引文格式：朱鹏程. 基于无人机的矿区地表水平移动监测方法[J]. 地理空间信息, 2024, 22(3): 16-19. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.03.004

基于无人机的矿区地表水平移动监测方法

朱鹏程[1]
（1. 陕西铁路工程职业技术学院，陕西 渭南 714000）

摘　要：为了更加全面地监测采动引起的矿区地表变形，提出了一种基于无人机摄影测量技术的矿区地表水平移动监测方法。首先利用无人机获取多期监测区域的时序航拍影像；再利用Pix4Dmapper软件处理影像，获得测区时序DOM数据；然后通过特征点匹配的方法监测同名特征点在不同期DOM上的位置，进而计算特征点的位移量和移动方向；最后绘制水平移动的时序矢量位移图。该方法已被应用于山东省济宁市南屯煤矿某工作面，无人机影像分辨率为2.73 cm/pixel时，监测精度为3.8 cm。该结果能反映水平移动趋势，为井下开采、耕地保护和地面搬迁等提供数据支持。

关键词：煤炭开采；地表水平移动；DOM；无人机
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）03-0016-04

Horizontal Movement Monitoring Method of Mine Surface Based on UAV

ZHU Pengcheng[1]
(1. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China)

Abstract: In order to more comprehensively monitor the surface deformation of mine caused by mining, we proposed a horizontal movement monitoring method of mine surface based on UAV photogrammetry technology. Firstly, we used UAV to obtain time-series aerial images of multi-stage monitoring areas. Then, we used Pix4Dmapper to process images, and obtained time-series DOM of monitoring areas. We used the feature point matching method to match the position of same feature points on the DOM of different periods, so as to calculate the displacement and movement direction of feature points. Finally, we drew a horizontal movement time-series vector displacement map. This method has been applied to a working face of Nantun coal mine in Jining City, Shandong Province. The monitoring accuracy is 3.8 cm when UAV image resolution is 2.73 cm/pixel, which can reflect the horizontal movement trend and provide data support for underground mining, cultivated land protection and ground relocation.

Key words: coal mining, surface horizontal movement, DOM, UAV

煤炭资源作为我国主要工业能源之一，在为经济建设做出重要贡献的同时也给环境带来了严重破坏，主要包括工业污染[1]、开采沉陷[2]、水土流失[3]等。由于井下采煤导致煤层上覆岩层发生断裂与位移，且随着开采范围的增大，岩层移动波及地表，引起地表位移，不可避免地对采动影响区域内的建（构）筑物、耕地、人类生产活动产生影响。为定量分析采动对地表的影响以及二者之间的对应关系，相关学者开展了大量研究，如李昱昊[4]等以无人机摄影测量技术为基础，利用BP神经网络去除了沉降盆地内的噪点，进而提高了下沉盆地监测精度；廉旭刚[5]等研究了免像控无人机摄影测量技术监测开采沉陷的精度；杨绪霆[6]等通过地形跟随模式提高了无人机摄影测量方法监测矿区沉陷的精度。除无人机监测外，InSAR技术也被广泛应用于地表移动监测，如谭志祥[7]、沙永莲[8]等采用SBAS-InSAR技术实现了沉陷盆地的毫米级监测；张童康[9]等将InSAR与支持向量机相结合，改进了开采沉陷预测模型。三维激光扫描技术也是常见的开采沉陷监测方法，如王磊[10]、贾秉松[11]等分别将其应用于矿区建筑物的变形监测和采动损害评估以及受采动影响的山区边坡沉陷监测。已有研究几乎均是通过某种技术手段监测地表某点的纵向位移，即单点的沉降量，但地表某点受采动影响的位移是一个三维移动的过程[12]，既包含纵向位移，又包含横向位移（水平位移），二者叠加才是其真实的位移量。为了弥补已有监测方案的缺陷，更加全面地描述地表受采动影响的变化过程，本文通过无人机摄影测量技术与计算机视觉技术相结合的方法，实现了采动影响区域内地

