

基于高分影像和 ASIFT 算法的滑坡位移场监测方法

张慧慧^{1,2}, 刘善军¹, 王 茹¹
(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁省交通高等专科学校 测绘系, 辽宁 沈阳 110122)

摘 要: 针对利用高分遥感影像和 SIFT 算法进行大变形滑坡位移场监测时存在的不足, 引入了一种具备完全仿射不变性的图像特征匹配算法(ASIFT), 对不同时相高分遥感影像进行特征点提取与匹配, 并在抚顺西露天矿特大型滑坡的位移场监测中进行了应用. 结果表明, 与 SIFT 算法相比, ASIFT 算法弥补了特征提取算法在仿射不变性上的不足, 增加了特征匹配点, 提高了滑坡空间位移矢量场标定精度, 且自动化程度高、成本低, 非常适合于特大型滑坡的大变形位移场监测.

关 键 词: 高分影像; ASIFT; 滑坡; 位移场; 监测

中图分类号: P 237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)10-1468-06

Monitoring Method of Landslide Displacement Field Based on High-Resolution Images and ASIFT Algorithm

ZHANG Hui-hui^{1,2}, LIU Shan-jun¹, WANG Ru¹
(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Surveying and Mapping Department, Liaoning Provincial College of Communications, Shenyang 110122, China. Corresponding author: LIU Shan-jun, E-mail: liusjdr@126.com)

Abstract: In view of the shortcomings of displacement field of large deformation landslide with SIFT algorithm and high-resolution remote sensing images, a feature matching algorithm with fully affine invariability(ASIFT) was introduced to extract and match features on different phases of high-resolution remote sensing images. The Fushun West Open-Pit Mine was selected as a study area, and the displacement field was analyzed with the ASIFT algorithm. The results showed that compared with the SIFT algorithm, the deficiency of the feature extraction algorithm in affine invariance is compensated, the feature matching points increase and the accuracy of the displacement vector field of the landslide is improved by using ASIFT algorithm. The ASIFT algorithm is more suitable for monitoring the displacement field of large landslide with higher degree of automation and lower cost.

Key words: high-resolution image; ASIFT; landslide; displacement field; monitoring

滑坡是露天矿开采过程中的重大安全隐患之一. 随着露天开采深度和边坡角度的不断增大, 边坡的稳定性问题越发突出, 给矿山的安全生产带来隐患, 并造成人员伤亡和生产事故^[1]. 因此, 实时动态监测边坡稳定性及其变化趋势是露天矿开采领域不容忽视的难题.

目前, 边坡变形监测的方法主要包括 GPS 监测技术、InSAR 技术和三维激光扫描等形变监测技术, 但这些传统的监测方法各自存在一定的局

限性. GPS 监测技术属于点式监测手段^[2], 难以获取空间场的信息; InSAR 技术作为高精度监测地表形变的技术, 适用于确定滑坡初期、小变形量滑坡范围, 而在地表起伏较大时易产生相位失相关^[3]; 地面三维激光扫描技术适合滑坡中后期的垂直位移监测, 但受到扫描速率和扫描距离等因素限制且价格昂贵, 该技术在特大型边坡稳定性监测领域应用有限^[4]. 因此, 亟需一种针对大型滑坡后期在发生较大变形时的位移场监测方法.

近年来,随着高分辨率遥感技术的迅速崛起,遥感监测形变方法已在滑坡监测领域发挥了重要作用. 国内外一些学者利用高分影像结合图像匹配算法进行大变形滑坡水平位移监测,取得了重要进展. Delacourt 等^[5]基于 3 幅时间间隔相同的 Quick Bird 影像,利用基于像素灰度变化的相关系数法两两计算滑坡位移,得到每年范围在 2.5 ~ 20 m 的滑坡运动变化图; Travelletti 等^[6]利用位置固定的高分辨率光学相机获取阿尔卑斯山的 Super - Sauze 滑坡影像,利用相关系数法计算其滑坡位移量; Gance 等^[7]利用光学相机同样拍摄阿尔卑斯山 Super - Sauze 滑坡半年内的图像,通过 Harris 角点特征匹配法得到滑坡位移量; Liu 等^[8]利用 SIFT 算法在两期不同时相高分辨率遥感影像上提取同名点,获取了大型滑坡的位移场,从而确定了滑坡的范围,为滑坡的后期防治提供了依据. 上述表明,基于高分影像和图像匹配算法可以对滑坡的空间位移场进行计算,但以往使用的基于像素灰度匹配的相关系数法,在影像的低对比度区域相关系数较低,变形量不易计算或精度不高;目前最新的基于 SIFT 特征匹配的监测方法虽然取得了一定效果,但鉴于不同时相的两期影像经预处理后仍具有仿射变形,存在特征点匹配精度不理想的问题.

