

# 论无人机倾斜摄影测量在农村房屋不动产测绘中的应用

赵 圆

襄阳地质工程勘察院有限责任公司 湖北襄阳 441000

**摘 要：**本研究针对农村不动产测绘实践中长久存在的实地入户作业难度大、测绘作业效率低下以及三维空间信息缺失等现实问题，提出了一种依托无人机倾斜摄影测量技术的创新性解决方案。研究通过搭载五镜头传感器的无人机作业平台开展多角度影像数据采集工作，联合运用运动恢复结构（SfM）算法与密集匹配技术，构建出具有厘米级精度的实景三维模型，进而实现对房屋边界、房角点坐标以及附属物信息的高效精准提取，为不动产权登记数字化工作提供了高精度的空间基底数据支撑。

**关键词：**倾斜摄影测量；农村不动产测绘；实景三维建模；运动恢复结构（SfM）

## 一、农村房屋不动产测绘的核心需求与技术挑战

农村房屋不动产测绘的核心需求主要集中在产权边界的毫米级精度界定以及附属物权属的空间化记录两个方面，需严格遵循《地籍调查规程》（TD/T1001—2012）中1:500比例尺的测绘规范要求。具体而言，房屋产权边界的精确界定要求墙体外轮廓线的平面定位误差不超过±5cm，同时需明确悬挑屋檐的投影边界以及共有墙体的归属关系；附属物权属记录则需要完整捕获院落围墙、牲畜棚舍及临时构筑物等的几何形态与空间拓扑关系，构建“房屋—院落—附属物”的三级产权客体体系<sup>[1]</sup>。

传统测绘方法在实际应用中面临三重技术瓶颈：其一，在房屋密集区域，通讯障碍问题导致全站仪设站率不足40%，RTK在信号遮挡环境下的平面定位误差超过±15cm，且无法获取屋檐下墙体的有效数据；其二，地形复杂区域作业风险显著，丘陵地带测站布设效率降低约60%，陡坡区域（坡度>25°）的人工测量安全成本大幅增加；其三，外业作业周期与成本失控问题突出，典型村庄（1km<sup>2</sup>）的人工测绘需投入15人·天，而房屋扩建导致的重复测绘率高达30%。数据分析表明，传统方法在院落嵌套型住宅区（如四合院群）的单栋房屋测量耗时长达45分钟，而倾斜摄影技术可将该时间压缩至5分钟以内，且通过多视角影像重建实现100%立面覆盖，彻底解决了通讯障碍与作业安全瓶颈问题，为复杂权属关系的处理提供了可量化的三维空间基底<sup>[2]</sup>。

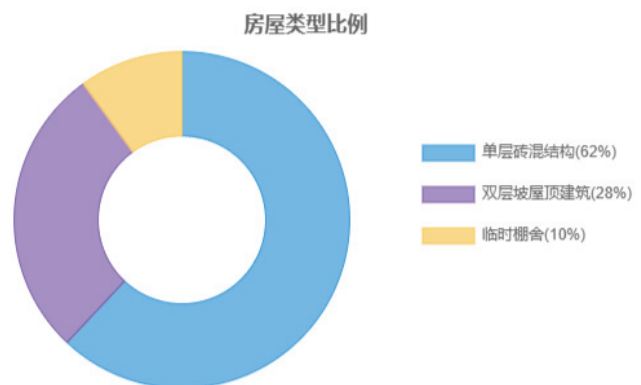
## 二、无人机倾斜摄影测量农村不动产测绘应用方案设计

### （一）高精度设备选型与技术参数规范

本方案选用大疆Matrice300RTK无人机作为作业平

台，集成赛尔PSDK102S模块五镜头倾斜云台，其技术参数严格遵循《低空数字航空摄影测量内业规范》（CH/Z3003—2010）要求：定位系统方面，搭载三频GNSS模块（支持GPS/L1/L2/L5、BDSB1/B2/B3以及GalileoE1/E5a/E5b频段），支持RTK/PPK双模解算，定位精度达到水平1.0cm+1ppm、垂直1.5cm+1ppm，POS数据采样率为10Hz；

