

刘超, 杜鹏, 王银, 等. 基于无人机摄影测量技术研究有无地面控制点的差异性在地震方面的应用[J]. 华南地震, 2021, 41 (1): 84-93. [LIU Chao, DU Peng, WANG Yin, et al. Research on the Application of the Difference with or without Ground Control Points in Earthquake Based on UAV Photogrammetry Technology [J]. South China journal of seismology, 2021, 41(1): 84-93]

# 基于无人机摄影测量技术研究有无地面控制点的差异性在地震方面的应用

刘 超, 杜 鹏, 王 银, 余思汗, 杨 顺  
(宁夏回族自治区地震局, 银川 750001)

**摘要:** 利用无人机摄影测量技术获取影像数据, 在集成 SfM 算法的 Photoscan 软件上进行影像的处理, 通过定量分析有无地面控制点生成的 DEM 精度, 进一步明确了其在水平位置和垂直高程上的差异; 对比两种情况下在数据获取、处理过程和结果精度的优缺点, 探讨了两者在地震不同方面的应用前景。结果表明: 在无控制点的情况下, 影像数据获取简易, 处理时间较短, 处理结果水平位置(XY)误差<2.00 m, 垂直高程(Z)绝对值误差超过了 100.00 m 但在局部范围内的相对高程值误差<0.5 m, 适用于地震应急现场无人机震后影像的快速获取、处理和分析; 在有控制点的情况下, 影像数据获取复杂、处理时间较长, 但处理结果精度高, 水平位置和垂直高程误差均<5 cm, 适用于活动构造的定量研究和微地貌的精细解译及定量分析, 可见有无地面控制点在地震不同方面具有良好的发展前景。

**关键词:** 无人机; 摄影测量技术; 控制点; 差异性; 地震

**中图分类号:** P315.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-8662(2021)01-0084-10

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2021.01.12

## Research on the Application of the Difference with or without Ground Control Points in Earthquake Based on UAV Photogrammetry Technology

LIU Chao, DU Peng, WANG Yin, YU Sihan, YANG Shun  
(Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China)

**Abstract:** The paper uses unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry technology to obtain image data, performs image processing on Photoscan software integrated with Structure from Motion (SfM) algorithm, and quantifies the accuracy of DEM generated with or without ground control points to further clarify the difference in horizontal position and vertical elevation; then, the paper compares the advantages and disadvantages in data

**收稿日期:** 2020-03-04

**基金项目:** 中国地震局地震应急青年重点任务(CEA\_EDEM-202021); 宁夏自然科学基金(2020AAC03443); 宁夏地震科研基金课题(NX202017)和宁夏地震局科技创新团队(CX2019-1)共同资助。

**作者简介:** 刘超(1991-), 男, 工程师, 主要从事城市活断层探测与地震应急现场工作。

**E-mail:** liuchao0426@126.com.

acquisition, processing and result accuracy in the two cases, and discusses the application prospects of the two in different aspects of earthquakes. The results indicate that without control points, the image data is easy to obtain, the processing time is short, the horizontal position ( $XY$ ) error of the processing result is less than 2.00 m, and the absolute value error of vertical elevation ( $Z$ ) is over 100.00 m, however, the relative elevation value error in a local area is less than 0.5 m, which is suitable for rapid acquisition, processing and analysis of UAV post-earthquake images in earthquake emergency sites. In the case of control points, the image data acquisition is complicated and the processing time is long, but the processing results has highly accurate, and the errors of the horizontal position and vertical elevation are both less than 0.5 m, which is suitable for quantitative research of active structures and fine interpretation and quantitative analysis of micro-topography. It can be seen that the situation with or without GCP control points has good development prospects in different aspects of earthquakes.

**Keywords:** UAV; Photogrammetry technology; GCP; Difference; Earthquake

## 0 引言

近年来空间物体的三维模型重建成为数字摄影测量和计算机视觉领域的研究热点<sup>[1-2]</sup>。目前三维模型重建的方式主要有两种,一种是基于三维激光扫描,一种是基于数字图像。前者激光雷达扫描(LiDAR, Light Detection And Ranging)技术迅速发展,将激光测距、惯性导航和全球定位 3 种技术相结合,直接获取高精度三维模型<sup>[3-5]</sup>,但仪器价格昂贵、操作专业、数据处理复杂致使普及率不高、广泛应用受限<sup>[6]</sup>;后者通过匹配被测物体不同数字图像中的同名点,交汇得到空间点的三维空间坐标<sup>[7-9]</sup>,这种名为 SfM (Structure from Motion) 三维重建技术获取的三维模型分辨率和精度与 LiDAR 相当<sup>[10-11]</sup>,但测量成本低、操作灵活快捷、数据处理简单,已被应用于地震领域的多个方面<sup>[12-16]</sup>。

基于 SfM 算法进行影像数据处理时,通过图像特征匹配与跟踪解算出相机的空间位置,然后计算出三维密集点的相对坐标,其只具有图像的空间坐标系,如果要转换成现实世界的空间坐标系,则需要用少量地面控制点(GCP, Ground Control Point)进行空间校正才能得到现实中精准的水平位置和垂直高程。然而,要通过野外测量(如利用差分 GPS)获取现实空间坐标并在数据处理时加入控制点,则需要更贵的仪器、更繁的操作和更多的时间,在地震应急现场恶劣的环境条件下,人员是无法到达震中破坏严重的区域去获取控制点的,即使是能够获取控制点在数据处理时耗时太多,也无法快速完成影像数据的拼接和分析,那么也不能及时地获取灾害情况为震后救援和重建提供科学依据。因此本文针对有无控制

点建立的空间坐标系误差大小能否满足不同方面的应用这一关键问题,通过实例定量分析有无控制点相机位置的精度,明确两种情况下处理结果在水平位置和垂直高程上的差异性,结合实际应用的需要,探讨不同情况在地震不同方面的发展前景<sup>[17-18]</sup>。