收稿日期：2022-12-19。
项目来源：陕西铁路工程职业技术学院2021年第二批科研基金研究生专项资助项目（KY2021-58）。
作者简介：朱鹏程（1995—），硕士，助教，研究方向为摄影测量与变形监测预计，E-mail：13813474141@163.com。

表的水平移动监测，可为井下开采、沉陷预计、人员安置等提供更全面的数据。

1　无人机监测矿区地表水平移动方法

本文提出的无人机矿区地表水平移动监测方法的技术流程见图1，首先利用开采沉陷预计方法预计采动影响范围，并根据监测精度确定无人机作业的航高、重叠度、航线等参数；然后采集预计影响范围内不同时期的时序影像，通过Pix4Dmapper处理影像获得时序DOM；再利用Global Mapper对DOM进行网格化处理，并进行特征点匹配，计算特征点在不同时序影像上的位置；最后计算特征点的水平移动距离与方向，绘制水平移动矢量图。

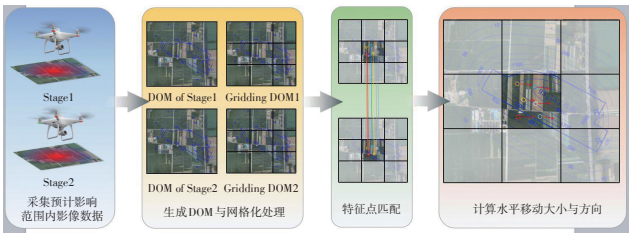


图1　无人机矿区地表水平移动监测方法流程图

2　水平移动提取关键技术

2.1　网格化处理

原始影像经Pix4Dmapper处理后生成DOM，再利用Global Mapper进行网格化处理，具体流程见图2，网格大小由沉陷预计的最大水平移动量 ΔD_{max} 确定，假设 ΔD_{max} =500 mm，则网格边长为1.2 ΔD_{max} 即600 mm。划分网格大小的目的：①减小特征点匹配时的运算量，只需在对应网格内匹配同名特征点即可；②确定时序移动增量监测范围，随着采动的影响，地表发生水平移动与沉降后，其特征会与初期DOM特征差异巨大，导致无法匹配，划定网格后只需匹配当前网格与上期对应网格，通过计算移动增量并累加增量的方法获得当期与初期之间的水平移动大小与方向。

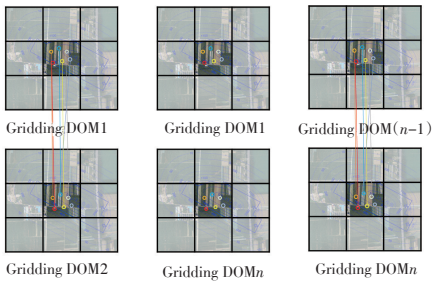


图2　网格化处理

2.2　特征点匹配

常见的特征点匹配算法包括Harris角点检测算法、SIFT算法、SURF算法、FAST角点检测算法、BRIEF描述子以及基于FAST角点检测算法和BRIEF描述子相结合的ORB算法等。大量学者已将上述算法应用于各场景中并做出了相关改进，如王丞[13]等利用Harris角点检测算法实现了三维点云的自适应特征描述、提取与粗配准；张占平[14]等将Harris算子与SIFT描述子相结合，并辅以无人机影像的POS数据与公开的SRTM数据，提高了无人机倾斜摄影影像的匹配效率；徐启文[15]等利用一种具有动态阈值的改进SURF算法提升了图像拼接效率；陈伟[16]等结合FAST提取的特征点和SURF算法的描述子实现了图像的快速拼接；陶卓[17]等利用稀疏光流法改进了传统ORB算法，使算法的匹配精度更高、鲁棒性更强。本文对同一场景进行了常见特征检测与提取算法的测试，并统计了5种特征点提取算法的提取效果，结果见表1。通过对比提取效率、特征点提取数量以及特征点匹配准确性，最终确定本文的特征点提取与匹配采用经典SIFT算法。

表1　常见特征检测与提取算法比较

算法	检测目标	运行耗时/s	提取特征数量/个
Harris	角点	0.03	322
FAST	角点	0.10	3 275
SIFT	极值点	0.65	1 575
SURF	极值点	0.19	2 700
ORB	极值点	0.96	97

