引文格式：施秀岚,孙一琳,俞凯辉,等. 基于PPK差分技术的矿区沉陷航测测量方法[J]. 地理空间信息, 2025, 23(5): 113-116. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.05.025

基于PPK差分技术的矿区沉陷航测测量方法

施秀岚[1]，孙一琳[2]，俞凯辉[1]，顾勤华[1]
（1. 浙江省测绘科学技术研究院，浙江 杭州 311100；2. 浙江省国土勘测规划有限公司，浙江 杭州 310030）

摘　要：为解决矿区沉陷监测中存在的测量作业量大、操作复杂、监测频率和影像分辨率低、采集数据精度不高等问题，提出基于PPK差分技术的矿区沉陷航测测量方法。利用无人机地形跟随技术采集矿区的影像数据，通过PPK差分技术获取影像地理位置高程信息，并将其合成密集点云。采用自适应不规则三角网算法过滤密集点云中的离散点，再通过局部多项式空间插值法构建目标矿区的沉陷盆地DEM模型，实现矿区沉陷航测。实验证明，该方法测量精度高、定位准确、灵活高效、容易操作，能从整体上监测矿区的沉陷情况；构建的矿区沉陷盆地模型真实度高，视觉效果清晰，可以更好地分析和研究矿区沉陷规律。

关键词：PPK差分技术；矿区沉陷；无人机航测；空间插值法；沉陷盆地；DEM模型
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）05-0113-04

Mining Area Subsidence Aerial Photogrammetry Method Based on PPK Differential Technology

SHI Xiulan[1], SUN Yilin[2], YU Kaihui[1], GU Qinhua[1]
(1. Zhejiang Institute of Surveying and Mapping Science and Technology, Hangzhou 311100, China;
2. Zhejiang Provincial Land Survey and Planning Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract: In order to solve the problems existing in mining area subsidence monitoring, such as large amount of measurement work, complex operation, low monitoring frequency and image resolution, and low accuracy of collected data, we proposed a mining area subsidence aerial photogrammetry method based on PPK differential technology. We used UAV terrain following technology to collect the image data of mining area, used PPK differential technology to obtain the image geographical location elevation information, and synthesized them into the dense point cloud. Then, we used the adaptive irregular triangulation algorithm to filter the discrete points in the dense point cloud, and used the local polynomial spatial interpolation method to build the subsidence basin DEM model of target mining area, realizing the aerial photogrammetry of mining area subsidence. The experimental result shows that this method has high measurement accuracy, accurate positioning, flexible, efficient and easy operation, and can monitor the subsidence of mining area as a whole. The subsidence basin model built by this method has high fidelity, and very clear visual effect, which can better analyze and study the subsidence law of mining area.

Key words: PPK differential technology, mining area subsidence, UAV aerial photogrammetry, spatial interpolation method, subsidence basin, DEM model

我国对于煤炭资源的需求量非常大，大规模的煤矿开采对生态环境造成了不可逆的伤害。为更好地保护地面环境和建筑物，进行安全开采，需要随时监控矿区的沉陷情况，分析其发展趋势，掌握矿区的沉陷规律[1-2]。传统矿区沉陷监测方法不仅效率低、作业量大，而且受复杂地形影响，很多地方人工无法到达，只能通过局部测量推演矿区全局的沉降趋势，准确性较低[3]。随着测绘技术的发展，卫星遥感、无人机倾斜摄影测量等技术在地理和工程测绘中取得了很好的成果[4-8]，虽然上述技术的测量速度快、效率高、作业灵活、容易操作，但仍存在测量费用过高、监测频率和影像分辨率低、采集数据精度不高等问题。PPK差分技术无需在地面设置像控点，只要校正无人机相机镜头，获得准确的相机参数，其采集的影像则可达到厘米级的定位精度，通过精密的地理配准，即可准确反映地表状态，为矿区沉陷监测提供了新的技术支持[9-10]。在无人机飞行控制方面，更加灵活的仿地飞行技术逐步应用于测绘领域，可根据地表高度变化灵活调整无人机的飞行高度，从而提高数据采集的质量[11]。鉴于此，本文提出了一种基于PPK差分技术的矿区沉陷航测测量方法。

