

Multi-level Fuzzy Comprehensive Evaluation of the Accuracy of UAV Oblique Photogrammetry Three-dimensional Modeling

Zhong Yin

Nanjing Engineering Higher Vocational School, Nanjing, Jiangsu, 210000, China

Abstract

In order to scientifically evaluate the accuracy of UAV oblique photogrammetry three-dimensional modeling, this article takes a three-dimensional modeling project as an example, proposes a precision evaluation model based on hierarchical analysis and fuzzy comprehensive evaluation through the analysis of system composition and modeling process. The weight distribution of each factor is obtained, and the precision level the instance is clarified. The results of the study show that the data acquisition link has the highest contribution, the flight height and the layout of control points are key influencing factors, and high consistency of the sorting results of the measured mean square error and the evaluation results verifies that the model has good discrimination.

Keywords

UAV oblique photogrammetry three-dimensional modeling accuracy; multi-level fuzzy; comprehensive evaluation.

无人机倾斜摄影测量三维建模精度多层次模糊综合评价

殷忠

江苏省南京工程高等职业学校, 中国·江苏南京 210000

摘要

为了科学评估无人机倾斜摄影测量三维建模精度, 本文以某三维建模项目为例, 通过分析系统构成、建模流程, 提出基于层次分析法、模糊综合评价的精度评价模型, 得出各因素权重分布, 明确实例精度等级。研究结果表明, 数据获取环节贡献度最高, 航高、控制点布设为关键影响因子, 实测中误差和评价结果排序的高度一致, 验证模型具备良好判别力。

关键词

无人机倾斜摄影测量; 三维建模精度; 多层次模糊; 综合评价

1 引言

随着智慧城市、数字园区等应用场景对于高精度实景三维模型需求快速增加, 无人机倾斜摄影测量凭借其多视角成像、高分辨率纹理获取、作业灵活等应用优势, 已经成为地理信息采集的关键技术。然而, 建模精度受到飞行参数、影像重叠度、控制点布设、空三解算、重建算法等误差影响, 具有高度不确定性, 传统评价方法难以量化复杂因子间的非线性交互关系。为此, 本文引入层次分析法、模糊综合评价相融合的多层次评估框架, 将建模系统按照误差来源分解为数据获取、处理流程、成果质量, 构建集成定性、定量的指标体系。该方法有效解决单一 AHP 主观性强、模糊评价维

度单一等问题, 综合判断三维模型几何精度、纹理完整性、空间一致性等属性, 为倾斜摄影建模质量提供可操作的快速评价工具。

2 无人机倾斜摄影测量三维建模基本原理

2.1 系统构成

无人机倾斜摄影测量三维建模系统由飞行平台、多视角成像载荷、地面控制网络、后处理软件模块构成, 形成覆盖“空、地、算”的一体化作业链。飞行平台通常采用多旋翼无人机, 搭载由一台下视相机、四台倾斜相机(前、后、左、右各 45° 倾角)组成的五镜头集成传感器阵列, 同步获取地物顶部、全向立面影像, 保证建筑立面纹理完整覆盖。该构型打破了传统正射航摄仅能采集顶面信息的局限性, 有效支撑复杂城市场景中建筑物高度、轮廓、材质的高保真还原。地面布设像控点和 POS(定位定姿系统)数据共同约束空三加密精度, 为后续密集匹配提供几何基准。ContextCapture、Pix4D 等配套软件通过多视影像匹配、点

【作者简介】殷忠(1970-), 男, 中国江苏泰兴人, 硕士, 副教授、高级工程师, 从事工程测量技术、无人机测绘技术的教学与应用研究。

云生成、网格构建、纹理映射等流程，自动输出具备真实地理坐标、厘米级细节的实景三维模型。

2.2 基本流程

无人机倾斜摄影测量三维建模严格遵循标准化的作业流程，依次包括任务提出、航线设计、数据获取、数据处理、模型构建、成果交付等环节。在任务提出阶段，工作人员要明确测区范围、模型精度等级、地面分辨率、应用场景，为后续参数设定提供依据；航线设计基于任务指标，综合考虑飞行高度、航向/旁向重叠度、相机倾角、像控点布设方案，保证影像几何冗余；数据获取阶段利用高精度 POS 系统。同步记录五镜头影像、时空姿态信息，并辅以地面控制点，全面提高绝对定位精度。数据处理包括影像匀光匀色、空中三角测量、密集匹配生成高密度点云等步骤，是精度保障的重要环节。随后通过三角网构建、纹理映射、多尺度优化等要点，完成实景三维模型制作，最终输出具备真实坐标、精细结构、逼真纹理的成果模型。该流程环环相扣，任何环节出现偏差均会导入最终模型，故需要全过程质量控制，从而保证成果满足工程级应用需求。

3 无人机倾斜摄影测量三维建模精度多层次模糊综合评价

3.1 研究区概况

本研究选取某三维建模项目为实验区，利用大疆精灵 4 无人机平台，开展倾斜摄影测量三维建模试验。飞行高度统一设置为 250 米，航向重叠率涵盖 66%、78% 两种工况，地面控制点布设策略则包括均匀布设、非均匀布设、单点布设、点组布设等模式，共形成六组对比方案。影像数据通过机载五镜头相机同步采集，地面控制点坐标采用 Trimble

