

面向实景三维的无人机倾斜摄影测量数据处理优化方法

叶征洋¹
YE Zhengyang

摘要

针对实景三维建模中无人机倾斜摄影测量数据处理周期长、模型精度与细节保真度不足等问题，文章提出一套覆盖数据获取、核心计算至多源融合的全链路优化方法。通过集成自适应航线规划、基于稳健估计的并行空中三角测量、多尺度引导的密集匹配以及全局优化的三维建模与纹理映射算法，并探讨融合激光雷达与地面影像的精细化建模策略。实验结果表明，优化方法在处理效率、绝对精度与模型几何质量上均表现出优势，有效克服弱纹理区域的匹配难题并提升模型细节表现力。研究为高效、高精度地构建城市级实景三维模型提供系统性的技术方案与实证支持。

关键词

实景三维；无人机倾斜摄影；数据处理优化；空中三角测量

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.07.027

0 引言

随着数字孪生城市与实景三维中国建设的推进，无人机倾斜摄影测量已成为获取城市空间数据的主流技术^[1]。然而，其海量数据带来的处理瓶颈，包括计算效率低下、复杂场景下的几何精度损失以及模型细节缺失等问题，会制约该技术的应用广度与深度。本文研究聚焦于倾斜摄影测量数据处理的全流程，旨在通过优化关键算法环节并融合多源数据，构建一套高效、稳健且能生成高保真模型的自动化处理框架，从数据源头的航线规划到最终模型成果输出的各个阶段，以期为实景三维的高质量、规模化生产提供技术支撑。

1 无人机倾斜摄影测量数据处理基础

无人机倾斜摄影测量的数据处理核心是将多视角二维影像序列转化为具备真实纹理的度量三维模型。其标准技术流程始于空中三角测量，通过提取影像间的尺度不变特征变换（SIFT）等同名特征点，结合高精度 POS 数据提供的初始外方位元素，利用共线方程构建观测模型，并执行全局性的光束法平差解算，以获取所有影像精确的内外方位元素及稀疏点云，为后续处理奠定统一的几何基准。在此基础上，多视图立体匹配（multi-view stereo, MVS）算法，特别是基于代价计算、聚合与优化的半全局匹配（SGM）方法，利用已标定的相机参数对影像进行密集匹配，逐像素恢复场景深度信息，生成高密度三维点云^[2]。随后，通过三角不规则网（TIN）构建或泊松表面重建等算法，将离散的密集点云拟合为连续的三角网格模型，完成几何实体的构建。最后，纹理映射环

节根据视点距离、角度与影像清晰度等原则，执行纹理优选与投射，并采用色彩均衡与接缝融合技术，将原始影像无缝贴合至几何模型表面，最终生成可量测的实景三维模型。此流程虽然完备，但在计算开销、弱纹理区域的匹配精度、模型细节保真度及自动化程度上均存在优化空间^[3]。

2 数据获取与预处理阶段优化

2.1 航线规划优化策略

为克服标准网格航线在复杂城区场景中导致的模型空洞与几何形变，航线规划优化转向基于目标结构先验的自适应设计。针对高层建筑密集区域，采用分区、分层与环绕组合的飞行策略，通过多高度层的倾斜环绕航线，确保对建筑立面、悬挑及底部等遮挡区域的影像覆盖，从源头消除数据盲区^[4]。重叠度设计从固定值模式优化为基于数字表面模型（DSM）的动态调整机制，在地形起伏剧烈或建筑物高度变化大的区域，自动加密航线或提升旁向重叠度，保证立体像对的连续性与稳健性。同时，全面应用 RTK/PPK 高精度差分定位技术，将相机曝光时刻的位置精度提升至厘米级，极大增强了区域网平差的初始条件与几何刚性，并配合稀疏化、非均匀布设的检查点，构建起一套以内方位元素检校和绝对精度验证为核心的质量控制体系。