本文在前期课题组工作的基础上^[8],考虑到大视角变化下滑坡目标发生仿射变形的实际情况,引入了一种具备完全仿射不变性的图像特征匹配算法(ASIFT),对不同时相高分遥感影像进行特征点提取与匹配,优化前期使用 SIFT 算法进行滑坡位移场提取的效果.

1 图像匹配中的 ASIFT 算法原理

ASIFT 算法是文献[9 - 10]提出的一种具备完全仿射不变性的局部特征提取算法,该算法是对 SIFT 算法的改进. 它继承了 SIFT 算法完全尺度不变性,并在 SIFT 算法平移,旋转,尺度缩、放 4 个不变特性基础上增加了 2 个不变特性:经度角和纬度角,用来描述拍摄视角的空间位置,实现图像特征匹配的完全仿射不变性.

ASIFT 算法实施过程:模拟拍摄视角变化造成的仿射畸变,获取模拟图像;对所得模拟图像利用 SIFT 算法进行特征点检测与匹配.

1) 仿射模拟:由拍摄视角发生变化而产生的局部空间形变可以通过图像之间仿射变换来模拟. 仿射变换模型可表示为

$$I(x, y) \rightarrow I(ax + by + e, cx + dy + f) \quad (1)$$

式中仿射变换矩阵 $A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$, 可以分解为

$$A = \lambda \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中仿射变换参数的几何解释如图 1 所示. 在这个仿射模拟模型 u 中,图右上方的小平行四边形代表相机观看 u 的位置, λ 为缩放系数, ψ 为镜头光学轴向旋转角度, t 为倾斜度, φ 和 $\theta = \arccos(1/t)$ 为相机的经度角和纬度角.

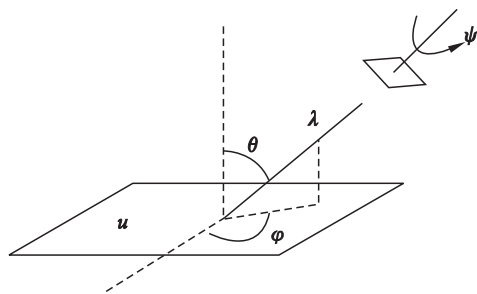


图 1 仿射模拟模型

Fig. 1 Affine simulation model

模拟目标所有可能的由于拍摄视角变化造成的仿射畸变,获取对输入图像视角变化模拟后的一组模拟图像.

2) 利用 SIFT 算法对仿射模拟输出后的图像进行特征提取与匹配,主要包括在高斯差分尺度空间上检测特征点、分配特征点主方向、生成特征点描述子、最邻近法匹配特征点等步骤,具体实现过程见文献[11].

2 滑坡位移场标定的技术流程

2.1 遥感影像预处理

遥感影像预处理主要包括正射校正和影像配准. 正射校正能消除卫星成像过程中,因地球曲率、地形起伏及传感器倾斜等因素导致的影像畸变^[11]. 因此,在利用高分影像进行滑坡位移量计算时,首先需要对原始影像进行正射校正,再利用已获取的与待纠正影像范围一致的数字高程模型(DEM)数据对原始影像进行投影差改正,将原始影像纠正成正射影像.

经正射校正后地表未发生真实移动的同名点在两幅影像上地理位置理论上应完全吻合,但由于卫星姿态、轨道误差、传感器结构性能、地球运动和形状等因素的影响^[12],造成两幅影像上稳定同名点在位置上出现偏差,需要进行影像配准. 因

此,在利用不同时相两期高分影像进行滑坡位移量计算时,可以选取前一时相影像作为参考影像,对后一时相影像进行配准. 配准总均方根误差应控制在一个像元内.

2.2 ASIFT 算法实施

ASIFT 算法的实施包括确定模拟图像、特征提取与匹配两个方面,具体见第 1 节. 通过 ASIFT 算法实施后,实现了不同时相影像之间的特征点提取与匹配.

2.3 误匹配点剔除

在特征匹配中,虽选取最佳经验值为阈值,但需要匹配的两影像之间可能存在噪声、计算误差等,仍存在误匹配点,需要剔除. 本文采用一种基于标准偏差基准的斜率过滤法^[13];若出现某对匹配点连线的斜率明显不符,其残差大于 3 倍标准差,则确定该匹配点对为误匹配.