第一作者简介：施秀岚（1986—），本科，工程师，从事测绘地理信息工作，E-mail：grabek@163.com。

1 矿区沉陷航测测量方法

1.1 航测总体方案设计

根据矿区工作面的采集作业和地理环境情况，本文按照标准沉陷测量精度，首先规划无人机的飞行区域、航线、航期等，采用无人机地形跟随技术按照飞行计划采集数据；再通过PPK差分技术获取矿区准确地理位置的高程信息，并生成目标矿区的点云数据；然后通过自适应不规则三角网算法对目标矿区的点云数据进行滤波处理；最后通过局部多项式空间插值法构建目标矿区的航测沉陷盆地模型。

1.2 PPK差分技术

PPK差分技术通过架设一个基准站和若干个流动站（至少一个），同时与GNSS卫星进行数据连接[12-13]，从而进行定位，可消除定位过程中的卫星钟误差、接收机钟误差和卫星轨道误差等影响。基准站始终保持与卫星连接，流动站则测量待测量点位，与卫星的连接同样是不间断的。对基准站和流动站接收的同步数据进行差分后处理和线性匹配，构成模拟的载波相位观测值，得到基准站相对于流动站的定位。由于基准站的位置是确定的，因此根据相对定位即可得到流动站的准确位置。PPK差分技术打破了数据传输的局限，无需进行实时数据传输，只需记录基准站和流动站观测的GNSS基础数据，待全部测量工作完成后再进行动态差分后处理即可[14]，定位精度高、测量半径大、完成速度快、测量方式灵活。

在PPK测量工作中，数据处理时需要输入地面基站和无人机端观测到的GNSS原始数据进行计算。为得到准确的无人机端三维地理坐标，需参考地面基准站的坐标和IGS提供的精密星历，对载波相位观测值进行修正，即

$$\Delta_s = R_0^i - \left(\alpha N_0^i(t) + \alpha C_0^i(t) + \varphi_0^i(t)\right) \tag{1}$$

式中，i为卫星序号；0为基准站；t为当前时刻；R_0^i为基准站与观测卫星之间的实际距离，通过卫星轨道的精确位置与地面基准站的坐标计算；α为波长；$N_0^i(t)$为基准站的初始相位模糊度；$C_0^i(t)$为基准站的整周数相位，范围从初始到观测历元；$\varphi_0^i(t)$为基准站相位观测数据小数点的后几位。

在载波相位观测方程式中代入修正值，可得：

$$H = \Delta_s + \alpha N_{\mathrm{L}}^i(t) + \alpha C_{\mathrm{L}}^i(t) + \varphi_{\mathrm{L}}^i(t) = \sqrt{\left(X^i(t) - X_{\mathrm{L}}(t)\right)^2 + \left(Y^i(t) - Y_{\mathrm{L}}(t)\right)^2 + \left(Z^i(t) - Z_{\mathrm{L}}(t)\right)^2} \tag{2}$$