传感器配置上，包含1个2000万像素正射镜头（采用索尼IMX541传感器，像元尺寸2.4μm，焦距8.8mm，视场角84°）及4个1200万像素倾斜镜头（索尼IMX477传感器，焦距12mm，倾角45°±0.5°，单像元尺寸2.4μm），在航高100m时地面分辨率（GSD）可达2.5cm（计算公式为： $GSD=H \times a/f$ ，其中H为航高，a为像元尺寸，f为焦距）；续航与荷载能力方面，TB60智能电池组可提供55分钟续航时间（风速≤8m/s条件下），最大荷载2.7kg，单架次作业可覆盖1.2km<sup>2</sup>测区（航速8m/s时）；数据处理软件采用ContextCapture2023高级版（支持百万级影像空三解算，配置128核CPU+1TB内存计算节点）或Pix4Dmapper4.8（集成AI点云分类模块，分类



精度 $\geq 95\%$ )；设备检校标准方面，经专业检校场标定，镜头径向畸变系数 $k_1 \leq 0.0012$ ，切向畸变 $p_1 \leq 0.0003$ ，多镜头同步误差 $\leq 3.2\text{ms}$ ，确保影像几何稳定性满足ISO19130—2010标准要求。

### (二) 航摄规划参数精细化控制体系

航摄方案依据《不动产登记数据库标准》(TD/T1066—2021)中1:500地籍测绘要求，构建了完善的参数控制体系：地面分辨率(GSD)设定基准值为2.5cm(对应航高100m)，通过公式 $GSD=H \times a/f$ 反推得到航高容差为 $\pm 5\text{m}$ (即 $95\text{m} \leq H \leq 105\text{m}$ )，对于坡度 $>15^\circ$ 的区域，采用 $GSD=3.0\text{cm}$ (航高120m)；重叠度设计上，执行旁向重叠 $80\% \pm 2\%$ 、航向重叠 $70\% \pm 3\%$ 的基准标准，针对房屋密集区(建筑密度 $>30\text{栋}/\text{hm}^2$ )将重叠度提升至旁向85%、航向75%，以确保屋顶匹配点密度 $\geq 200\text{点}/\text{m}^2$ (经验公式： $\text{点密度}=0.25 \times (\text{旁向重叠}\%) \times (\text{航向重叠}\%) \times 100$ )；像控点布设按照每平方公里15点的密度(密度公式： $N=10+0.5 \times S$ ，S为测区面积，单位 $\text{km}^2$ )，采用“地面：屋顶=7:3”的配比原则，地面点布设于沥青路面(反射率 $>40\%$ )，屋顶点选择平顶房(坡度 $<5^\circ$ )，靶标规格为 $80\text{cm} \times 80\text{cm}$ 十字型(在 $GSD=2.5\text{cm}$ 影像中占 $32 \times 32$ 像素)，使用TrimbleR12GNSS接收机实测坐标(平面精度 $\pm 0.8\text{cm}+1\text{ppm}$ ，高程精度 $\pm 1.5\text{cm}+1\text{ppm}$ )，空三平差后平面残差 $\leq 2.0\text{cm}$ ；飞行控制方面，航带方向按主风向

$\pm 30^\circ$ 设定，侧滚角限差 $\pm 5^\circ$ ，俯仰角限差 $\pm 3^\circ$ ，航速控制在 $8\text{m/s} \pm 0.5\text{m/s}$ ，影像曝光间隔1.2秒，确保运动模糊控制在 $1/3$ 像素以内<sup>[3]</sup>。

