

用数字相关方法研究滑坡变形场

赵永红*, 王航, 张琼, 谢雨晴, 杨家英

北京大学地球物理学系, 北京 100871

* 联系人, E-mail: zhaoyh@pku.edu.cn

2016-03-17 收稿, 2016-06-19 修回, 2016-06-20 接受, 2016-09-18 网络版发表

摘要 三峡大坝建成及动态蓄水运行后, 滑坡成为库区地质灾害的主要形式之一. 库区滑坡发育受大坝每年的蓄水泄洪周期及降水等因素影响. 本文选择湖北秭归县卧沙溪滑坡作为研究对象, 利用数码相机作为采集设备采集了2015年4月和5月的滑坡图像观测滑坡地表, 用数字相关方法对滑坡图像进行处理得到滑坡位移场. 位移量达到50 cm, 但滑坡体表面各部分的位移量和方向不尽相同, 滑坡运动是不均匀性的、非刚体运动. 综合运用散斑法、灰度特征搜索等系列相关方法, 成功处理了小形变关系、大位移量移动等滑坡特征问题, 采用数码相机观测作为一种新的观测手段, 还解决了采集图像的配准、灰度同级化等问题, 并计算出滑坡体上各个点的方向和位移变化量, 得到所有点的滑坡位移分布图, 通过室内标定实验, 误差在可接受范围内, 验证了此方法的有效性. 在满足滑坡监测要求的前提下, 该方法操作简便、成本低、采集数据信息量大、可同时获取滑坡地表变形信息, 有很好的推广前景.

关键词 三峡, 卧沙溪滑坡, 相关计算, 位移场, 图像灰度特征匹配

滑坡是三峡地区常见的一种地质灾害形式. 随着水库的动态蓄水运行, 三峡滑坡具备或强化了发育条件, 对沿岸居民和航运安全有较大的影响^[1]. 因此对其进行监测是三峡滑坡等地质灾害的必要防灾手段之一, 周小莉等人^[2]做了大量研究工作总结出多种不同形式的地表监测方法. 地表变形监测是对滑坡体的地表进行接触式监测和非接触式监测. 接触式监测的主要仪器和技术有自动伸缩仪、TDR技术、分布式光纤^[3]、监测机器人^[4]和永久散射体技术^[5,6], 非接触式方法有GPS技术、合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术、摄像测量等.

接触式方法采用的仪器和技术手段主要有以下几种. 自动伸缩计^[7~9]用于测量滑坡体裂缝的变形量, 与其他监测方法相比, 具有精度高、价格低廉、安装简单、不受天气影响等优点, 其测量精度可达到0.2 mm. 但测量范围受到量程的限制, 超过量程自动伸

缩仪就会失效. 时域反射法(time domain reflectometry, TDR)是一种远程电子测量技术^[10]. TDR技术已在滑坡监测中得到广泛应用. 适用范围是监测滑带, 优点是适合连续观测, 局限性是不确定方向. 分布式光纤监测系统^[3]是分布调制的光纤传感系统, 通过独特的检测技术解调调制信号谱带, 从而获得外界场信号的大小及空间分布. 这种方法的优点是精度高, 局限性是成本高、运行费用也高昂. 监测机器人^[4]是在全站仪基础上集成步进马达、CCD影像传感器构成的视频成像系统, 是一种能代替人进行自动搜索、跟踪、辨识和精确照准目标并获取角度、距离、三维坐标以及影像等信息的智能型电子全站仪. 采用测量机器人能进行自动快速监测, 具有时效性强、观测精度高等特点, 并大大减轻了测量人员的内、外业工作量, 但对边长和地面通视有一定要求.

对于非接触式方法, 全球定位系统^[11~13](GPS)主

引用格式: 赵永红, 王航, 张琼, 等. 用数字相关方法研究滑坡变形场. 科学通报, 2016, 61: 3163–3171

Zhao Y H, Wang H, Zhang Q, et al. A study of landslide deformation field with digital correlation method (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 3163–3171, doi: 10.1360/N972016-00351

要用于精确定位目标点的空间位置,测量精度在毫米级.其局限是在受地形影响的情况下测量精度不够高,较多用于只对滑坡的长期趋势进行监测或精度要求较低,且滑坡范围较大的应用场景.合成孔径雷达^[13~15]干涉测量是一种用于大面积观测的微波遥感技术,理论上InSAR方法可以探测到毫米量级的地面变化,该技术手段能提供比GPS技术好得多的空间分辨率,特别适于解决大面积的滑坡、崩塌、泥石流以及地裂缝、地面位移等地质灾害的监测预报,其局限性是观测精度固定,目前InSAR的精度仍低于GPS的观测精度,且成本高.

以上各种监测方法在实际应用当中的优缺点和局限性见表1.