式中，H为相同观测历元的残差值；L为流动站。

为得到流动站准确的三维地理坐标，基准站和流动站需同时观测4颗以上的GNSS卫星，获取卫星的定位数据，再通过最小二乘法进行计算。

1.3 无人机地形跟随航测技术

无人机在事先设定好的航道上保持贴地飞行，并根据实际地形调整飞行高度即为地形跟随技术。该技术通过无人机的纵向机动能力实现，可使无人机在飞行过程中始终与地面保持相同的距离，采集的数据更加准确。传统调节无人机飞行高度的方法是设置气压高度计和GPS，而地形跟随技术须在此基础上加装专业的传感器。本文将飞行时间（TOF）传感器加装在无人机上，对目标矿区的沉降情况进行地形跟随摄影测量。TOF传感器可通过发射光线实时测量无人机与地面的距离，同时通过颜色区分距离进行标注，测量精度高、距离远、更新快、体量小，且可与其他传感器同时使用。为达到无人机实时地形跟随的目的，采用控制器局域网总线（CAN）搭建无人机与TOF传感器之间的桥梁，TOF传感器即可对不同地形起伏变化进行快速反应，随时调整飞行高度。调节无人机的飞行高度、速度和加速度需要采用三级级联式PID控制器[15]；同时为加强无人机地形跟随调节的准确性、降低飞行误差，本文设置了3层控制结构。利用TOF传感器即可得到飞行的实时高度，计算飞行高度误差可比较目标高度与实际测量的飞行高度。根据飞行高度误差值E_A，PID控制器可计算得到垂直速度的调整值K_t，调整后的速度即为目标速度V_m。根据K_t，PID控制器可计算得到垂直加速度的调整值，调整后可得目标加速度，即

$$G_m = G + K_t^2 E_A \tag{3}$$

式中，G为加速度；K_t^2为垂直加速度调整值。

为实现无人机地形跟随，需获取无人机的油门控制量，在PID控制器中输入K_t^2进行计算，即

$$B_o = K_P \times K_t^2 E_A + K_I \times \int K_t^2 E_A D \times t + K_D \times \frac{1}{D \times t} K_t^2 E_A D + B_u \tag{4}$$

式中，B_o为油门控制量；B_u为油门初始量；K_P为比例项，即输入的K_t^2乘以比例常数；K_I为积分项，即对K_t^2进行积分运算；K_D为导数项，即对K_t^2进行微分运算；D为导数项的系数。

1.4 点云数据降噪处理

将无人机采集的目标矿区影像数据通过基于SFM算法的Agisoft Photoscan Professional Version 1.7.0软件生成密集点云、DSM和DOM[16]。由于原始点云数据存

在很多杂质和噪声，因此需对各航期不同点云数据进行滤波处理[17-18]，清除噪声点，确定目标矿区的地面点。本文采用自适应不规则三角网算法（ATIN），通过TerraScan软件对目标矿区的原始点云进行滤波处理。

1.5　无人机航测沉陷盆地模型

对目标矿区各航期降噪后的点云数据进行叠加，得到目标矿区的下沉值，剔除最大下沉异常值，即可得目标矿区的沉陷离散数据[19]；再利用空间插值技术在地面点上进行外表接续建模，从而分析目标矿区的沉降情况和变化趋势。DEM插值以地形的空间相关性和异质性为基础，参考地面点的高程值对未插值点的高程进行评估，以达到评估缺值、内插等值线和离散点数据网格化的目的。本文采用局部多项式插值法构建目标矿区的航测沉降盆地模型，其基函数由一阶、二阶、三阶多项式组成（式（5））[20]。寻求一个恰当的采样数据建模多项式函数是局部多项式插值法处理离散采样点的重点步骤，在插值过程中使用的插值函数阶数决定了其精度和外表模型的变化程度，因此在使用局部多项式插值法前需优先选择适当的插值函数阶数。

$$\begin{cases} F(x,y)=a_0+a_1x+a_2y \\ F(x,y)=a_0+a_1x+a_2y+a_3xy+a_4x^2+a_5y^2 \\ F(x,y)=a_0+a_1x+a_2y+a_3xy+a_4x^2+a_5y^2+ \\ \qquad a_6x^2y+a_7xy^2+a_8x^3+a_9y^3 \end{cases} \tag{5}$$

式中，$F(x,y)$为地面点内插值；a_n为多项式系数。

局部多项式插值属于趋势面拟合方法，在海量样本数据下能参考沉陷下降规律拟合得到更加流畅的下沉等值线图，还可保持沉降盆地模型的精度（图1）。

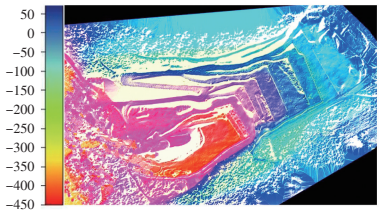


图1　无人机航摄沉陷盆地构建效果图

2　实验与结果分析

2.1　目标矿区环境

本文选择某矿区作为实验区域，根据地面勘探所得的地质资料和开采巷道工程建设资料，该矿区没有湖泊、河流等水体，属于丘陵地貌，并无岩浆岩入侵和陷落柱等地质构造，地表植被稀疏、建筑物很少、视野宽广，适合无人机测量。矿区工作面总面积为0.58 km^2，走向长度为935 m，倾向长度为235 m，地表高度为872~1 056 m，平均倾角为2.75°；属于水平煤层，平均开采深度为325.6 m，平均煤厚为5.82 m。

