

飞马 D2000 高精度免像控在矿区沉陷监测中的应用

廉旭刚 刘晓宇 武燕茹 韩雨 王帆 范皓迪 高玉荣 张雅飞

【太原理工大学】

摘要:

煤矿地下开采引起的地表沉陷及其次生效应不断威胁着矿区居民的人身安全和财产安全。常用的全站仪方法费时费力,获取数据空间范围有限。在本项目中,我们使用飞马 D2000 四旋翼无人机在某工作面地表影响区(3.75km²)进行 4 次 4cm/像素的免像控摄影测量。在两个子研究区域的 5 种点云滤波算法性能对比实验表明,ATIN 算法对该研究区域的滤波效果最好。提出了基于时序无人机摄影测量技术的山区采煤沉陷监测方法,即采用 ATIN 算法对研究区整体点云数据进行滤波,得到数字高程模型(DEM);通过两阶段 DEM 相减得到地表动态沉降盆地。结果表明,与同期现场实测水准数据相比,平均均方根误差为 165mm,沉降监测精度最高可达 98%。无人机在矿区变形监测领域具有巨大的潜力,本项目论证了无人机摄影测量数据在矿区地表变形监测中的适用性,为该技术在矿区采煤沉陷监测中的推广应用提供强有力支撑。

关键词:

无人机摄影测量;免像控;沉陷监测;滤波算法;地表沉陷盆地

1 立项依据与研究内容

1.1 研究背景与意义

我国煤炭资源分布广泛,已经勘测和发现的煤田大约有 55 万平方公里,占了我国国土面积的 5.7%。煤炭资源的开采是经济发展的能源支柱,为国家经济发展提供直接动力。但是煤炭开采对地表资源的破坏也是不可避免的,比如山体滑坡、建筑物垮塌、地表植被破坏、生态环境恶化、地表水位下降等灾害。开展地表沉陷监测对于保护矿区生态环境与现代煤炭开采可持续发展起着重要作用,快速实时获取沉陷资料能够对煤炭开采活动提供合理科学的指导^[1]。

几十年来,传统的观测技术如全站仪和水准仪等一直在岩层移动研究中起到了重要的作用。其存在的主要问题在于:

(1) 传统的观测线方法仅从主断面上研究采动地表移动规律，无法形成整个工作面影响区域的面状沉陷盆地，对于分析地表移动规律具有一定的局限性。

(2) 传统的观测手段，全站仪、水准仪人力物力成本较高，观测工作量较大，复杂地形区域不便于采用全站仪或水准仪，造成了沉陷盆地重要区域的数据缺失。

测量技术的发展将地貌研究带入了高分辨率地形革命：亚米分辨率的地形数据越来越多。改进的测量平台、传感器、数据后处理工具和算法的应用促进了这类数据的获取。这种数据收集革命极大地提高了我们描绘景观、监测和评估地貌变化的能力和机会。本项目研究的无人机高精度免像控在矿区沉陷监测中的应用具有重要的意义。无人机结构运动(SfM)摄影测量是一种快速、低成本、简单灵活的三维测量方法，已广泛应用以获取多个时间和空间尺度的高分辨率地形数据。在控制点获取受到场地进入困难或危险环境影响的情况下，为了提高测量效率，可以使用直接地理参考。在无控制点的情况下，通过精确测量传感器的位置和方位，将无人机图像定位在地球固定坐标系中。

本项目引入无人机免像控监测技术，极大程度上的克服了传统监测技术的多种局限性，为采煤沉陷地面监测提供了一条技术革新的探索途径，对于传统监测方法的技术变革具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

随着无人机技术的进步和快速应用，越来越多的研究者将无人机遥感技术用于地表沉陷监测。与其他监测方法相比，无人机在检测地表沉陷时提供了相似的精度水平，然而无人机技术更加灵活和高效^[4]。就矿山沉陷监测而言，无人机有一个显著的优势是其在测量后可以获得更大的数据集^{错误!未找到引用源。}。作为一个动态的、连续的和经济的数据采集方法，无人机能在低空飞行时快速获取厘米级图像，然而无人机也受到一些内部或外部因素的影响，如天气、GPS 信号、稳定性问题^{错误!未找到引用源。}。

目前，无人机技术已经广泛应用于露天矿，无人机能够估算库容，监测高边坡稳定性^[7]。与地面激光扫描技术的结合，进行露天矿土地覆盖类型的高精度分类^[8]。Zhou 等人利用无人机摄影测量技术对煤矿井下开采引起的地表动态沉降盆地进行监测，观察短期动态地表变化并反演开采沉降参数^[9]。Pawel 等采用无人机摄影测量检测矿区的不连续形变，评定点坐标、位移以及高度沉降的精度在 1.5-3 地面采样距离(GSD)左右^[10]。利用无人机摄影测量获取沉陷盆地形态特征，在外业实测地面检查点数据来评估无人机沉陷模型的垂直精度，论证无人机应用开采沉陷监测的可行性^[11]。在大多数研究中，无人机数据的地理参

考依赖于地面控制点。利用地面测量方法绘制难以到达或危险区域是一项具有挑战性的任务。飞马 D2000 无人机采用实时动态载波相位差分技术 (RTK) 融合 GNSS 动态后处理差分技术 (PPK) 进行空三解算, 提高空三加密的精度, 以实现免像控的目的。Mian 使用 0.7cm GSD 的图像实现了均方根误差为 40cm 的垂直精度^[15]。文献^[16]使用的是测量级 GNSS 实时运动学 (RTK) 接收机 (RTK UAV), 他们的结论是, 在要求垂直均方根误差小于 12 厘米的应用中, 应该使用控制点而不是 GNSS/RTK 平台。在文献^[17]中, 作者指出, 在没有控制点的情况下, 均方根误差在 10 厘米的范围内随飞行而变化。参考文献^[18]也评估了使用类似设备进行直接地质参考的性能。他们实现了约 4.7GSD 的垂直误差。

无人机能够在短时间内对研究区域进行多次监测, 通过数据处理得到每次观测的 DEM。然后, 通过两时段的 DEM 相减得到矿区的沉降数据。生成 DEM 的数据处理过程中, 重要的一步是对原始点云进行滤波以去除非地面点。目前常用的点云滤波算法主要应用于激光雷达数据处理软件中。最近有些研究主要集中在无人机点云数据滤波方法上^[19]。激光雷达技术在矿区沉陷监测中虽有一定应用^[21], 然而, 它的高成本使得这项技术难以实现。无人机技术取代了机载激光雷达系统, 为许多应用产生高密度的点云。文献中已经介绍了大量的地面滤波方法, 其中一些已经在商业软件中实现, 一些已经在非商业软件中实现。为了验证地面滤波的准确性, 进行了一些关于算法性能的比较^[23], 结论是没有哪一种算法可以在任何地形情况下都表现得最好, 在地表变化较大的地区, 区分地面和非地面具有相当大的挑战性^[25]。文献中也缺少对广泛应用的地面滤波算法在基于无人机的点云上综合评价其性能的研究。

