

# 飞马 V100 助力山区复杂地形条件下的大比例尺测图应用

中铁第四勘察设计院集团有限公司 费亮

## 一、项目背景



图 1 重庆巫云开项目航飞测区概况

地形图是铁路和公路工程设计的基础资料，而目前生成测区地形图的技术手段包括航空或无人机摄影技术、机载 LiDAR 技术。相比于 LiDAR 技术，航空或无人机摄影技术具有机动性强、成本低、数据获取效率高、纹理信息丰富等优势，依然是地形图制作的主要技术手段。而随着近年来无人机制造工艺的进步和影像匹配技术的发展，无人机低空遥感和倾斜摄影技术开始在铁路和公路勘察设计中得到大力推广。

本课题依托中铁第四勘察设计院与中交第二公路勘察设计院合作项目（重庆巫溪至云阳至开州高速公路项目，简称巫云开项目），测区概况如图 1 所示。路线全长约 33.6Km，桥梁 30 座，其中特大桥 1 座；隧道 7 座，其中特长隧道 2 座；互通式立体交叉共 4 处，服务区 2 处。项目的主要任务是完成全线的 1: 2000 地形图作图任务（作业面积为 56km<sup>2</sup>）和互通区域的三维实景模型构建任务。该项目为交通行业典型的带状地形，具有很好的代表性。一方面，由于测区位于重庆山区，地形起伏较大，测区最大海拔高差达到 600m 以上，对无人机测图来说具有较大的挑战性。另一方面，由于公路测量规范对地形图成果的高程精度要求较高，给外业数据采集和内业成图都提出更高的要求。

## 二、飞马 v100 在山区大比例尺测图应用中的技术路线

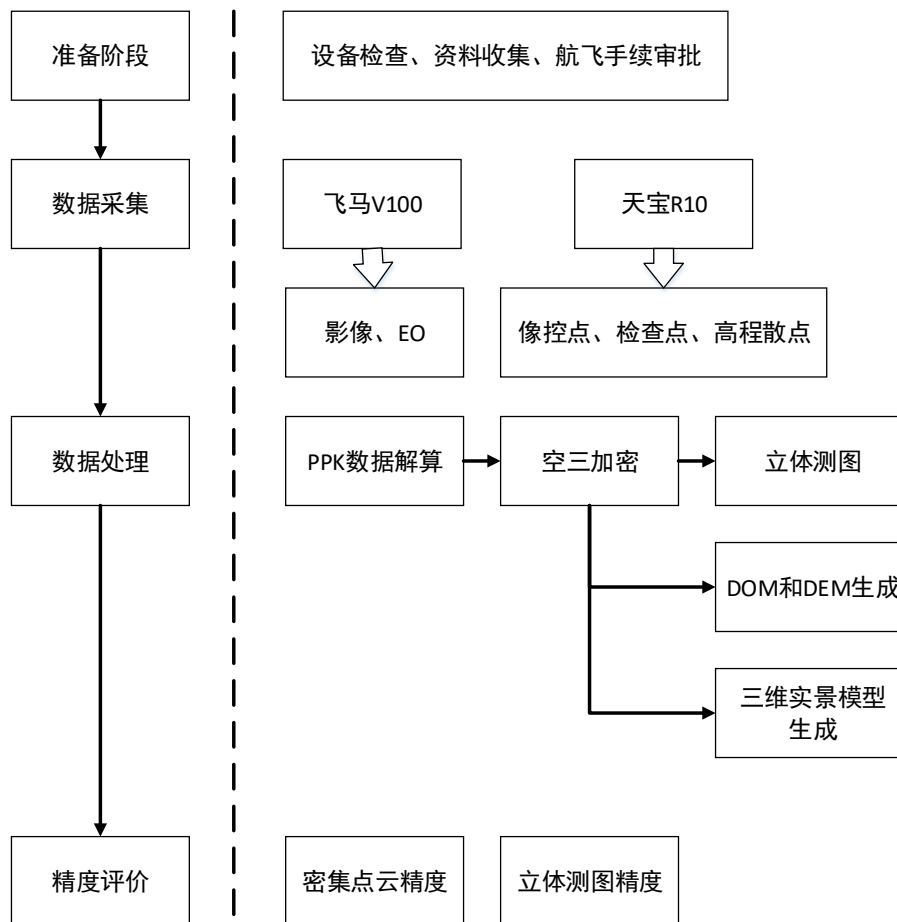


图 2 总体技术线路图

### 2.1 准备阶段

检查设备的状态，完成航飞前的各项审批手续，提前向当地有关部门报备。收集测区已有的 DOM、控制点、水准点等资料，并在 Google Earth 上对测区的地形起伏情况做初步掌握，提前布设像控点点位、选择候选起降场等。