本文在滑坡监测研究方法的基础上,将摄影测量方法^[16,17]应用到对滑坡监测这个特定领域,发展了一种基于图像灰度特征匹配的滑坡位移量场求解方法.首先利用摄像机、照相机等图像采集设备对动静景物或者运动过程进行拍摄,得到时间序列图像后,利用数字图像处理手段对其进行分析以获得位置、速度、加速度等运动量和位移、应变等形变量.通过对三峡库区的卧沙溪滑坡的监测,得到了该滑坡的位移场随时间的变化和位移矢量.该方法相对于卫星遥感测量和航空摄影测量来说,观测范围小,但是测量分辨率高、操作实施非常方便,观测成本低、数据处理方法简单灵活,特别适合于野外矿山^[18~22]、隧道^[23,24]、边坡^[25~27]、桥梁^[28]等中小尺寸结构的变形监测.

1 基于图像灰度特征匹配方法求解滑坡位移场

图像灰度特征匹配^[29~32]的基本思想是基于统计的观点,将图像看成二维信号,采用相关的方法寻找

信号间的相关匹配.利用两个信号的相关函数评价它们的相似性以确定同名点.在参考图像中选择一个需要计算的点P,以该点为中心,切割出一块用于匹配的含有该点灰度特征的图像 f .选择目标图像中P点坐标周围多个点,切割出与 f 大小一致的用于匹配的图像 g ,计算 f 和 g 间的相关系数.当上述所有的点都被遍历计算一遍后,相关系数最大值点所在的位置就是P点在目标图像中的位置Q.用于计算相关系数的公式如下^[33~35]:

$$C = \frac{\sum \sum (f - \bar{f}) \cdot (g - \bar{g})}{\sqrt{\sum \sum (f - \bar{f})^2 \cdot \sum \sum (g - \bar{g})^2}}, \quad (1)$$

式中, f 和 g 代表用于匹配的两幅图像.

利用以上算法对滑坡前后同一个位置的附近区域图像进行搜索匹配,计算得到滑坡前后该点的位移量.具体求解步骤是通过数字图像采集设备获取被测对象变形前、后的各一幅图像,变形前称参考图像,变形后称目标图像,对图像中灰度分布特征相似的区域进行搜索和匹配,从而得到被测物上每个点的变形信息,即变形场^[33,34,36].

2 卧沙溪滑坡图像采集

卧沙溪滑坡位于长江支流青干河右岸,经度为110°35'42.4"E,纬度为30°58'03.9"N.滑坡区为单斜地层,岩层总体产状100°∠25°,走向与岸坡总体走向大角度相交,属斜向结构岸坡.地层岩性为侏罗系长石石英砂岩,发育3组裂隙,产状分别为:155°~160°∠75°~85°,210°~225°∠60°~70°,20°~40°∠65°~70°.卧沙溪滑坡体后缘高程405 m,前缘高程140 m以下,滑坡左、右边界以基岩脊与山谷交接处为界,总坡度20°.滑体长400 m,宽700 m,平均厚度约8 m.卧沙溪滑坡的地质构造图见图1和2,卧沙溪滑坡的轮廓

表1 滑坡监测技术统计表

Table 1 Comparison of slope sliding monitoring methods

监测方法	适用情况	优点	适用的特点	初期投入费用	运行费用	可否自动监测
GPS地表形变监测	能够接收到GPS信号	全天候观测	反映点的变化,要受环境影响	设备昂贵	中	可
InSAR监测	植被覆盖少的地区	大面积监测	受气象和地形影响大	低	高	可
分布式光纤形变监测	适合钻孔的滑坡体	精度高,可以实时连续监测	变形大时,光纤容易损坏	设备昂贵	高	可
自动伸缩计地表监测	地表形变明显的滑坡	精度高,可以实时连续监测	只能监测到局部变形	中	低	可
TDR深部监测	监测滑带变形及位置	可连续观测	不能确定方向	高	中	可
摄像测量	监测滑坡地表变形	可连续观测	受气象条件限制	低	低	可

