测量一处岩质海岸时,技术人员可以在清晰可见的岩石与海水交界处选取像素点,确保种子点准确落在海岸线上。这种方式虽然耗时,但能保证种子点的准确性,尤其适用于小范围、高精度的测量场景。自动检测则借助图像处理算法,根据图像的灰度、颜色或纹理等特征自动识别出可能的种子点。比如利用边缘检测算法先初步确定海岸线的大致位置,然后在这些区域内选取具有代表性的像素作为种子点。自动检测方式效率高,适合处理大规模图像数据,但在复杂图像中可能存在误选的情况,需要后续进一步优化和筛选。相似性准则是区域生长算法的核心“规则”,它决定了哪些像素可以被纳入生长区域。常见的相似性度量依据图像的灰度值、颜色、纹理等特征展开。以灰度值为例,算法会设定

一个灰度差值阈值。在生长过程中,若某个相邻像素与种子点的灰度差值小于预设阈值,就认为该像素与种子点相似,将其纳入生长区域。在颜色特征方面,对于色彩丰富的海岸图像,如包含蓝色海水、金色沙滩和绿色植被的场景,算法会比较像素的RGB值或其他颜色空间的数值,判断相邻像素与种子点在颜色上的相似度。而基于纹理特征的相似性度量,则通过分析像素邻域内的纹理模式,如粗糙度、方向性等,来确定像素是否相似。例如,海水表面具有独特的波纹纹理,沙滩则呈现出颗粒状纹理,算法可以依据这些纹理差异,准确区分海水与沙滩区域,进而提取海岸线。在实际应用中,单一的相似性准则往往难以应对复杂多变的海岸图像,因此常将多种特征结合使用,以提高分割的准确性。

4 结语

文章系统探讨了无人机海岸线测量数据处理方法,深入分析了基于光谱、纹理和几何特征的影像提取方法,以及边缘检测、阈值分割、区域生长等核心算法。这些方法和算法相互补充,为无人机海岸线测量数据处理提供了多维度的技术支撑,有效提升了测量精度与效率。但在复杂环境适应性、算法实时性等方面仍存在改进空间。未来,需进一步探索多源数据融合与智能算法优化,推动无人机海岸线测量数据处理技术向更精准、高效、智能化方向发展。

参考文献

- [1] 谭志宏. 基于无人机倾斜摄影技术的海岸线提取与测量方法研究[J]. 华北自然资源, 2024, (06): 68-71.
- [2] 汪尧峰. 基于无人机遥感的海岸线提取与测量方法[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45 (10): 143-146.
- [3] 魏智东, 黄兴, 林瑞, 陈戈敦. 无人机倾斜摄影技术在海岸线修测中的应用[J]. 北京测绘, 2022, 36 (09): 1268-1273.
- [4] 孙玉超, 曾纪胜, 田松, 刘显博, 黄财京, 邵先成. 面向海岸线修测的无人机照片视频获取及管理研究[J]. 海洋技术学报, 2020, 39 (05): 13-18.
- [5] 吕立蕾, 董玉磊, 奉定平, 王荣林. 海岸线自动提取方法研究[J]. 海洋测绘, 2019, 39 (04): 57-60.

Analysis on the accuracy of urban 3D modeling based on UAV oblique photography technology

Xiaojing Zhao

Hebei Second Surveying and Mapping Institute, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract

With the accelerated development of smart city construction, 3D real-scene modeling has emerged as a key technology for spatial management and decision-making support, becoming a research hotspot. This paper focuses on UAV oblique photography, systematically outlining its modeling process and critical technical pathways while identifying influencing factors such as image resolution, flight path design, control point deployment, and algorithm selection. Using 0.6 km² core area five-camera oblique data from a city, we compare model accuracy (RMSE_{xy}, RMSE_z, texture clarity) between PIX4D and ContextCapture under different parameter combinations. Results indicate that ContextCapture demonstrates superior elevation accuracy (average 3.8 cm), while PIX4D excels in planar error (approximately 4.3 cm) and texture detail representation. Finally, precision optimization strategies and error control methods are proposed to provide technical references for urban-level 3D modeling process design.