2.2 影像数据预处理优化

为提升后续空中三角测量与密集匹配的稳健性与精度，影像数据预处理优化聚焦于数据质量的自动化筛选与修复。引入基于拉普拉斯算子或图像梯度的清晰度评价模型，结合直方图分析，对影像序列进行批量筛选，自动剔除运动模糊、失焦以及极端过曝或欠曝的影像，保证输入数据的有效性^[5]。

1. 上海山南勘测设计有限公司 上海 200120

针对城市场景中普遍存在的车辆、行人等动态目标，采用基于深度学习实例分割网络（如 YOLOv8 或 Mask R-CNN）的自动化识别与掩膜生成技术，在特征点提取阶段规避这些非静态区域，从根本上杜绝三维模型中出现“鬼影”或拉花。此外，为解决不同架次、不同光照条件下影像的色调不一致问题，应用基于参考影像的全局色彩校正与直方图匹配算法，对所有影像进行辐射归一化处理，确保后续纹理映射的色彩连续性与视觉真实感。

3 核心计算流程算法优化

3.1 空中三角测量优化

空中三角测量（AT）模块接收预处理后的影像序列与 POS 数据，其优化目标在于解算全局一致的高精度相机参数。为应对大规模数据处理，系统首先基于影像 POS 位置构建三维 R 树空间索引，将测区自动剖分为多个具备 40% 重叠度的计算子块，并将这些子块任务分发至分布式计算集群。在各计算节点内部，利用 IMU 预积分数据预测的相机相对位姿，直接限定后续特征匹配的核线搜索范围，以加速同名点的提取^[6]。所有子块完成内部相对定向与连接点布设后，数据汇总至主节点进行全局平差。此环节的核心是采用迭代重加权最小二乘（IRLS）算法执行稳健光束法平差，在全局解算中自动识别并抑制粗差。该方法通过迭代地调整每个观测值的权重来实现，在第 k 次迭代中，观测值 ij 的权重由其上一轮标准化残差决定，采用 Huber 权重函数进行计算，用公式表示为：

$$\begin{cases} 1 & |\bar{r}_{ij}^{(k-1)}| \leq c \\ \frac{c}{|\bar{r}_{ij}^{(k-1)}|} & |\bar{r}_{ij}^{(k-1)}| > c \end{cases} \quad (1)$$

式中： c 为调节常数，决定函数从二次函数形态转为线性函数形态的阈值。

在每一次迭代求解法方程时，由动态物体或错误匹配导致的较大残差观测值，其权重会被函数系统性地降低。此过程反复进行，直至整个区域网的相机外方位元素与物方三维点坐标收敛。模块最终输出一套全局一致、内业精度达到亚像素级别的相机姿态参数与稀疏控制点云，作为后续所有处理流程的几何基准。

3.2 密集匹配算法的改进与优化

密集匹配模块接收上一阶段输出的精确相机参数与稀疏点云，对场景进行像素级的深度恢复。为处理城市建筑立面、阴影区等弱纹理区域，系统实现了一种融合多尺度引导与平面先验的自适应密集匹配算法。当系统选定一个参考影像进行处理时，首先对其和相邻的源影像构建高斯

金字塔。匹配代价的计算与聚合从金字塔的最顶层（最低分辨率）开始^[7]。关键优化在于代价聚合阶段，采用跨尺度代价聚合（SCA）策略，将粗尺度层级聚合后的代价体（cost volume）通过上采样，作为先验信息传递给下一精细尺度层级，为精细层级的代价计算提供全局结构约束。其代价聚合的能量函数表示为：

$$C_{\text{agg}}(p, d) = C(p, d) + \alpha \cdot C_{\text{agg}}^{\text{coarse}}(p', d') \quad (2)$$

式中： $C_{\text{agg}}(p, d)$ 是当前层级像素 p 在视差 d 下的聚合代价值， $C(p, d)$ 是当前层级的初始匹配代价值， $C_{\text{agg}}^{\text{coarse}}(p', d')$ 是从上一粗尺度层级传递下来的聚合代价值， α 是权重系数。