### 2.2 数据采集

#### 2.2.1 像控点布设与测量



图 3 像控点布设及测量

像控点分为两类，在居民区域选择易于辨识的房角点、斑马线等作为像控点，在山区或没有明显标识区域采用腻子粉或石灰粉人工布设靶标，可以布设在“7”字内角或“十”字中心，如图所示。按照地物识别分辨率为影像分辨率的 $\sqrt{2}$ 倍，因此在布设人工靶标时其宽度应当至少 15cm 以上。本项目按照 POS 辅助航摄区域网布点方案（参照《CH/Z 3004-2010 低空数字航空摄影测量外业规范》），即平面控制点采用角点布设法，并根据需要加布高程控制点，控制点平均间距约为 1 公里。

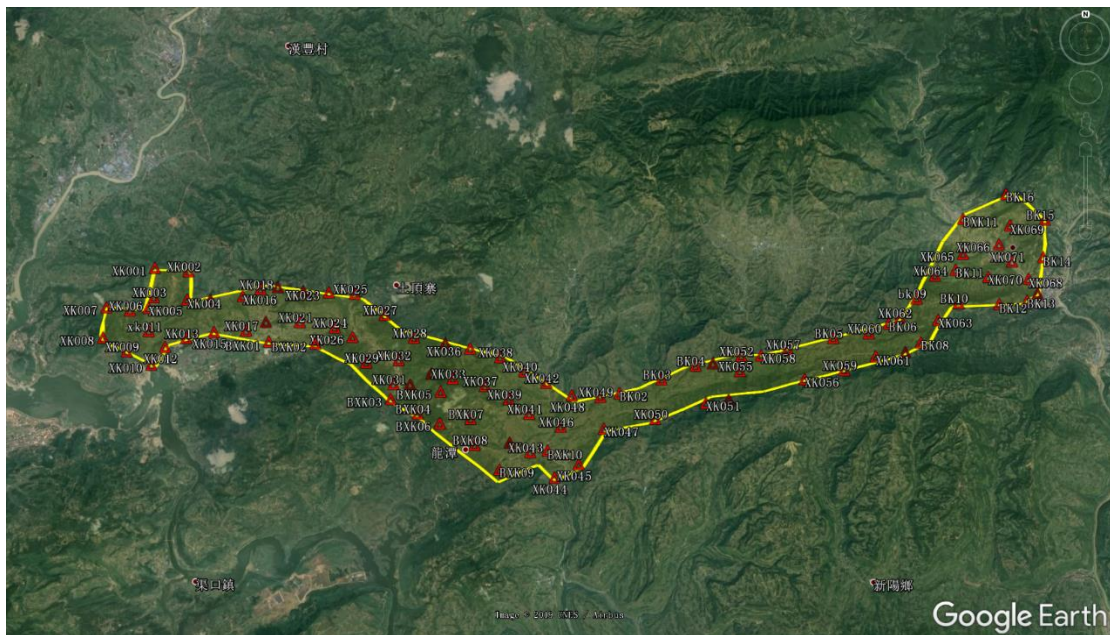


图 4 本项目像控点分布图

## 2.2.2 航摄无人机和相机



图 5 飞马 V100 无人机及现场作业

航摄采用飞马 V100 倾转旋翼无人机，其包含单镜头航测模块（1×4200 万像素，焦距 35mm，像素大小 4.53um）和四镜头倾斜模块（4×2400 万像素，焦距 35mm，像素大小 3.92um）。采用自检校光束法平差进行空三加密，保证最终成图精度。飞马 V100 无人机及现场作业如图 2 所示。

### 2.2.3 航高设计

根据本项目的要求，要求影像分辨率优于 0.12m，根据公式

$$H = \frac{f}{\text{pixelunit}} * \text{GSD} = \frac{35}{0.00453} * 0.12 \approx 927\text{m}$$

，即相对航高按照 927m 设计。由于实际航飞区域为带状，且跨度较大，需要进行分块航飞。在分块航飞时需考虑地形变化情况，使得同一分区内部高差尽量小，且在满足重叠率的条件下需要最低点满足高差在 927m 以内。

