



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

张庆斌,赵之星,刘志奇.基于单目影像对滑坡监测应急预警的方法探究[J].煤炭科学技术,2021,49(7):185-191. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.07.025

ZHANG Qingbin,ZHAO Zhixing,LIU Zhiqi.Study on method of emergency warning for landslide monitoring based on monocular images[J].Coal Science and Technology,2021,49(7):185-191. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.07.025

基于单目影像对滑坡监测应急预警的方法探究

张庆斌,赵之星,刘志奇

(中晋环境科技有限公司,山西 太原 030002)

摘要:为提高对滑坡的响应速度和预警效率,减少设备损失,保障作业人员的安全,提出了利用影像进行监测预警的方法。以各时段同名像点位移为主要判断标准,并结合梯度方向角度、特征点相邻加权平均距离等参数综合评估。建立高斯分布模型,验证各时段同名像点位移形成的枢轴量是否超过置信区间,以此判断该位移是否受粗差影响。若非粗差原因,则在梯度方向角度数量最多的 2 组点中,统计点间相邻加权平均距离和位移加权平均值,结合摄影测量技术规范和实践经验,规定前两者的合理阈值。当点间相邻加权平均距离超过该阈值,则说明发生移动的特征点相对位置比较分散,同样位移加权平均值超过对应阈值,说明目标发生了明显的滑动,存在潜在危险。将以上 2 个条件综合分析,能自动判断出目标的移动是偶然分散式的人为破坏还是真实滑坡,并做出相应的预警措施。结果表明:该方法构造的数学模型较为可靠,能够准确辨别真实滑坡,且省去了多目影像计算坐标的较长时间成本,可应用于突发性滑坡的应急监测工作。

关键词:应急监测;单目像片;滑坡;滑坡预警

中图分类号:TD176

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)07-0185-06

Study on method of emergency warning for landslide monitoring based on monocular images

ZHANG Qingbin,ZHAO Zhixing,LIU Zhiqi

(Zhongjin Environment Technology Co., Ltd., Taiyuan 030002, China)

Abstract: In order to improve the speed of response to landslides and the efficiency of early warning, reduce equipment losses and costs, and ensure the safety of operators, a method of monitoring and early warning using images was proposed. Taking the displacement of the image point with the same name in each time period as the main criterion, combined with the comprehensive evaluation of parameters such as the gradient direction angle and the adjacent weighted average distance between the adjacent feature points. Establish a Gaussian distribution model to verify whether the pivot amount formed by the displacement of the same name image point in each period exceeds the confidence interval also as to determine whether the displacement is affected by the gross error. If it is not due to gross errors, the second step is to count the weighted average distance between adjacent points and the weighted average of displacement in the two sets of points with the largest number of angles in the gradient direction. The two reasonable thresholds are set according to photo-grammetry technical specifications and practical experience. When the weighted average distance between adjacent points exceeds the threshold, it means that the relative positions of the moving feature points are relatively scattered. Similarly, the weighted average value of the displacement exceeds the corresponding threshold, indicating that the target has obviously slipped and there is a potential danger. Comprehensive analysis of the above two conditions can automatically distinguish whether the movement of the target is accidental decentralized man-made damage or real landslide, and make corresponding early warning measures. The results show that the mathematical model constructed by this method is more reliable, it can accurately identify the real landslide and saves the long time cost of calculating the coordinates with multi-view images. This method can be applied to emergency monitoring of sudden landslides.

Key words: emergency monitoring; monocular image; landslide; landslide warning

收稿日期:2020-12-25;责任编辑:朱恩光

基金项目:山西省应用基础研究计划项目面上青年基金资助(201901D211451)