1.3 本项目研究内容

(1) 提出一个详细的工作流程, 以有效收集和处理矿区的多时相无人机 SfM 数据。这些数据可以用来描述矿区地表特征, 研究地形随时间的变化。

(2) 使用 5 种广泛应用的商业或非商业软件对基于无人机的航拍照片提取的点云进行滤波: 商业软件 Terrascan、开源软件 gLiDAR、开源软件 Cloudcompare、ENVI LiDAR 以及商业软件 Lastools。评估这些滤波方法的相对性能, 对它们的适应性进行对比选优。

(3) 利用无人机摄影测量技术获取研究区多期点云数据开展沉陷建模研究, 通过实测数据验证沉陷盆地的实际精度, 为无人机摄影测量在矿区采煤沉陷监测中的推广应用提供技术支撑。

2 技术路线

在矿区建立控制点耗费巨大的人力物力，而且通常是不可行的。地面控制点的布置也限制了无人机的一个固有优势：能够远程和准确地观察地面上难以进入和危险的地形。免像控的前提在于精准的 POS 数据和相机参数。因此，不同于常规 1:500 航测成图，免像控测量对于航线规划、数据采集和数据处理等有着严格的要求。本文主要讲述项目实施的数据采集、数据预处理、数据生产等几个阶段，并对成果进行精度检核。其详细技术路线如图 1。

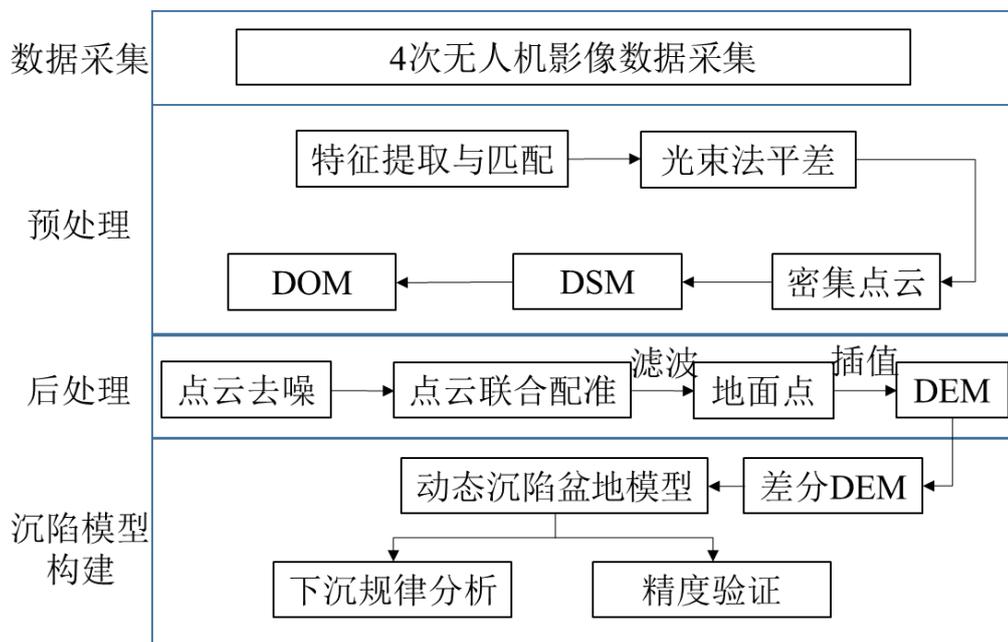


图 1 项目技术路线图

3 项目实施

3.1 研究区域

阳泉煤业位于中国山西省阳泉市。研究区的工作面特征如下：走向长度 1345m，倾向长度 226 米，煤层的平均倾角为 4° ，平均开采深度为 446.8m，平均煤厚 7.24m。布设半条走向观测线 A 线和两条倾向观测线 B 线和 C 线。工作面、观测站及研究区域相对位置关系如图 2 所示。

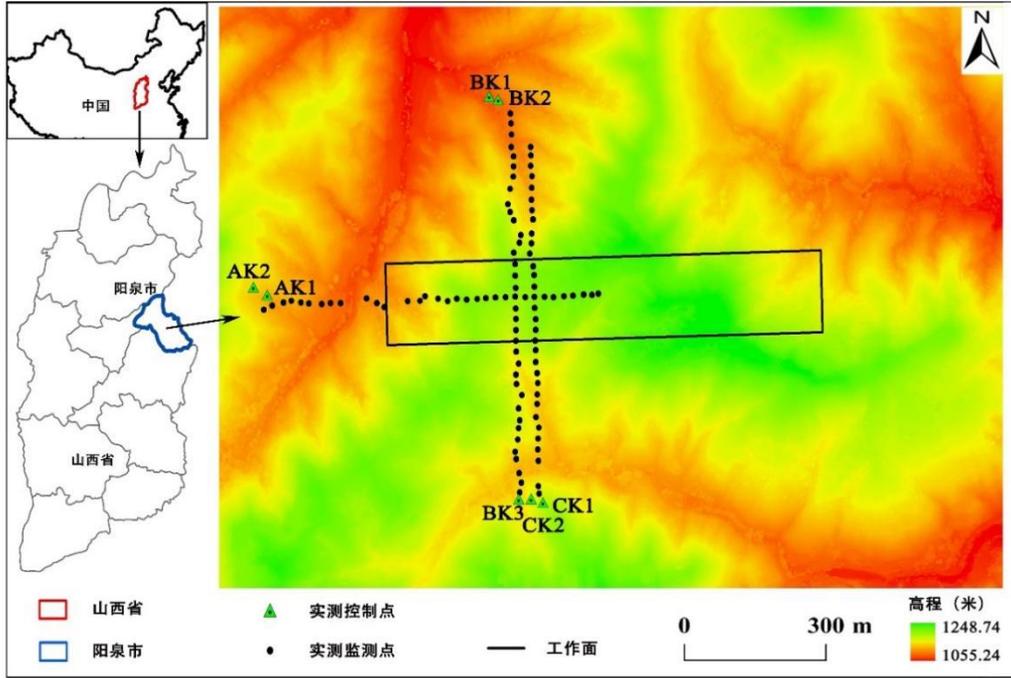


图 2 工作面、观测站及研究区域相对位置关系

3.2 数据采集

(1) 航线设计

本项目采用飞马智能航测系统 D2000 分别在 2020 年 6 月 14 日、7 月 20 日、9 月 7 日和 11 月 15 日在阳泉煤业采集 4 次数据。采用 RTK+PPK 的融合解算技术实现无人机飞行过程中的高精度定位。无人机平台的详细信息见表 1。根据地形特征，为保证飞行安全和图像质量，设计地面分辨率为 4cm，航向重叠和旁向重叠分别为 80%和 70%。采用变高飞行，始终保持相对地面飞行高度不变，保证影像分辨率一致。航线和参数设置如图 3。研究区面积 3.75 平方公里，通过断点记录功能，每次航飞进行两个架次，飞行总时间 50 分钟。获取的数据坐标系为 WGS-84。每次外业飞行作业流程保持不变，保证了每期数据之间坐标基准的统一性。