2.3　水平移动大小与方向的计算

利用SIFT算子匹配两幅影像中同名特征点后，需将特征点像素坐标转换为地理坐标，本文采用GDAL空间数据转换坐标库进行坐标转换，转换公式为：

$$\begin{cases} x = \mathrm{trans}(0) + m \times \mathrm{trans}(1) + n \times \mathrm{trans}(2) \\ y = \mathrm{trans}(3) + m \times \mathrm{trans}(4) + n \times \mathrm{trans}(5) \end{cases} \tag{1}$$

式中，trans(0)、trans(3)为影像左上角像素点左上角位置的地理坐标；trans(1)、trans(5)为影像上单个像素的宽度与高度；如若该影像是指北的，则trans(2)、trans(4)均为0；m、n 为特征点在影像中的像素坐标；x、y 为该特征点转换后的地理坐标。

将同名特征点的像素坐标转换为地理坐标后，便可计算该特征点的水平移动量和方向，假设同一网格匹配 n 对特征点，各对特征点水平移动量的计算公式为：

$$\Delta = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_i - y_2)^2} \tag{2}$$

为使水平移动监测更加可视化，可计算水平移动方向，假定某点水平移动是由 (x_1, y_1) 指向 $(x_2\ y_2)$，且水平移动矢量与东方向形成的夹角为 α（图3），则有：

$$\begin{cases}\alpha=\arctan\dfrac{y_2-y_1}{x_2-x_1}\times\dfrac{180}{\pi} & x_2-x_1>0,\ y_2-y_1>0\\ \alpha=\arctan\dfrac{y_2-y_1}{x_2-x_1}\times\dfrac{180}{\pi}+180 & x_2-x_1<0,\ y_2-y_1>0\\ \alpha=\arctan\dfrac{y_2-y_1}{x_2-x_1}\times\dfrac{180}{\pi}+180 & x_2-x_1<0,\ y_2-y_1<0\\ \alpha=\arctan\dfrac{y_2-y_1}{x_2-x_1}\times\dfrac{180}{\pi}+360 & x_2-x_1>0,\ y_2-y_1<0\end{cases} \tag{3}$$

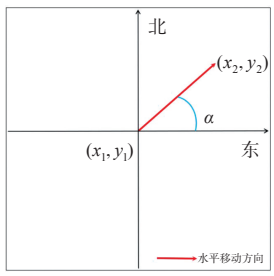
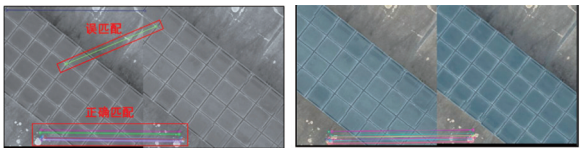


图3　水平移动矢量示意图

2.4　基于水平移动大小与方向的误匹配剔除

由于矿区地物特征的特殊性和复杂性，采用SIFT算子提取的匹配特征点存在误差（图4a），为提高水平移动监测精度，本文提出了一种基于位移大小和方向的误匹配剔除方法。通常在同一网格内，各特征点间水平移动量差别不大，且水平移动方向具有一致性，根据这两个特性可剔除误匹配和不符合地表水平移动规律的匹配。首先计算同一网格内所有水平移动量的平均值 Δ_A，设置 $0.9\Delta_A$~$1.1\Delta_A$ 为满足误匹配剔除的大小阈值范围；再计算同一网格内所有水平移动方向的平均值 Δ_α，设置 $0.9\Delta_A$~$1.1\Delta_A$ 为满足误匹配剔除的角度阈值范围；最后结合两个阈值范围，可基本剔除误匹配，剔除后效果见图4b。



a 剔除前　　b 剔除后

图4　误匹配剔除前后对比

3　实测案例分析

3.1　案例概况

监测案例中采动区域为山东省济宁市南屯煤矿33上08工作面（图5），测区中心位于35°22′43″N、116°52′01″E，平均采深为300 m、走向长680 m、倾向长170 m、平均煤厚5.2 m。该工作面采动前已对地表村庄易地搬迁，但仍保留部分工业建筑，且该区域为高潜水位地区，采动后地下水会出露地表，因此对该区域的地表移动进行监测非常必要。