作者简介:张庆斌(1980—),男,山西平顺人,高级工程师,硕士。E-mail:329479992@qq.com

0 引言

滑坡监测历来是地质灾害研究领域中的重点,大量的开采、施工或长期恶劣气候的影响,使得原始地貌形成了多种不稳定边坡,这些边坡由于受力失衡会产生定向移动^[1]。大面积滑坡会对矿区工作人员、附近居民以及其他相关作业人员的生命和财产造成严重危害。其中突发性的滑坡现象危险性最大,其隐蔽不易辨别的征兆和灾害发生时无法应对的紧迫性,是迄今为止灾害监测预警的难题^[2]。为此大量学者和机构开发了各种监测手段和预警系统。上海华测导航科技有限公司推出了基于综合技术的自动实时监测系统,该系统应用了GNSS接收机、固定式测斜仪、裂缝计、雨量计等传感器,以及无线传输装置和太阳能电池等辅助设备^[3-6]。该系统利用多种手段获取信息,综合评估目标变化,得出结果,但是其设备价格昂贵,一旦发生滑坡,系统设备全部损坏,监测成本较高。成都理工大学团队^[7-9]利用机载雷达和倾斜相机对灾害体进行采集,通过内业处理生成三维激光点云实景三维模型,并对多期数据进行比较,该方法能直观显示出测区隐患点,为决策提供准确的依据,且对植被茂密灾害点隐蔽的测区尤为胜任。但该方法处理过程较长,特别是三维模型的生产占用大量的时间,因此监测实时性略显滞后。文献^[10-12]利用近景摄影测量、计算机视觉等手段,通过固定双相机,利用影像匹配技术,结合内外方位元素计算目标的三维坐标,并分析多期的坐标变化以达到目标位移的计算。该方法不需要在灾害体上安装设备,作业成本低^[13-15]。但为了得出空间坐标,需要进行较为复杂的计算,且受制于摄影测量本身精度的限制,对突发性应急存在一定的不适应^[16-18]。针对滑坡的突发性和应急性,通过固定相机对滑坡体拍照,对相片的像素进行计算,设定多层筛选条件和阈值,令计算机准确分析出实际滑坡和误差影响或分散式局部移动的情况,做出相应决策。该方法延续了近景摄影非接触式的优势,同时舍弃求取三维坐标的繁杂计算过程,仅通过影像进行判别,响应速度快,自动化程度高,对滑坡灾害的应急较为适用^[19-20]。

1 滑坡预警算法推导

1.1 初步判断标准

固定相机按照一定时间间隔对滑坡体进行连续拍照。相机固定即像片不动,像片不动即像平面坐标系不变,当滑坡目标不发生移动时,理论上两帧影

像提取的同名点像素坐标应相等,即

$$u_i^k = u_i^{k+1}, v_i^k = v_i^{k+1}$$

式中: u_i^k 、 v_i^k 分别为第 k 张影像中第 i 个特征点的像素横、纵坐标; u_i^{k+1} 、 v_i^{k+1} 分别为第 $k+1$ 张影像中第 i 个特征点的像素横、纵坐标。

受到噪声影响,两帧影像同名点坐标会产生一定的偏差,由于噪声服从各向同性高斯分布,使得总体上点坐标偏差方向各异,偏差均值为0,即

$$\overline{\Delta X_L} = (1/2n) \sum_{i=1}^n [(u_i^k - u_i^1) + (v_i^k - v_i^1)] = 0 \quad (1)$$

式中: $\overline{\Delta X_L}$ 为同名点坐标差总和的平均值; n 为同名点数; u_i^1 、 v_i^1 分别为第1张影像中第 i 个特征点的像素横、纵坐标。

事实上,除了随机噪声影响外,特征提取中存在粗差以及样本数量有限等影响因素,导致上述坐标偏差的均值与理想值0存在偏离,因此需要定义置信阈值,当该偏离在阈值范围内,则同名点坐标的变化仅受到噪声的干扰,没有发生实际的移动。结合坐标误差的理论分布,令

$$\Delta u_i = u_i^k - u_i^1, \Delta v_i = v_i^k - v_i^1$$

式中: Δu_i 、 Δv_i 分别为第 k 张影像与第1张影像的同名点横、纵坐标差。

则样本方差的估值为

$$S^2 = 1/(2n-1) [\sum_{i=1}^n (\Delta u_i - \overline{\Delta X_L})^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta v_i - \overline{\Delta X_L})^2] \quad (2)$$