表 1 无人机平台详细信息

无人机		D-CAM2000 航空模块	
系统标准起飞重量	2.8kg	相机	SONY a6000
标准载荷	200g	有效像素	24.3 million
续航时间	74min	传感器	23.5x15.6mm (aps-c)
遥控距离	20km(Max)	焦距	25mm

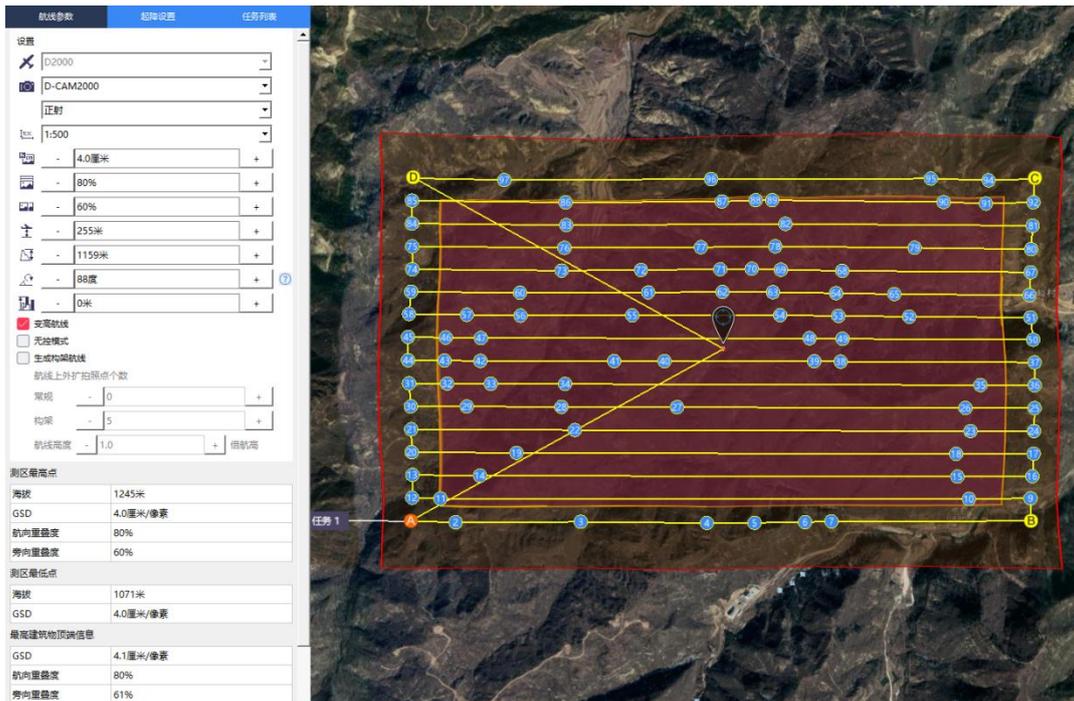


图3 航线设计

(2) 航飞情况

现场航摄作业时，飞机组装完成后，要根据飞马无人机管家的提示进行一系列严格的检查，在确保安全的情况下才能升空作业。野外工作如图 4 所示，飞机升空作业后，在地面站对飞机工作状态进行实时监控，时刻关注电池电量、飞机的飞行姿态、航高及速度等指标。航摄完成后应在现场下载 POS 数据并对航摄影像进行检查和整理，确保 POS 信息无遗漏，影像清晰。



图4 飞马 D2000 现场作业图

3.3 数据处理

3.3.1 数据预处理

(1) 格式转换

针对 D2000 系列的*.fmcompb 格式的流动站数据，采用智理图 GPS 解算模块中的“GPS 格式转换”工具转换为 RINEX 格式。如图 5 所示。



图 5 两个架次文件格式转换

(2) 差分解算

基于流动站和基站数据，并根据差分作业模式进行差分解算，获取每个相机的高精度 POS 数据。流动站观测文件为飞机 GPS 原始数据转换得到的*.0 文件。勾选基准站，并设置选择“RINEX 头文件”，点击下载，根据目标坐标系进行选择，下载对应的基准站文件。导入流动站和基准站后进行差分解算设置。如图 6 所示。



图 6 网络差分解算

(3) 写入 EXIF

差分解算完成后，进行差分质量的检查，其差分质量通过解算的照片固定解的百分比来表现。将照片数量和 POS 数据对应好，选择智理图“EXIF”功能，顺序写入 EXIF。



图 7 写入 EXIF 界面

3.3.2 数据后处理

(1) 数据生产

在管家智拼图中新建工程，设置工程名称，处理类型选择正射，导入影像并由 EXIF 读入 POS。确定相机参数和坐标系统后进行自由网空三运算，并生成 DSM 和真正射数据。之后导出 xml 格式的空三文件，导入 ContextCapture 软件中。空三完成后，ContextCapture 软件进行自动化建模作业。

在四次调查中获得的所有图像都进行了相同的摄影测量处理。影像匹配和免像控空中三角测量是获取成果的两个关键技术。保证照片有一定的重叠度就可以利用计算机视觉技术对齐照片来进行特征点匹配；通过引入网络 RTK/PPK 融合差分作业模式来进行高精度后差分 POS 解算，为免像控空三处理提供了前提条件。