### 2.2.4 航线设计

摄区航摄飞行设计从保证产品质量、高效、经济的原则出发，综合考虑仪器设备的性能、

地形、地势、高差、摄区形状、航高、航向重叠度、旁向重叠度等一系列要素，采用飞马无人机管家进行航线设计，最终航线设计方案如图所示：



图 6 本项目航线设计方案

## 2.2.5 高程散点采集

为了验证飞马 V100 在山区复杂地形图下的大比例尺测图有效性，选取了一块试验区域利用千寻位置测量了均匀分布的 412 个高程散点，散点高程精度约为 0.1m。

## 2.3 数据处理

### 2.3.1 PPK 数据解算

采用飞马无人机管家进行预处理，获取 PPK 解算后的高精度外方位元素。

### 2.3.2 PPK 辅助下的无人机影像空三处理

采用 PhotoScan 进行无人机影像空三处理，选取试验子区块，从重叠度与倾斜角、相机自检校模型、外方位元素精度、外方位元素权值等多方面进行了精度分析。

#### (1) 重叠度、倾斜角对定位精度的影响

通过模拟飞行参数并将物方点反投影至每张影像生成像点观测值，通过求解区域网平差

中的协方差矩阵来估计物方点多片前方交会的先验精度。分别模拟航向、旁向重叠度分别为 60/40、80/60、80/80、90/90，倾斜角分别为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  情况下，根据区域网平差法方程的逆来估计物方点的先验定位精度。其结果如图 6 所示：

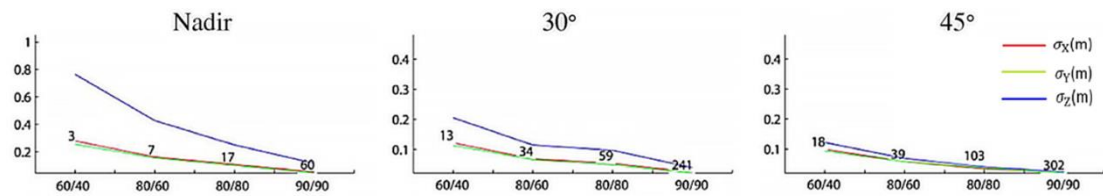


图 7 重叠度与倾斜角对定位精度影响

从图 7 中结果可以看出，随着航向重叠度或旁向重叠度的增加，不同倾斜角的情况下定位精度均得到了有效提升；当倾斜角为  $30^\circ$  时，物方点水平方向的定位精度约为高程方向的 2 倍；当倾斜角为  $45^\circ$  时，物方点的整体定位精度得到提高，且高程方向提升更显著，高程方向与水平方向的精度接近一致；相比传统的垂直摄影，倾斜摄影测量带来了两个方向的提升：

- 1) 由于冗余观测值的加入，物方点的定位精度约为传统垂直摄影的 2 倍；
- 2) 由于大交会角立体像对的引入，高程方向精度得到了显著提升，且精度与水平方向趋于一致。

## (2) 相机模型对定位精度的影响

通过对自检校区域网平差模型的不同参数标定配置，分析相机模型对无地面控制点影像空三的定位精度影响。按照自检校参数的不同，试验分为以下几种情况：

- ①  $f, c_x, c_y, k_1, k_2$ ;
- ②  $f, c_x, c_y, k_1, k_2, k_3, k_4$ ;
- ③  $f, c_x, c_y, k_1, k_2, k_3, k_4, p_1, p_2$ ;
- ④  $f, c_x, c_y, k_1, k_2, k_3, k_4, p_1, p_2, b_1, b_2$ ;
- ⑤  $f, c_x, c_y, k_1, k_2, k_3, k_4, p_1, p_2, p_3, p_4, b_1, b_2$ ;