式中: S 为标准差。

构建样本枢轴量

$$t = |(\overline{\Delta X_L} - 0) / [s / (2n)]^{1/2}| \quad (3)$$

其中, $\overline{\Delta X}$ 为样本期望($\overline{\Delta X}$ 为非理想状态下的实际量),该统计函数服从样本容量为 $N-1$ 的 t 分布,即 $t \sim t(N-1)$,而样本期望与理想期望偏离的阈值由 t 分布定义,通常定义显著水平 $\alpha=0.05$,如果所定义的检验统计量 t 没有超出以上阈值,可以判定很大概率上像点坐标的偏差仅受到了噪声的影响,没有发生移动,如图1所示。

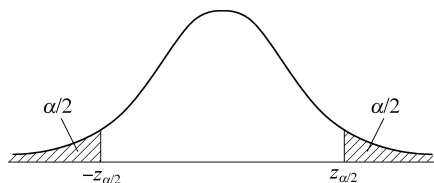


图1 误差服从 t 分布的 α 分位

Fig.1 Alpha quantiles with errors following t distribution

反之,该情况下特征点坐标偏差的均值和理论期望之间的差异是显著的,因此认为像点受到了噪

声以外的干扰,需进行进一步分析。

1.2 位移情况甄别

若像点的偏差均值过大,则需深入分析,以判断变化是由粗差影响还是本身发生移动造成的,具体方法如下。

计算特征点的梯度方向:

$$\theta_i = \arctan[(v_i^k - v_i^1)/(u_i^k - u_i^1)] \quad (4)$$

式中: θ_i 为第1张影像相较于第k张影像同名点发生位移的梯度方向。

绘制特征点梯度方向的直方图,横轴为梯度方向的角度区间,在 $45^\circ \sim 135^\circ$ 内,每间隔 5° 为1个区间,共18个,纵轴为满足每个区间点的数量,即 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_{18}$,将点数量按大小排列,并提取出最多的2组进行分析。假设点数量最大的一组为 N_i ,将 N_i 个像点按照横坐标从小到大依次计算相邻点的距离

$$d_i = [(u_{i+1}^k - u_i^k)^2 + (v_{i+1}^k - v_i^k)^2]^{1/2}$$

式中: d_i 为同一影像上相邻像点间的距离。

以第1个点与第2个点的相邻距离 d_1 为基准,定义相邻间距的权重 p_i 为

$$p_i = d_1/d_i$$

计算该组内相邻像点间距的加权平均值 \bar{d} 。

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^{N_i-1} p_i d_i / \sum_{i=1}^{N_i-1} p_i \quad (5)$$

令单个像素大小为 δ ,当 $\bar{d} > 3\delta$,认为该组点分散,很大概率由于受到粗差影响,继而同样方法分析第2组;当 $\bar{d} \leq 3\delta$ 时,则在一定范围内相邻点在近乎相同方向上移动。然后计算该组点的位移。