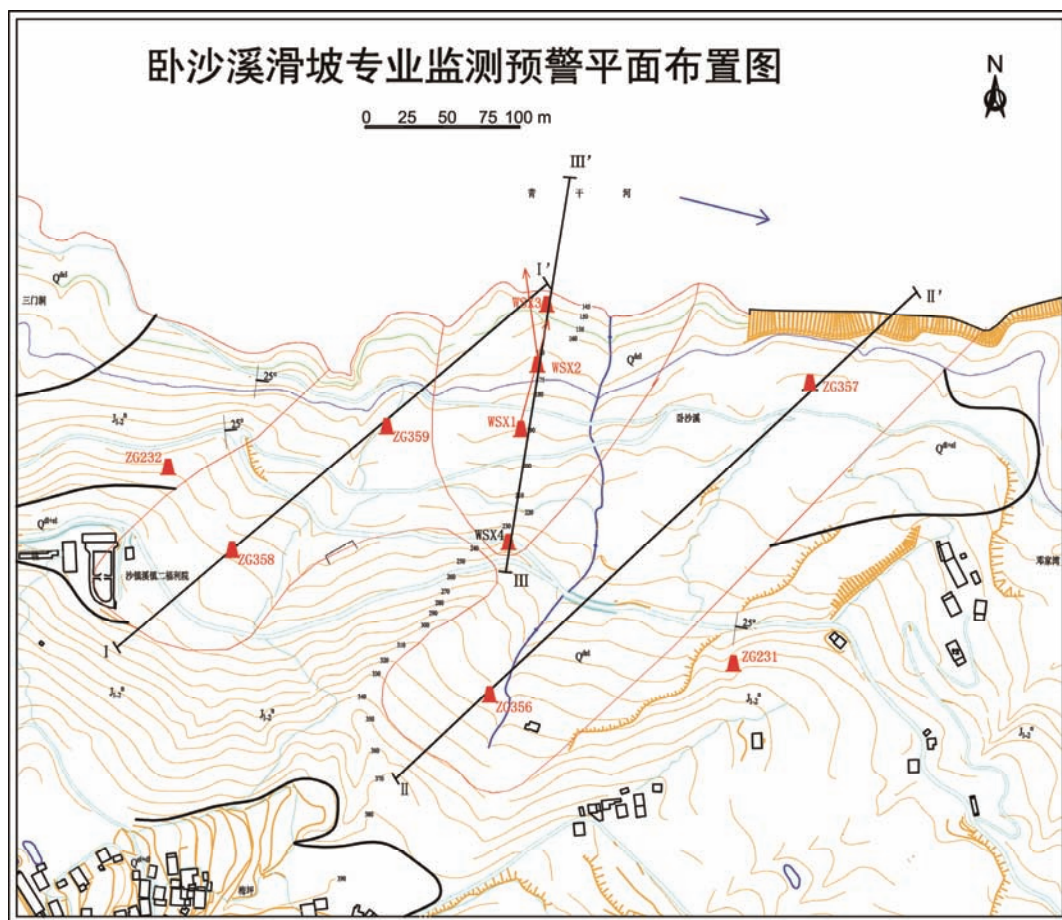


图 1 (网络版彩色)卧沙溪滑坡等高线图

Figure 1 (Color online) The contour map of the Woshaxi landslide

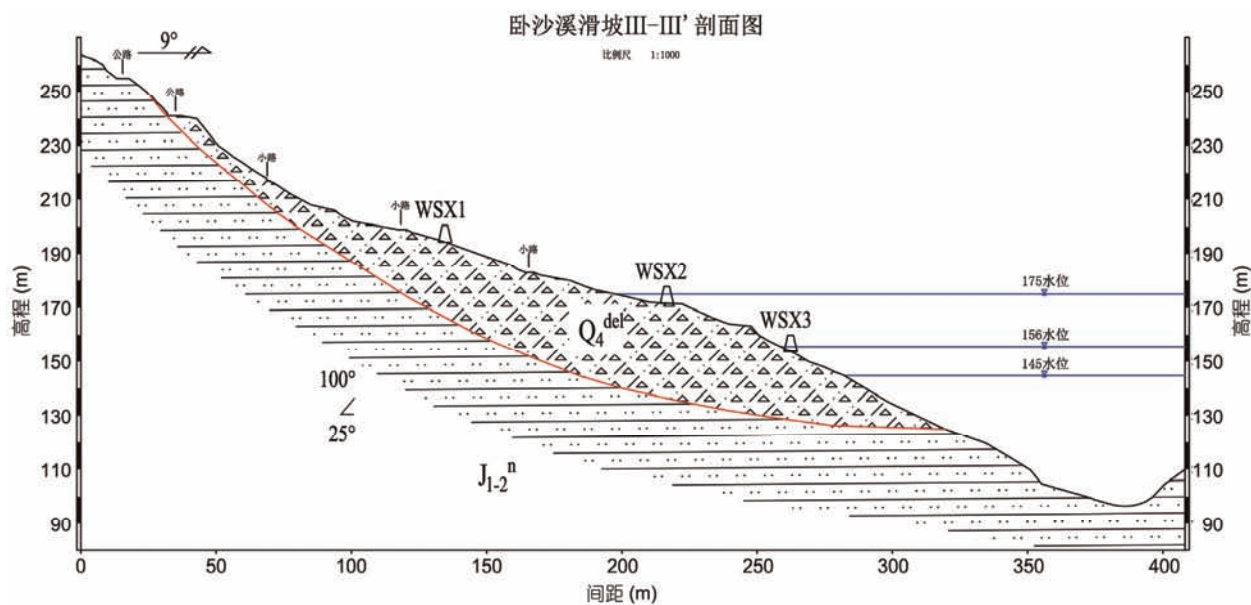


图 2 (网络版彩色)卧沙溪滑坡剖面图

Figure 2 (Color online) The sectional view of the Woshaxi landslide



图3 (网络版彩色)相机采集到的原始图像. 实线部分内是滑坡和次级滑坡体范围

Figure 3 (Color online) The original image captured by camera. Regions blow solid line are the landslide and secondary landslide

见图3.