Keywords

UAV; oblique photography; 3D modeling; precision analysis; urban modeling

基于无人机倾斜摄影技术的城市三维建模精度分析研究

赵晓静

河北省第二测绘院, 中国·河北 石家庄 050000

摘要

随着智慧城市建设提速, 三维实景建模作为空间管理与决策支持的重要技术, 逐渐成为研究热点。本文以无人机倾斜摄影为核心, 梳理其建模流程与关键技术路径, 识别影像分辨率、航线设计、控制点布设及算法选型等影响因素。基于某市0.6 km²核心区五镜头倾斜数据, 对比PIX4D和ContextCapture在不同参数组合下的模型精度(RMSE_{xy}、RMSE_z、纹理清晰度等)。结果表明: ContextCapture在高程精度(平均3.8 cm)更优, 而PIX4D在平面误差(约4.3 cm)及纹理细节表现方面具有优势。最后提出精度优化策略与误差控制方法, 旨在为城市级三维建模流程设计提供技术参考。

关键词

无人机; 倾斜摄影; 三维建模; 精度分析; 城市建模

1 引言

面对精细化城市三维建模的需求, 相较于传统航空摄影测量手段, 无人机倾斜摄影越来越多地应用于城市空间三维信息数据的采集。使用无人机搭载多镜头相机, 从多个角度采集地面影像数据, 突破了垂直摄影的视角局限性, 可高效获取建筑物的三维及立面等信息, 较大的克服了测量高密度、多层次、异构空间场景时存在的数据更新滞后、细节还原度不足等问题, 为精细化城市三维建模提供了较好的技术支撑。倾斜摄影测量技术虽已在城市管理、规划、应急、国土调查等领域获得初步应用, 但其在复杂城市环境下的建模精度尚存在诸多缺陷和不确定性因素。因此, 有必要开展对

使用无人机进行城市三维建模的精度进行分析研究, 以期从数据获取源头、控制点布设到建模算法优化等全过程开展技术解析与误差评估, 以提升和控制三维建模质量。

2 影响倾斜摄影三维建模精度的因素剖析

2.1 航测参数配置与飞行策略设计

在倾斜摄影三维建模流程中, 影像数据的获取质量直接决定建模精度的上限, 而航测参数的优化配置是保证数据质量的前提条件。无人机航飞参数包括: 飞行高度、航向与旁向重叠度、摄影基线长度、倾斜角度、航线布设方式等。通常情况下, 城市三维建模项目推荐的飞行高度一般控制在80–120 m之间, 搭配地面分辨率(GSD)不大于5 cm的相机, 以满足城市级空间信息的精度需求; 高重叠度(航向≥80%、旁向≥70%)不仅提高了影像冗余, 还增强了从无序的图像集中恢复相机的运动轨迹和场景三维几何信息的SfM算法(Structure from Motion)的匹配鲁棒性, 但在高密度

【作者简介】赵晓静(1988–), 女, 中国河北邯郸人, 本科, 助理工程师, 从事测绘工程研究。

建筑区域,增加重叠度则有助于减少遮挡造成的模型空洞^[1]。

飞行策略的合理性也是影响建模精度的重要因素。在城市高层区域,需重点考虑“视角覆盖率”指标 (View Redundancy), 以保证每一个高立面区域至少被两个倾斜相机从不同方向拍摄,才能还原其完整立面结构。当采用固定翼无人机时,应根据航线转弯半径优化边缘补拍策略;而对于多旋翼无人机,则可执行低空定点补拍任务以提升模型完整性。另外,飞行速度与快门速度的匹配也不可忽视,快门速度过慢将导致影像拖影、模糊,会降低影像特征稳定性,进而影响点云密度与精度。因此,应依据实际光照条件合理设定快门参数,必要时可引入高感光镜头或多次曝光技术予以补偿。

2.2 控制点布设方式与精度约束机制

地面控制点 (GCP) 作为三维建模中的绝对坐标参考,在空三解算过程中提供了必要的几何约束,是控制模型空间精度、消除系统误差和提升成图精度的核心要素。其布设不仅要求在数量上通常不低于总图幅的 6-8 个,还需在空间上满足“均匀+特征覆盖”的原则。即控制点应尽量均匀分布于建模区域边缘、中部以及关键立面变形区域,如街角、转折、立柱交汇处等。在城市环境中,由于地物遮挡密集、空中空间受限,常出现控制点遮挡、RTK 信号漂移或精度误差积累等问题^[2]。因此,需优先使用高精度 GNSS (RTK 或 PPK) 采集控制点坐标,并辅以全站仪或激光测距仪对关键控制点进行复测,以消除高差与遮挡对平差成果的扰动。此外,为应对高层建筑无法在地面设置像控点的情况,近年来逐渐采用“高程辅助约束+相对控制点融合”的方法,即将建筑顶部设置为相对控制参考点,通过立面配准算法实现建筑整体刚体约束,从而提升高层建筑物模型的高度精度一致性。控制点的冗余设计 (冗余点 ≥ 2) 与独立检核点设