$$m_i = [(u_i^k - u_i^1)^2 + (v_i^k - v_i^1)^2]^{1/2}$$

式中: m_i 为第1张影像相较于第k张影像第i个同名点发生的位移。

同样定义位移的权重 $q_i = m_1/m_i$,计算该组点的加权平均位移 \bar{m} 。

$$\bar{m} = \sum_{i=1}^{n_i} (q_i m_i) / \sum_{i=1}^{n_i} q_i \quad (6)$$

当 $\bar{m} \leq 5\delta$ 时,认为位移较小或受到粗差影响,反之判定位移已超出误差影响的范围,从而定义为目标发生移动。

同时根据相似关系得出一个像素对应物方的实际距离为

$$GSD = f/(L\delta) \quad (7)$$

式中: GSD 为1个像素对应的实际距离; f 为焦距; L 为拍摄距离; δ 为单个像素大小。

因此发生移动的距离为 $D = GSD(u^2 + v^2)^{1/2}$,其

中, u, v 为目标点像素坐标。

1.3 决策阶段

根据以上分析,总结本次影像应急监测预警的条件,如图2所示。

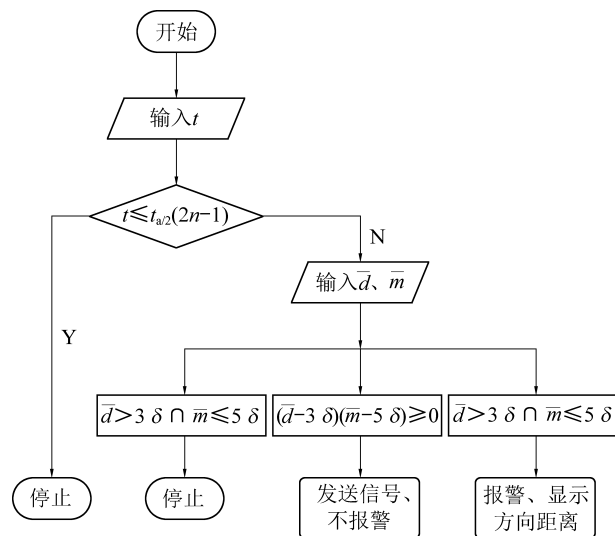


图2 滑坡应急预警决策流程

2 滑坡预警模拟试验

2.1 试验布置和数据采集

由于数量稀少,危险性等原因,对理想突发性滑坡测区的选定较为困难,考虑时间成本等因素,选择进行模拟试验。试验区域选择太原市中国冶金地质总局新办公楼施工区西北角的人工边坡,边坡坡度正切值约0.7(坡面角 35°),土层15 cm以下布置 $1.2 \text{ cm} \times 1.2 \text{ cm}$ 的衬垫,以便模拟滑坡移动过程。为尽可能接近滑坡体结构,在边坡上掺杂了碎石组成的松散堆积体。采用SONY_A7 II相机,将其固定在改装后的三脚架上,在距目标3 m处粗略整平,并保持不动。首先在坡面未动的情况下拍摄首张照片(图3a),然后分3种情况拍摄后续照片:保持坡面不动(图3b),人为使坡面上某点或较为分散的零星点位发生移动(图3c),人工拉拽衬垫,坡面滑移(图3d)。分别将图3b、图3c、图3d与图3a进行对比分析,验证方法的正确性。

2.2 数据处理

将图3b中影像首先通过优化后的SIFT算法进行同名点提取与匹配,利用基于本方法开发的程序进行处理分析,计算每组像片间同名点的像素坐标变化情况,验证本方法对3种位移情况的判断及响应效果。

2.2.1 未移动影像组处理分析

第1对影像选择初始影像和滑坡未动影像进行软件分析,通过同名点匹配、统计匹配点样本数量,

计算同名点像素坐标差值、平均值及标准差估计值,依据假设检验求取检验统计量的绝对值,并与其服从的分布拒绝域的临界点进行比较。处理结果如图 4 所示。共提取特征点 1 858 个,匹配成功的同名点 1 553 个,红色箭头为像点移动的方向,经比较计算得出检验统计量为 1.78, α 取 0.05 时, t 分布的拒绝域临界点为 1.96,显然统计量小于临界点。

2.2.2 局部分散式移动影像组处理分析

第 2 对影像为初始影像与分散局部移动个别点位的影像之间的对比,如图 5 所示。经计算得出像点坐标差值组成的检验统计量已超过临界值位于拒绝域内,需要进一步分析,在分析阶段,统计梯度方向角度 $45^\circ \sim 135^\circ$ 内每 5° 一个区间的方向数量,如图 6 所示。