图5　监测区域

基于概率积分法的开采沉陷预计方法是目前较成熟的矿山开采沉陷预计手段，主要基于已有变形监测数据与对应工作面参数，根据随机介质理论，以统计学的视角将采动区域分解为无限个微小开采单元，进而反演计算工作面参数与变形监测数据之间的相互关系，主要通过下沉系数、水平移动系数、拐点偏移距、主要影响角正切以及开采影响传播角等预计参数进行描述和计算，并以此预计同地质采矿条件下的其他待采动工作面的变形情况[18]。由3308工作面参数与历史预计参数计算可知，该工作面预计最大下沉值为4 549 mm，东西最大水平移动为1 396 mm，南北最大水平移动为1 455 mm（图6）。

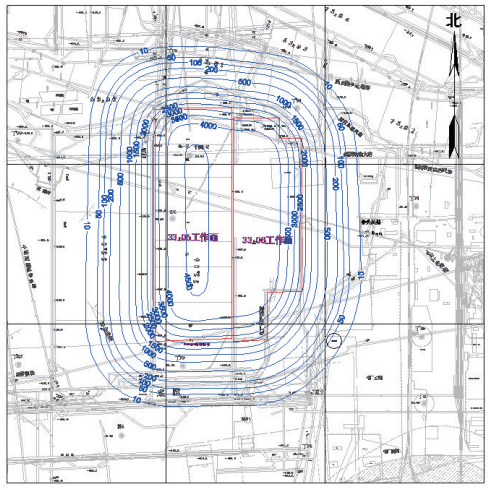


图6　33上08工作面开采地表下沉等值线

3.2　数据采集

为监测3308工作面采动对地表的影响，检验本文方法的有效性，2021年3—4月对3308工作面采动影响区域采集3期无人机影像数据与像控点坐标数据。无人机采用大疆精灵RTK，作业高度为100 m，影像分辨率为2.73 cm/pixel，具体飞行数据见表2。像控点采用60 cm×60 cm倒三角形像控点（图7），并采用GPS-RTK+DS3级水准测量获得坐标与高程，其中平面误差为2 cm，高程误差为1 mm，共布设35个像控点（图8），包括10个像控点和25个检查点。

表2　无人机飞行数据

作业时间	航高/m	重叠度（航向/旁向）/%	飞行速度/（m/s）	影像数量/张	天气
2021-03-04	100	85/70	7	508	晴，微风
2021-03-17	100	85/70	7	508	晴，2级风
2021-03-31	100	85/70	7	508	晴，2级风