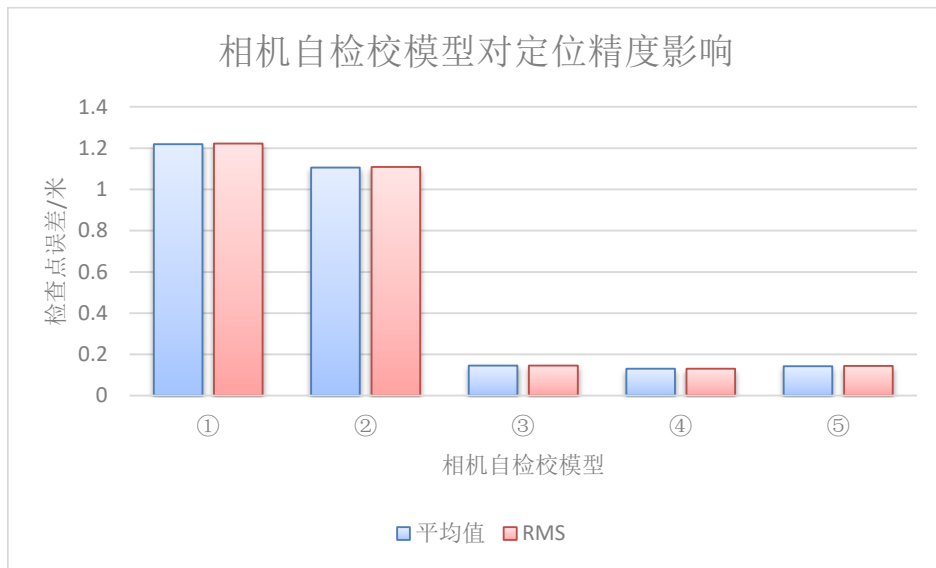


图 8 相机自检校模型对定位精度影响

从图 8 中结果可以看出：

- 1) 当自检校相机模型仅考虑径向模型 ( $k_1, k_2, k_3, k_4$ ) 时，无地面控制点平差结果收敛到较差的结果，检查点误差大于 1m；这是由于相机的畸变模型欠拟合，无法拟合真实的畸变情况；
- 2) 当自检校相机模型同时考虑径向畸变参数 ( $k_1, k_2, k_3, k_4$ ) 和切向畸变前两项 ( $p_1, p_2$ ) 时，无地面控制点平差收敛结果得到显著提升；
- 3) 当自检校相机模型同时考虑径向畸变参数 ( $k_1, k_2, k_3, k_4$ )、切向畸变前两项 ( $p_1, p_2$ ) 和正交畸变参数 ( $b_1, b_2$ ) 时，无地面控制点平差获得最优的收敛结果；
- 4) 当继续增加切向畸变参数的  $p_3, p_4$  项时，无地面控制点平差精度反而出现细微降低，推测这是相机模型过拟合造成的。

因此，针对飞马 V100 无人机的相机进行无地面控制点或稀少控制点影像空三时，建议自检校相机模型选择方案④。

### (3) 外方位线元素精度对定位精度影响

将最佳配置参数的平差结果作为外方位元素真值，外方位角元素不采用（初值为 0），通过对外方位线元素真值添加指定标准差的随机扰动，分析外方位线元素精度对定位精度影响。在实验中，外方位线元素的权值（设置标准差）取实际精度。

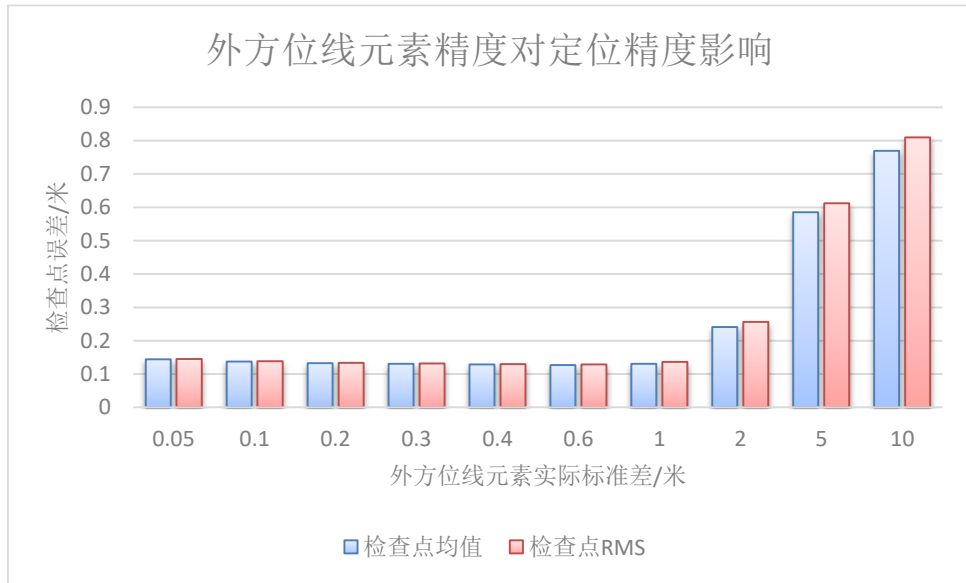


图 9 外方位线元素实际精度对定位精度影响

从图 9 中结果可以得出以下结论：

- 1) 当外方位线元素实际精度（标准差） $\leq 1.0\text{m}$  时，无地面控制点空三都能够收敛至较好的结果(13cm 左右)；这是由于在区域网平差将偶然误差在一定程度上消除掉。
- 2) 当外方位元素实际精度（标准差） $\geq 1.0\text{m}$  时，随着实际标准差的增大，意味着外方位线元素定位精度越来越差，无地面控制点空三的定位精度也越来越差。