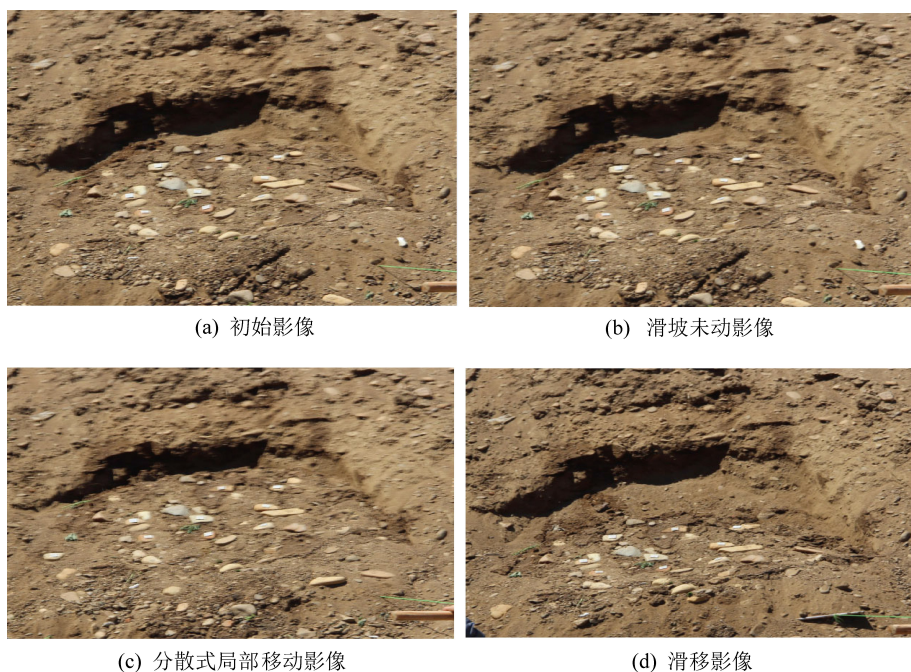


图 3 试验序列影像

Fig.3 Experimental sequence images

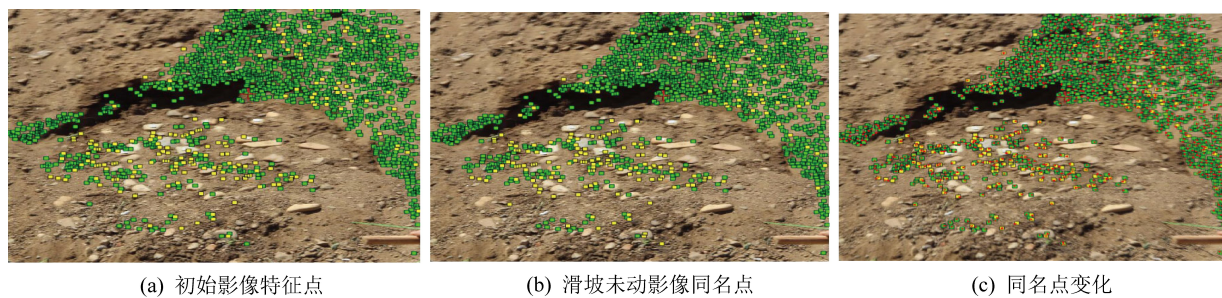


图 4 未移动试验序列影像

Fig.4 Unmoved experimental sequence images

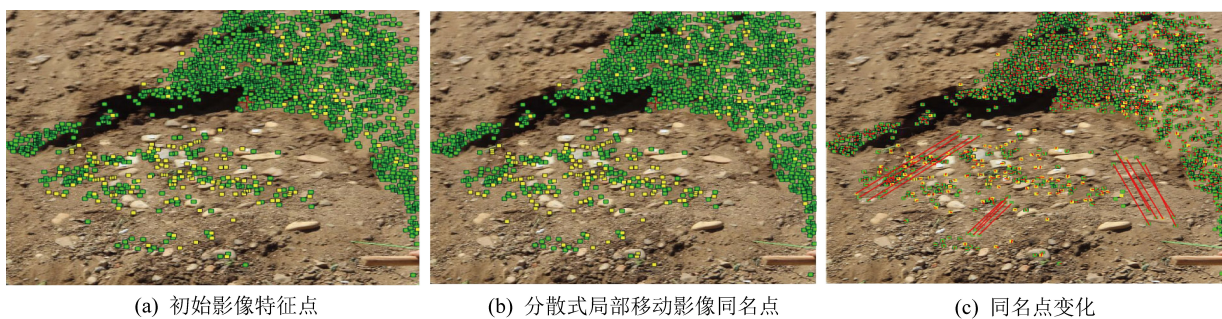


图 5 分散局部移动试验序列影像

Fig.5 Scattered local moving experimental sequence images

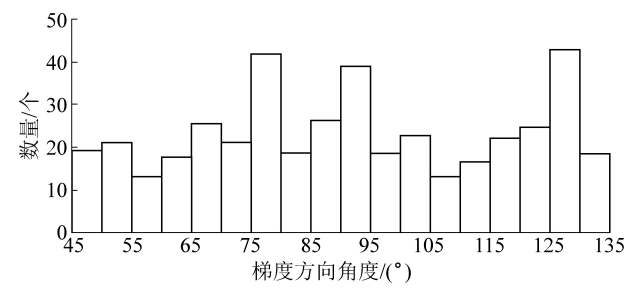
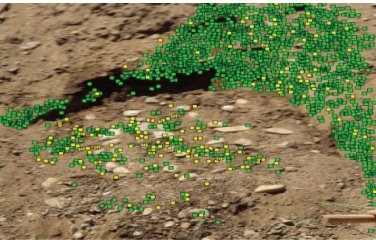


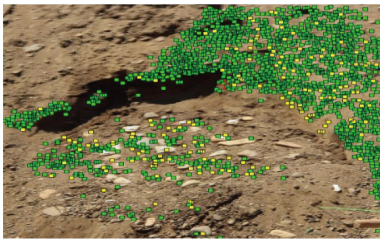
图 6 同名点梯度方向数目

Fig.6 Number of gradient directions with same name

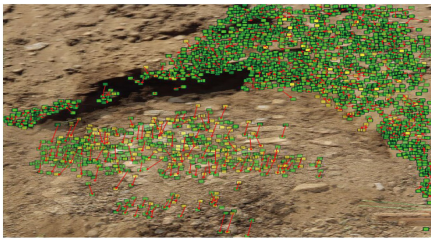
其中选定数量最多的前 2 组,进行第 2 步分析,依据程序计算 2 组中特征点的平均相邻距离和影像间同名点的移动量,计算得出各自数值见表 1。



(a) 初始影像特征点



(b) 滑坡移动影像同名点



(c) 叠加后的同名点变化

图 7 移动试验序列影像

Fig.7 Unmoved experimental sequence images

经程序计算,像点坐标差值组成的检验统计量已远大于 t 分布的拒绝阈临界点,需要进一步分析,在分析阶段,统计得出 $45^{\circ} \sim 135^{\circ}$ 内按照每 5° 一个区间的方向数量(图 8)。