本研究利用数码相机(SONY DSC-W190, 分辨率 4912×3264)作为对滑坡地表图像的采集设备, 采集时使用选点复位措施, 在野外确定采集地点后, 在采集点地表契入木桩作为位置标志, 在木桩横截面上钉钉子, 作为校准点, 每次采集时用作复位参考点. 复位采集位置, 使用铅锤校准三脚架的位置, 使铅锤尖对准木桩上的校准点位置. 复位参数包括: 垂高、方位角、俯仰角等. 利用拍摄的照片, 得到的是滑坡在视线方向的投影, 方位角 195° , 俯角 5° . 采集图像的

时间分别为2015年4月21日及2015年5月23日, 得到的卧沙溪滑坡全貌及次级滑坡图像如图4所示.

3 滑坡位移场计算结果

以2015年4月21日滑坡体图像为参考图像, 2015年5月23日滑坡体图像作为目标图像, 对滑坡体上的各个点进行匹配运算, 获得两个时间段下的各点的坐标. 对每个点在变形前后的位置坐标相减即可得到滑坡的位移场如图5所示. 其中 x 方向(平行于青干江流向的方向)的位移场用 u 来表示(图5(a)), y 方向

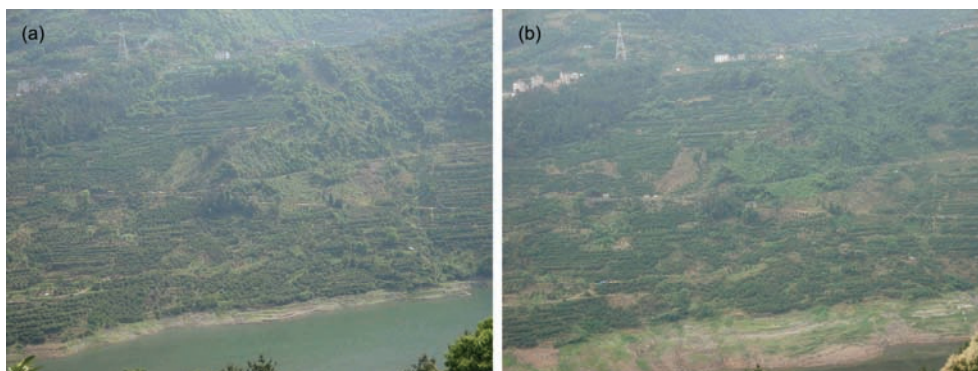


图4 (网络版彩色)相机采集到的原始图像. (a) 4月参考图像; (b) 5月目标图像

Figure 4 (Color online) The original image captured by camera. (a) Reference image (obtained in April 21); (b) target image (obtained in May 23)

(垂直于青干江流向的方向)的位移场用 v 来表示(图5(b)). 滑坡位移场的单位为厘米, 某点的水平方向位移向右为正值, 垂直方向位移向下为正.

观察两个方向的滑坡位移场可以发现, 滑坡体发生了沿水平方向(平行于江水流动方向)向右侧的滑动, 右侧位移数值较大, 水平滑动的最大量约为30 cm. 滑坡体上各点在 y 方向上的位移自左至右呈增大的趋势, 说明滑坡体整体在向下(垂直于江水流动方向)即向江中滑动. 相对于水平方向位移来说, 垂直方向位移数值整体偏大, 滑坡体右侧的向下最大位移量可达到约50 cm, 滑坡体中部和靠近水线的部分, 也可以观察到20 cm左右的向下移动. 综合两个方向的位移场特征, 滑坡体的整体滑动方向是从左上向下滑动, 结合地形分布, 则是向右侧的冲沟滑动同时向江中移动. 滑坡体内部的位移场不均匀分布, 说明滑坡体在发生整体滑动的同时, 由于内部各个区域土质、植被覆盖以及坡体本身的变形的影响, 各点的位移并不完全同步. 在水平方向和垂直方向的位

移场显示出滑坡体在右侧边界上的位移在数值和梯度上都很大, 表示在滑坡的内部发育了次一级的变形(图6).