置也有助于后期评估空三残差和建模几何精度,从而形成闭环控制机制。

2.3 数据处理流程与建模算法及参数对精度的影响

从原始影像到最终三维模型,涉及空三重建、点云匹配、三角网生成、纹理映射等多个数据处理阶段,其中各阶段使用的算法类型与参数配置对建模精度具有直接影响。空三加密阶段,常采用 Bundle Adjustment 光束法平差算法进行相对配准,该算法对初始控制点误差与匹配点误差敏感,通过最小化重投影误差来优化相机姿态、三维点坐标及成像参数。若特征点匹配精度低或基线设计不合理,易导致后续重建模型时出现漂移或倾斜。在稠密匹配阶段,多视点立体视觉算法 (MVS) 的视角选择策略、匹配代价函数形式 (如 ZSSD-N、Census 变换等)、遮挡处理机制将直接决定点云密度与重建完整性。部分软件 (如 PIX4D) 采用图像金字塔策略提升匹配速度,但在纹理边缘与遮挡区则精度损失明显;而使用三维建模软件 ContextCapture 会引入视角加权函数,在立面区域具有更优表现。因此,建模软件选择与参数调优不应机械套用,而应结合建模目的、区域特征与数据特点进行针对性配置。因此,作业时推荐在建模过程中设置多个子区域样本进行建模精度对比试验,形成最优算法路径与参数组合,确保全区域模型既满足几何精度要求,又具备良好的立体可视性与后续分析可用性。

综上所述,为了全面理清城市三维建模精度的影响因素,图 1 从数据获取、控制约束、环境干扰与算法路径四个维度构建了精度影响因素结构图。该图以“建模精度”为核心,逐层分解了导致精度波动的主要技术变量,有助于在建模流程设计阶段进行有针对性的参数优化与干扰抑制,构建完整的误差控制机制。

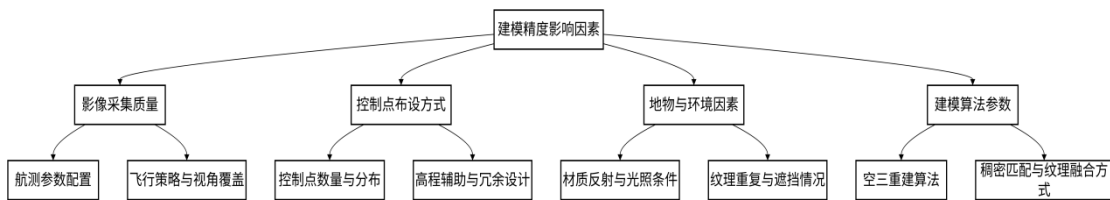


图 1 三维建模精度影响因素结构图

3 建模精度评估方法探索与实验设计实例

3.1 精度评估指标体系构建

三维建模的成果质量不仅体现在模型视觉效果的真实性和完整性上,更需通过量化指标对其空间几何精度与纹理表达质量进行系统评估。为此,研究中构建了一个针对无人机倾斜摄影建模特点的综合精度评估体系,主要包括以下五类指标:

平面位置精度 (平面位置的均方根误差公式, $RMSE_{xy}$) 与高程精度 ($RMSE_z$) 是评估模型几何准确性的核心指标。通过选取具有真实地理

坐标的独立检查点,计算建模成果点与实测点在 X、Y、Z 方向上的误差均方根值,衡量建模数据与真实地物之间的几何吻合程度。该指标直接反映空三配准与模型整体空间位置的精度水平^[3]。

模型完整率指在给定的建模区域内,三维模型无明显空洞、断裂或重建失败区域所占比例,反映了模型数据的空间覆盖能力和稠密匹配效果。该指标尤其适用于城市高密度区域的建模场景,其数值越高,表示模型越完整。

建筑几何保真度是对典型目标物体 (如矩形建筑、标准屋顶、立面平整度等) 几何形态与实际一致性的定性+定量混合指标,常通过人工判读与断面剖面对比方式进行评