

# 基于飞马 D2000 无人机在复杂地形中的三维建模研究

秦阳玉 赵帅 于磊

《中煤航测遥感集团有限公司》

## 摘要:

近年来,随着各省市对自然资源的有效保护和智能化管理越来越重视,实景三维模型的应用市场也变得越来越广泛。本项目借助飞马 D2000 无人机完成了地形复杂的云贵高原地区的实景三维数据生产,作业过程中采用了差分 GNSS 技术融合解算出高精度 POS 数据,有效减少了外业像控量测的工作量,并且保证了数据精度;在数据处理中飞马无人机管家各模块的功能应用在数据的采集和后处理上发挥了重要作用,大大提高了工作效率,为获取高质量三维模型成果奠定了基础。

## 关键词:

D2000 无人机; 差分 GNSS; 融合解算; 实景三维

## 1 引言

近年来,实景三维模型的应用领域越来越广泛,包括数字城市、城市规划、国土资源、地质勘探、文化保护和文化遗产等方面。其优势在于采用倾斜摄影测量技术,通过软件自动或半自动化处理影像数据后可生成具有真实坐标、可供量测的实景三维模型,极大的减少了人工的投入,成本相较于人工建模大大降低<sup>[1]</sup>。然而由于无人机易受到外界因素的影响,导致飞行姿态不稳,获取的数据难以满足精度要求,这一点在地形复杂的情况下表现尤为突出。

D2000 无人机系统是飞马全新研发的一款小型、长航时但同时能满足高精度测绘、遥感及视频应用的多旋翼无人机系统,可搭载多源数据获取模块,配置高精度差分 GNSS 板卡,同时标配网络 RTK、PPK 及其融合解算服务;支持高精度 POS 辅助空三,实现免像控应用。D2000 无人机系统还配备“无人机管家专业版(测量版)”软件,支持精准三维航线规划、三维实时飞行监测和 GPS 融合解算等功能。

本文针对地形复杂的云贵高原地区,采用了飞马 D2000 无人机,结合差分 GNSS 技术融合解算高精度 POS 数据的创新方法,既减少了外业像控测量的数量,又满足了项目的精度要求,为项目后期的规划、建设和智能化管理提供了有效的数据支持。

## 2 关键技术

差分 GNSS 技术包括 PPK 与 RTK 两种模式，PPK 为动态后差分处理模式，RTK 为实时差分模式。PPK 差分系统包括机载 GNSS 接收机和地面基站，两者同时接受卫星信号进行空间定位，事后通过 PPK 后处理解算软件处理数据，得到的数据精度较高；而 RTK 实时差分系统相较于 PPK 差分系统增加了飞控地面站，能实时联合解算出无人机的空间坐标位置和飞行姿态等数据参数，在航测过程中对信号的强弱有较高的要求，但在飞行监测与控制上实用性更高<sup>[2]</sup>。采用差分 GNSS 技术在确保平面精度和高程精度的情况下，外业像控数据数量可减少约 33%~60%，同时 GNSS 线元素和 IMU 角元素在相对定向速率和连接点提取精度方面有了较大的提高<sup>[3]</sup>。

D2000 无人机系统配置高精度差分 GNSS 板卡，标配网络 RTK 差分系统与 PPK 实时差分系统，确保无人机在复杂地形航测作业时信号连接正常；GPS 融合解算技术汲取 PPK 差分系统和 RTK 实时差分系统的优点，可提供高精度 POS 数据，极大地减少外业像控数据数量。

## 3 倾斜摄影测量数据获取

### 3.1 项目概况

本次倾斜摄影测量项目位于云贵高原上某自然风景区，面积约为 3.56 平方千米，测区地形起伏大，整体为山地地形，最高点海拔约 2515 米，最低点海拔约 350 米，位于测区中部的山峰拔地而起，是典型的喀斯特地貌，主峰垂直高差达百米；峰林间落差 300-400 米，测区植被种类丰富且覆盖面积广，天气变化剧烈，无人机航飞极为困难。

项目要求全区倾斜影像 GSD 优于 4 厘米，峰顶处 GSD 优于 3 厘米；建筑物基顶部高差精度小于等于 15 厘米，建筑物其他平面特征平面精度小于 30 厘米；三维模型要真实、全面还原测区生态环境和风景现状，以保障成果能够应用于后期针对于该区域开发的旅游系统平台中。