2.4 滑坡位移场标定

在经过上述步骤后,确定了滑坡不同时相影像中的特征匹配点对,可以利用滑坡体运动特征矢量集模型计算空间矢量位移. 以遥感影像左上角点为原点建立像方坐标系,计算坡体在两幅影像时间段间的匹配点位移像素个数. 像素个数与单个像素所代表的实地距离相乘,便是滑坡体在两幅影像所处的时间段内已滑动的位移量. 分别将两幅影像中获取的滑坡体上的特征点依次首尾相连,连接成特征矢量集,最后绘制滑坡位移场的等值线图,直观地显示出不同滑坡位移量的空间移动范围. 滑坡位移场标定的技术流程如图 2 所示.

3 在抚顺西露天矿滑坡监测中的应用

3.1 研究区概况

抚顺西露天煤矿为亚洲第一大矿,总面积约为 14.52 km²,经过百余年的开采,先后出现多次滑坡险情. 2013 年 8 月,南帮滑坡险情加剧,在千山南坡形成了一条长约 3 100 m 的地裂缝,最大移动速度达到 8~10 cm/d,造成矿坑底鼓、运输皮带破坏、建筑物变形等现象. 虽然之前矿山已经布置了 GPS 点进行位移监测,但由于点的密度较低,无法获取滑坡的位移场范围. 此外,曾使用合成孔径雷达差分干涉测量技术(differential interferometric synthetic aperture radar, D-InSAR)对 2007—2011 年间的滑坡位移场进行监测,获得了南帮滑坡的位移场信息. 进入 2013 年后,随着位移量的增大,D-InSAR 出现了相位解

缠困难,无法实现位移场有效获取的问题. 为此,本文针对抚顺西露天矿特大型滑坡在后期发生的大变形情况,基于高分遥感影像和 ASIFT 算法,开展了位移场测定和滑坡范围的确定.

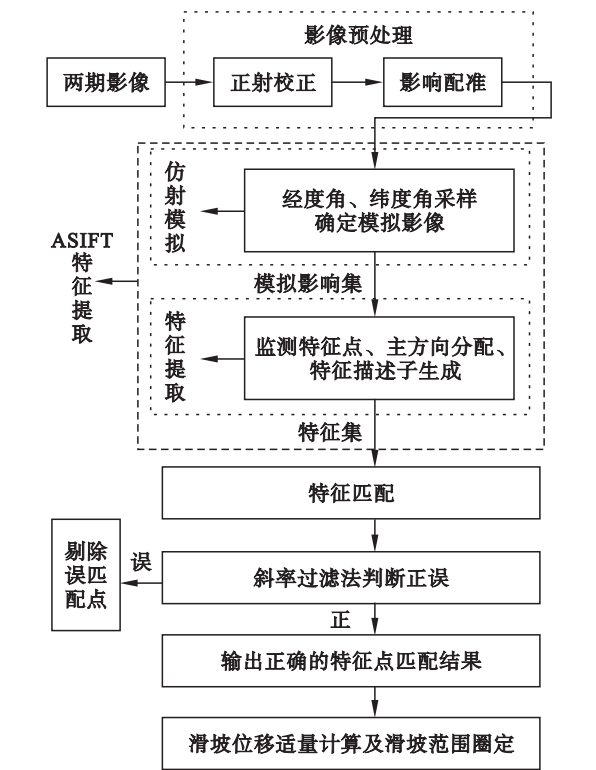


图2 滑坡位移场标定的技术流程
Fig. 2 Calibration process of landslide displacement field

3.2 数据选择及预处理

本文采用的遥感影像数据是 Pléiades-1B 卫星的高分辨率全色影像,其空间分辨率为 0.5 m. 采用了 2013 年和 2014 年春季的两期影像完成位移场变化计算,详细参数如表 1 所示.

表 1 高分辨率遥感影像数据				
Table 1 High resolution remote sensing image data				
数据来源	影像获取时间	轨道高度/km	分辨率/m	拍摄角度/(°)
Pleiades	2013-04-21	694	0.5	17.7
全色波段	2014-03-18	694	0.5	6.6

首先利用与影像同一时间和空间分辨率的 DEM 数据进行正射校正,但在实际的影像正射校正时,二者往往不能满足要求. 为尽可能减小误差,本文采用经过处理后的 Aster GDEM 数据和三维激光扫描仪实测的 DEM 数据分别对两期影像进行了正射校正^[8]. 接着选择矿坑周围的稳定区域对正射校正后的影像进行手动配准,最后经过影像裁剪,输出待匹配的两期遥感影像.