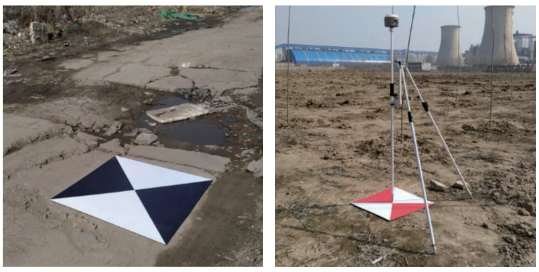


图7　33上08工作面像控点布设与量测

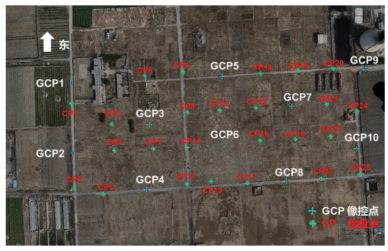


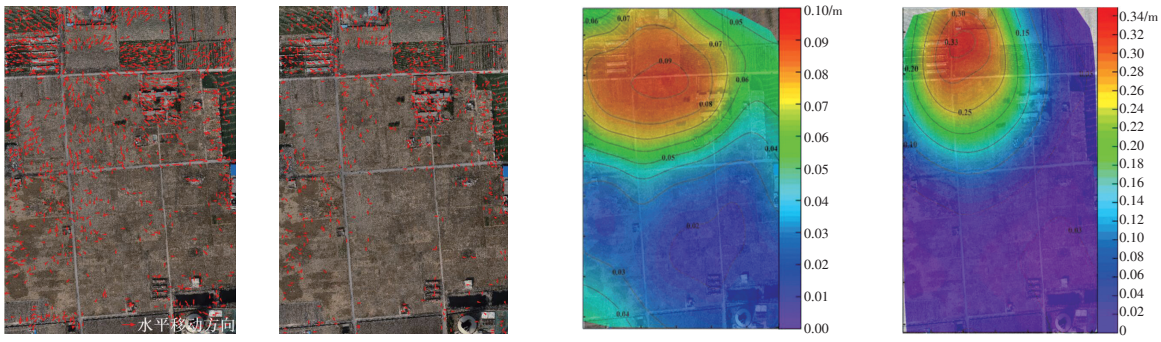
图8　像控点布设位置分布图

3.3　数据处理与精度分析

利用本文方法对3期数据进行处理，获得水平移动大小与方向图（图9），并将实测值与提取值进行比较，统计本文方法的水平移动提取误差（表3），首期水平移动由二期DOM与初期DOM比较获得，二期水平移动由三期DOM与二期DOM比较获得，经计算首期水平移动提取中误差为1.9 cm，二期水平移动提取中误差为3.3 cm，综合误差为3.8 cm。

表3　水平移动提取误差统计

点号	2021-03-05		2021-03-17				2021-03-31			
	X /m	*Y* /m	*X* /m	*Y* /m	实测	提取	*X* /m	*Y* /m	实测	提取
1	3 917 004.845	488 000.434	3 917 004.882	488 000.349	0.09	0.05	3 917 004.834	488 000.293	0.14	0.15
2	3 917 003.119	487 958.940	3 917 003.18	487 958.836	0.12	0.09	3 917 003.138	487 958.712	0.23	0.2
3	3 916 999.141	487 857.913	3 916 999.222	487 857.803	0.14	0.13	3 916 999.234	487 857.624	0.30	0.29
4	3 916 996.037	487 786.979	3 916 996.118	487 787.066	0.12	0.14	3 916 996.123	487 787.274	0.31	0.30
5	3 916 935.346	487 774.636	3 916 935.452	487 774.680	0.11	0.14	3 916 935.445	487 774.795	0.19	0.27
15	3 916 403.023	488 036.087	3 916 403.006	488 036.105	0.02	0.03	3 916 403.022	488 036.085	0.00	0.01
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
16	3 916 418.473	487 949.367	3 916 418.466	487 949.372	0.01	0.03	3 916 418.448	487 949.374	0.03	0.04
17	3 916 411.810	487 820.556	3 916 411.809	487 820.542	0.01	0.03	3 916 411.804	487 820.558	0.01	0.01
18	3 916 490.789	487 811.788	3 916 490.785	487 811.792	0.01	0.04	3 916 490.792	487 811.794	0.01	0.02



a 首期地表水平移动方向图　b 二期地表水平移动方向图　c 首期地表水平移动量等值线图　d 二期地表水平移动量等值线图

图9　两期地表移动监测结果

4　结　语

本文基于无人机摄影测量技术提出了一种矿区地表水平移动监测方法，并通过实测案例检验了该方法的可行性。

1）地表水平移动作为受采动影响的地表变形的重要组成部分，前人的相关研究重点关注地表沉降监测，而对水平移动监测的研究存在缺失，本文是对相关研究的补充。

2）本文方法可基本完成地表水平移动的自动化监测，较少需要人为干预，且精度可满足矿区日常监测要求。在影像分辨率为2.73 cm/pixel的前提下，水平移动提取精度为3.8 cm，且随着硬件设备性能的提升，该方法可获得更高精度的结果。

本文为受采动影响的地表水平移动监测提供了一种更全面、便利、可视化的监测手段，可广泛应用于采动区域的变形监测，为井下开采、耕地保护和搬迁移民等提供前瞻性和实时的数据支持，（下转第23页）