## 3.2 技术路线

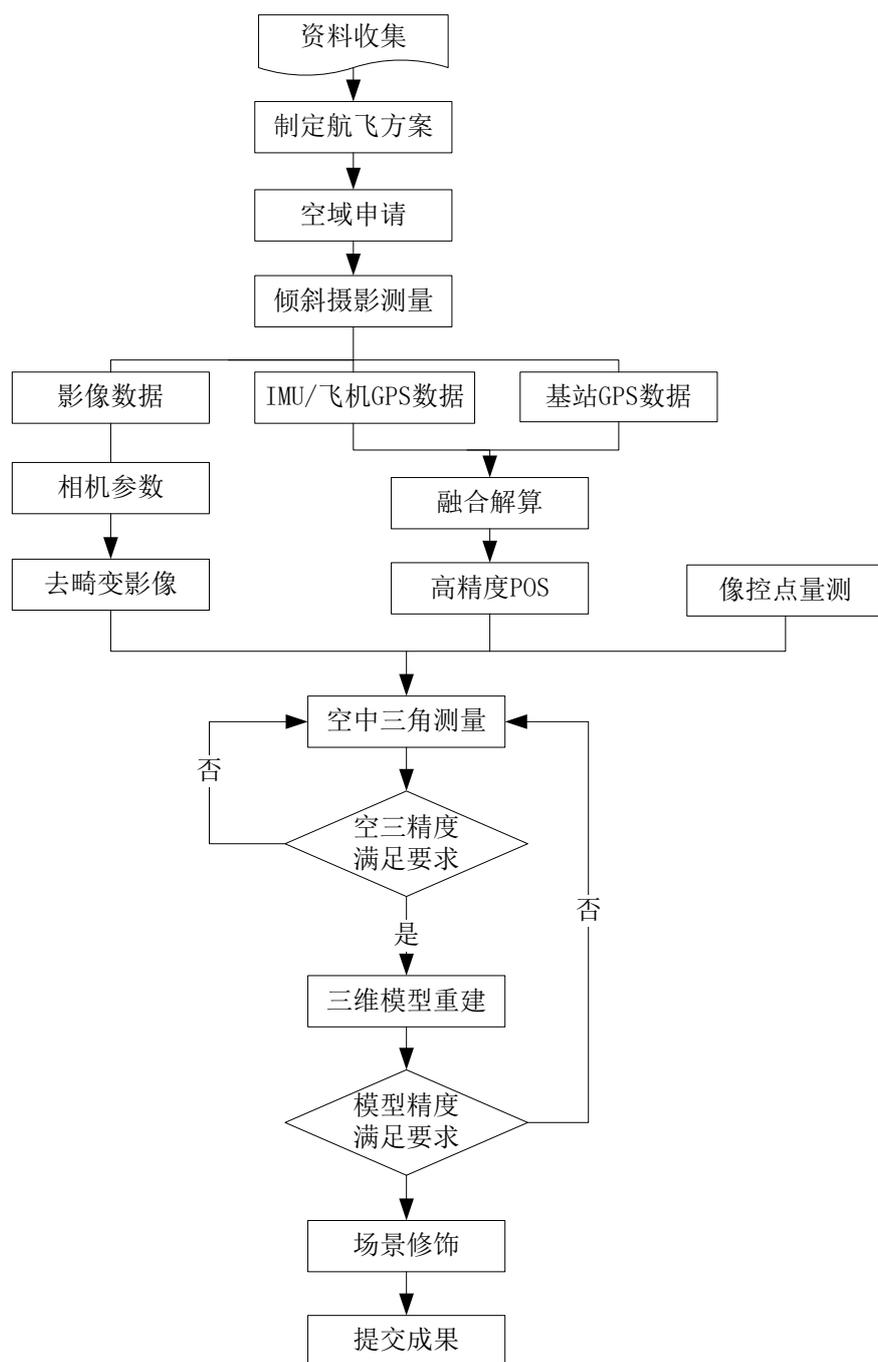


图 1 技术路线图

## 3.3 倾斜摄影测量数据获取

### 3.3.1 航线设计及影像获取

在进行航飞设计时发现，测区地形起伏较大，有较多的断崖和垂直岩壁等地貌，如果使用统一的航高敷设航线，较大的落差会导致影像分辨率的差异很大，这会极大地影响空三精度及三维实景模型精度。为改善不同的地形带来的影像分辨率的差异，本测区采用仿地飞行