因此，当外方位线元素能够获取优于 1m 精度的初值时，无地面控制点空三的精度均可收敛至较好的结果。需要注意的是，上述模拟数据是在不存在系统误差的情况下，对真值添加 1m 的随机误差。实际情况中，如果外方位元素中存在系统误差，则需要先消除系统误差后再进行空三处理。现有的 RTK 技术/CORS 定位技术、PPK 后处理技术均可以获取优于 10cm 的定位结果，这为无地面控制点空三提供了可能。

#### (4) 外方位线元素的权值对定位精度的影响

采用 **Australis** 自检校相机模型 ( $f, c_x, c_y, k_1, k_2, k_3, k_4, b_1, b_2, p_1, p_2$ ) 进行试验，在 PhotoScan 软件中通过改变外方位线元素的标准差来验证其对定位精度的影响。



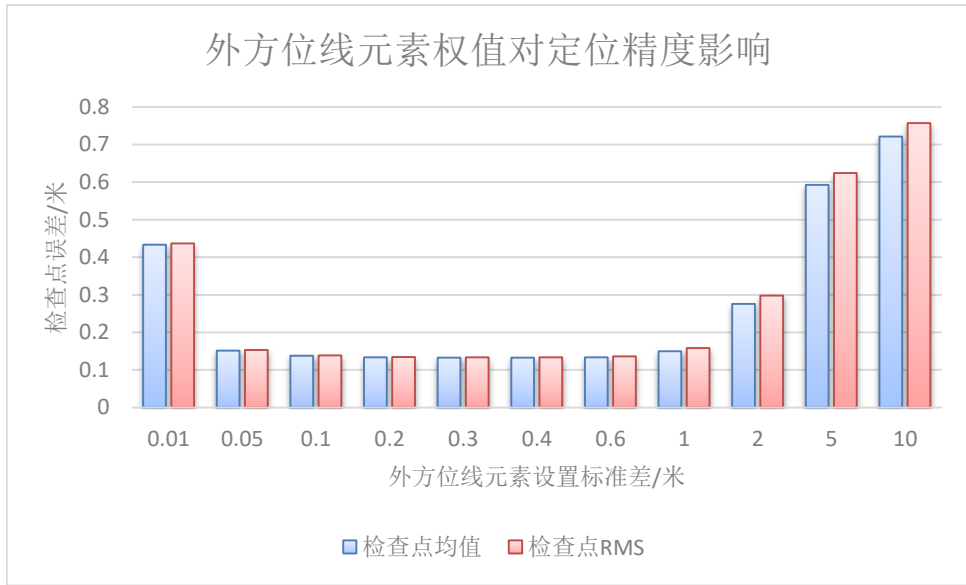


图 10 外方位线元素权值对定位精度影响分析

从图 10 中结果可以得出如下结论：

- 1) 当外方位线元素标准差与实际精度相符时(约 0.1m)，检查点含有最高的定位精度；从图中可以看出，该标准差允许一定的设置范围（0.05~1.0m），均可以获取较好的定位精度；
- 2) 当外方位线元素标准差值偏离实际精度越来越大时，外方位线元素的权值越来越小（约束减弱），检查点的定位精度越来越差；
- 3) 当外方位线元素标准差偏离实际精度越来越小时，外方位线元素的权值越来越大，平差过程中初值权值过大导致无法收敛到正确结果，检查点的定位精度也越来越差。