## 1 获取影像数据和控制点

本次使用精灵 Phantom 4 四轴飞行器,其搭载大疆公司制造、焦距 3.61 mm、光圈 f/2.8 自动对焦的 FC330 型号相机,配备 1 英寸有效像素 1240 万的影像传感器,保证了影像分辨率高、畸变小及感光度强的特征。该无人机集成了 GPS/GLONASS 卫星定位双模块,悬停精度在 GPS 定位正常工作时垂直误差 $\pm 0.5$  m、水平误差 $\pm 1.5$  m,但悬停范围在 0~10 m 导致测量时相机位置误差范围在 0~10 m 甚至更大。为了获取高精度的现实空间坐标,使用 Trimble R8 差分 GPS 进行实测,测量精度水平误差在 $\pm 10$  mm+1 ppmRMS、垂直误差在 $\pm 20$  mm+1 ppmRMS 的范围,有效保证水平位置和垂直高程绝对值的精度在厘米级。

实例 1 选择在宁夏回族自治区境内天景山活动断裂带西段,古地震<sup>[19-20]</sup>造成的断层陡坎附近(图 1),晴朗弱风天气环境保证飞行安全和稳定,阳光充足保证地貌光学特征显示最佳。自动飞行软件设置飞行高度 50 m、重叠度航向和旁向均为 80%,覆盖区域为 200 m $\times$ 200 m,耗时 10 min 左右完成,共获取 28 张影像照片;控制点在飞行区域均匀布设了 10 个,能够很好的约束相机位置有效避免影像数据扭曲变形。

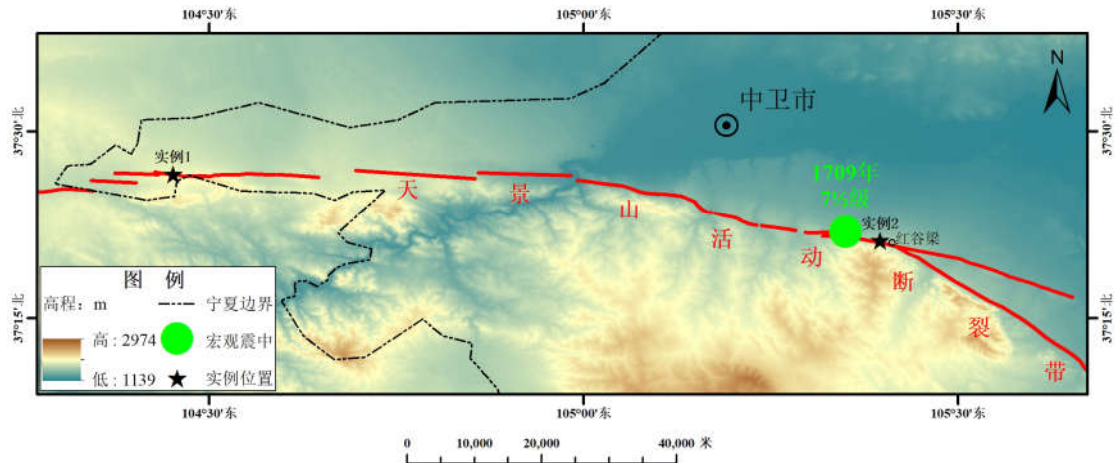


图1 实例位置及区域地震构造图

Fig.1 Example location and regional seismotectonic map

## 2 影像数据处理

影像数据需要选择集成 SfM 算法的软件进行处理, 如 Pix4Dmapper、PhotoScan、Smart3d、PPSG 及 SFMToolkits 等<sup>[15,21-22]</sup>, 本文选用 PhotoScan 软件, 处理流程如图 2 所示。

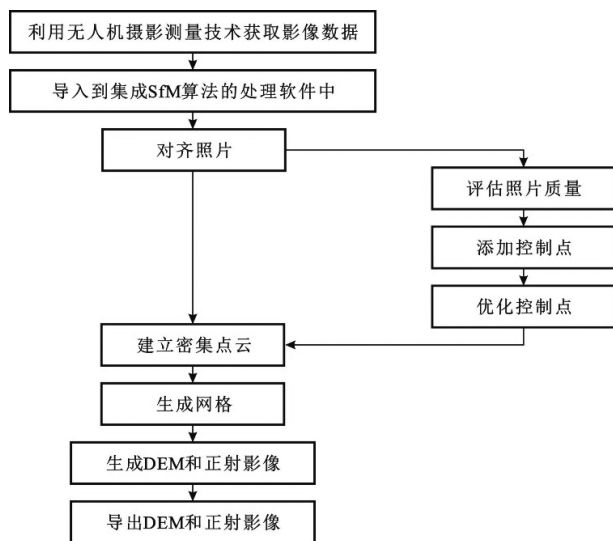


图2 影像数据快速处理(左)及高精度处理(右)流程

Fig.2 Fast processing(left) and high precision processing (right) of image data

在快速处理流程中(图 2(左)), 不进行照片质量评估和控制点校正, 直接利用 SfM 算法解算出相机位置和姿态, 重建三维模型生成密集点云; 在高精度处理流程中(图 2(右)), 需要评估照片质量, 将评估参数低于 0.5 的照片剔除, 然后在高质量照片上添加控制点, 进行坐标的绝对校正, 将三维点的图像坐标系转换为世界空间坐标系, 获得具有真实空间坐标系的密集点云。后续基于生

成的密集点云, 通过插值获取 DEM 和正射影像。

### 2.1 无控制点快速处理

软件在无控制点的情况下为快速处理, 耗时 1 小时左右, 其结果中平均飞行高度 49.7 m, 摄影覆盖面积约 17 100 m<sup>2</sup>, 解算出的相机位置如图 3a (黑点表示相机位置), 图中照片区域覆盖度在 9 张以上的占比超过 60%, 平均有效重叠约为 5.9 次, DEM 分辨率 3.77 cm/pix, 点云密度 702.808 点/m<sup>2</sup>, 高程范围 1856~1873 m(图 4a), 高程差 17 m, 正射影像分辨率 1.89 cm/pix(图 5a)。

PhotoScan 软件会估算相机内部参数比如相机位置和地面控制点, 这就为定量分析有无控制点相机位置的精度提供了可行的途径。相机位置总误差的计算公式如下:

(XYZ) 总误差=

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(X_{i,est}-X_{i,in})^2 + (Y_{i,est}-Y_{i,in})^2 + (Z_{i,est}-Z_{i,in})^2]}{n}} \quad (1)$$

$X_{i,est}$ : 第  $i$  个相机位置的  $X$  坐标估计值

$X_{i,in}$ : 第  $i$  个相机位置的  $X$  坐标输入值

$Y_{i,est}$ : 第  $i$  个相机位置的  $Y$  坐标估计值

$Y_{i,in}$ : 第  $i$  个相机位置的  $Y$  坐标输入值

$Z_{i,est}$ : 第  $i$  个相机位置的  $Z$  坐标估计值

$Z_{i,in}$ : 第  $i$  个相机位置的  $Z$  坐标输入值

由公式(1)得到无控制点情况下 28 张照片相机位置的总误差为 0.95 m(表 1), 其中  $X$  误差为 0.43 m、 $Y$  误差为 0.41 m、 $Z$  误差为 0.74 m 及  $XY$  误差为 0.59 m, 每张照片相机位置和误差估计值见图 6a。

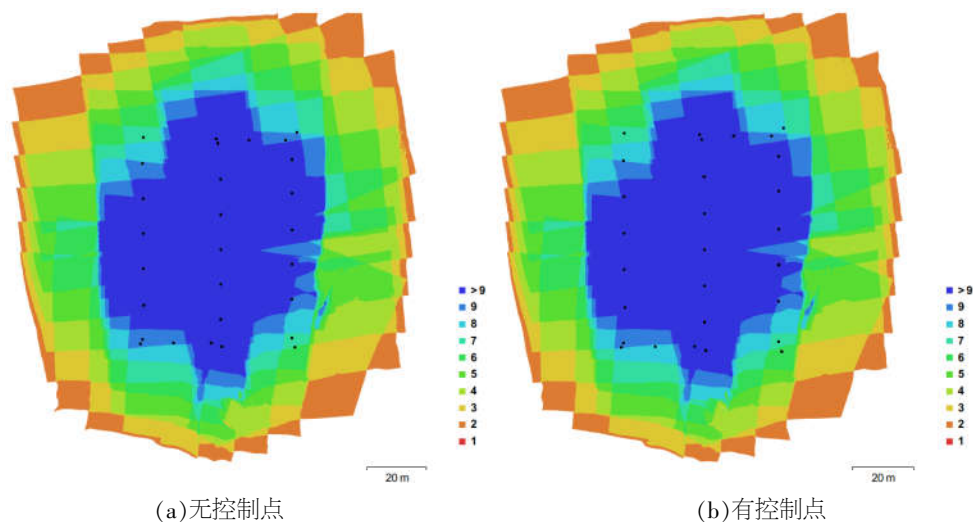


图 3 有无控制点解算的相机位置及照片覆盖度

Fig.3 Camera locations and image overlap with or without GCPs

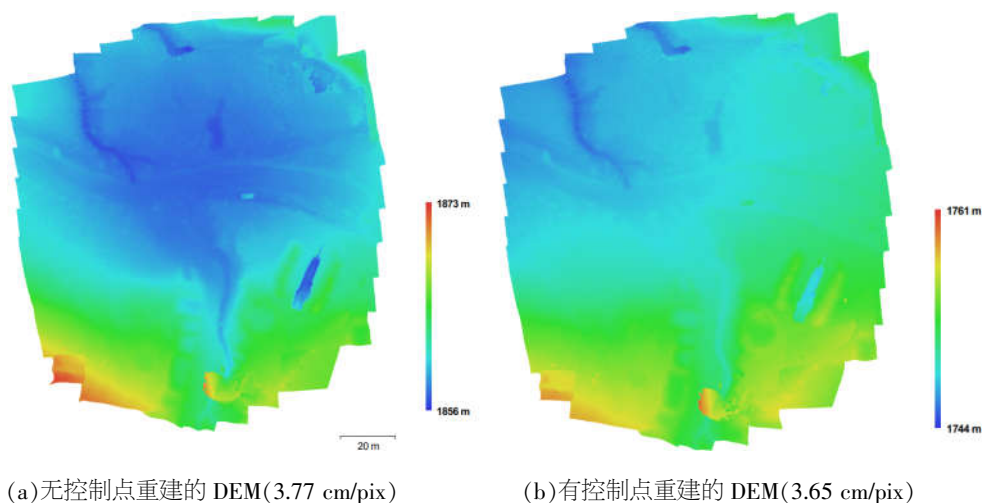


图 4 有无控制点重建的 DEM

Fig.4 Reconstructing DEM with or without GCPs

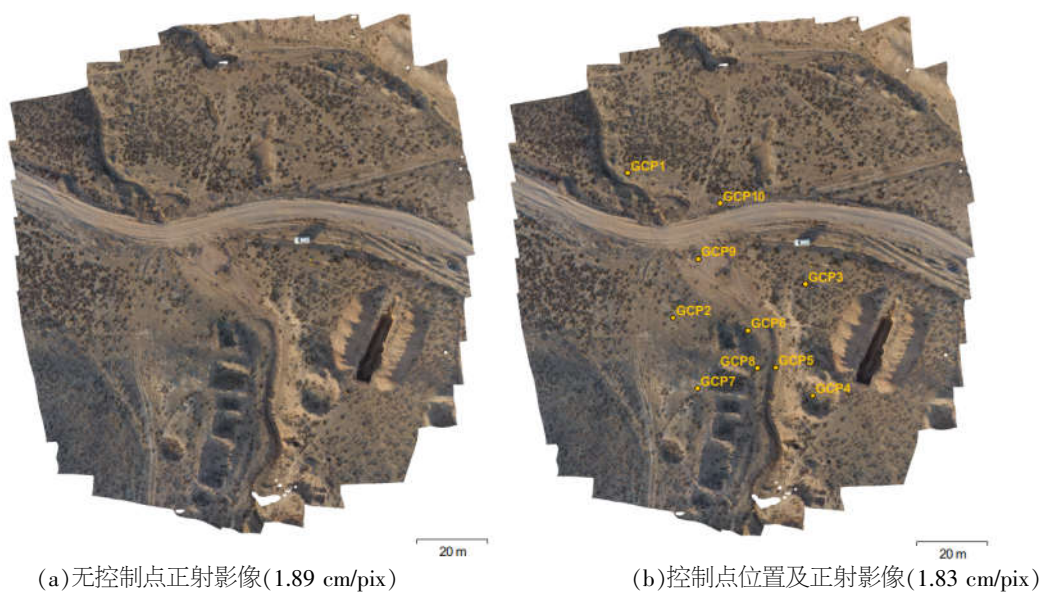


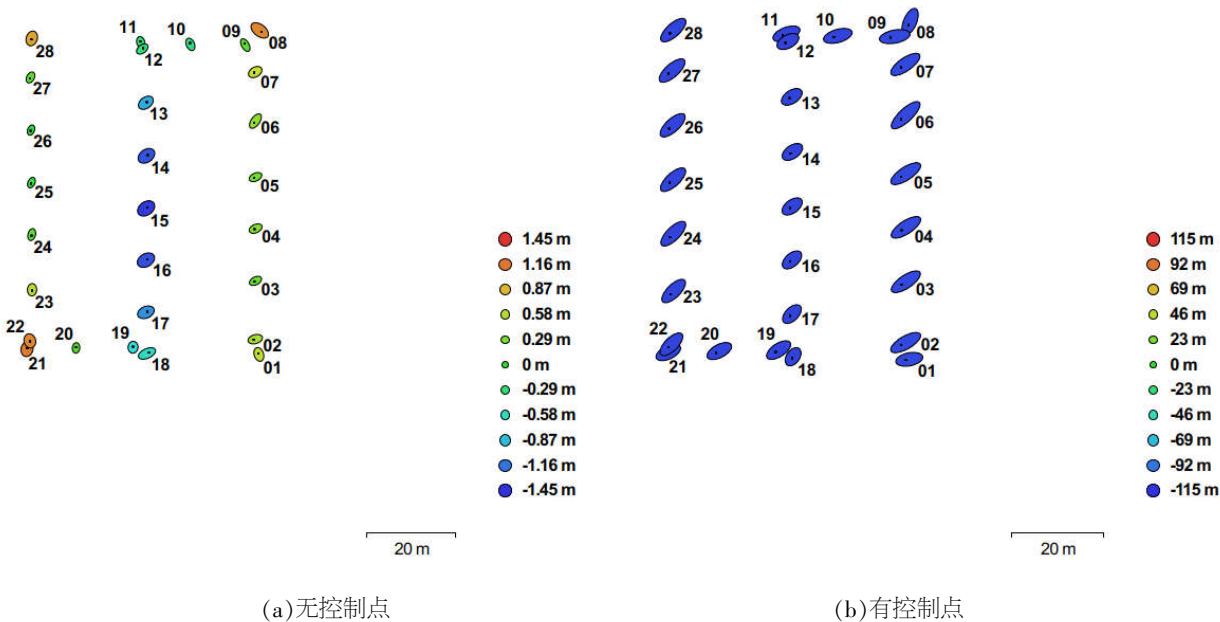
图 5 有无控制点重建的正射影像及控制点位置

Fig.5 Reconstructing orthomosaic with or without GCPs and GCP locations

表 1 相机位置精度检验结果

Table 1 The accuracy check results of camera positions

X 误差/m		Y 误差/m		XY 误差/m		Z 误差/m		XYZ 总误差/m	
无	有	无	有	无	有	无	有	无	有
0.43	1.46	0.41	1.07	0.59	1.81	0.74	109.53	0.95	109.55