的方式，依据事先获取的精确 DEM 数据，飞马无人机管家“智航线”模块高效的规划出变高航线方案保障了获取影像的地面分辨率统一，如图 2 所示。

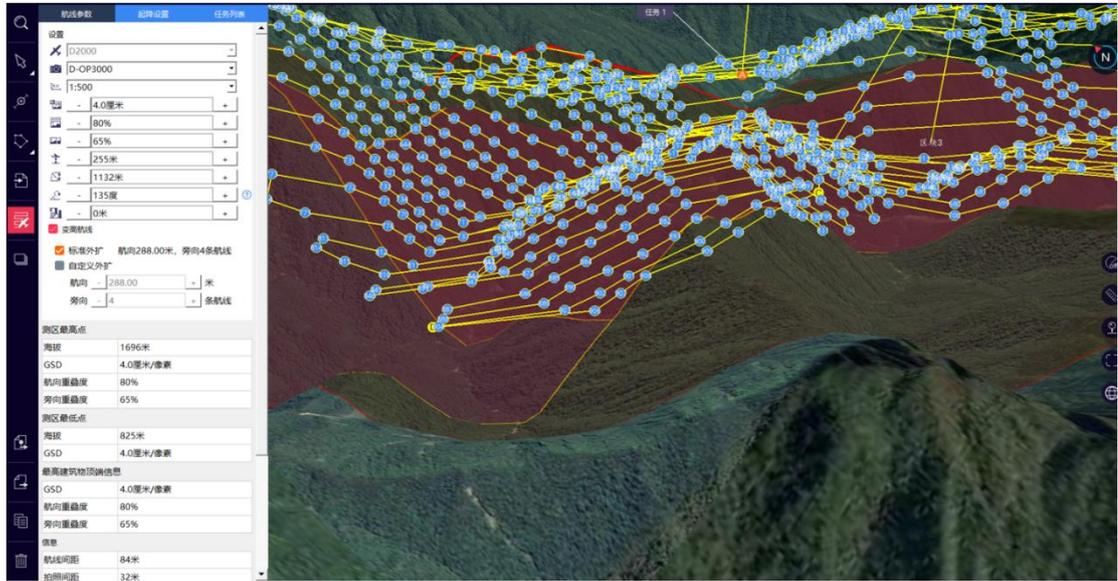


图 2 仿地飞行航线规划

除此以外，复杂地形还会影响无线电通信，山体阻断无线电信号造成无人机悬停不稳、自动返航或者失联等问题；海拔过高的地区由于空气稀薄还可能会造成飞机动力不足，导致飞机动力失效而失速<sup>[4]</sup>。飞马 D2000 无人机系统支持三维实时飞行监控，“智飞行”无人机飞行监控软件在实景三维场景下实时可视化监控飞机状态和参数，修改飞行状态，智能预警，确保了飞机任务的安全执行。

考虑到地形高差、山脊线、起飞降落点等因素，最终将测区划分为 5 个航飞分区，并在航飞时保证各分区间重叠大于 70m。为确保山顶处重点景观和建筑物群的精度与视觉效果，本项目对测区中心位置增设了一架次的航线，具体分区情况见图 3。在本项目中使用了“智飞行”无人机飞行监控软件的智能划分飞行区块的功能，实现了一键划分、接边重叠、紧贴测区航摄规划实际优化航线和自动续飞完成全区覆盖，极大地提高了作业效率。