3.3 结果分析

预处理后的两期影像利用第 2 节所述流程在 Matlab 平台上实现了滑坡位移场的标定. 在露天矿研究区范围内, 基于 SIFT 和 ASIFT 算法分别

获取 2013 - 04 - 21 ~ 2014 - 03 - 18 间的滑坡位移场矢量图, 如图 3 所示. 黄色箭头标识的是滑坡体目标运动矢量位置、大小和方向.

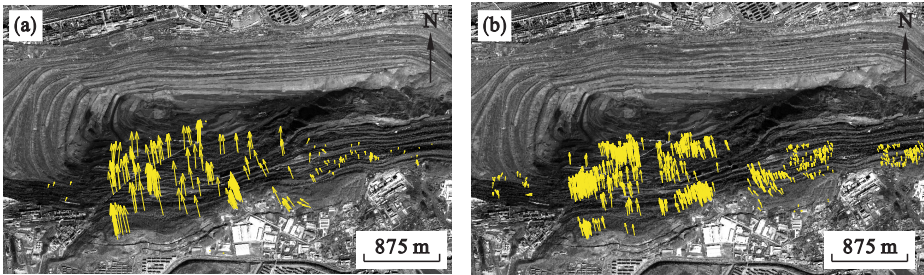


图 3 基于 SIFT 和 ASIFT 算法的滑坡位移矢量图
Fig. 3 Displacement vectors extracted by SIFT and ASIFT algorithms
(a)—SIFT; (b)—ASIFT.

由图 3 可知, 两种算法都可获取一定数量的正确匹配点对, 但图 3b 明显比图 3a 提取到更多的特征匹配点对. 为进一步说明基于 ASIFT 算法的优越性, 以总匹配数、正确匹配数、匹配准确率作为评价标准, 表 2 为两种算法应用效果的具体情况. 可知, 基于 ASIFT 算法的匹配数量及匹配准确率都高于 SIFT 算法, 这主要因为 ASIFT 算法通过仿射变换模型输出的模拟影像有效地克服了两期影像因拍摄视角、目标变化引起的形变对匹配效果的影响, 保证了特征匹配的准确性、完备性.

图 4 为基于 SIFT 和 ASIFT 算法分别提取的特征匹配点生成的滑坡位移场等值线图. 从中可

以很清楚地看出滑坡范围及各处位移量大小, 最大滑动位移已达到 35 m. 由于图 4b 相对于图 4a 边界处特征匹配点的增多, 生成的位移场的边界更精确, 滑坡范围的确定随之更准确, 而滑坡内部特征匹配点的增多, 也可更准确地描述滑坡内部的滑动情况.

表 2 两种算法评价指标 Table 2 Evaluation indexes of two algorithms			
算法	总匹配数	正确匹配数	准确率/%
SIFT	308	253	82
ASIFT	1 041	979	94

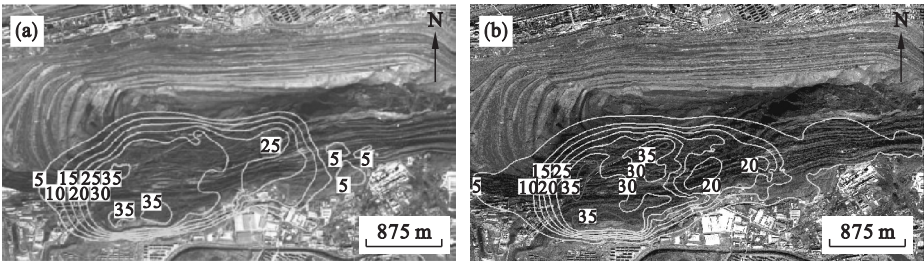


图 4 两种算法的滑坡位移场等值线图
Fig. 4 Contours of landslide displacement of two algorithms
(a)—SIFT; (b)—ASIFT.

4 精度评价

为了正确评价滑坡位移场提取结果, 本文将 SIFT 和 ASIFT 两种算法的计算结果与研究区埋设的 3 个 GPS 点监测结果进行了对比. 图 5 中红色标志为 GPS 监测点位置, 表 3、表 4 为 SIFT 和 ASIFT 处理结果分别与 GPS 监测结果的对比情况.