(a)无控制点 (b)有控制点  
X、Y 误差用椭圆形状表示;Z 误差用椭圆颜色表示;估计的相机位置用黑点标记  
图 6 相机位置和误差估计值

Fig.6 Camera locations and error estimates

2.2 有控制点高精度处理

软件在有控制点的情况下为高精度处理(10 个控制点的位置见图 5b), 耗时 5 h 左右, 其结果中平均飞行高度 49.7 m, 摄影覆盖面积约 15 800 m<sup>2</sup>, 解算出的相机位置略有变化见图 3b(黑点表示相机位置), 图中照片区域覆盖度在 9 张以上的占比也超过 60%, 平均有效重叠约为 5.9 次, DEM 分辨率 3.65 cm/pix, 点云密度 749.434 点/m<sup>2</sup>, 高程范围 1744~1761 m(图 4b), 高程差 17 m, 正射影像分辨率 1.83 cm/pix(图 5b)。

根据总误差公式(1), 估算出了每个地面控制点的误差见表 2, 最终得到了所有控制点的 X 误差为 2.60 cm、Y 误差为 2.31 cm、Z 误差为 2.92 cm、XY 误差为 3.48 cm 及总误差为 4.54 cm, 均在 5 cm 的范围内。通过地面控制点的校正, 照片相机位置的误差明显增大(图 6b), 结果见表 1 有控制点列(数字加粗), X 误差为 1.46 m、Y 误差为 1.07 m、Z 误差为 109.53 m、XY 误差为 1.81 m 及总误

差为 109.55 m, 可见水平位置 (XY)误差<2.00 m, 垂直高程(Z)误差>100.00 m。

表 2 控制点精度检验结果

Table 2 The accuracy check results of GCPs

控制点 ID	X 误差 /cm	Y 误差 /cm	XY 误差 /cm	Z 误差 /cm	XYZ 总误差 /cm
GCP1	4.45	1.07	4.576	0.97	4.68
GCP2	2.05	-1.74	2.69	-1.57	3.11
GCP3	-1.77	5.06	5.36	-4.27	6.86
GCP4	-3.58	-3.87	5.27	-0.17	5.27
GCP5	2.14	0.93	2.33	4.49	5.06
GCP6	1.17	-0.17	1.18	-0.59	1.32
GCP7	0.53	-1.48	1.57	1.26	2.02
GCP8	-0.11	-0.45	0.47	0.11	0.48
GCP9	-0.11	-1.31	1.32	-4.44	4.63
GCP10	-4.64	1.90	5.01	4.65	6.83
总计	2.60	2.31	3.48	2.92	4.54