### 2.3.3 无人机影像立体测图



图 11 无人机空三加密（左）和地物立体采集（右）

通过 PhotoScan 完成空三加密、密集匹配和正射影像制作，通过 Inpho 执行模型优化和

格式转换，并通过 JX-4G、MapMatrix 和 AutoCAD 完成立体测图的地物采集和编图，地形图成果如图 12 所示。

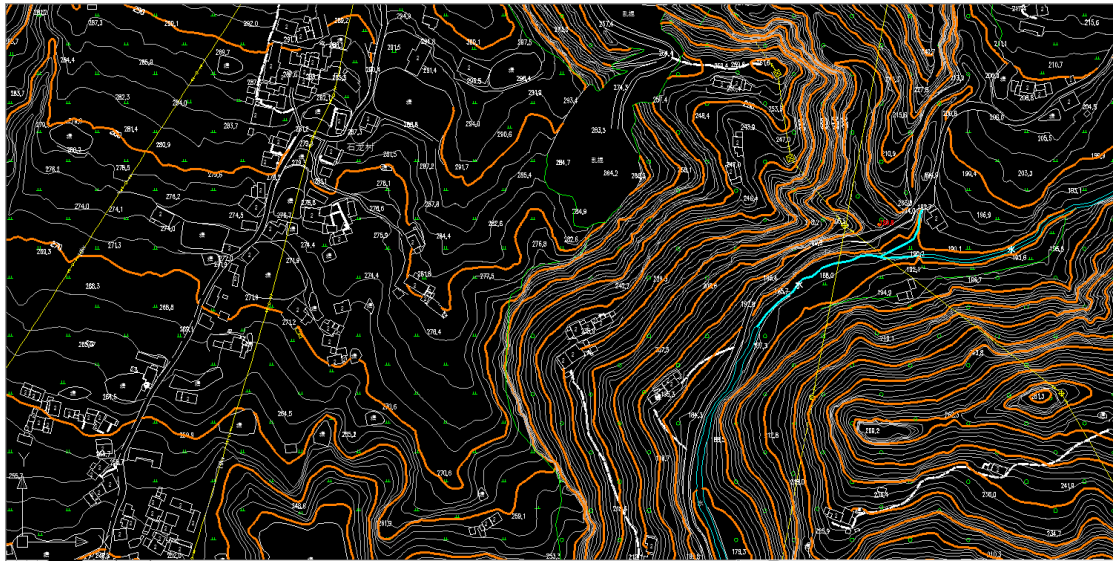


图 12 本项目的 1:2000 地形图成果示例

### 2.3.4 数字正射影像图 DOM 和数字高程模型 DEM 生成

采用 PhotoScan 通过空三加密、密集匹配和正射微分纠正完成 DOM 和 DEM 的生成，其中一子区域的成果如图 13 所示。



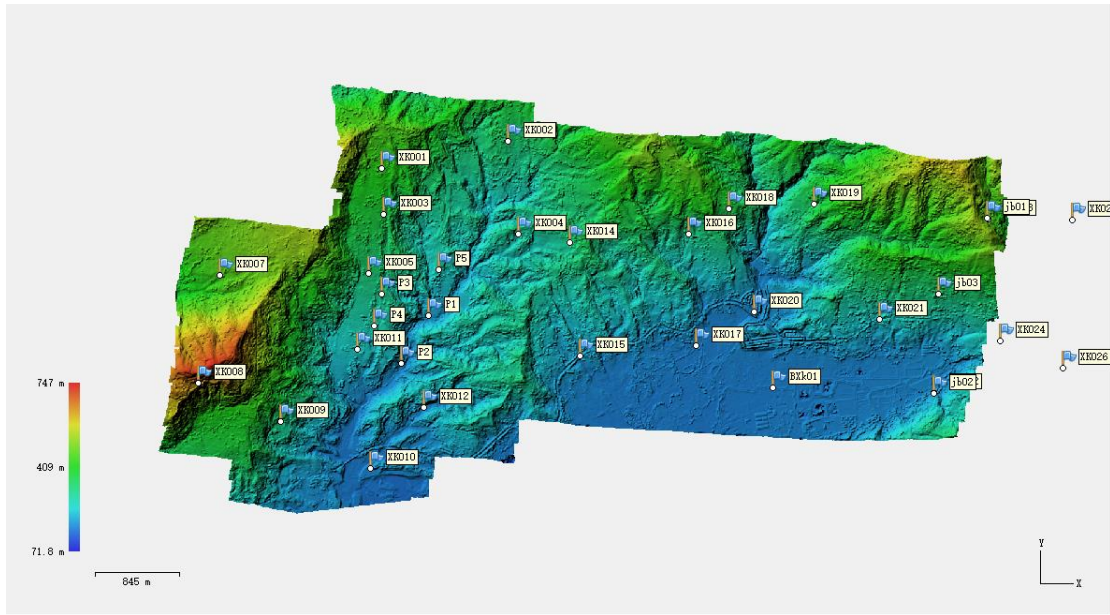


图 13 本项目试验子区块 DOM 成果和 DEM 成果示例

### 2.3.5 数字表面模型 DSM 生成

在完成互通区域的影像空三加密后，利用 Bentley 公司的 Context Capture 完成测图的三维实景模型生成，其成果如图 14 所示。





图 14 互通区域示范三维倾斜实景模型示例

## 2.4 精度评价

### 2.4.1 检查点精度评价

以试验子区域为例，该区域共包含 24 个像控点，其中 5 个设置为检查点。最终的空三精度如图 15 所示，检查点精度为 0.14m。

| Markers                                   | Easting (m)   | Northing (m)   | Altitude (m) | Accuracy (m) | Error (m) | Projections |
|---|---------------|----------------|--------------|--------------|-----------|-------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> XK007 | 543628.576000 | 3455188.444000 | 459.987000   | 0.005000     | 0.015417  | 11          |
| <input checked="" type="checkbox"/> XK019 | 549493.547000 | 3455889.293000 | 358.996000   | 0.005000     | 0.023704  | 24          |
| <input checked="" type="checkbox"/> XK008 | 543419.605000 | 3454125.732000 | 633.940000   | 0.005000     | 0.025804  | 18          |
| <input checked="" type="checkbox"/> XK001 | 545230.202000 | 3456235.614000 | 424.385000   | 0.005000     | 0.030052  | 17          |
| <input checked="" type="checkbox"/> jb03  | 550720.706000 | 3454995.335000 | 327.965000   | 0.005000     | 0.033448  | 11          |
| <input checked="" type="checkbox"/> XK016 | 548260.065000 | 3455592.976000 | 301.415000   | 0.005000     | 0.034176  | 2           |
| <input checked="" type="checkbox"/> BXK02 | 550679.300000 | 3454029.232000 | 187.623000   | 0.005000     | 0.036665  | 20          |
| <input checked="" type="checkbox"/> XK002 | 546477.041000 | 3456502.381000 | 333.792000   | 0.005000     | 0.044311  | 18          |
| <input type="checkbox"/> XK004            | 546577.012000 | 3455593.910000 | 283.997000   | 0.005000     | 0.048244  | 9           |
| <input checked="" type="checkbox"/> XK012 | 545647.779000 | 3453880.165000 | 186.223000   | 0.005000     | 0.049662  | 10          |