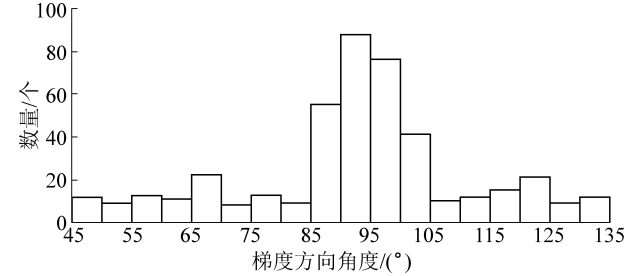


图 8 同名点方向梯度方向数目

Fig.8 Number of gradient directions with same name

选定数量最多的前 2 组,进行第 2 步分析,依据程序计算 2 组中特征点的平均相邻距离和影像间同名点的移动量,计算得出各自数值见表 2。

表 2 梯度方向数量前 2 组的距离

Table 2 Top two distance of gradient directions

分组	点位相邻距离 加权平均值/pix	同名点位移 加权平均值/pix
1	1.9	11.6
2	2.6	17.2

2 组方向中发生滑移的特征点相邻距离加权平均值小于方法中规定的 3 pix,而影像间发生的滑移

表 1 梯度方向数量前 2 组的距离

Table 1 Top two distance of gradient directions

组别	点位相邻距离加权平均值/pix	同名点位移加权平均值/pix
1	9.1	33
2	13.6	25

2 组方向中发生滑移的特征点相邻距离加权平均值远大于所设定的 3 pix,而影像间发生的位移也都远大于 5 pix。

2.2.3 移动影像组处理分析

第 3 组影像为初始影像和人工模拟移动影像对比,匹配点如图 7 所示。

距离也都远大于 5 pix,同时根据相似几何关系,按照拍摄距离 3 m 计算得出该滑移量大约为 5.1 m。

2.3 结果分析

1)第 1 组试验计算结果表明:影像间同名点像素坐标差平均值,其绝对值小于临界值,说明不存在显著性差异,造成的位移很大概率上是由于受到高斯噪声的影响,因此可以判定未发生移动,并终止分析。