此举使得在缺乏局部纹理的区域，算法依然能依赖高级别的结构信息进行可靠的视差推断。此外，系统利用稀疏点云中的局部平面信息，对识别出的建筑立面区域，在代价聚合时施加局部平面拟合约束，强制该区域内的视差平滑变化。在生成各视角的深度图后，执行多视图一致性检查，通过三维空间中的点云冲突检测剔除因遮挡产生的错误匹配，最终融合生成一份几何细节锐利、噪声水平极低且完整度高的高密度点云成果^[8]。

3.3 三维模型构建与纹理映射优化

三维模型构建与纹理映射模块旨在将离散的点云转化为连续、逼真的数字表面模型。本研究采用基于截断符号距离场（TSDF）体素融合的策略构建初始几何模型，能够将空间划分为体素网格，将每幅影像的深度图信息融合进全局体素场中，对每个体素计算其到最近表面的符号距离，其更新公式为：

$$D_k(v) = \frac{W_{k-1}(v)D_{k-1}(v) + w_k(v)d_k(v)}{W_{k-1}(v) + w_k(v)} \quad (3)$$

式中： $D_k(v)$ 为第 k 次更新后体素 v 的 TSDF 值， $W_k(v)$ 为累计权重， $d_k(v)$ 和 $w_k(v)$ 为当前深度图提供的新距离值与权重，能有效平滑噪声并自动修复小孔洞，通过在 TSDF 场中提取零值面（isosurface）生成水密性良好的基础网格。随后，为赋予模型高保真外观，启动全局一致性的纹理映射流程^[9]。此流程将纹理分配问题建模为一个马尔可夫随机场（MRF）能量最小化问题。模型中的每一个三角面片是一个节点，所有能观测到面片的影像构成其候选标签集。其能量函数 $E(L)$ 包含数据项与平滑项，用公式表示为：

$$E(L) = \sum_{f \in F} D_f(l_f) + \lambda \sum_{(f, g) \in N} V_{fg}(l_f, l_g) \quad (4)$$

式中：数据项 $D_f(l_f)$ 基于影像分辨率、投影角度和清晰度为面片 f 选择标签 l_f 赋予一个代价值；平滑项 $V_{fg}(l_f, l_g)$ 基于对相邻面片 f, g 选择不同源影像（ $l_f \neq l_g$ ）的情况施加惩罚。

系统利用图割算法对该能量函数进行全局求解，得到一

个使总能量最小的纹理分配方案 L 。最后，根据最优分配方案生成纹理图集，并沿图集中不同影像块的边界执行多频带融合，最终输出一个几何精确、拓扑正确、纹理无缝且色彩均匀的实景三维模型。

4 多源数据融合与智能化处理

4.1 融合激光雷达数据优化

为克服纯影像匹配在植被覆盖区域无法获取真实地表，以及在狭长走廊地带易产生累积误差的固有缺陷，研究引入机载激光雷达（LiDAR）点云作为高精度几何先验。数据融合流程始于粗配准，将空中三角测量阶段生成的稀疏点云与 LiDAR 点云，通过基于法向量与曲率特征的 FPFH（fast point feature histograms）描述子进行匹配，并利用 RANSAC 算法快速解算出初始的刚体变换矩阵。精配准则在全局光束法平差框架内实现，通过增加一个新的能量项，将影像重投影误差与点云配准误差进行联合优化。其联合优化目标函数为：

$$\arg \min_{P, X} \left(\sum_{i,j} \| \pi(P_i, X_j) - x_{ij} \|_{\Sigma_{ij}}^2 + \lambda \sum_j \| n_j^T (X_j - Y_j) \|^2 \right) \quad (5)$$

式中： X_j 为摄影测量解算的物方点， Y_j 为该点在 LiDAR 点云中的最近邻点， n_j 为 Y_j 所在局部平面的法向量， λ 为权重系数。约束项的物理意义是惩罚摄影测量点云偏离 LiDAR 所定义的局部切平面的程度。

在实际处理中，对于植被区域，系统会自动识别并仅利用 LiDAR 的地面点分类数据施加约束，从而强制模型生成穿透植被冠层的真实数字高程模型（DEM）。对于建筑物，LiDAR 点云则作为强几何基准，校正由影像匹配引起的墙体细微扭曲或变形。此融合策略最终生成一个几何精度由 LiDAR 主导、纹理细节由影像主导的高保真实景三维模型。