| <input checked="" type="checkbox"/> XK015 | 547188.191000 | 3454388.514000 | 201.510000   | 0.005000     | 0.052295  | 11          |
| <input checked="" type="checkbox"/> BXk01 | 549085.070000 | 3454073.354000 | 168.920000   | 0.005000     | 0.053659  | 9           |
| <input checked="" type="checkbox"/> XK010 | 545119.050000 | 3453282.849000 | 175.471000   | 0.005000     | 0.058232  | 23          |
| <input checked="" type="checkbox"/> XK017 | 548328.481000 | 3454490.632000 | 174.392000   | 0.005000     | 0.058903  | 11          |
| <input checked="" type="checkbox"/> jb02  | 550681.223000 | 3454017.801000 | 192.155000   | 0.005000     | 0.063913  | 12          |
| <input type="checkbox"/> XK005            | 545102.791000 | 3455205.423000 | 324.764000   | 0.005000     | 0.073439  | 19          |
| <input checked="" type="checkbox"/> XK014 | 547082.784000 | 3455507.785000 | 303.554000   | 0.005000     | 0.086957  | 13          |
| <input checked="" type="checkbox"/> XK009 | 544229.405000 | 3453745.339000 | 315.045000   | 0.005000     | 0.093541  | 9           |
| <input type="checkbox"/> XK020            | 548907.845000 | 3454822.778000 | 177.154000   | 0.005000     | 0.115469  | 8           |
| <input checked="" type="checkbox"/> jb01  | 551207.813000 | 3455744.235000 | 472.187000   | 0.005000     | 0.130652  | 9           |
| <input checked="" type="checkbox"/> XK011 | 544987.272000 | 3454458.674000 | 251.486000   | 0.005000     | 0.178416  | 8           |
| <input type="checkbox"/> XK021            | 550143.352000 | 3454752.147000 | 244.077000   | 0.005000     | 0.189575  | 7           |
| <input checked="" type="checkbox"/> XK023 | 551210.258000 | 3455739.726000 | 467.561000   | 0.005000     | 0.200207  | 7           |
| <input type="checkbox"/> XK018            | 548653.371000 | 3455843.888000 | 365.687000   | 0.005000     | 0.208794  | 12          |
| <b>Total Error</b>                        |               |                |              |              |           |             |
| Control points                            |               |                |              |              | 0.083441  |             |
| Check points                              |               |                |              |              | 0.141836  |             |