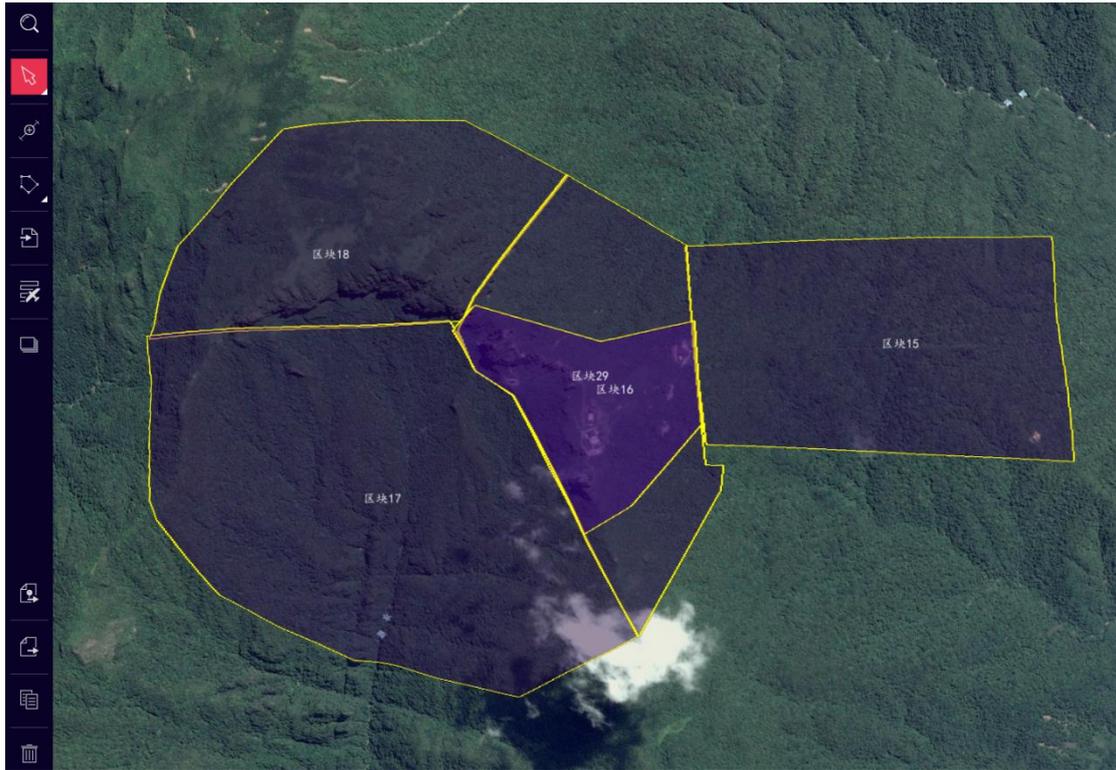


图3 测区分区情况

### 3.3.2 像控点测量

在倾斜摄影测量作业中，像控点是空三加密运算和三维实景建模的基础，对成果的绝对精度起着重要作用<sup>[5]</sup>。对测区内进行现场踏勘后发现由于整个区域内植被覆盖率很高，因此像控点只适合沿景区硬化路面布设，导致像控不能覆盖全区。因此本项目选用飞马 D2000 无人机搭载 D-OP3000 相机进行作业；由于 D2000 配置高精度差分 GNSS 板卡，同时标配网络 RTK、PPK 及其融合解算服务，支持高精度 POS 辅助空三，在满足平面精度和高程精度的同时，减少了外业像控量测数量。最终像控点布设如图 4。像控地标选用红色地胶制作成“L”形，飞行过后即可清除，对景区没有任何污染，测量地标内角作为像控点如图 5。