2)第 2 组试验中,仅在较为分散的局部区域内发生变动,其像素坐标差绝对值超出临界值,经计算得出两影像间像点位移加权平均值超过设定阈值 5 pix,而发生变化的点位相邻间距加权平均值却大于设定的 3 pix,表明尽管点位发生了较为明显变化,但点位之间的距离较远,位置分散,区别于真实滑坡情况下的连片移动,故判定疑似人为所致,或滑坡前兆,发送提醒信号、不报警。

3)第 3 组试验为已发生移动情况下的分析,该像素坐标差平均值远大于临界值,在分析阶段,筛选出梯度方向数量最多的 2 组,计算得出变化点相邻间距加权平均值小于设定值 3 pix,同时影像间像点滑移量的加权平均值远大于设定阈值 5 pix,证明发生变化的点分布紧密且连接成片,目标位移也远超过高斯噪声和粗差的影响,故可判定目标发生滑坡移动,并报警。

3 结 论

1)提出了依靠单目序列影像进行滑坡位移的判断算法,利用像素变化的统计规律,加入梯度方向、目标点相邻距离和影像间目标点位移等参数,并设定初始筛选、数据分析、相应决策3个环节,提高了该算法的鲁棒性。

2)该算法可对高斯噪声影响、分散式局部移动、和大面积滑坡3种现象进行有效甄别,省略了计算三维空间坐标的繁琐过程,提高了运行速度,节省生产成本和保证人身安全的前提下,对突发性滑坡事故应急工作能起到一定的帮助。

3)由于受试验条件及时间限制,目前仅利用模拟试验进行测试,且对于阈值设定的合理性和普适性还需要更多的实地场区进行验证,这也是后期的优化工作。

参考文献(References):

- [1] 杨 贺,王立伟,郝圣旺.基于倾角演化的滑坡监测及稳定过程[J].工程力学,2020,37(S1):193-199.
YANG He, WANG Liwei, HAO Shengwang. Landslide monitoring and stability process based on dip angle evolution [J]. Engineering Mechanics, 2020,37(S1):193-199.
- [2] 许 强.对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J].工程地质学报,2020,28(2):360-374.
XU Qiang. Understanding and thinking on landslide monitoring and early warning [J]. Journal of Engineering Geology, 2020,28(2):360-374.
- [3] 何 伟,张伦宁,贺成成,等.地灾监测的大数据信息平台研究及应用[J].测绘通报,2019(1):127-131.
HE Wei, ZHANG Lunning, HE Chengcheng, et al. Research and application of big data information platform for disaster monitoring [J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2019(1):127-131.
- [4] 何玉童,汪 剑,李宏祥.基于北斗的超长基线解算在滑坡基准点监测中的应用探讨[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(1):75-78.
HE Yutong, WANG Jian, LI Hongxiang. Discussion on application of super long baseline solution based on Beidou in landslide datum point monitoring [J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention, 2020,31(1):75-78.
- [5] 上海华测导航技术股份有限公司.空天地多源立体化监测预警平台及应急救援灾系统[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(2):151.
CHINTERGED EXHIBITION. Multi source stereoscopic monitoring and early warning platform and emergency relief system on space-air-ground [J]. Chinese Journal of geological disasters and prevention, 2019,30(2):151.
- [6] 陈向阳,于金池,葛 建,等.融合 GPS 与强震仪数据实时监测瞬时地壳形变[J].测绘通报,2019(12):87-90,115.
CHEN Xiangyang, YU Jinchi, GE Jian, et al. Real time

monitoring of instantaneous crustal deformation using GPS and strong seismograph data [J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2019(12):87-90,115.