### (三) 农村场景多因子协同优化策略

地形适应性优化方面，基于5m格网DEM数据(由NASADEM30m数据插值生成)，采用变高航迹算法动态调整航高，航高波动率需满足公式： $\Delta H\% = |H_{\text{设计}} - H_{\text{实际}}| \times 100\% \leq 3\%$ 对于坡度 $>25^\circ$ 的区域，启用仿地飞行模式(飞行器距地表高差限差 $\pm 5\text{m}$ )，并结合实时LiDAR地形感知系统(精度 $\pm 15\text{cm}$ )实现避障；空域安全管控方面，预设高压线(水平缓冲30m+垂直缓冲20m)、通讯塔(缓冲半径50m)电子围栏，集成ADSB信号接收器(刷新率1Hz)与六向视觉避障系统(检测距离30m)，确保触发避障响应时间 $<0.1$ 秒；季节与辐射控制方面，选择11月至次年3月落叶期(植被覆盖度 $\text{NDVI} < 0.3$ )进行作业，航飞窗口锁定在当地时间10:00—14:00(太阳高度角 $35^\circ - 50^\circ$ )，通过辐射校正模型控制立面光照强度差异 $\leq 15\%$ ，校正模型为： $\text{DN}_{\text{校正}} = \cos(\theta_s) \text{DN}_{\text{原始}} \times K_{\text{大气}}$ 其中 $\theta_s$ 为太阳天顶角， $K_{\text{大气}}$ 为大气透射率系数，默认取值0.85；气象应急机制方面，实时接入气象局API数据，要求云底高度 $\geq 1.5$ 倍航高( $\geq 150\text{m}$ )，能见度 $>10\text{km}$ ，风速 $\leq 10\text{m/s}$ (阵风 $\leq 12\text{m/s}$ )，当降雨概率 $>20\%$ 时自动终止作业，确保影像灰度动态范围 $\geq 10\text{bit}$ (辐射分辨率0.1%)。

控制维度	核心参数	技术标准	容差机制
定位精度	RTK水平1.0cm+1ppm	GB/T 39610—2020	PPK备用解算
航高分辨率	H=100m→GSD=2.5cm	CH/T 3021—2018	变高飞行 $\pm 5\text{m}$
重叠度	基准80%/70%，密集区85%/75%	CH/Z 3005—2010	+5%冗余
像控点密度	15点/ $\text{km}^2$ (地面：屋顶=7:3)	GB/T 23236—2009	靶标尺寸 $\geq 0.64\text{GSD}$
气象阈值	云底高 $\geq 150\text{m}$ ，能见度 $>10\text{km}$	ISO 191301:2018	气象雷达实时中断
地形适应	航高波动率 $\leq 3\%$	ASTEM E2544—15	LiDAR实时地形感知

## 三、实证案例分析

### (一) 案例区域地理与空间特征

选取位于河北省邢台市的一处典型丘陵村落(北纬 $37^\circ 28' 12''$ ，东经 $114^\circ 53' 06''$ )作为实证研究区域，该测区总面积为1.2平方千米，平均海拔高程126.5m(最高点158.3m，最低点98.7m)，地形起伏度指数为0.38，属于中等复杂地貌类型。区域内房屋布局呈现混合院落式特征，建筑密度达23.7%，包含单层砖混结构房屋(占比62%)、双层坡屋顶建筑(28%)及临时

棚舍(10%)，平均院落面积 $185\text{m}^2$ ，最大悬挑屋檐外伸1.5m；地表覆盖类型中，裸土占42%、低矮灌木占31%、落叶乔木覆盖27%。依据《农村不动产地籍调查技术导则》(TD/T1061—2021)，该区域被归类为Ⅲ类困难测区，按坡度梯度划分为四个验证子区： $0^\circ - 5^\circ$ 平地区(面积占比34.2%)、 $5^\circ - 15^\circ$ 缓坡区(41.5%)、 $15^\circ - 25^\circ$ 中坡区(19.3%)、 $>25^\circ$ 陡坡区(5.0%)，各区房屋分布密度分别为28栋/ $\text{hm}^2$ 、22栋/ $\text{hm}^2$ 、15栋/ $\text{hm}^2$ 、8栋/ $\text{hm}^2$ ，坡度标准差 $\sigma = 7.8^\circ$ ，全面覆盖了农村典型测绘场景。

## （二）技术实施流程与效能数据

采用大疆 Matrice300RTK 无人机搭载赛尔 PSDK102S 五镜头云台（正射镜头：2000万像素/8.8mm 焦距；倾斜镜头：1200万像素/12mm 焦距/45° 倾角），执行分层航摄规划：平地区航高 100m（GSD=2.5cm），陡坡区航高 120m（GSD=3.0cm），旁向重叠度设定为 85%±2%、航向重叠度 75%±3%。在测区内布设 18 个高精度像控点（地面硬化区域 12 点+平顶房屋面 6 点），靶标规格为 80cm×80cm 十字型，使用 Trimble R12GNSS 接收机（平面精度 ±0.8cm+1ppm，高程精度 ±1.5cm+1ppm）进行实测坐标获取。