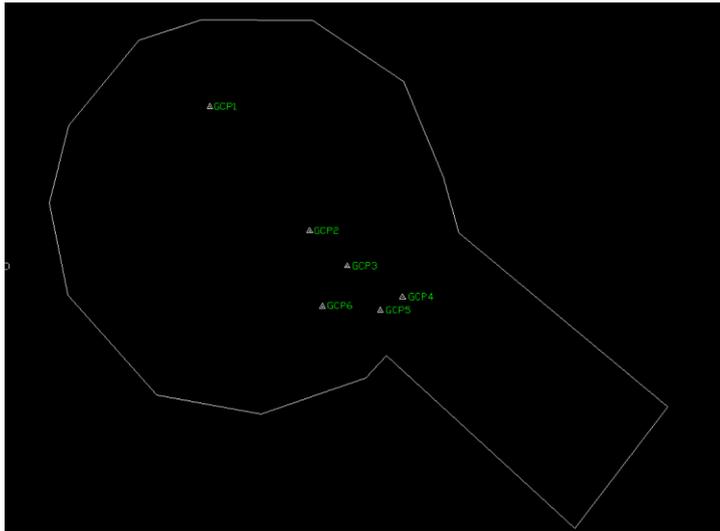


图 4 像控点布设情况

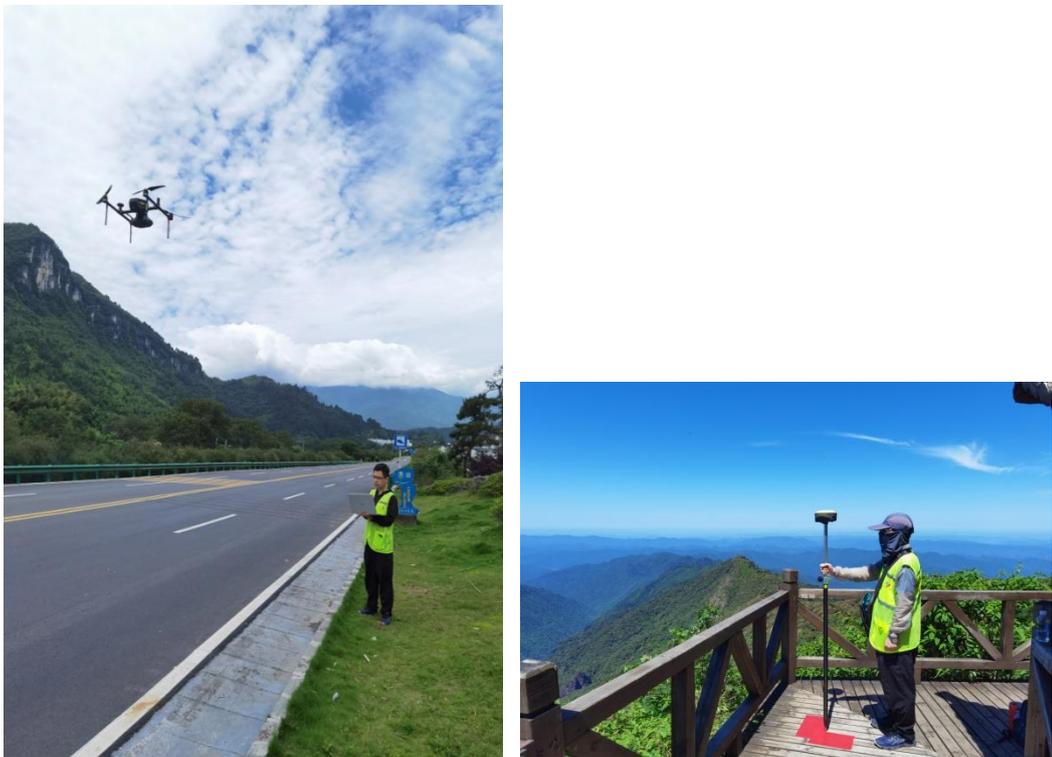


图 5 现场作业情况

## 4 高精度 POS 数据获取

飞马 D2000 无人机系统标配千寻服务，支持高可靠性的网络 RTK、PPK 及其融合解算，提高了作业的效率和数据精度。“智理图”模块支持基站静态数据和飞机 GPS 数据格式转换，转换后文件格式为.18o 和.18p。转换后的飞机 GPS 数据为天线相位中心坐标，默认 GNSS 系统为 GPS+北斗，对基站数据及机载 GPS 数据进行 PPK/RTK 融合差分解算，得到差分 POS 数