2.2　可行性实验

1）无人机数据采集。实验在矿区设置两条观察线，S线观察走向趋势，Z线观察倾斜趋势。为确定持续开采作业导致地表沉降的影响范围，参考矿区以往的开采情况和沉陷参数，计算得到无人机的航飞测量范围为1.23 km^2。采用深圳飞马机器人科技有限公司的D2000四旋翼无人机进行数据采集，巡航速度为7 m/s，飞行时长为74 min，搭载索尼a6000相机（2 430万像素），并另外安装TOF传感器和PID控制器。数据采集时利用PPK差分技术进行GNSS定位，同时与地面保持70 m的相对航高，航向重叠度为75%。相同条件下在不同时间进行3次测量，获取3期矿区工作面的无人机倾斜摄影数据[21]。为了对比传统无人机固定航高测量和人工实地测量的效果，在相同的条件下采用这两种方法对同一矿区采集3期数据。

2）点云数据滤波处理。本文利用网络PPK融合差分作业模式对采集的数据进行定位计算，获取准确的位置信息；利用基于SFM算法的Agisoft PhotoScan Professional Version 1.7.0软件生成密集点云、DSM和DOM；采用ATIN，通过TerraScan软件对目标矿区的原始点云数据进行滤波处理，筛除明显脱离地面的离群点和非地面点。矿区工作面滤波前后的点云数据对比见图2。



a 滤波前　　b 滤波后

图2　点云数据滤波前后效果对比图

3）矿区沉陷盆地模型构建。将滤波后的地面点云数据生成DEM；再通过ArcGIS软件的栅格计算器叠加3期点云的DEM，即可得到完整的矿区沉陷盆地DEM模型（图3），可以看出，本文方法构建的矿区沉陷盆地DEM模型可直接反映沉陷盆地各级下沉区域，改善了传统观测方法只能通过局部测量获取矿区沉陷趋势的不足，能从整体上对矿区的沉陷盆地进行研究和分析，有利于指导后期的开采工作和对地面建筑环境的保护。

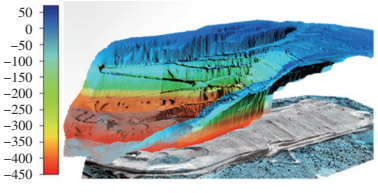


图3　矿区沉陷盆地DEM模型

2.3 不同测量方法沉陷盆地下沉趋势对比

为验证本文方法在矿区沉陷盆地测量方面的准确性与实用性，将本文方法与无人机固定航高测量和实地测量两种方法进行对比分析。地面分辨率与无人机飞行航高和相机像元尺寸成正比，与相机镜头焦距成反比。因此，随着无人机飞行航高的增加，拍摄影像的地面分辨率将下降，导致无人机数据采集精度降低，干扰点位坐标的定位结果，降低拍摄影像的匹配精度。3种方法得到的矿区沉陷盆地下沉趋势见图4，可以看出，以实地测量的60个点位为标准，第一个地表下沉点在15号附近，最高沉降值为250 mm；1~10号点位的高程降低了25 mm，则固定航高测量的地面分辨率增加了0.6 mm，但由于波动不大，对航测精度影响很小，因此该阶段3种方式的下沉趋势曲线差别不大；在10~30号点位之间，地表高程迅速降低，导致固定航高测量的地面分辨率由25 mm增至45 mm，航测精度大幅减少，因此与实地测量的下沉趋势偏差很大，本文方法采用了地形跟随技术，航测高度和地面分辨率基本保持不变，因此航测精度一直很高，与实地测量的下沉趋势十分接近。