图6(a)展示了滑坡体的位移矢量场, 其中红色点代表计算点的位置, 蓝色箭头的长度代表该点位移的绝对值, 箭头的指向代表该点的移动方向. 从矢量场中可以很清楚地观察到滑坡体整体是朝右下方(东南方向)移动, 滑坡体右下方的位移量绝对值约为左上方的位移量绝对值的5倍. 图6(b)展示了滑坡体位移矢量大小的等值线分布图. 从图中可以发现滑坡体右下方的位移梯度非常大, 也就是说此处的滑动过程最为剧烈, 极易出现失稳滑动.

4 讨论与结论

本文提出一种基于“灰度匹配”方法的滑坡位移场位移量分布的光学测量方法, 实现了卧沙溪坡滑坡的全场位移场的观测测量. 对2015年4, 5月采集的滑坡图像进行处理得到了滑坡位移场, 总体位移量

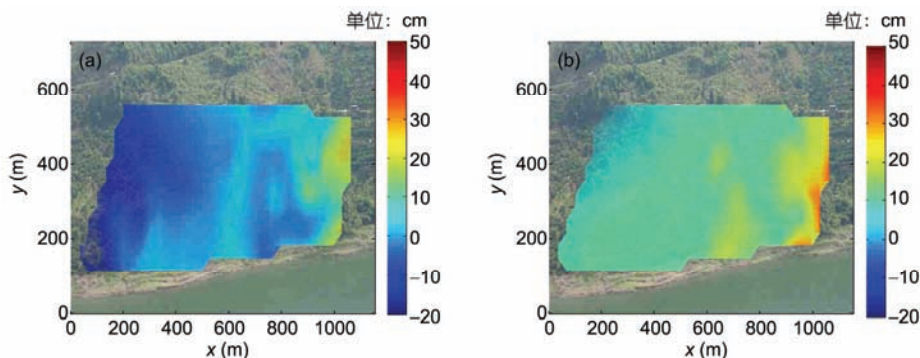


图5 计算得到的滑坡位移场. (a) 水平方向; (b) 垂直方向
Figure 5 The displacement fields of landslide. (a) u field; (b) v field

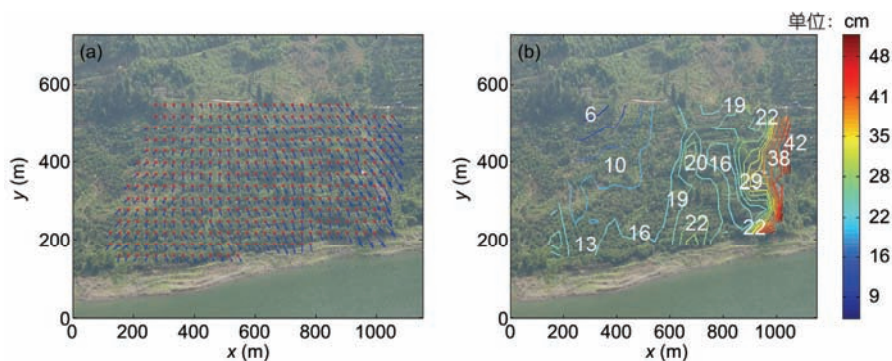


图6 2015年4~5月卧沙溪坡滑坡位移. (a) 位移矢量图; (b) 位移等值线图
Figure 6 The displacement of the Woshaxi landslide in 4-5, 2015. (a) Vector field of displacement, (b) contour map of displacement

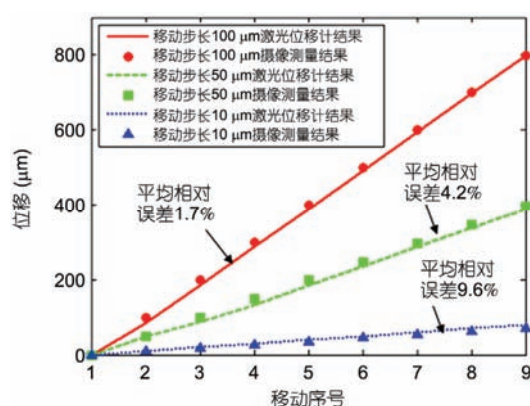


图7 (网络版彩色)本文方法和标准方法测量结果的对比

Figure 7 (Color online) Comparison between the method proposed in this paper and the standard method

达到50 cm, 在水平方向, 滑坡地表是整体向右侧移动, 在垂直于江水流动方向, 滑坡体整体在向下即向江中滑动. 相对于水平方向位移来说, 垂直方向位移数值整体偏大. 滑坡体表面各部分的位移量和方向不尽相同, 因此, 滑坡运动是不均匀性的非刚体运动. 根据当地专家的介绍, 滑坡体左侧边界外侧地下是一道石梁, 该结构限制了滑坡向左侧的发展; 地下

结构反映到地表, 左侧的位移量比较小, 在水平方向上10~20 cm之间, 在垂直方向上0~10 cm之间; 滑坡的右侧是一道冲沟, 没有其他构造制约, 所以, 右侧滑动量较大, 在水平方向上是30 cm左右, 在垂直方向上是30~50 cm之间. 符合滑坡受到石梁的影响这样一个运动规律. 依据标定实验结果(图7), 计算误差在可接受范围内, 验证了本方法的有效性^[37].