据，并基于飞行姿态、安置角度进行偏心改正，得到相机中心的高精度 POS 数据，如图 6。

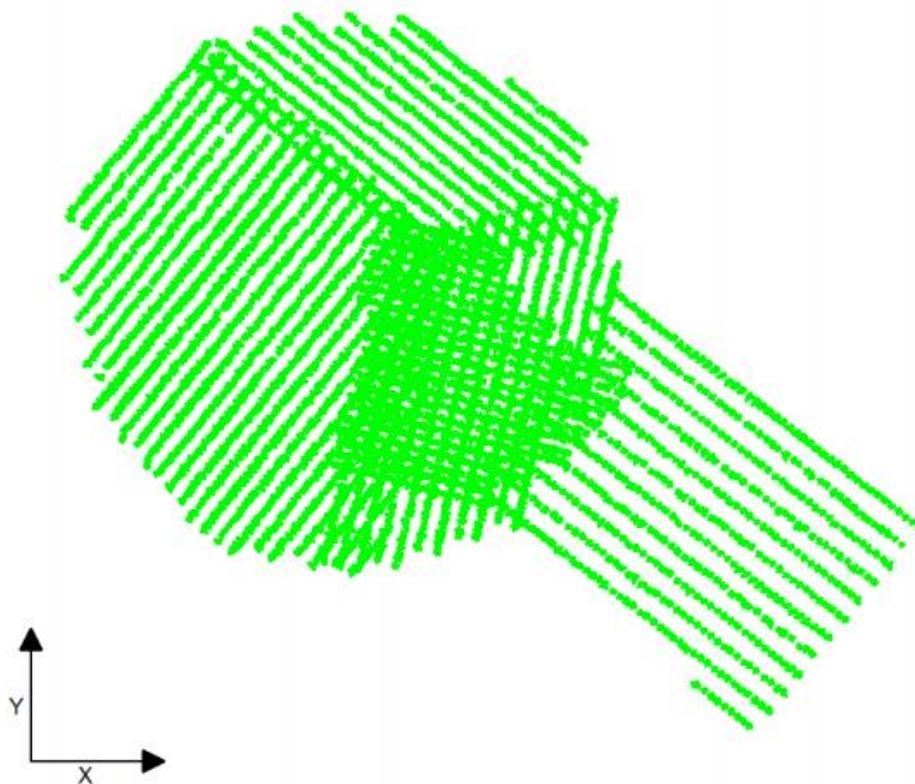


图 6 高精度 POS

## 5 数据处理

### 5.1 影像预处理

由于测区天气多变，获取的无人机影像数据会不可避免的出现的雾霾及色调不均一的情况，此外相机的畸变也会引起相对定向误差过大，从而影响空三精度，甚至导致空三平差无法进行，因此需事先进行影像的匀光匀色及去畸变<sup>[6]</sup>。在“智理图”模块中加入相机参数，全自动化处理得到去畸变影像。相机畸变参数如图 7，去畸变影像结果如图 8。

初始纠正

原始影像:  

相机参数   

焦距 (px):

影像宽 (px):  影像高 (px):

CCD宽 (mm):  CCD高 (mm):

像主点X (px):  像主点Y (px):

K1:  K2:  K3:

K4:  K5:  K6:

P1:  P2:  A:

B:

选项:  TIF  主点归零

输出目录:  

图 7 D-op3000 相机畸变参数



a.去畸变及匀光匀色前

b.去畸变及匀光匀色后

图 8 影像处理前后结果对比

## 5.2 空中三角测量

由于测区航摄分区数量多,高差较大且影像树木繁茂,同名点匹配困难,为保证空三整体平差精度,需要将 5 个架次超 18000 张影像合并为一个区域网进行空三解算,故选择某实景三维建模系统导入去畸变影像与高精度 POS 数据进行相对定向、像控点量测和绝对定向。空三结果如图 9。