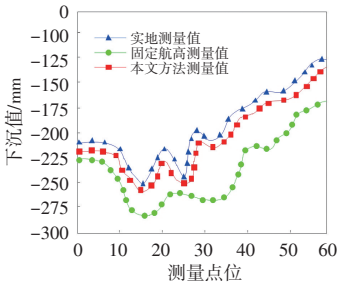


图4 3种测量方法下沉趋势对比

实验结果表明，本文方法避免了无人机航高变化对采集相片分辨率的影响，数据采集精度高，与实际测量下沉趋势一致，误差很小，明显优于固定航高测量方法；虽然细节精度比实际测量略低，但考虑到无人机测量在速度和效率上的优势，本文方法的实用性更高。

2.4 航测沉陷盆地精度验证

为验证本文方法构建的无人机航测沉陷盆地DEM模型的精度，以实地测量的3期数据为标准，对两种方法提取的高程差进行对比分析。本文选取平均误差、平均绝对误差和均方根误差作为评估参数，计算结果见表1，可以看出，二者的平均误差和平均绝对误差均较低，绝对值不超过0.15、0.2 m；均方根误差与偏差的平方成正比，异常值误差会对其造成很大干扰，因此均方根误差通常大于平均误差和平均绝对误差，多数位于0.2~0.3 m之间，最高一次的测量精度可达0.13 m；3种误差指标都保持在很低的水平，最高误差不超过0.3 m。

表1 无人机航测与实地测量高程差对比/m

数据集	平均误差		平均绝对误差		均方根误差	
	S线	Z线	S线	Z线	S线	Z线
一期	−0.15	−0.12	−0.19	0.16	0.19	0.25
二期	−0.05	−0.13	0.17	0.13	0.21	0.22
三期	0.12	−0.08	0.18	0.15	0.26	0.13

实验结果表明，本文方法采集的矿区沉陷数据非常精确，与实地测量误差很小，完全可以取代实地测量对矿区进行沉陷监测，且测量速度快、范围广、易操作，还能降低作业成本，打破了复杂环境对人工测量的限制，能更好地提升DEM建模效果。

3 结 语

本文提出了基于PPK差分技术的矿区沉陷航测测量方法，突破了传统方法只能通过局部测量获取矿区沉陷趋势的局限，能从整体上监测矿区的沉陷情况。该方法不仅提高了测量作业效率，降低了测量成本，还打破了复杂环境对人工测量的限制，能更好地提升DEM建模效果。通过本文方法构建的矿区沉陷盆地模型数据准确、视觉效果清晰明了，可以更好地分析和研究矿区的沉陷规律，合理安排后期的开采工作，加强对自然环境和地面建筑的保护。

参考文献

[1] 王书青,邓锟.内蒙古煤矿矿山环境恢复治理遥感监测[J].地理空间信息,2022,20(9):50-52

[2] 栗智,赵明宣,白冬,等.矿区开采沉陷监测方法对比[J].测绘通报,2021(增刊1):270-273

[3] 李林峰,黄洁,杨显华,等.露天煤矿区植被变化遥感监测与受损程度评估[J].地理空间信息,2019,17(1):72-76

[4] 刘乙霖,欧阳敏,岳鑫.马道头矿3~#煤层开采地表沉陷规律研究及智能监测策略[J].煤炭技术,2022,41(4):44-48

[5] 何柯璐,汤伏全,韦书平,等.机载激光点云构建西部矿区开采沉陷模型研究[J].测绘科学,2021,46(2):130-138

[6] 王志勇,李路,王建,等.基于HOG特征的InSAR矿区开采沉陷盆地检测方法[J].中国矿业大学学报,2021,50(2):404-410

[7] 沙永莲,王晓文,刘国祥,等.基于SBAS InSAR的新疆哈密砂墩子煤田开采沉陷监测与反演[J].自然资源遥感,2021,33(3):194-201

[8] 李昱昊,安士凯,周大伟,等.基于UAV摄影测量技术的开采沉陷全盆地建模和求参[J].煤矿安全,2022,53(2):179-186

(下转第123页)