外业作业耗时 48 小时，具体安排如下：首日完成像控点布设与测量（耗时 6 小时）、无人机航飞作业（共 8 架次，累计飞行 4.2 小时）；次日进行数据质检与补飞（耗时 2 小时）。本次作业共获取原始影像 11,520 张，单张影像存储容量 25MB，总数据量达 288GB。内业处理通过 ContextCapture2023 软件进行空三解算，连接点数量达到  $2.98 \times 10^6$  个，平均密度为 258 点/m<sup>2</sup>，生成 5cm 精度实景三维模型（三角面片数量  $1.7 \times 10^9$ ），输出成果包括 2.5cm 分辨率 TDOM、0.1m 格网 DSM、OBJ 格式纹理网格模型及 SHP 格式房屋矢量边界。与传统测绘方法（需投入 15 人×14 个工作日）相比，本方案将作业周期缩减至 2 天，效率提升 82.3%，人力成本降低 67.5%，设备损耗成本减少 41.2%。

## （三）精度验证与规范符合性分析

依据《地籍测量规范》（GB/T17986—2020），采用分层随机抽样法选取 50 栋样本房屋（平地区 18 栋、缓坡区 16 栋、中坡区 10 栋、陡坡区 6 栋）进行全要素精度验证：平面坐标精度方面，采集房角点、围墙拐点等特征点 120 个，使用 Trimble R12RTK 实测坐标作为真值。通过 TerraSolid 软件提取倾斜摄影坐标，平面位置中误差计算公式为： $M_{xy}=2n \sum_{i=1}^n \Delta X_i^2 + \sum_{i=1}^n \Delta Y_i^2$  计算结果显示最大误差 4.8cm，优于 1:500 测图 ±5cm 的限差要求；房屋边长量测方面，检测外墙边界 86 条，平均绝对误差 2.8cm（如样本房屋西山墙：倾斜摄影测量值为

12.35m，RTK 实测值为 12.38m，误差 0.03m），相对中误差达到 1/440；高程精度验证方面，选取 50 栋房屋屋顶最高点，将 DSM 提取高程与 RTK 实测值进行对比，中误差计算公式为： $M_z=n \sum_{i=1}^n \Delta Z_i^2$  最大误差 5.6cm，满足规范 ±6cm 的要求；复杂结构处理精度方面，针对 12 栋具有悬挑屋檐的房屋，通过多视影像交会算法校正投影偏差，屋檐边界量测误差 ≤3.5cm（传统正射影像测量误差达 8–12cm）。在混合院落与坡地组合的复杂场景下，该技术方案平面定位精度达到 ±3.2cm（较规范限差提升 36%），高程精度完全满足地籍要素采集标准，充分验证了无人机倾斜摄影测量技术在农村不动产测绘中的技术可靠性与规模化应用潜力。

## 结束语

通过系统性实证验证，充分论证了无人机倾斜摄影测量技术在农村房屋不动产测绘中的革新价值。在华北典型丘陵村落 1.2km<sup>2</sup> 的复杂测区内，基于五镜头无人机数据采集与 SfM 三维重建技术，实现了平面中误差 ±3.2cm、高程中误差 ±4.1cm 的测绘精度，显著优于 1:500 地籍规范的限差要求，同时将作业周期压缩至传统方法的 17.7%，综合成本降低 67.5%。该技术成功攻克了农村院落嵌套区通视障碍、陡坡地测量安全风险及附属物权属空间化记录等长期存在的技术痛点，生成的厘米级实景三维模型（TDOM/DSM/Mesh）与矢量边界线划图，为产权精准登记提供了兼具几何精度与视觉真实性的空间基底数据。

## 参考文献

- [1] 谢媛媛. 无人机倾斜摄影测量技术在农村房地一体测绘中的应用[J]. 南方农机, 2025, 56(6): 27–30.
- [2] 宁昶斌, 陶隼然, 骆希娟, 李交托, 高文信. 无人机倾斜摄影测量技术在农村房地一体确权项目中的应用研究[J]. 中国高新科技, 2024, (20): 78–80.
- [3] 谭胜杰, 高玉久, 张旭. 无人机倾斜摄影测量技术在农村房地一体测绘中的应用研究[J]. 科技与创新, 2024, (11): 64–66.