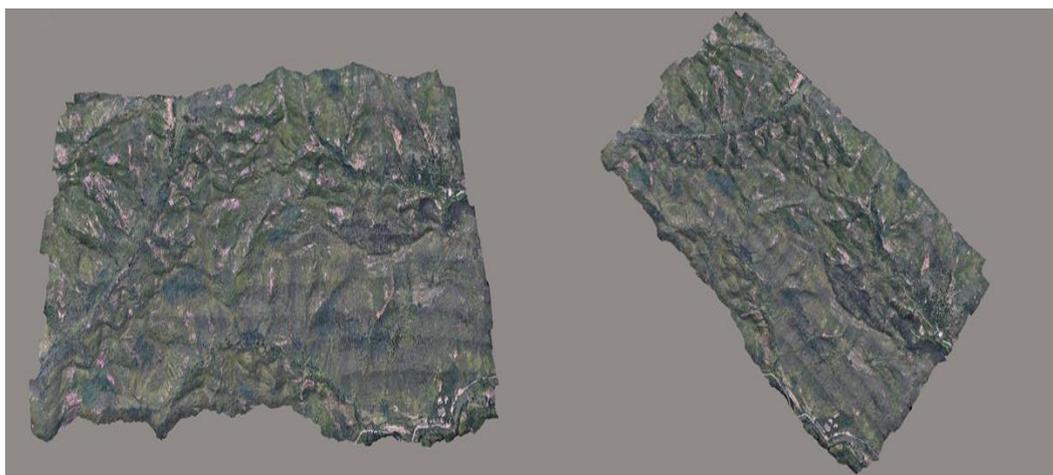


图 8 测区实景三维模型成果

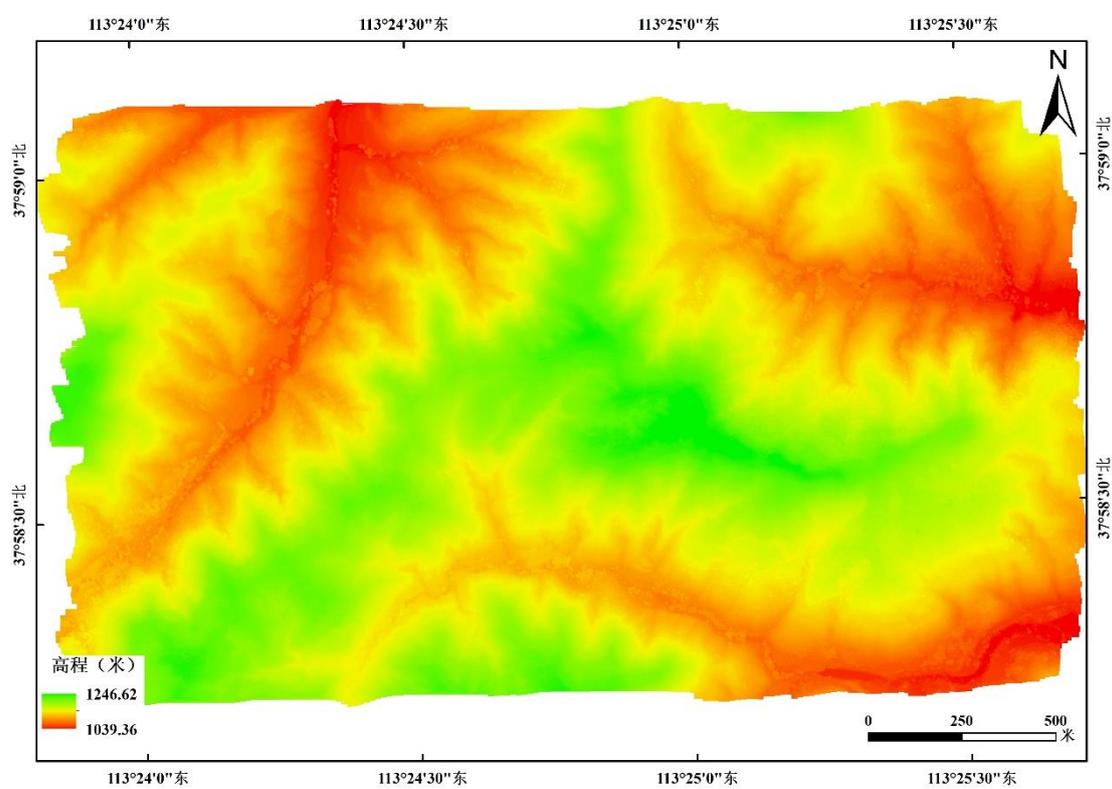


图 9 测区 DSM

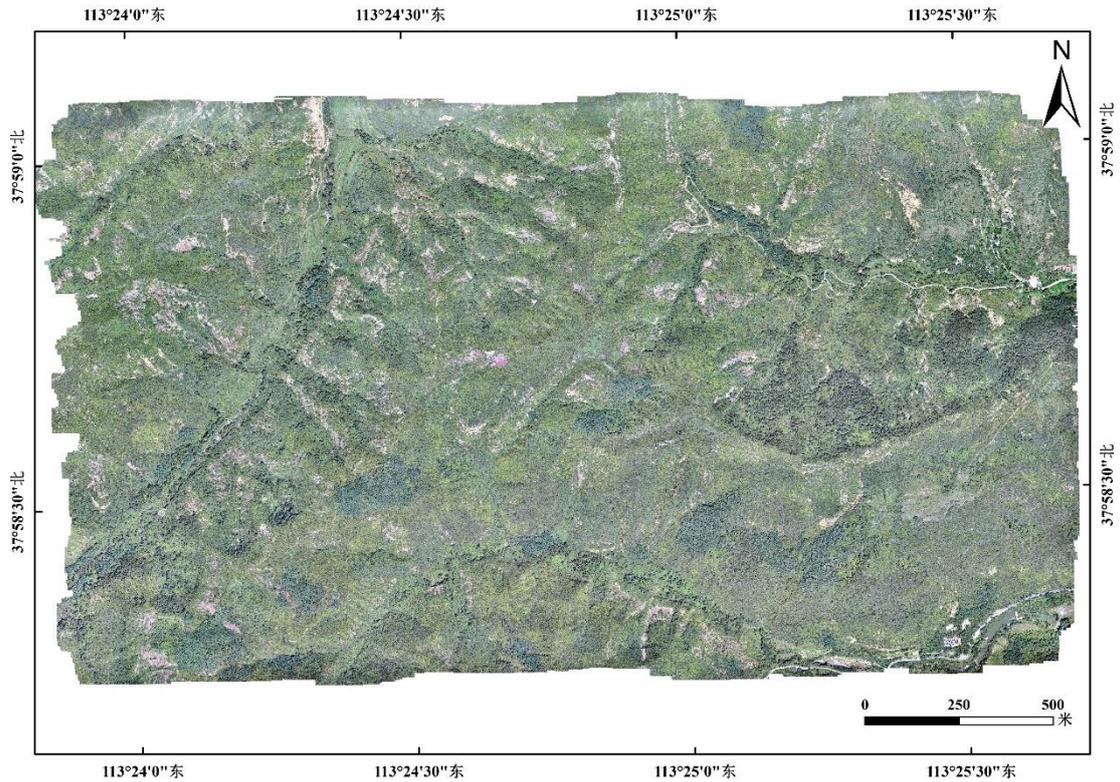


图 10 测区正射影像图

3.3 点云滤波

我们在数据区选择两个 $300\text{m} \times 300\text{m}$ 的子区域进行点云滤波软件性能的对比实验，获取参考地面点和非地面点的步骤如下：

(1) 使用 Terrascan 软件中的自动滤波工具获得初始滤波结果。

(2) 对初始滤波结果生成的 DEM 进行可视化检查，以发现不规则的凸起和低的表面。

通过可视化点云的横截面手工检测相应的点云，纠正错误分类的点。

(3) 在正射影像中检查每个点的土地类型，来确定参考数据的正确性并保证点云的均匀分布。

虽然参考数据的分类结果不是 100%准确，但误分类比软件自动滤波结果的误分类要低得多。因此，在本研究中，我们假设参考数据是对点云数据的正确分类。

3.3.1 定性分析

本节从视觉上定性评估了所使用的滤波算法的性能，定性分析可以帮助我们确定地物的一般类型，以及错误分类的空间分布。图 11 和图 12 显示了地点 1 和 2 的原始 DSM 以及不同滤波算法得到的 DEM。我们使用反距离加权插值地面点得到 DEM。图中分别用圆圈和矩