图 15 试验子区块空三像控点精度统计

## 2.4.2 高程散点精度评价

利用千寻测量的高程散点对密集匹配点云和立体采集的坐标进行精度评定。其结果如图 16 所示，密集点云与高程散点的高程差值标准差为 0.104m。

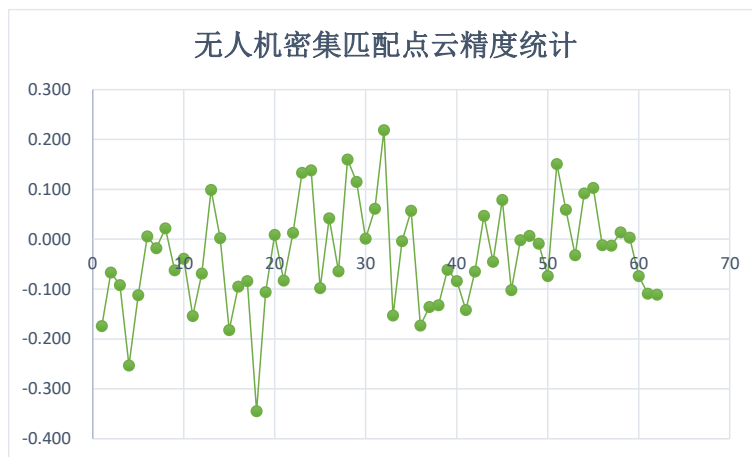


图 16 无人机密集匹配点云与散点高程精度统计图

同时，利用立体测图采集的坐标与高程散点比较，其精度统计如图 17 所示，立体测图与高程散点的高程差值标准差为 0.254m。



图 17 无人机影像立体测图与散点高程精度统计图

## 三、解决的生产问题

在山区复杂地形条件下的大比例尺测图中，传统的航测存在诸多的问题：

(1) 一方面，按照传统的区域网布点方案，需要较多的控制点；另一方面，由于山区地形起伏较大，为了保证空三加密的精度，往往需要更多的控制点。本项目中利用飞马 V100 自带的 GPS 模块通过 PPK 后处理可提供优于 10cm 的外方位线元素，可在空三过程中

将其作为带权观测值参与平差，减少对外部控制点的依赖。对于山区复杂地形条件下，像控点的减少能够显著提高外业作业效率，同时保证作业人员的安全。

(2) 带 PPK 数据的无人机影像的高精度外方位线元素一直以来尚未得到充分利用，本项目研究了外方位元素的精度和外方位元素的权值对无人机影像空三定位精度的影响，为后续的航飞和生产提供了指导意义。

## 四、项目特点及优势总结

本项目利用飞马 V100 高精度、快速获取和处理数据的能力，将其应用于铁路和公路山区大范围带状地形的大比例尺测图应用中。依托于飞马 V100 可获取优于 10cm 精度的 PPK 解算结果，本项目形成了 PPK 辅助下的无人机影像空三解决方案并分析了影像其定位精度的主要因素，在保证精度的情况下可有效减少外业像控点，项目体现的优势总结如下：

(1) 采用飞马 V100 搭载航测模块能够快速、高效完成山区复杂地形条件下的数据采集和处理工作，以大范围带状地形为主的铁路和公路项目为例，验证了飞马 V100 无人机在山区大比例尺测图中的有效性；同时，本项目测试了飞马 V100 搭载倾斜镜头进行三维实景模型构建的有效性，与传统三维建模方法相比具有准确、高效、逼真等诸多优势；

(2) 针对无人机影像测图问题，本项目分析了重叠度与倾斜角、相机自检校模型、外方位元素精度、外方位元素权值对空三定位精度的影响，对今后的外业航飞和内业数据处理具有指导意义，可在行业内推广使用。主要结论如下：1) 航向重叠度和旁向重叠度增加有利用得到更高的空三定位精度，在实际作业过程中，由于航向重叠度不影响飞行效率，应当尽量增加航向重叠度，如：航向 90%，旁向 70%；2) 带 PPK 后差分功能的无人机在减少像控点上具有显著优势；3) 在进行 PPK 辅助下的无人机影像空三处理时，应当选用合适的自检校模型并对外参数给予正确的权值。