本文所提出的滑坡位移场测量方法除了具有全场、非接触及观测范围可变等传统摄像测量方法的优势外, 还具有变形测量范围大、对环境适应能力强等优点. 相对于传统的点测量方法来说, 本文的方法不仅能够得到更多的滑坡点位移量数据, 而且能够观察到滑坡全局的变形, 可以对滑坡整体的变形行为进行观测和预测. 相对基于卫星图像的摄影测量方法来说, 本文的方法将观测范围限定在每个具体的滑坡, 位移分辨率更高, 而且不受气象条件、姿态角度和飞行周期的限制. 更为重要的是, 本文的方法在获取数据的成本上很低, 可在各个滑坡点架设摄像头实现无人值守的数据采集和处理, 实现滑坡位移场的自动化观测和预警, 因此具有很好的应用前景.

参考文献

- Li X F. The application of the correlation calculation method on solving landslide deformation: Shuping landslide as an example (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Peking University, 2011 [李小凡. 相关计算方法在求解滑坡变形场中的应用——以树坪滑坡为例. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2011]
- Zhou X L, Li R Z, Liang W X, et al. Studies on the information monitoring method for landslide geological disasters (in Chinese). Surv Mapp Sichuan, 2014, 4: 173–177 [周小莉, 李任之, 梁文旭, 等. 滑坡地质灾害信息监测方法研究. 测绘, 2014, 4: 173–177]
- Shi Y X, Zhang Q, Meng X W. The application of distributed optical fiber sensing technology in landslide monitoring (in Chinese). J Jilin Univ (Earth Sci Ed), 2008, 38: 820–824 [史彦新, 张青, 孟宪玮. 分布式光纤传感技术在滑坡监测中的应用. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38: 820–824]
- Lai J F, Li X X, Wang Z X. Application of measurement robot in Jinpingzi landslide deformation monitoring (in Chinese). J Geomat, 2008, 33: 22–23 [赖金富, 李向新, 王正祥. 测量机器人在金坪子滑坡变形监测中的应用. 测绘信息与工程, 2008, 33: 22–23]
- Fu W X. Study of DInSAR monitoring method for landslide movement in the low correlation zone: Shuping landslide as an example (in Chinese). Doctor Dissertation. Nanjing: Nanjing University, 2007 [傅文学. 低相关区滑坡移动的DInSAR监测方法研究——以树坪滑坡为例. 博士学位论文. 南京: 南京大学, 2007]
- Wang T, Perissin D, Rocca F, et al. Three Gorges Dam stability monitoring with time-series InSAR image analysis. Sci China Earth Sci, 2011, 1: 720–732 [王腾, Perissin D, Rocca F, 等. 基于时间序列 SAR 影像分析方法的三峡大坝稳定性监测. 中国科学: 地球科学, 2011, 1: 110–123]
- Zhang H W, Wang S M, Huo Z T, et al. Monitoring analysis of Baijiabao landslide deformation (in Chinese). Yangtze River, 2006, 37: 95–97 [张华伟, 王世梅, 霍志涛, 等. 白家包滑坡变形监测分析. 人民长江, 2006, 37: 95–97]
- Peng X M, Zhang Y M, Yan D P, et al. Some typical landslide deformation and monitoring in Zigui County after the impoundment of the Three Gorges Reservoir (in Chinese). In: Workshop of the Geological Hazard Investigation and Monitoring, 2004 [彭轩明, 张业明, 鄢道平, 等. 三峡水库蓄水后秭归县几个典型滑坡的变形及监测. 见: 地质灾害调查与监测技术现场研讨会, 2004]
- Wang F, Zhang Y M, Huo Z T, et al. Movement of the Shuping landslide in the first four years after the initial impoundment of the Three Gorges Dam Reservoir, China. Landslides, 2008, 5: 321–329