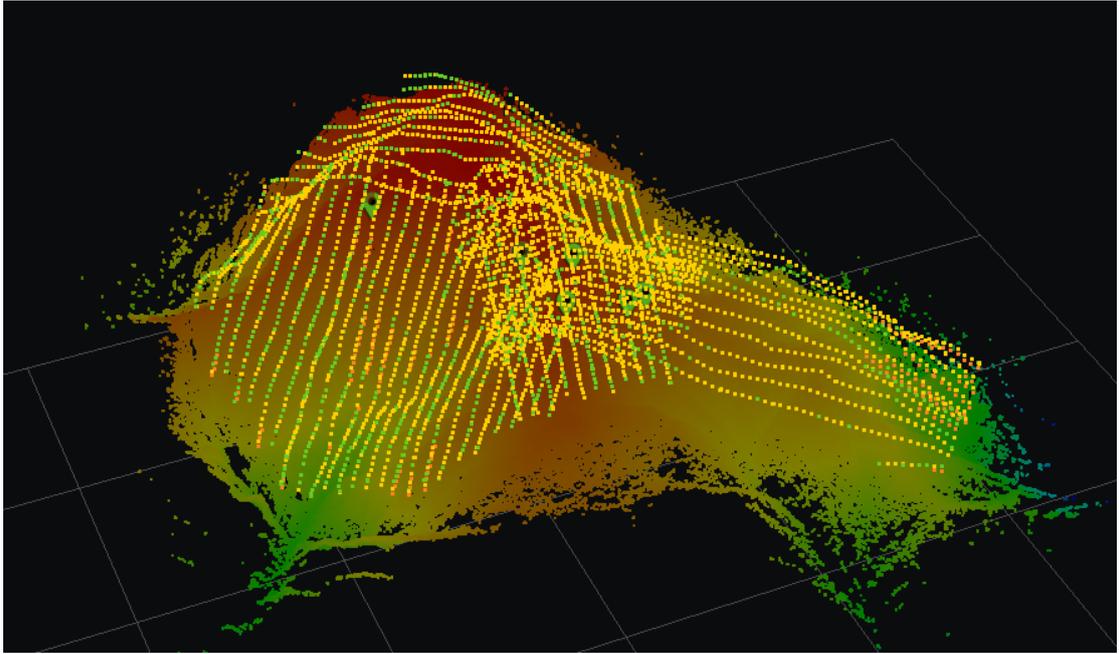


图9 空三成果

### 5.3 三维模型重建

在满足空三精度指标后，进行多视影像密集匹配、三维 TIN 网格构建、创建三维模型白模和纹理自动映射，生成的实景三维模型成果如图 10。



图 10 测区三维模型

### 5.4 场景修饰

由于影像数据多为复杂纹理，特征匹配较为困难，此外山间狭窄缝隙、阴暗面和树林茂密处点云匹配错误率较高，易造成模型三角面破损和纹理拉花，因此需要对三维模型进行修饰，如图 11。



图 11 场景修饰结果对比

## 6 精度评定

### 6.1 空三精度评定

本文列出了像控点及检查点的精度见表 1、表 2，像控点与检查点分布如图 12，由公式 (1) (2) 计算得出像控点水平中误差为  $\pm 0.002 m$ ，高程中误差为  $\pm 0.001 m$ ，符合《数字航空摄影测量空中三角测量规范》国家标准要求。

$$\begin{cases} \Delta s = \sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2} \\ \Delta h = h_i - h'_i \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} m_x = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2}{n}}, & m_y = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{n}} \\ m_s = \pm \sqrt{m_x^2 + m_y^2} \\ m_h = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h'_i)^2}{n}} \end{cases} \quad (2)$$

其中， $\Delta s$  和  $m_s$  分别为平面误差和中误差， $\Delta h$  和  $m_h$  为高程误差和中误差； $(x_i, y_i, h_i)$  和  $(x'_i, y'_i, h'_i)$  为第  $i$  个点的加密成果坐标和实测坐标。

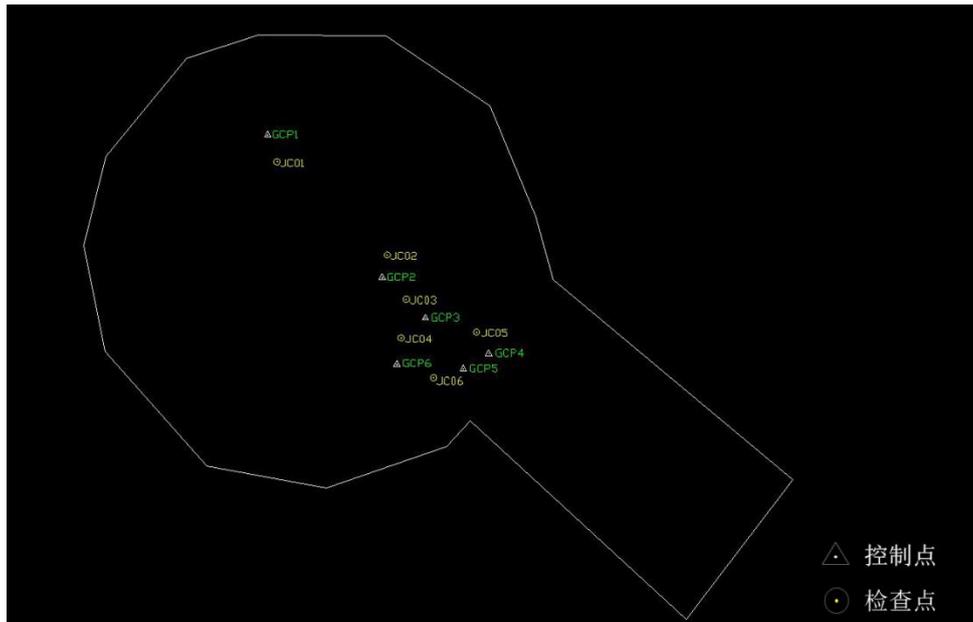


图 12 像控点与检查点分布图

表 1 像控点精度

点名	重投影误差/像素	平面误差/ $\pm m$	高程误差/ $\pm m$	三维误差/ $\pm m$
GCP1	0.201	0.003	0.002	0.003
GCP2	0.198	0.002	0.000	0.002
GCP3	0.202	0.002	0.000	0.002
GCP4	0.106	0.001	0.001	0.001
GCP5	0.257	0.001	0.001	0.002
GCP6	0.166	0.001	0.000	0.001