形表示一些最明显的拒真误差和纳伪误差。在所有的样本中，滤波后的三维曲面图几乎显示出相同的外观，也就是说，五个滤波方法都能将大部分的非地面点移除。然而，滤波方法不可避免的犯了一些拒真（类型 I）和纳伪（类型 II）的错误。

从图 11 可以看出，gLiDAR、CSF 和 ENVI LiDAR 未能去除一些非地面点，gLiDAR 的滤波结果中有一个尤为明显的纳伪误差，其中 CSF 和 ENVI LiDAR 还删去了该地点某些区域的地面点（如图 11(D, E)所示）。Lastools 把部分植被点错误地划分为地面点，导致坡底地形有一些粗糙（参见图 11(C)中矩形部分）。从图 11(B)可以看出，ATIN 算法在地点 1 中表现良好，除了在地形上造成一些小的凹陷坑的拒真误差。

Lastools 和 gLiDAR 的结果中有一些分类错误是由于地点 2 中部分区域地形的不连续，gLiDAR 中有两处较为明显的纳伪误差。ENVI LiDAR 的结果中有小的塌陷坑以及山顶处的地形缺失。ATIN 在滤除非地面点方面依然表现得很稳健，可以看出该算法的纳伪误差相对较小。ATIN 和 CSF 在地点 2 上是较为成功的算法。

由于定性评价取决于分析者的观点，分析者可能会犯主观上的错误，因此很难评价某个算法是最成功或最不成功，最好是通过定性评价对滤波算法的性能能有一个大致的了解。为了全面和稳健的分析，定量评价是必要的。

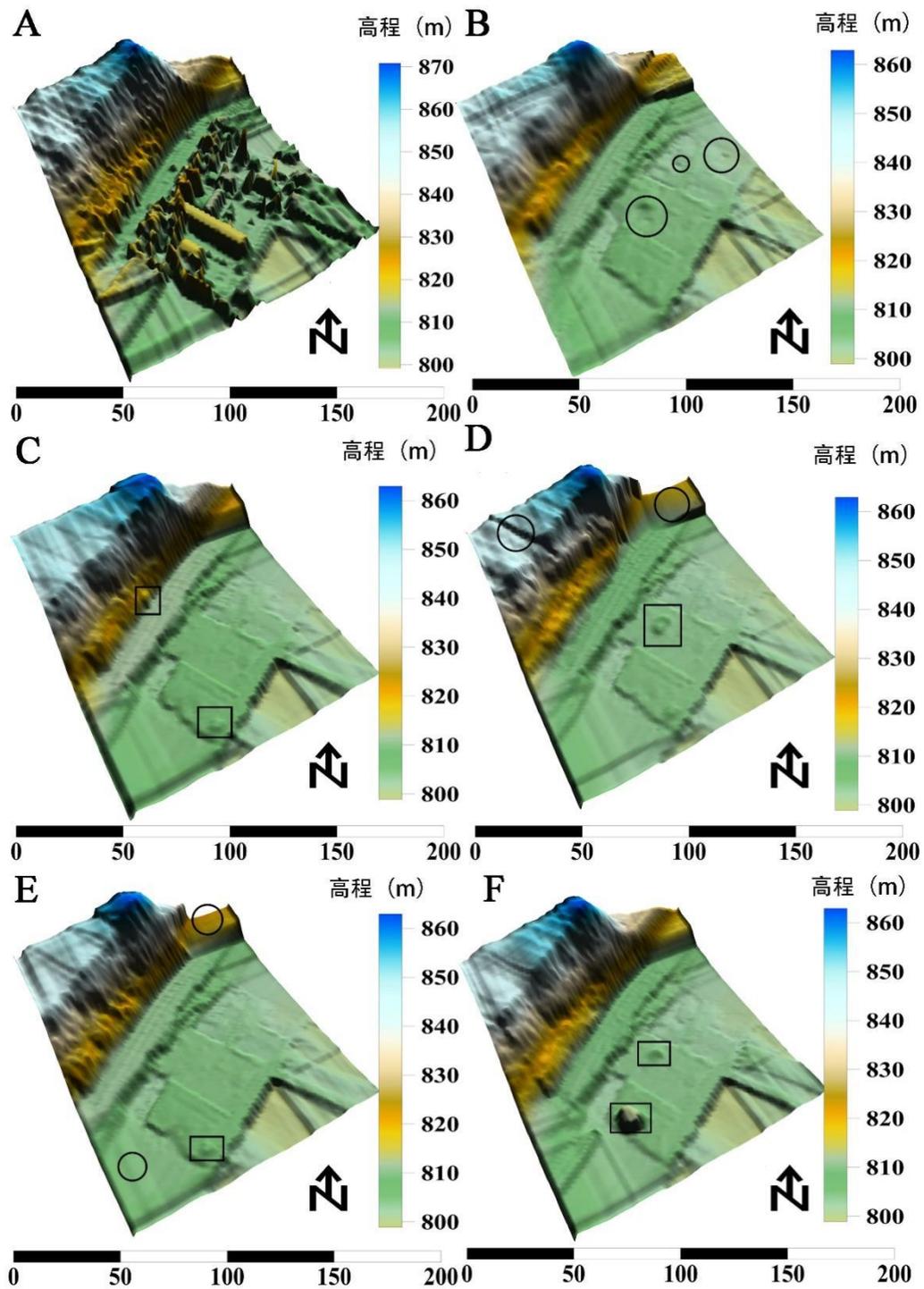


图 11 研究区 1 的 DSM 和 DEM (A) DSM (B) Terrascan-渐进 TIN 生成的 DEM (C) lastools 生成的 DEM (D) cloudcompare-CSF 生成的 DEM (e) ENVI LiDAR 生成 DEM (F) g-LiDAR 生成的 DEM