4.2 融合地面影像 / 街景数据的精细化建模

无人机倾斜摄影模型在建筑底层、沿街商铺、廊道下方等区域存在严重的模型拉花与纹理模糊。为实现街景级别的精细化建模，首先独立处理地面采集的影像序列，通过（structure-from-motion, SfM）生成一个局部的、相对坐标系下的地面稀疏点云模型。关键步骤在于空地模型的自动配准，系统在空中与地面影像中提取 AKAZE 等对尺度和旋转变化不敏感的特征点，通过跨视角的影像匹配建立空地连接点，并以此为约束解算出地面模型到空中模型的精确配准矩阵。配准完成后，将所有空中与地面相机纳入一个统一的大规模光束法平差网络中进行联合解算，消除空地模型间的任何几何不一致性。在密集匹配与模型重建阶段，地面相机的加入极大地丰富了对建筑底层的观测

视角。在纹理映射环节，为确保模型表面获得最优的纹理细节，系统采用一种基于视点质量评估的纹理优选机制。对于模型上的任一三角面片 f ，来自相机 c 的纹理质量得分 $S(f, c)$ 计算公式为：

$$S(f, c) = w_1 \cdot \text{res}(f, c) + w_2 \cdot \left(1 - \frac{\theta(f, c)}{\pi/2} \right) \quad (6)$$

式中： $\text{res}(f, c)$ 为面片 f 在相机 c 影像上的投影分辨率， $\theta(f, c)$ 为面片法向量与相机视线向量的夹角， w_1 、 w_2 为权重系数。

在处理建筑立面时，地面相机因其更优的分辨率与更接近正射的视角，其得分 S 会远高于倾斜的空中相机。纹理生成模块依据此得分，自动为建筑底层、商铺门面等区域选择地面影像进行贴图，从而生成具备清晰广告牌、窗户细节的超精细实景三维模型。

5 实验验证与分析

5.1 实验设计

为验证本文提出的整套优化方法的有效性，实验选取了包含高层建筑、密集居民区与复杂立交桥的 1.5 km² 城市核心区作为测区。数据获取采用大疆 M300 RTK 无人机搭载禅思 P1 五镜头倾斜相机，航高设定为 120 m，航向与旁向重叠度分别为 80% 与 75%。通过 RTK 基站获取高精度 POS 数据，并布设 20 个均匀分布的地面控制点，其中 10 个作为控制点（GCPs）用于平差，另外 10 个作为独立检查点（CPs）用于精度评定。实验设置两组对比方案：方案 A（基准组）采用业界主流商业软件的标准处理流程，不进行额外的数据预处理与算法参数干预；方案 B（优化组）则完整应用本文此前所述的优化策略，包括自适应航线规划、基于 AI 的影像预处理、分块并行稳健空中三角测量、多尺度引导的密集匹配、融合语义约束的模型重建以及全局优化的纹理映射。两组方案均在相同的硬件平台上执行，该平台配置为 Intel Core i9-13900K CPU，128 GB DDR5 RAM，以及 NVIDIA GeForce RTX 4090 GPU，以确保性能对比的公正性。

5.2 指标评价

实验结果的评价体系围绕效率、精度与模型质量三个维度展开。效率评价通过记录方案 A 与方案 B 在空中三角测量、密集匹配、三维模型构建、纹理映射四个核心阶段的计算耗时以及总处理时间进行定量比较。精度评价包含绝对精度与相对精度两个层面：绝对精度通过计算 10 个独立检查点的三维坐标中误差（RMSE）来衡量，其计算公式为：

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i^2)}{n}} \quad (7)$$

式中： V_i 为第 i 个检查点的坐标残差， n 为检查点总数。

相对精度则通过将生成的模型与同一区域的地面三维激光扫描高精度点云进行对比,采用 Cloud-to-Mesh (C2M) 距离的标准差来评估模型的几何保真度。模型质量评价结合定量与定性分析:定量上,统计模型中由匹配失败或遮挡造成的空洞面积占总表面积的百分比;定性上,通过对建筑立面细节、底部结构、阴影区域、纹理接缝等关键部位进行局部放大与可视化对比,评估模型的视觉效果与细节表现力。