RTK 高精度测量获取，航线规划由 Litichi 软件完成，三维模型重建则基于 ContextCapture Center 平台实现。该设计系统考察了控制点数量、空间分布、影像重叠度给建模精度带来的影响，为精度评价提供实证基础。

为了深入分析各方案性能差异，表 1 从控制点布设逻辑和精度响应关系角度进行分析。结果显示，控制点数量不足、分布不合理时，高程中误差高达 1.182-1.785 米，平面最大误差突破 5 米，表明稀疏或非均匀布设难以有效约束空三加密的几何自由度。相反，当采用四周均匀布设并沿航线加密，高程中误差下降为 0.111 米，平面平均误差仅为 0.216 米，大幅度提高测量精度。但值得注意的是，实例五和实例六在控制点数量相近，且均采用均匀布设时，精度表现高度一致，说明布设合理性比单纯增加点数具有较强的应用效益。

3.2 三维建模精度多层次模糊综合评价要点

3.2.1 评价体系构建

本文基于系统误差溯源思想，采用层次分析法 (AHP)，构建无人机倾斜摄影测量三维建模精度的多层次评价指标体系^[1]。该体系以“建模精度”为总目标层，分解为数据获取、数据处理、成果质量准则层。其中，数据获取层涵盖航高、影像重叠度、控制点数量、布设方式等影响因子；数据处理层注重分析空三加密精度、点云密度、匹配完整性；成果质量层则从几何精度、纹理真实性、模型完整性进行量化评估。各准则层下设置若干可测度的指标项，形成集成“目标、准则、指标”的管理结构。通过专家打分、一致性检验等方法，确定各层级权重，确保评价逻辑在反映技术流程内在关联的基础上，充分体现各环节对于最终精度的贡献差异。该体系打破了传统单一误差指标局限，结构性评估建模全过程影响因素，为后续模糊综合评价提供科学的框架基础(如图 1 所示)。

表 1 不同控制点布设方案对三维建模精度的影响特征

| 方案特征 | 控制点数量 | 布设方式 | 精度表现特征 |
|----------|-------|---------------|----------------------------|
| 低重叠+稀疏布设 | 17 | 四周+航线(重叠仅66%) | 高程中误差 0.22 m, 精度受到影像冗余不足限制 |
| 极简布设 | 6 | 非均匀 | 平面最大误差近 6 m, 空三稳定性差 |
| 角点单布 | 4 | 四周单点 | 高程最大误差 3.73 m, 边缘畸变明显 |
| 点组布设 | 8 | 四周点组 | 精度优于单点, 但内部区域控制力仍然存在不足 |
| 均匀点组布设 | 17 | 四周点组均匀 | 高程中误差 0.06 m, 整体精度最优 |
| 均匀+航线加密 | 19 | 四周均匀+沿航线布设 | 平面和高程误差均稳定在 0.2 m 内 |

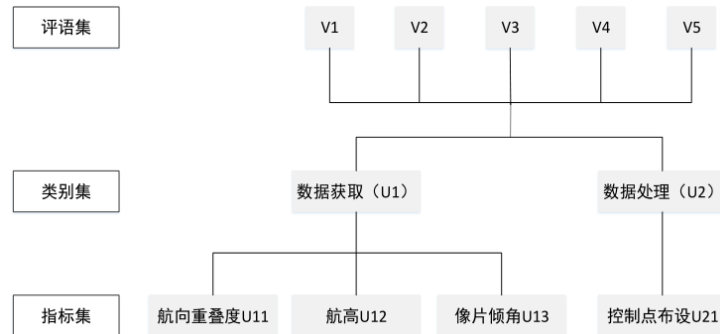


图 1 评价体系构建

3.2.2 指标权重的计算

为了科学量化不同影响因子对于无人机倾斜摄影测量三维建模精度的贡献程度,本文采用三角模糊数结合层次分析法(AHP)进行权重计算。通过构建判断矩阵,积极引入模糊一致性检验,有效降低专家主观判断的不确定性^[2]。数据显示,数据获取层(U₁)权重达到0.6129,高于数据处理层(U₂)的0.3871,表明飞行参数、控制点布设在精度控制中的主导作用。在二级指标中,航高(U₂)权重最高(0.5388),反映其在影像尺度、几何畸变的直接影响;航向重叠率(U₁₁)次之(0.1847),充分体现其对空三加密稳定性的关键支撑;像片倾角(U₁₃)权重为0.2765,说明多视角成像对立面纹理还原的重要性;控制点布设(U₂₁)作为唯一二级指标赋权为1,强调其在空三约束中的决定性地位^[3]。

3.2.3 最终结果的计算和处理

为了实现无人机倾斜摄影测量三维建模精度的科学化,本文采用多层次模糊综合评价模型进行系统计算。假设评价等级集为 $V = \{W_1, W_2, W_3, W_4, W_5\}$,分别代表“差、较差、一般、良好、优”五个精度等级。对实例1,首先在准则层进行模糊合成:

数据获取层权重向量记为 $X_1 = (w_{11}, w_{12}, w_{13}) = (0.1847, 0.5388, 0.2765)$,其中分 w_{11}, w_{12}, w_{13} 别对应航向重叠率、航高、像片倾角的权重;其隶属度矩阵S₁由各指标对五级精度的隶属度构成。采用加权平均型算子(M(·,+)),计算得:

$$T_1 = X_1 \cdot S_1 = (0, 0.0185, 0.5757, 0.1846, 0.1936)$$

数据处理层仅含控制点布设,权重 $X_2 = 1$,隶属度向量 $S_2 = (0, 0, 0.1, 0.3, 0.6)$,故:

$$T_2 = X_2 \cdot S_2 = (0, 0, 0.1, 0.3, 0.6)$$

再利用一级指标权重 $W = (w_1, w_2) = (0.6129, 0.3871)$ (w_1 为数据获取层权重; w_2 为数据处理层权重),对 T_1 和 T_2 进行上层合成:

$$S = W \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = (0, 0.0113, 0.3916, 0.2293, 0.3509)$$

依据最大隶属度原则, $\max(S) = 0.3916$ 对应 W_3 ,故实例1精度等级判定为“一般”(如表2所示)。

分析表明,控制点布设密度、空间均匀性是决定精度等级的核心因素,实例6由于控制点数量充足且分布优化,获评“优”,充分验证该评价模型的合理性。

3.3 评价结果

本文构建的多层次模糊综合评价模型注重分析位置精度,综合考量高程误差、水平误差,以中误差作为实测精度基准。如表3所示,六组实例的实测中误差排序为6(0.2540 m)<5(0.3103 m)<1(0.4215 m)<4(0.6623 m)<3(2.1064

m)<2(3.1057 m),和模型输出的精度等级排序完全一致。但值得注意的是,实例1虽然控制点布设较优,但由于航向重叠率仅为66%,导致空三稳定性不足,中误差高于实例5、6;而实例2、3因分布失当,中误差快速恶化,模型准确将其判为“很差”^[4]。该高度一致性验证了本评价体系在融合多样化误差因素后,能有效反映真实几何精度水平,具备良好的判别可靠性^[5]。

表2 六组实验模糊评价结果和精度等级

| 实例 | 模糊评价向量 S (差,较差,一般,良好,优) | 最大隶属度 | 精度等级 |
|----|--|--------|------|
| 1 | (0, 0.0113, 0.3916, 0.2293, 0.3509) | 0.3916 | 一般 |
| 2 | (0.3625, 0.0387, 0.2678, 0.1131, 0.2177) | 0.3625 | 差 |
| 3 | (0.2851, 0.1161, 0.2679, 0.2176) | 0.2851 | 差 |
| 4 | (0.1303, 0.2710, 0.1131, 0.2679, 0.1131, 0.2177) | 0.271 | 较差 |
| 5 | (0.0142, 0, 0.3066, 0.3814, 0.2951) | 0.3814 | 良好 |
| 6 | (0.0142, 0, 0.3066, 0.2680, 0.4113) | 0.4113 | 优 |

表3 实例精度等级与实测误差对照

| 实例 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 精度等级 | 一般 | 很差 | 很差 | 较差 | 较好 | 很好 |
| 高程平均误差(m) | 0.2842 | 2.5403 | 1.9844 | 0.4169 | 0.1357 | 0.1342 |
| 水平平均误差(m) | 0.3113 | 1.7866 | 0.7065 | 0.5146 | 0.2791 | 0.2157 |
| 中误差(m) | 0.4215 | 3.1057 | 2.1064 | 0.6623 | 0.3103 | 0.254 |

4 结语

本研究构建的多层次模糊综合评价体系,有效融合系统误差源,结构化评估建模全过程。权重分析体现数据获取阶段主导精度形成,控制点均匀布设、足够重叠率,可大幅度提高空三稳定性。实测误差和评价等级高度吻合,表明模型具备实际应用价值。该方法为倾斜摄影项目参数优化、质量控制提供了量化依据,推动三维建模由经验导向向数据驱动的科学决策发展。

参考文献

- [1] 董娟,李惠玲,张庆. 无人机倾斜摄影测量技术的应用探索[J]. 四川农业与农机,2024(1):49-50.
- [2] 许洪亮,赵中华,蒲章鹏,等. 复杂矿区的无人机倾斜摄影测量三维建模研究[J]. 有色金属(矿山部分),2025,77(5):47-55.
- [3] 刘小准. 无人机倾斜摄影测量在不动产测绘中的应用[J]. 科学技术创新,2025(1):72-75.
- [4] 张弘. 基于无人机倾斜摄影测量的城市洪涝风险区划分[J]. 测绘与空间地理信息,2025,48(5):154-156.
- [5] 郜捷. 浅析无人机倾斜摄影测量在矿山测量中的应用[J]. 中国金属通报,2025(1):225-227.