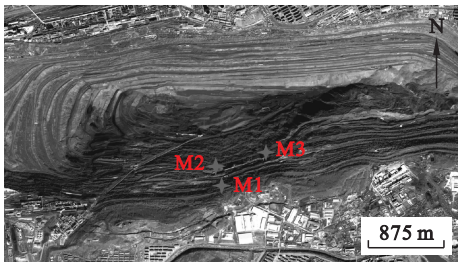


图 5 GPS 点位分布
Fig. 5 Distribution of GPS

表 3 SIFT 算法处理结果与 GPS 监测结果对比

Table 3 Comparison results of SIFT algorithm and monitoring results of GPS

m

GPS 点号	GPS 南北向位移	GPS 东西向位移	SIFT 算法南北向位移	SIFT 算法东西向位移	二者南北向差	二者东西向差	位移总误差
M_1	17.4	-1.4	18.3	-2.6	0.9	-1.2	1.2
M_2	20.5	-2.4	22.4	-2.1	1.9	0.3	1.9
M_3	16.7	-1.7	16.6	-0.2	-0.1	1.5	1.5

表 4 ASIFT 算法处理结果与 GPS 监测结果对比

Table 4 Comparison results of ASIFT algorithm and monitoring results of GPS

m

GPS 点号	GPS 南北向位移	GPS 东西向位移	SIFT 算法南北向位移	SIFT 算法东西向位移	二者南北向差	二者东西向差	位移总误差
M_1	17.4	-1.4	17.8	-1.9	0.4	-0.5	0.7
M_2	20.5	-2.4	21.3	-2.2	0.8	0.2	0.8
M_3	16.7	-1.7	16.6	-0.5	-0.1	1.2	1.2

由表 3 和表 4 可知:采用 SIFT 算法处理时, M_1, M_2, M_3 的位移总误差分别为 1.2, 1.9, 1.5 m;采用 ASIFT 算法处理时, M_1, M_2, M_3 的位移总误差分别为 0.7, 0.8, 1.2 m,精度分别提高了 0.5, 1.1, 0.3 m. 可见,相比 SIFT 算法,AISFT 算法有效地提高了滑坡空间位移矢量标定精度.

5 结 论

1) ASIFT 算法在目标的空间位置、视角发生较大变化的复杂情况下,可以获得比 SIFT 算法更多的正确特征匹配点.

2) 在抚顺西露天矿特大型滑坡监测结果表明:利用 ASIFT 算法正确匹配的特征点数达到了 SIFT 算法的近 4 倍,算法准确率从 82% 提高到 94%;位移量的精度也得到明显提高,在露天矿滑坡位移场监测中取得了更高的精度.

3) 本文研究结果为特大型滑坡的大变形监测提供了一种切实可行的方法.但是,ASIFT 算法由于增加了仿射模拟部分,导致其计算复杂度提高,耗时约为 SIFT 算法的 2 倍.如何提高 ASIFT 算法的处理效率,将是下一步的研究方向.

参考文献:

[1] Chen J P, Li K, Chang K J, et al. Open-pit mining geomorphic feature characterization[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 42 (10): 76-86.

[2] Brunner F, Macheiner K, Woschitz H. Monitoring of deep seated mass movements [C]// *Proceedings of the Third International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*. Vancouver, 2007: 13-16.

[3] Sun Q, Zhang L, Ding X L, et al. Slope deformation prior to Zhouqu, China landslide from InSAR time series analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156 (1): 45-57.

[4] Sajid G, Balazs S, Andreas R, et al. Landslide displacement monitoring using 3D range flow on airborne and terrestrial lidar data [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5 (6): 2720-2745.

[5] Delacourt C, Allemand P, Casson B, et al. Velocity field of the “La Clapière” landslide measured by the correlation of aerial and Quick Bird satellite images [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31 (15): 1-5.

[6] Travelletti J, Delacourt C, Allemand P, et al. Correlation of multi-temporal ground based optical images for landslide monitoring: application, potential and limitations [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 70 (6): 39-55.

[7] Gance J, Malet J P, Dewez T, et al. Target detection and tracking of moving objects for characterizing landslide displacements from time lapse terrestrial optical images [J]. *Engineering Geology*, 2014, 172 (8): 26-40.

[8] Liu S J, Wang H, Huang J W, et al. High-resolution remote sensing image based extensive deformation induced landslide displacement field monitoring method [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2015, 2 (3): 170-177.

[9] Morel J M, Yu G. ASIFT: a new framework for fully affine invariant image comparison [J]. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2009, 2 (2): 438-469.

[10] Yu G, Morel J M. A fully affine invariant image comparison method [C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Taipei, 2009: 1597-1600.

[11] Chen C C, Hsieh S L. Using binarization and hashing for efficient SIFT matching [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2015, 30 (7): 86-93.