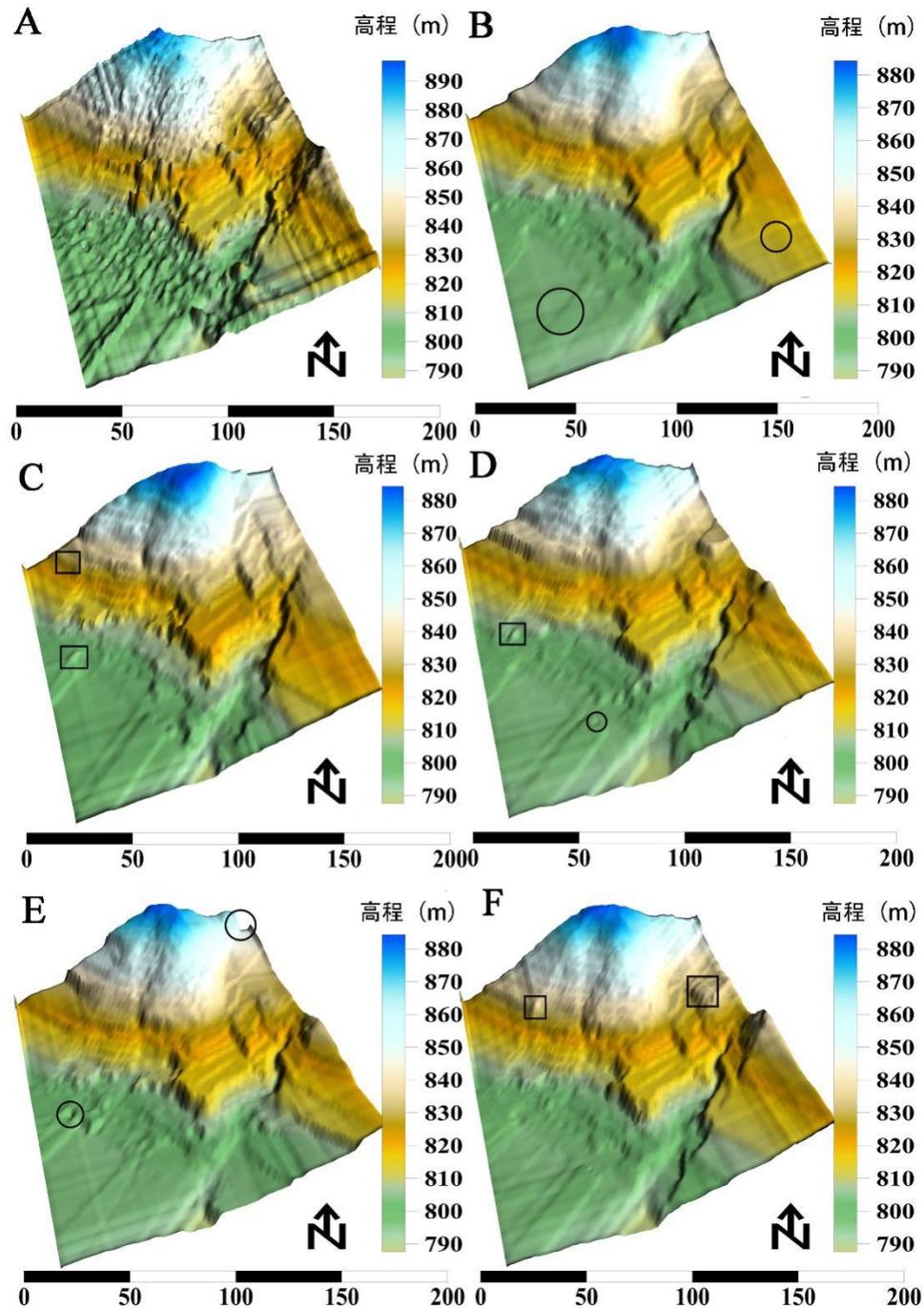


图 12 研究区 2 的 DSM 和 DEM (A) DSM (B) Terrascan-渐进 TIN 生成的 DEM (C) lastools 生成的 DEM (D) cloudcompare-CSF 生成的 DEM (e) ENVI LiDAR 生成 DEM (F) g-LiDAR 生成的 DEM

3.3.2 定量分析

定量评价结果如表 2 所示，在地点 1，第一类、第二类和总误差的范围分别为 5%~18%、0.4%~30%和 9.2%~17.8%。虽然 ATIN 的一类误差比二类误差大得多，但依然是总误差最

小的算法 (E_T 9.2%)。PTIN 是第二成功的算法 (E_T 11.5%)，在一类误差方面控制得比较好 (5%)，说明其能够在去除地面点的同时尽量保存了主要的地形特征。ENVI LiDAR 与 PTIN 相近的总误差 (E_T 11.6%)，但是在类和二类误差方面性能相反，一类误差较大，这在定性评价中同样得到了验证。CSF 在地点 1 的表现整体比 PTIN 稍差。gLiDAR 算法二类误差较大导致其有最大的总误差 (E_T 17.8%)，其保留地面点的性能优于去除非地面点的性能。

表 2 定量评价结果

		地面点滤波算法				
测试地点	误差类型	Terrascan	Lastools	ENVI		
		ATIN	PTIN	CSF	LiDAR	gLiDAR
地点 1	E_I (%)	18	5	10.4	15.6	5.6
	E_{II} (%)	0.4	18	22.2	7.6	30
	E_T (%)	9.2	11.5	16.3	11.6	17.8
地点 2	E_I (%)	12.2	1.4	13.6	18.6	5
	E_{II} (%)	1	36	14.6	12	40
	E_T (%)	11.1	18.7	14.1	15.3	22.5

地点 2 计算的误差值显示，第一类、第二类和总误差的范围分别为 1.4%~18.6%、1%~40%和 11.1%~22.5%。ATIN 在去除非地面点方面的稳健性使其依然是总误差最小的算法。CSF 在地点 2 是第二成功的算法。地点 2 地形的特点是有连续的陡坎，对各种算法都提出了挑战。各种算法经常检测不到台阶边缘上的地形点，将地物的下部误认为是地面点，这也是地点 2 中犯二类错误通常比地点 1 中所犯的错误的大的主要原因。图 13 直观地解释了所有滤波误差结果。

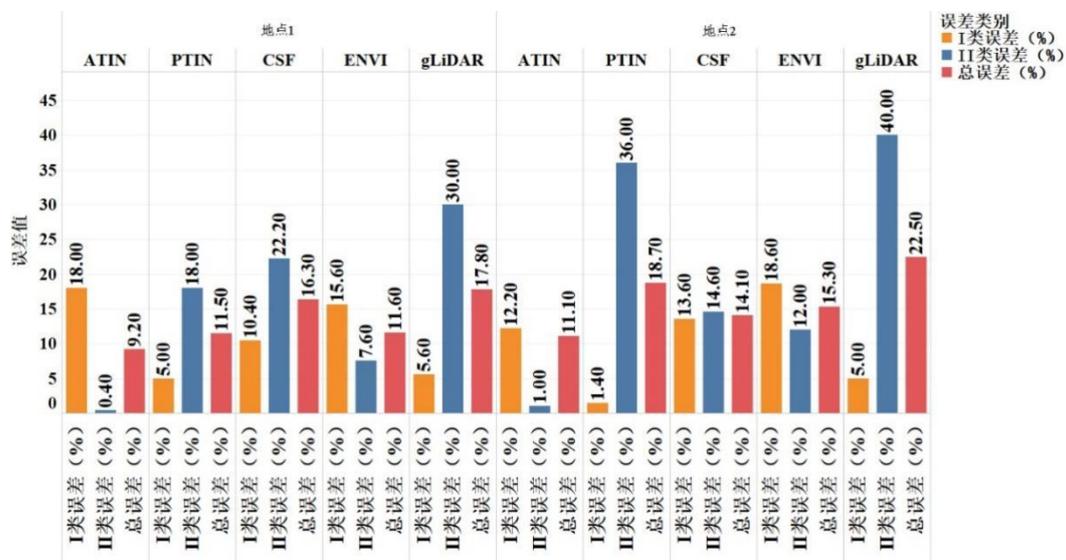


图 13 测试地点的类型 I、类型 II 和总错误

3.4 沉陷模型构建

3.4.1 获取动态沉陷盆地

通过在两个典型地点的滤波性能对比分析可知，ATIN 有易于选取的参数范围，能有效去除区域内的低矮植被，并且在两个地点都取得了最小的总误差，比其他算法有更强的自适应性，所以我们选择 ATIN 作为整个研究区域的滤波工具。