3 DEM 精度对比分析

3.1 利用地面控制点检验 DEM 精度

软件利用 SfM 算法精确解求出的相机空间位置, 能够获取带有空间坐标系的三维密集点云, 然后采用插值的方法生成网格数据 DEM, 其精度差异决定着分析地形地貌的结果。汪思好等(2018)利用地面控制点计算出均方根误差(RMSE, Root Mean Squared Error)来检查无控制点的情况下 DEM 在水平位置和垂直高程上的精度<sup>[2]</sup>, 本文采用该方法, 在无控制点的情况下提取 DEM, 计算出 10 个点在 X、Y、XY、Z 和 XYZ 的均方根误差, 结果见表 3, X 误差为 0.66 m、Y 误差为 1.54 m、Z 误差为 109.88m、XY 误差为 1.68 m 及 XYZ 总误差为 109.89 m, 可见水平位置(XY)误差 1.68 m<2.00 m, 而且利用 Trimble R8 差分 GPS 测量的水平误差为±10 mm+1pp mRMS 及地面控制点本身的水平误差为 3.48 cm(表 2), 则水平位置误差最大 1.73 m<2.00 m; 但垂直高程(Z)误差>100.00 m, 这与表 1 中有控制点校正下相机位置的误差估计值相吻合, 说明没有控制点的情况下, 软件解求出的相机位置及获取的地形 DEM 数据只具有图像空间坐标系, 无法转换到现实世界空间坐标系, 故其相机位置精度并不能代表 DEM 的精度。但增加了地面控制点后, 将相机位置进行了变换, 使得能够获取绝对空间坐标系的三维密集点云, 此时地面控制点校正了重建的 DEM 数据, 故地面控制点的精度代表了有控制点的情况下生成的 DEM 精度<sup>[4]</sup>, 而相机位置的精度则代表了没有控制点的情况下相机位置的偏差, 进而影响并决定了生成的 DEM 精度。

表 3 无控制点的情况下 DEM 精度分析

Table 3 Accuracy analysis for the DEM without GCPs

点 ID	$\Delta X/m$	$\Delta Y/m$	$XY/m$	$\Delta Z/m$	$XYZ/m$
GCP1	-1.07	0.38	1.13	112.10	112.10
GCP2	-0.45	-1.39	1.47	109.92	109.93
GCP3	0.98	-1.01	1.41	108.94	108.95
GCP4	1.09	-2.21	2.46	109.62	109.65
GCP5	0.67	-2.02	2.13	109.32	109.34
GCP6	0.35	-1.58	1.62	109.23	109.24
GCP7	-0.09	-2.17	2.17	110.19	110.21
GCP8	0.49	-2.01	2.07	109.43	109.45
GCP9	-0.23	-0.69	0.73	110.53	110.53
GCP10	0.03	0.00	0.03	109.51	109.51
均方根误差	0.66	1.54	1.68	109.88	109.89

3.2 利用等值线对比 DEM 高程数据

对比 2.1 和 2.2 有无控制点的情况下生成的 DEM 高程数据发现, 两种情况生成的 DEM 高程范围分别为 1856~1873 m 和 1744~1761 m(图 4), 高程范围均为 17 m, 为了进一步探讨两种情况生成的 DEM 在内部的高程差异, 利用 Surfer 专业软件, 采用自然邻近插值的方法对高质量三维密集点云进行插值生成网格数据 DEM, 网格大小均为 176 行×200 列, 节点总数 35 200 个, 用无控制点减掉有控制点的网格数据 DEM, 得到新的高程差网格等值线图(图 7), 可以看出, 高程差主要集中在 108~113 m, 平均高程差 110.51 m, 这与 3.1 无控制点的情况下 DEM 垂直高程误差(Z)109.88 m 接近, 说明与利用地面控制点检验 DEM 精度的结果相吻合; 图 7 中高程差并非唯一值, 而是由中心向外逐渐增大的同心圆, 中心向东偏移, 相邻等值线高程差为 0.5 m 则相邻等值线之间的区域内相对高程差<0.5 m, 说明在局部范围内的相对高程值的误差<0.5 m。

3.3 有无控制点的差异性

基于以上有无控制点的处理结果, 通过对比分析影像数据获取、处理和精度, 将两者的差异性总结如下。

(1)数据获取: 无控制点数据获取简易、快速, 设备成本低, 只需要一台无人机硬件和自动飞行软件, 选择能够起飞无人机的某一点即可获得整个研究区域的影像数据, 并不需要人员去研究区域的所有地方, 全程 1 名人员就可完成。有控制点数据获取除以上设备外, 还需要测量地面控制点的硬件设备如差分 GPS, 其不仅价格昂贵, 而且野外操作复杂; 在布设控制点时需要人员放置在研究区域合适的位置, 这就需要踏勘整个研究区后进行选择; 在测量控制点时至少需要 2 名人员才可完成。装卸设备和测量时需要投入更多的人力, 耗费大量的时间, 获取影像数据复杂、费时且技术要求高。

(2)数据处理: 无控制点数据处理快速, 数小时之内就可完成, 且自动化程度高, 批量处理操作简单, 不需要人员投入更多的时间就可获得最终的 DEM 和正射影像。有控制点数据处理过程复杂、技术要求高, 尤其是在用地面控制点校正相机位置时, 不仅要消耗大量的时间, 而且需要熟