- [7] 白 洁,巨能攀,张成强,等.贵州兴义滑坡特征及成功预警研究[J/OL].(2020-01-15)[2020-07-13].https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2019-360.
BAI Jie, JU Nengpan, ZHANG Chengqiang, et al. Study on characteristics and successful early warning of Xingyi landslide in Guizhou Province [J / OL].(2020-01-15)[2020-07-13].https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2019-360.
- [8] 解明礼,赵建军,巨能攀,等.多源数据滑坡时空演化规律研究:以黄泥坝子滑坡为例[J].武汉大学学报(信息科版),2020,45(6):923-932.
XIE Mingli, ZHAO Jianjun, JU Nengpan, et al. Study on the temporal and spatial evolution of multi-source data landslides: a case study of huangnibazi landslide [J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2020,45(6):923-932.
- [9] 何朝阳,巨能攀,范 强,等.多源异构地质灾害监测数据集成技术研究[J].人民长江,2014,45(13):94-98.
HE Chaoyang, JU Nengpan, FAN Qiang, et al. Study on the integration technology of multi-source heterogeneous geological disaster monitoring data [J]. Renmin Changjiang River, 2014,45(13):94-98.
- [10] 杨化超,邓喀中,张书华,等.数字近景摄影测量技术在矿山地表沉陷监测中的应用研究[J].中国图象图形学报,2008,13(3):519-524.
YANG Huachao, DENG Kazhong, ZHANG Shuhua, et al. Application of digital close range photogrammetry technology in mine surface subsidence monitoring [J]. Chinese Journal of Image Graphics, 2008, 13(3):519-524.
- [11] 张春森,景啸宇,曹建涛,等.基于摄影测量视觉方法相似模拟试验自动监测研究[J].煤炭科学技术,2019,47(7):200-207.
ZHANG Chunsen, JING Xiaoyu, CAO Jiantao, et al. Research on automatic monitoring based on similar simulation test of photogrammetric vision method [J]. Coal Science and Technology, 2019,47(7):200-207.
- [12] 杨 娜,张 翀,李天昊.基于无人机与计算机视觉的中国古建筑木结构裂缝监测系统[J].工程力学,2021,38(3):27-39.
YANG Na, ZHANG Chong, LI Tianhao. Design of Chinese ancient building wood structure crack monitoring system based on uav and computer vision [J]. Engineering Mechanics, 2021,38(3):27-39.
- [13] TAHAR K N, AHMAD A. Capability of low cost digital camera for production of orthophoto and volume determination [C]//IEEE, International Colloquium on Signal Processing and ITS Applications. IEEE, 2011:67-71.
- [14] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]//IEEE International Conference on Computer Vision. IEEE, 1999:1150.
- [15] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60

- (60):91-110.
- [16] 刘善军,吴立新,毛亚纯,等.天-空-地协同的露天矿边坡智能监测技术及典型应用[J/OL].(2020-01-11)[2020-07-13].<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0362>.
LIU Shanjun, WU Lixin, MAO Yachun, *et al.* Intelligent monitoring technology and typical application of open pit mine slope based on space-air-ground coordination[J/OL].(2020-01-11)[2020-07-13]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0362>.
- [17] 王 东,杜 涵,王前领.基于系统聚类-加权马尔科夫耦合模型滑坡预警方法研究与应用[J].煤炭学报,2020,45(5):1783-1794.
WANG Dong, DU Han, WANG Qianling. Research and application of landslide warning method based on system Clustering-weighted Markov coupling model[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(5):1783-1794.
- [18] LOWRY B, GOMEZ F, ZHOU W, *et al.* High resolution displacement monitoring of a slow velocity landslide using ground based radar interferometry[J]. Engineering Geology, 2013, 166(6):160-169.
- [19] SEVERIN J, EBERHARDT E, LEONI L, *et al.* Development and application of a pseudo-3D pit slope displacement map derived from ground-based radar[J]. Engineering Geology, 2014, 181:202-211.
- [20] EUILLADES L D, EUILLADES P A, RIVEROS N C, *et al.* Detection of glaciers displacement time-series using SAR[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 184:188-198.