表 2 检查点精度

点名	重投影误差/像素	平面误差/ $\pm m$	高程误差/ $\pm m$	三维误差/ $\pm m$
JC01	0.578	0.055	0.044	0.044
JC02	0.644	0.079	0.070	0.106
JC03	0.468	0.044	0.056	0.071
JC04	0.587	0.061	0.048	0.078
JC05	0.656	0.082	0.073	0.110
JC06	0.367	0.037	0.039	0.054

## 6.2 三维模型精度评定

三维模型的精度评定可分为两方面：纹理精度和数学精度。纹理精度的评定是直观判断，观察模型的纹理、结构是否与实际相符；模型是否出现大面积漏洞，是否出现模型分层等情况；是否存在拉花现象。而数学精度包括平面精度和高程精度，将实地测量的控制点量测坐标与模型上对应控制点的模型坐标进行对比见表 3、表 4，由公式（1）（2）计算得出模型控制点水平中误差为  $\pm 0.060m$ ，高程中误差为  $\pm 0.051m$ ；模型检查点水平中误差为  $\pm 0.119$

$m$ ，高程中误差为 $\pm 0.091 m$ ，误差值符合项目精度要求。

表 3 控制点检测精度

点名	残差/ $m$			平面误差/ $m$	高程中误差/ $\pm m$
	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta h$		
GCP1	0.045	0.033	0.058	0.056	0.051
GCP2	0.024	-0.030	0.027	0.038	
GCP3	-0.041	0.056	0.030	0.069	
GCP4	0.060	0.046	-0.051	0.076	
GCP5	0.019	0.030	0.070	0.036	
GCP6	0.053	-0.049	0.054	0.072	

表 4 检查点检测精度

点名	残差/ $m$			平面误差/ $m$	高程中误差/ $\pm m$
	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta h$		
JC01	0.109	0.091	0.073	0.142	0.091
JC02	-0.090	0.067	0.051	0.112	
JC03	0.074	-0.048	0.078	0.088	
JC04	0.062	0.076	-0.094	0.098	
JC05	-0.125	0.084	0.137	0.150	
JC06	0.098	0.052	0.089	0.111	

## 7 结论

本项目借助飞马 D2000 无人机搭载 D-op3000 相机，采用了差分 GNSS 技术，融合解算出高精度 POS 数据辅助空三，得到高精度三维实景模型，通过该设备在测区中的应用，可得到以下结论：

(1) 飞马 D2000 无人机与“无人机管家专业版”软硬件配合，在航测外业中可支持航线规划、实时监测飞行状态和智能预警，保障飞机飞行安全，提高了外业作业安全性和工作效率。其便携性与安全性兼备，适用于大多数复杂地形的倾斜摄影测量项目航测作业。

(2) 飞马 D2000 无人机配置高精度差分 GNSS 板卡，同时标配网络 RTK、PPK 及其融合解算服务，支持高精度 POS 辅助空三，有效解决了复杂地形的倾斜摄影测量项目外业像控量测困难的问题，保证数据精度以及空三的顺利进行。

(3) 飞马“无人机管家专业版”各模块如“智航线”、“智飞行”和“智理图”在数据的采集和后处理上发挥了重要作用，大大提高了内业工作效率，为获得高质量三维模型成果提供了基础。

参考文献：

- [1] 周磊,梁爽,李海泉,南竣祥.无人机航摄系统在复杂地形应用的关键技术试验[J].测绘通报,2017(04):85-88.
- [2] 向荣荣,李红梅,刘铭扬.差分 GNSS 倾斜摄影在山区公路勘察设计中的应用[J].路基工程,2021(01):116-121.021(01):116-121.
- [3] 舒斯红,肖斌.基于差分 GNSS 无人机航测系统在数字航测中的应用研究[J].矿山测量,2017,45(05):48-51+90.
- [4] 白芝勇,朱峰,周建东,张智荣.无人机在高海拔、高落差地区航测的应用[J].测绘技术装备,2019,21(04):54-57.
- [5] 张允涛.免相控无人机航摄系统在棚户区改造 1 : 500 地形图中的应用[J].测绘通报,2019(S1):295-297+302.
- [6] 倪凯.基于精灵 4 RTK 无人机的 1 : 500 地形图免像控测量[J].测绘技术装备,2021,23(01):57-59.