实验首先将各组数据通过 ATIN 算法进行点云滤波、反距离加权插值处理，获取 4 组 DEM 数据，将 6 月 14 日的 DEM 分别减去 7 月 20 日、9 月 7 日和 11 月 15 日的 DEM，得到如图 14 的工作面开采引起的地表下沉盆地的发展情况。随工作面推进，最大下沉值增大，下沉盆地范围向采空区中心靠拢。

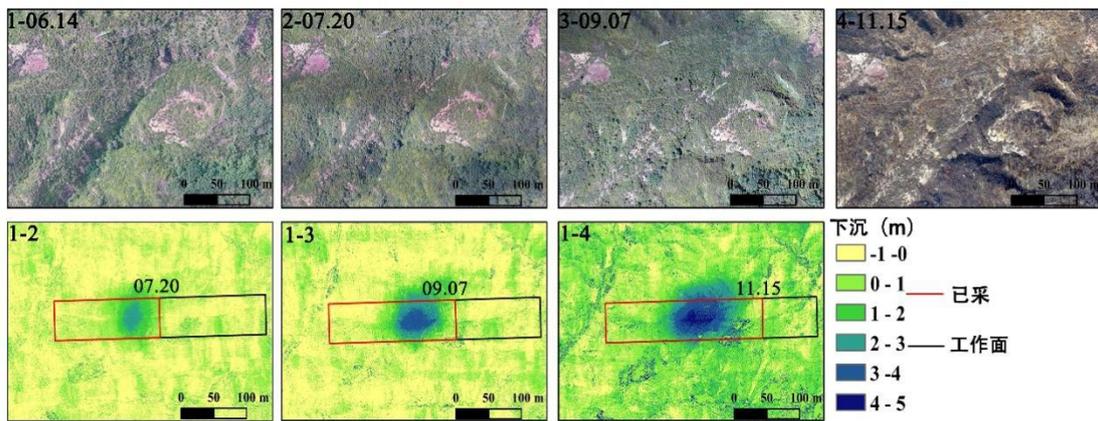


图 14 工作面地表沉降盆地的发展

3.4.2 精度分析

将 6 月 14 日到 7 月 20 日的实测点高程差与对应两时段的 DEM 高程差对比，计算使用无人机数据沉降盆地的均方根误差。计算结果表明，走向 A 线 33 个有效监测点沉降值的均方根误差为 0.16 m，倾向 C 线 17 个有效监测点沉降值的均方根误差为 0.17m。以 A 线和 C 线的交点为原点，实测变形与沉陷 DEM 点形变对比如图 15。无人机沉陷 DEM 提取的下沉曲线与实测下沉曲线趋势较为接近。

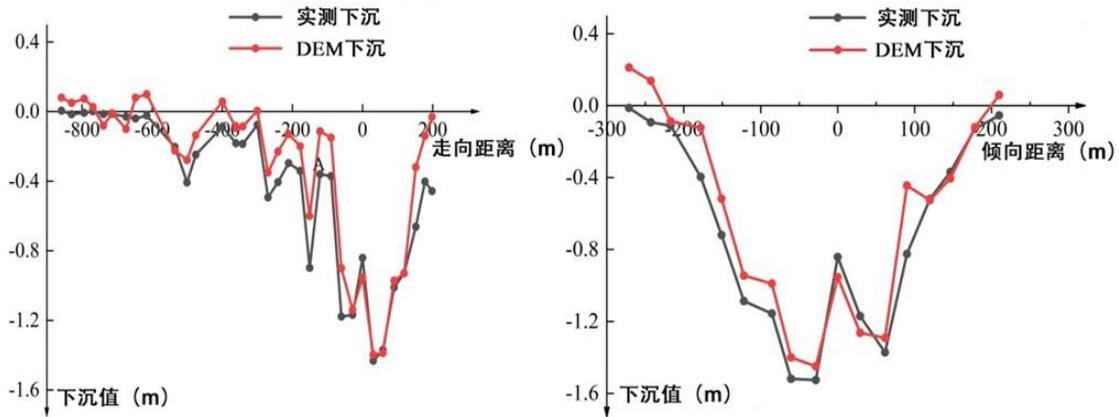


图 15 A 线和 C 线实测形变与沉陷 DEM 形变对比

3.4.3 主断面沉陷特征分析

主断面分析是开采沉陷分析的重要方式。为了更直观地反映本研究沉陷 DEM 模型的效果，沿下沉盆地走向主断面提取三期下沉剖面数据，并保证剖面线的起点和终点坐标均相同。由于滤波和多期点云内插生成格网 DEM 造成的模型误差，无人机提取的沉陷数据中不可避免地存在突变误差。对三期沉陷曲线进行局部多项式拟合，最大下沉值拟合误差最大不超过 0.03 米，占走向实测最大下沉值的 2%以内。从图 16 原始提取数据和拟合曲线可以看出随着工作面推进，地表的影响范围不断扩大，下沉值不断增加，最大下沉点随工作面的推进向采空区中心偏移，符合开采沉陷的一般规律。总的来说采用无人机监测矿区沉陷能够较为全面地反映出矿区沉陷影响范围，精确地监测出最大下沉值。