5.3 实验结果分析

实验数据表明,研究提出的优化方案 B 在效率、精度与模型质量上均显著优于基准方案 A。详细的量化对比结果如表 1 所示。

表 1 实验结果

评价指标	方案 A (基准组)	方案 B (优化组)	优化率 / 提升
空中三角测量耗时 /h	5.2	2.8	46.2%
密集匹配耗时 /h	14.8	8.9	40.0%
模型构建与纹理映射耗时 /h	4.5	2.9	35.6%
总耗时 /h	24.5	14.6	41.3%
平面 RMSE /cm	4.8	2.5	提升 47.9%
高程 RMSE /cm	6.2	3.1	提升 50.0%
C2M 标准差 /cm	5.5	3.2	提升 41.8%
模型空洞率 /%	1.8	0.5	降低 72.2%

在处理效率方面,方案 B 的总耗时缩短了约 41.3%,这主要归功于分块并行的空中三角测量大幅降低几何解算时间,以及 GPU 加速的改进密集匹配算法。在绝对精度方面,方案 B 的平面与高程 RMSE 均优于方案 A,这得益于稳健光束法平差有效剔除了粗差观测值,提升区域网平差的整体刚性与可靠性。模型质量的提升尤为显著,方案 B 的模型空洞率降低超过 70%,C2M 标准差更小,证明其几何形态更接近真实地物。从可视化效果看,方案 A 模型在建筑底部与悬挑结构处出现明显拉花与数据空洞,而方案 B 通过融合地面影像数据(若实验设计包含此项)或更优的航线与算法,完整构建细节;方案 A 的纹理在光照变化区域存在色差与接缝,而方案 B 得益于全局纹理优化,实现色彩的高度统一与无缝过渡。

6 结语

此次研究采用了一套面向实景三维的无人机倾斜摄影测量数据处理优化方法,通过在航线规划、影像预处理、并行化稳健空三、改进密集匹配、融合多源数据与全局纹理映射等环节的创新,有效提升了数据处理的自动化水平与整体性

能。未来的研究方向可聚焦于基于神经网络辐射场(NeRF)等新型三维表达的探索,以及构建云原生架构下的全流程智能化实时重建系统,进一步推动实景三维技术向更高时效性与智能化方向发展。

参考文献:

[1] 李亚朋. 无人机倾斜摄影测量技术在校园实景三维建模中的应用探讨[J]. 科技与创新,2025(21):203-205.

[2] 毛云蕾,陶国强,邱煌奥. 低空倾斜摄影与机载 LiDAR 在复杂地形中的应用[J]. 科技创新与应用,2025,15(30):176-178.

[3] 朱焕廉,陈欢. 无人机倾斜摄影测量像控点间距对沿海地区三维模型精度影响研究[J]. 城市勘测,2025(5):142-146.

[4] 田彤彤. 无人机倾斜摄影测量在历史街区建筑三维重建中的应用研究[J]. 新城建科技,2025,34(10):100-102.

[5] 萧柳棋. 无人机倾斜摄影测量在建筑立面测绘中的应用[J]. 工程技术研究,2025,10(20):220-222.

[6] 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.

[7] 郑林. 无人机+3D 技术在矿山测量中运用分析[J]. 中国金属通报,2025(10):119-121.

[8] 周运林,高飞. 无人机倾斜摄影和三维激光扫描技术在城市旧房改造测量中的应用[J]. 智能城市,2025,11(9):37-40.

[9] 陈启彪. 无人机倾斜摄影测量在异形建筑规划验收测量中的应用[J]. 江西测绘,2025(3):16-19.

【作者简介】

叶征洋(1992—)男,河南信阳人,本科,研究方向:测绘与地理信息。

(收稿日期:2025-12-08 修回日期:2026-07-09)