- 10 Zhang J Y, Yan E C, Xue X Q, et al. The application of BOTDR on geological hazards monitoring in Three Gorges (in Chinese). *Earth Environ*, 2005, 33: 355–358 [张俊义, 晏鄂川, 薛星桥, 等. BOTDR 技术在三峡库区崩滑灾害监测中的应用分析. *地球与环境*, 2005, 33: 355–358]
- 11 Li Y N, Feng X L. Application of GPS technique for landslide monitoring in Yunyang County of the Three Gorges Reservoir area (in Chinese). *Chin J Geol Hazard Contr*, 2007, 18: 124–127 [李远宁, 冯晓亮. GPS 在三峡水库区云阳县滑坡监测中的应用. *中国地质灾害与防治学报*, 2007, 18: 124–127]
- 12 Huo Z T, Zhang Y M, Jin W Q, et al. New technology and method on the slope monitoring in the Three Gorges Reservoir (in Chinese). *Geol Miner Resour South China*, 2006, 4: 69–74 [霍志涛, 张业明, 金维群, 等. 三峡库区滑坡监测中的新技术和新方法. *华南地质与矿产*, 2006, 4: 69–74]
- 13 Yang W N, Pu G L, Zheng P Y, et al. Digital processing and information extraction of multi-type and multi-temporal remote sensing images for geological hazard in the Yangtze Three Gorges project region, China (in Chinese). *J Chengdu Univ Technol (Sci Technol Ed)*, 2003, 30: 378–385 [杨武年, 濮国梁, 郑平元, 等. 长江三峡库区多类型、多时相遥感图像数字处理和地质构造信息提取. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2003, 30: 378–385]
- 14 Qiao X J, Li S S, You X Z, et al. Monitoring crustal deformation by GPS and InSAR in the Three Gorge Area. *Wuhan Univ J Nat Sci*, 2002, 7: 451–457
- 15 Hu H B. Interferometric synthetic aperture radar and its application of landslide monitoring (in Chinese). Doctor Dissertation. Wuhan: China University of Geosciences, 2008 [胡红兵. 合成孔径雷达干涉技术及其在滑坡体形变监测中的应用. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学, 2008]
- 16 Jin G C. Computer Aided Optical Measurement (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2007 [金观昌. 计算机辅助光学测量. 北京: 清华大学出版社, 2007]
- 17 Yu Q F, Shang Y. Study of the Principle and Application of Videogrammetry (in Chinese). Beijing: Science Press, 2009 [于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究. 北京: 科学出版社, 2009]
- 18 Sheng Y H, Yan Z G, Song J L. Monitoring technique for mining subsidence with digital terrestrial photogrammetry (in Chinese). *J China Univ Min Technol*, 2003, 32: 411–415 [盛业华, 闫志刚, 宋金铃. 矿山地表塌陷区的数字近景摄影测量监测技术. *中国矿业大学学报*, 2003, 32: 411–415]
- 19 Ahmet S F. Mapping and monitoring temporal changes for coastline and coastal area by using aerial data images and digital photo-grammetry: A case study from Samsun, Turkey. *Int J Phys Sci*, 2010, 5: 1567–1575
- 20 Zhou H P. Study of close-shot photography measurement monitoring technology in surface mine slope (in Chinese). *Opencast Min Technol*, 2010, 5: 45–47 [周海平. 露天矿边坡近景摄影测量监测技术研究. *露天采矿技术*, 2010, 5: 45–47]
- 21 Ma S P, Xu X H, Zhao Y H. The Geo-DSCM system and its application to the deformation measurement of rock materials. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2004, 41: 411–412
- 22 Ma S P, Liu S J, Zhao Y H. Gray correlation of digital images from loaded rock specimen surface to evaluate its damage evolution (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2006, 25: 590–595 [马少鹏, 刘善军, 赵永红. 数字图像灰度相关性用以描述岩石试件损伤演化的研究. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25: 590–595]
- 23 Tian S L, Ge X R, Tu Z J. Testing study on digital close-range photogrammetry for measuring deformations of tunnel and underground spaces (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2006, 25: 1309–1315 [田胜利, 葛修润, 涂志军. 隧道及地下空间结构变形的数字化近景摄影测量试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25: 1309–1315]
- 24 Ma S P, Wang L G, Zhao Y H. Experimental study on deformation field evolution during failure procedure of a rock borehole structure (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2006, 27: 1082–1086 [马少鹏, 王来贵, 赵永红. 一种岩石圆孔结构复杂破坏过程的实验研究. *岩土力学*, 2006, 27: 1082–1086]
- 25 Xiang X, Wang Y L. Application of close-range photogrammetry in slope deformation monitoring (in Chinese). *Coal Geol China*, 2010, 22: 66–69 [项鑫, 王艳利. 近景摄影测量在边坡变形监测中的应用. *中国煤炭地质*, 2010, 22: 66–69]
- 26 Haneberg W C. Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States. *Bull Eng Geol Environ*, 2008, 67: 457–469
- 27 Ohnishi Y, Nishiyama S, Yano T, et al. A study of the application of digital photogrammetry to slope monitoring systems. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2006, 43: 756–766
- 28 Yu Q F, Ding X H, Lei Z H, et al. Optical measurement system for bridge displacement and vibration. *Proc SPIE*, 2002, 4537: 174–177
- 29 Wang H W, Kang Y L, Xie H P. Advance in digital speckle correlation method and its application (in Chinese). *Adv Mech*, 2005, 35: 195–203 [王怀文, 亢一澜, 谢和平. 数字散斑相关方法与应用研究进展. *力学进展*, 2005, 35: 195–203]
- 30 Gao J X, Zhou X G. Principle and applications of digital speckle correlation method (in Chinese). *Acta Mech Sin*, 1995, 27: 724–731 [高建新, 周辛庚. 数字散斑相关方法的原理与应用. *力学学报*, 1995, 27: 724–731]