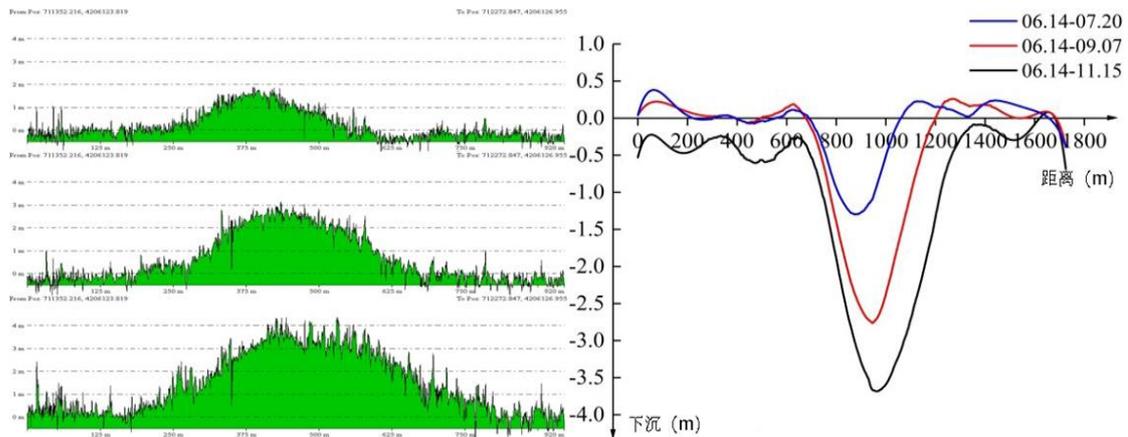


图 16 工作面走向主断面沉降剖面结果(基于无人机摄影测量) (a)走向主断面数据 (b)局部多项式拟合

4 项目总结

研究基于无人机摄影测量监测矿区地表沉陷的方法，得到了以下结论：

(1) 无人机摄影测量技术作为一种新的开采沉陷监测技术，克服了观测周期长、劳动强度高、固定测点埋深、传统观测站保护困难等局限性，同时可实现大面积的监测，降低了成本，处理更为便捷省时。无人机摄影测量可直接获取面的沉陷信息，提供了丰富的沉降数据，便于从整体上把握沉陷地区情况。

(2) 高精度定位系统是无人机的一个关键的部分，本项目获取无人机数据过程中采用先进的网络 RTK/PPK 融合差分作业模式，能有效解决由于观测数据质量差和飞行姿态问题所带来的差分解算固定率低和高程跳点较多的问题，全面提升定位精度和可靠性，为免像控空三处理提供了前提条件。

(3) 采用飞马 D2000 多旋翼无人机搭载 DCAM-2000 测量模块的方式进行测区影像数据获取，能够在较短的时间生产高质量、高精度的模型成果，并在此基础上分析矿区沉陷监测结果。采用免像控方式，大大减轻外业人员劳动强度，提升作业效率，外业采集更自主、更高效，整体效果优于传统布设像控点的航测方式。

参考文献：

- [1] 钱鸣高, 许家林, 王家臣. 再论煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2018, 第 43 卷(1):1-13.
- [2] 何国清. 矿山开采沉陷学[M]. 中国矿业大学出版社, 1991.
- [3] 何万龙. 山区开采沉陷与采动损害[M]. 中国科学技术出版社, 2003.
- [4] Potential and limitation of UAV for monitoring subsidence in municipal landfills[J]. International Journal of Environmental Technology & Management, 2014, 17(1):1-13.
- [5] Stupar D I , Roer J , Vuli M . Investigation of Unmanned Aerial Vehicles-Based Photogrammetry for Large Mine Subsidence Monitoring[J]. Minerals, 2020, 10(2):196.
- [6] He Ren, Yanling Zhao, Wu Xiao, et al. A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives[J]. 国际煤炭科学技术学报(英文), 2019, 6(3):320-333.
- [7] Ge L , Li X , Ng H M . UAV for mining applications: A case study at an open-cut mine and a longwall mine in New South Wales, Australia[C]// Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE, 2016.
- [8] Tong X , Liu X , Chen P , et al. Integration of UAV-Based Photogrammetry and

Terrestrial Laser Scanning for the Three-Dimensional Mapping and Monitoring of Open-Pit Mine Areas. [J]. Remote Sensing, 2015.

[9] Z. Dawei, Q. Lizhuang, Z. Demin, Z. Baohui and G. Lianglin, "Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry Technology for Dynamic Mining Subsidence Monitoring and Parameter Inversion: A Case Study in China," in IEEE Access, vol. 8, pp. 16372-16386, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2967410.

[10] Ćwiąkała P, Gruszczyński W, Stoch T, et al. UAV Applications for Determination of Land Deformations Caused by Underground Mining[J]. Remote Sensing, 2020, 12(11): 1733.

[11] 高冠杰, 侯恩科, 谢晓深, 等. 基于四旋翼无人机的宁夏羊场湾煤矿采煤沉陷量监测[J]. 地质通报, 2018, 37(12): 2264-2269.

[12] 陈鹏飞. 无人机倾斜摄影测量开采沉陷监测方法研究[D]. 山西: 太原理工大学, 2018.

[13] 张曦. 基于无人机摄影测量技术的矿区沉陷监测方法研究[D]. 河北: 河北工程大学, 2019.

[14] Anssi R, Anne T, Corine D, et al. UAV Remote Sensing Surveillance of a Mine Tailings Impoundment in Sub-Arctic Conditions[J]. Remote Sensing, 2017, 9(12): 1318-1318.

[15] Mian, O.; Lutes, J.; Lipa, G.; Hutton, J.J.; Gavelle, E.; Borghini, S. Accuracy assessment of direct georeferencing for photogrammetric applications on small unmanned aerial platforms. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2016, 40, 77-83.

[16] Hugenholtz, C.; Brown, O.; Walker, J.; Barchyn, T.; Nesbit, P.; Kucharczyk, M.; Myshak, S. Spatial accuracy of UAV-derived orthoimagery and topography: Comparing photogrammetric models processed with direct geo-referencing and ground control points. Geomatica 2016, 70, 21-30.

[17] Benassi, F.; Dall'Asta, E.; Diotri, F.; Forlani, G.; Cella, U.M.; Roncella, R.; Santise, M. Testing accuracy and repeatability of UAV blocks oriented with gnss-supported aerial triangulation. Remote Sens. 2017, 9, 172.

[18] Forlani, G.; Dall'Asta, E.; Diotri, F.; Cella, U.M.; Roncella, R.; Santise, M. Quality Assessment of DSMs Produced from UAV Flights Georeferenced with On-Board RTK Positioning. Remote Sens. 2018, 10, 311.

[19] Zeybek M, Şanlıoğlu İ. Point cloud filtering on UAV based point cloud[J]. Measurement, 2019, 133: 99-111.

[20] Serifoglu Yilmaz C, Gungor O. Comparison of the performances of ground filtering

algorithms and DTM generation from a UAV-based point cloud[J]. *Geocarto international*, 2018, 33(5): 522-537.

[21] 汤伏全, 芦家欣, 韦书平, 等. 基于无人机 LiDAR 的榆神矿区采煤沉陷建模方法改进[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(7): 2655-2666.

[22] 张永庭, 徐友宁, 梁伟, 等. 基于无人机电 LiDAR 的采煤沉陷监测技术方法——以宁东煤矿基地马连台煤矿为例[J]. *地质通报*, 2018, 37(12): 2270-2277.

[23] Klápště P, Fogl M, Barták V, et al. Sensitivity analysis of parameters and contrasting performance of ground filtering algorithms with UAV photogrammetry-based and LiDAR point clouds[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2020: 1-23.

[24] Polat N, Uysal M. Investigating performance of Airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation[J]. *Measurement*, 2015, 63: 61-68.

[25] Sithole G, Vosselman G. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds[J]. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 2004, 59(1-2): 85-101.