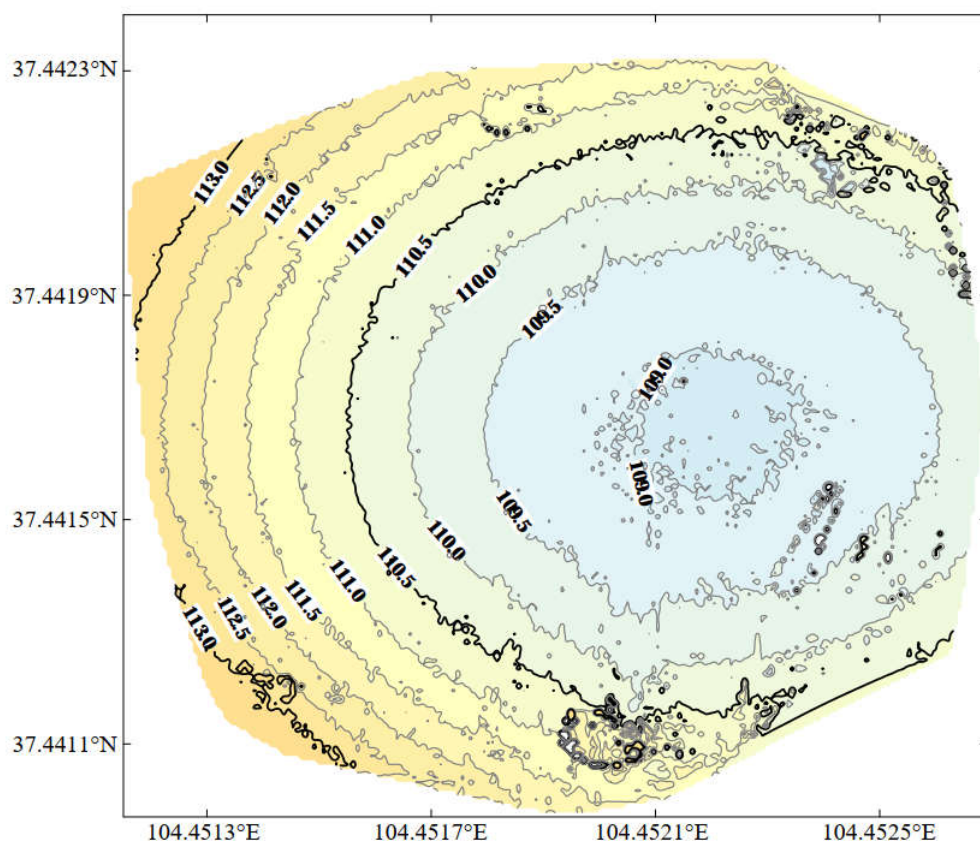


图7 高程差网格等值线图

Fig.7 Contour map of elevation difference grid

练的操作和丰富的经验才能将控制点放置在最佳的位置,使误差降到更低以达到更高的精度,该过程无法进行自动化处理只能通过人工操作完成;随着研究区面积的增大,需要布设的控制点增多,数据处理的工作站配置要求更高,成本就越高,耗费的人力就越多,这种情况下至少需要2~3 d才能完成。

(3)精度检验:这两种情况下,基于高密集点云( $>700$  点/ $\text{m}^2$ )生成DEM和正射影像的分辨率基本不受影响,均在厘米级,这说明了有无控制点不会影响图像的分辨率,但能够影响三维密集点云的坐标。无控制点时由于软件中没有控制点校正,缺乏真实世界绝对空间坐标的参考,使得软件处理时相机位置的精度无法代表DEM的精度,通过地面控制点对DEM的检验结果表明水平位置误差 $<2.00$  m,垂直高程的误差 $>100.00$  m,但通过高程差的等值线分析在局部范围内的相对高程值的误差 $<0.5$  m,所以在基于DEM提取活动构造定量参数中的垂直位错量时,由于其为剖面上的相对高程值,那么在有无控制点的情况下提取

结果的米级数值是相同的;由此可见无控制点情况下快速提取活动构造的垂直位错量误差 $<0.5$  m。另一个方面,具有现实世界空间坐标的控制点误差均在5 cm的范围内,由此约束和校正后的密集点云具有真实空间坐标系,生成的DEM和正射影像不仅在图像分辨率上达到了厘米级,而且在空间绝对位置上偏差 $<\pm 5$  cm,精度较无控制点提高了至少数十倍。

## 4 有无控制点在不同方面的应用

从第2、3节的分析中可以看出,在有无控制点的两种情况下数据获取、处理和精度各有差异和优缺点,将此对比结果与目前地震领域的研究相结合,本节探讨了两者在地震不同方面的应用前景。

### 4.1 无控制点

在无控制点的情况下,数据获取简易、快速、成本低,数据处理时间短、技术要求低、自动化

程度高,生成的DEM和正射影像分辨率在厘米级,但精度在米级,水平位置误差 $<2.00\text{ m}$ ,垂直高程绝对值误差超过 $100.00\text{ m}$ 但在局部范围内的相对高程值的误差 $<0.5\text{ m}$ ,适用于快速获取影像数据和分析,在地震应急现场可自动快速完成拼接并获取高精度震后影像资料,在短时间内为灾情评估提供宏观震中的灾害信息。若发生6.5级以上的地震会产生地表破裂带<sup>[24]</sup>,在地表遗留地震沟槽、线性陡坎、断错水系冲沟及地表裂缝等形变地貌<sup>[25-26]</sup>,记录着断裂带的活动信息,尽快地获取这些地貌数据能够提取到地震活动相关的构造参数,为地震危险性评估提供科学的依据。在大地震发生后恶劣的环境条件下,人员无法到达破坏严重的发震构造区,因此只能在无控制点的情况下利用无人机快速获取地震地表破裂带附近的影像数据,其简易、快速、安全和自动化程度高的优点展现出了在地震应急现场和救援中良好的应用前景和巨大的应用潜力。虽然该方面还处在探索阶段,但相信通过更进一步的研究和发展,无人