- 31 Schreier H W, Braasch J R, Sutton M A. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation. *Opt Eng*, 2000, 39: 2915–2921
- 32 Ma S P, Zhao Y H, Jin G C, et al. Review on application of optical measurement methods to experimental inspection of rock mechanics (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2005, 24: 160–165 [马少鹏, 赵永红, 金观昌, 等. 光测方法在岩石力学实验观测中的应用评述. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24: 160–165]
- 33 Pan B, Qian K, Xie H, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review. *Meas Sci Technol*, 2009, 20: 062001
- 34 Sutton M A. Digital image correlation for shape and deformation measurements. In: Sharpe Jr W N, ed. *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics*. New York: Springer, 2008. 565–600
- 35 Ma S P, Jin G C, Zhao Y H. A hybrid method for sub-pixel registration of digital speckle correlation method (in Chinese). *Opt Tech*, 2005, 31: 871–877 [马少鹏, 金观昌, 赵永红. 一种用于数字散斑相关方法亚像素求解的混合方法. *光学技术*, 2005, 31: 871–877]
- 36 Gonzalez R C, Woods R E. *Digital image processing*. Prentice Hall Int, 2001, 28: 484–486
- 37 Wang H. Solve the deformation field of landslide with comprehensive application of digital correlation method and dynamical model (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Peking University, 2016 [王航. 综合运用数字相关方法和动力学模型求解滑坡的形变场. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2016]

A study of landslide deformation field with digital correlation method

ZHAO YongHong, WANG Hang, ZHANG Qiong, XIE YuQing & YANG JiaYing

Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871, China

Landslides are one of the main geological disasters that persist in the reservoir after the completion and dynamic water storage of the Three Gorges Dam, and it is a threat to the safety of the residents along the river and shipping. The increase of landslides around the reservoir is affected by the yearly cycle of impoundment and flood water discharged from the dam, and precipitation, etc. Hence, monitoring the reservoir accurately and timely is one of the essential means for preventing disasters like landslide in the Three Gorges. In this work, we apply the photogrammetry method to the field of landslide monitoring on the basis of previous methods. We develop a solving method of landslide displacement field based on the image gray feature matching. First, image capture equipment like camera, vidicon is utilized to photograph the dynamic and static fields or movement process so as to obtain the time series images. Then kinematic variables like position, velocity, acceleration and deformation variables like displacement and strain are calculated by analyzing the images with digital correlation method. The essential idea of the image gray feature matching method is based on the viewpoint of statistics. Images in this method are treated as two-dimensional signals for searching corresponding match between signals by using correlation method. We can match two images around the same site before and after the landslide and obtain the displacement of this point. The Woshaxi landslide of Zigui County, Hubei Province is chosen as the study object, and we obtain the displacement field over time and the displacement vector of the landslide. The overall displacement is up to 50 cm, and the value and direction of regional displacement of the landslide surface are not completely the same. The overall landslide surface move rightward in the horizontal direction, and slid downward to the river in the direction vertical to the flow direction of the river. The vertical displacement is relatively larger in comparison with the horizontal displacement. Therefore, landslide movement is a non-uniform and non-rigid body motion. By integrated use of the speckle method, gray feature search and other related serial methods, we succeed in dealing with landslide problems like small deformation relationship and large displacement movement. As a new observation method, this method also solves problems, such as the registration of collected images and the peering of gray level. We calculate the variation and direction of displacements of all points on the landslide and obtain the distribution map of the landslide displacement. The error in the indoor calibration test was within the acceptable range, which verified the validity of this method. The measuring method of the landslide displacement field proposed in this work possesses advantages of whole field, non-contact and flexible monitoring range like the traditional photogrammetry, as well as other advantages such as large deformation measuring range, good adaptability of environment, etc. Compared with the traditional point measurement method, this method may not only obtain displacement data of more landslide points, but also monitor the global deformation of the landslide and observe and predict the whole movement behavior of the landslide. This method bounds the observation range to every specific landslide, has higher displacement resolution, and is unconstrained by weather condition, attitude angle and flight cycle relative to the photogrammetry based on satellite images. More importantly, the cost of data acquisition is relatively low in this method. We can set up cameras at landslide points and realize unattended data acquisition and analysis, i.e., autonomic monitoring and early warning of landslide displacement. Consequently, this method has a good application prospect.

Three Gorges, Woshaxi landslide, correlation calculation, displacement field, image gray feature matching

doi: 10.1360/N972016-00351