机技术会在地震应急中发挥出更大的作用和价值。

实例2(图1)以1709年宁夏中卫南的7级地震为例,选取震中红谷梁西具有地震陡坎和断错水系冲沟形变遗迹<sup>[25-27]</sup>的附近,在无控制点的情况下获取该处影像数据,经过第2节相同步骤的处理,获得了 $6.33\text{ cm/pix}$ 分辨率的DEM。在确定了断裂的方向之后,在同一地貌上提取出垂直于断裂方向上的地形和坡度数据(图8),图中上方为测量的图解<sup>[15,28-29]</sup>,利用坡度快速分离出上、下盘,然后拟合出上、下盘的直线 $L_1$ 和 $L_2$ 获得陡坎范围内上、下盘间的高程差 $h_1$ 和 $h_2$ ,最后求得平均值 $h$ 代表断层陡坎的高度,并计算测量误差 $dh$ 。由此可见陡坎垂直位错量为相对高程差非绝对高程值,故无控制点的情况下垂直位错量的误差为 $<0.5\text{ m}$ 并非绝对高程值误差( $>100.00\text{ m}$ )。另一方面,在DEM基础上提取水平位移量时,需要确定位移标志物如沟心和沟壁的趋势线<sup>[30]</sup>然后进行测量,因此无控制点的情况下水平位移量误差为 $<2.00\text{ m}$ 。

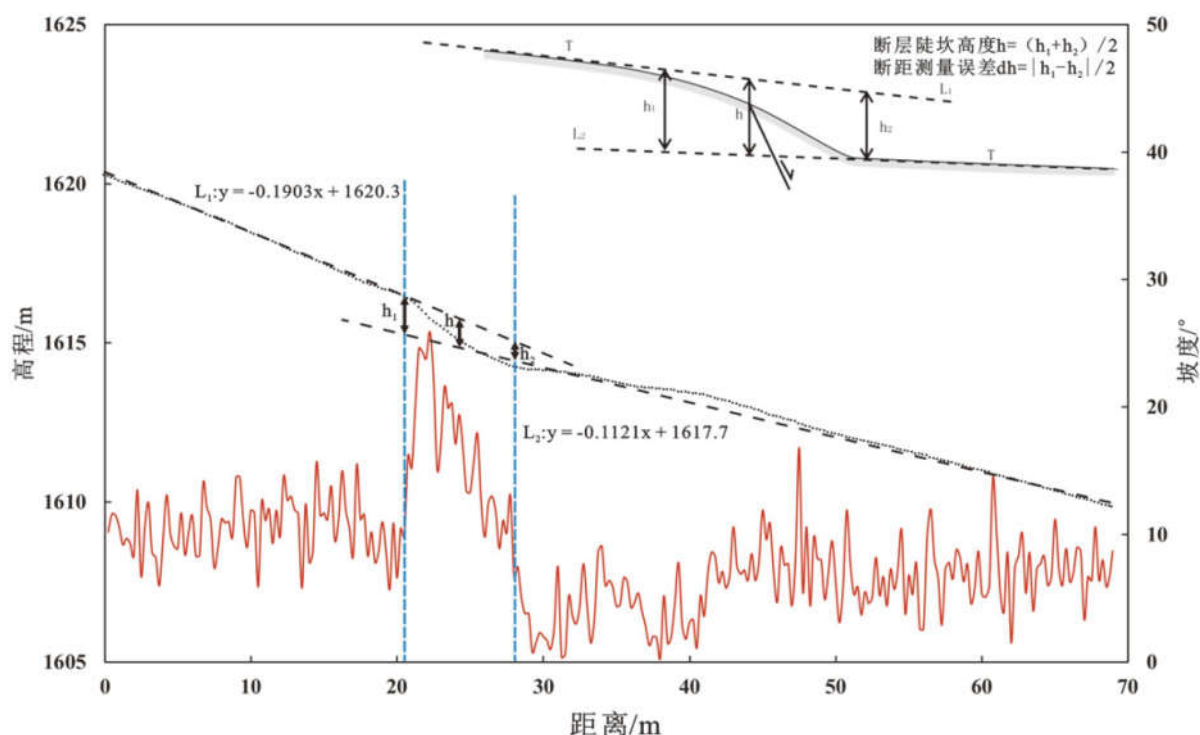


图8 地形和坡度剖面确定的垂直断错量( $h$ )

Fig.8 The vertical fault value( $h$ )extracted by the topography and slope profile

## 4.2 有控制点

在有控制点的情况下,虽然数据获取、处理具有成本高、操作复杂、处理时间长、自动化程度低且技术要求高等诸多不便因素,但生成的

DEM数据具有厘米级的超高分辨率和 $<5\text{ cm}$ 的超高精度,这一优势使得该方法被广泛应用到地震地质学研究中。如活动构造定量研究<sup>[11,15,31-32]</sup>和微地貌精细解译及分析<sup>[6,16,33]</sup>,展现出了广阔的应用前景,已成为该方面研究中一种重要的新技术手



段,前人研究成果丰硕本文就不再举例赘述。虽然这方面应用还存在一定的局限,如测量区面积有限、植被覆盖区效果不理想及受天气影响较大等问题,但相信随着技术的发展和提高影响因素会越来越少,该方法会有更大的价值和意义。

## 5 结语

本文通过对比有无控制点情况下,数据获取、处理和精度的差异性,明确了在无控制点的情况下数据获取和处理简易、快速且成本低,水平位置误差 $<2.00\text{ m}$ ,垂直高程绝对值误差超过 $100.00\text{ m}$ 但在局部范围内相对高程值的误差 $<0.5\text{ m}$ ;在有控制点的情况下数据获取和处理复杂、费时且成本高,但有 $<5\text{ cm}$ 的高精度,两者均可生成厘米级分辨率的 DEM 和正射影像。基于两种情况的优劣势,前者在地震应急中展现了良好的应用前景和巨大的应用潜力,并且可以快速、定量提取发震构造的变形参数,垂直位错量误差 $<0.5\text{ m}$ 、水平位移量误差 $<2.00\text{ m}$ ;后者在活动构造定量研究和微地貌精细解译及分析中展现了广阔的应用前景,提取活动构造的定量参数误差 $<5\text{ cm}$ ,其优势在精细化、量化研究中得到了充分地发挥。

## 参考文献:

- [1] 王宇宙. 计算机视觉三维重建理论与应用[D]. 西安: 西北大学, 2004.
- [2] 廖盾, 吴竞. 基于 Agisoft Photoscan 的图像三维重建及精度研究[J]. 测绘工程, 2017, 26(8): 41-44.
- [3] Cunningham D, Grebby S, Tansey K, et al. Application of airborne LiDAR to mapping seismogenic faults in forested mountainous terrain, southeastern Alps, Slovenia [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(20): L20308.
- [4] Oskin M E, Arrowsmith J R, Corona A H, et al. Near-field deformation from the El Mayor-Cucapah earthquake revealed by differential LiDAR[J]. Science, 2012, 335(6069): 702-705.
- [5] Chen T, Zhang P Z, Liu J, et al. Quantitative study of tectonic geomorphology along Haiyuan Fault based on airborne LiDAR[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(20): 2396-2409.
- [6] Johnson K, Nissen E, Saaripalli S, et al. Rapid mapping of ultra fine fault zone topography with structure from motion [J]. Geosphere, 2014, 10(5): 969-986.
- [7] Baltsavias E P, Favey E, Bauder A, et al. Digital surface modeling by airborne lasers scanning and digital photogrammetry for glacier monitoring[J]. The Photogrammetric Record, 2001, 17(98): 243-273.
- [8] Snavely N, Seitz S M, Szeliski R. Modeling the world from internet photo collections[J]. International Journal of Computer Vision, 2008, 80(2): 189-210.
- [9] Harwin S, Lucieer A. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery [J]. Remote Sensing, 2012, 4(6): 1573-1599.
- [10] 魏占玉, Arrowsmith R, 何宏林, 等. 基于 SfM 方法的高密度点云数据生成及精度分析[J]. 地震地质, 2015, 37(2): 636-648.
- [11] 毕海芸, 郑文俊, 曾江源, 等. SfM 摄影测量方法在活动构造定量研究中的应用[J]. 地震地质, 2017, 39(4): 656-674.
- [12] 李云, 徐伟, 吴玮. 灾害监测无人机技术应用与研究[J]. 灾害学, 2011, 26(1): 138-143.
- [13] Lucieer A, de Jong S M, Turner D. Mapping land slide displacement using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography [J]. Remote Sensing, 2014a, 38(1): 97-116.
- [14] 李金香, 常想德, 姚远, 等. 无人机技术在新疆塔县地震的应用及实现[J]. 华南地震, 2019, 39(3): 57-64.
- [15] 艾明, 毕海芸, 郑文俊, 等. 利用无人机摄影测量技术提取活动构造定量参数[J]. 地震地质, 2018, 40(6): 1276-1293.
- [16] 孙稳, 何宏林, 魏占玉, 等. 基于无人机航测获取高分辨率 DEM 数据的断层几何结构精细解译与分析——以海原断裂唐家坡为例[J]. 地震地质, 2019, 41(6): 1350-1365.
- [17] 徐志强, 杨建思, 姜旭东, 等. 无人机快速获取地震灾情的应用探索[J]. 地震地磁观测与研究, 2009, 30(5): 66-70.
- [18] 王晓青, 王龙, 章熙海, 等. 汶川 8.0 级地震震害遥感定量化初步研究——以都江堰城区破坏为例[J]. 地震, 2009, 29(1): 174-181.
- [19] 杜鹏, 柴炽章, 沈卫华, 等. 罐罐岭断裂带最新活动特征[J]. 地震地质, 2007, 29(3): 597-606.
- [20] 李新男, 李传友. 香山—天景山断裂带西段晚第四纪的特征滑动行为[J]. 地震地质, 2015, 37(03): 482-495.
- [21] 贺专. 地震应急无人机影像处理软件对比研究[J]. 中国应急救援, 2017, 65(05): 35-39.
- [22] 赵云景, 龚绪才, 杜文俊, 等. PhotoScan Pro 软件在无人机应急航摄中的应用[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(4): 179-182.
- [23] 汪思好, 艾明, 吴传友, 等. 高分辨率卫星影像提取 DEM 技术在活动构造定量研究中的应用——以库米什盆地南缘断裂陡坎为例[J]. 地震地质, 2018, 40(05): 999-1017.
- [24] 铁瑞, 王俊, 贾连军, 等. 强震地震数据统计及其地表破裂特性研究[J]. 世界地震工程, 2016, 32(1): 112-116.

- [25] 张维歧,焦德成,柴炽章,等. 宁夏香山—天景山弧形断裂带新活动特征及 1709 年中卫南 7 $\frac{1}{2}$  级地震形变带[J].地震地质,1988,10(3):12-20.
- [26] 张维歧,焦德成,柴炽章,等. 天景山活动断裂带[M]. 北京:地震出版社,2015.
- [27] 汪一鹏,宋方敏,李志义,等. 宁夏香山—天景山断裂带晚第四纪强震重复间隔的研究[J]. 中国地震,1990,6(2):15-24.
- [28] Zheng W J,Zhang H P,Zhang P Z,et al. Late Quaternary slip rates of the thrust faults in western Hexi Corridor (Northern Qilian Shan, China) and their implications for northeastward growth of the Tibetan Plateau[J]. Geosphere, 2013,9(2):342-354.
- [29] 俞晶星. 雅布赖山前断裂晚第四纪滑动速率与古地震[D]. 北京:中国地震局地质研究所,2013.
- [30] 李传友. 青藏高原东北部几条主要断裂带的定量研究[D]. 北京:中国地震局地质研究所,2005.
- [31] 王鹏涛,邵延秀,张会平,等. sUAV 摄影技术在活动构造研究中的应用:以海原断裂骗马沟为例[J]. 第四纪研究,2016,36(2):433-442.
- [32] 马建,黄帅堂,吴国栋,等. 基于微型无人机摄影技术的微构造信息提取研究—以博—阿断裂乌苏通沟东岸为例[J]. 中国地震,2019,35(03):550-557.
- [33] 高帅坡,冉勇康,吴富晓,等. 利用无人机摄影测量技术提取复杂冲积扇面构造活动信息—以新疆巴里坤盆地南缘冲积扇面为例[J]. 地震地质,2017,39 (04):793-804.