

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 点云辅助地基干涉 SAR 雷达影像与地形数据应急匹配方法
作者: 郑翔天, 何秀凤, 杨晓琳, 马海涛, 于正兴, 任贵文, 张浩, 张劲松
DOI: 10.13203/j.whugis20200280
收稿日期: 2021-03-11
网络首发日期: 2021-07-16
引用格式: 郑翔天, 何秀凤, 杨晓琳, 马海涛, 于正兴, 任贵文, 张浩, 张劲松. 点云辅助地基干涉 SAR 雷达影像与地形数据应急匹配方法. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200280>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20200280

引用格式：

郑翔天,何秀凤,杨晓琳,等.点云辅助地基干涉 SAR 雷达影像与地形数据应急匹配方法[J].武汉大学学报·信息科学版,2021,DOI:10.13203/j.whugis20200280(ZHENG Xiangtian, HE Xiufeng, YANG Xiaolin, et al. Integrated GB-SAR Images and Terrain Data for Emergency Deformation Monitoring Assisted by Point Clouds[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200280)

点云辅助地基干涉 SAR 雷达影像与地形数据应急匹配方法

郑翔天^{1,2} 何秀凤¹ 杨晓琳³ 马海涛³ 于正兴³
任贵文³ 张浩³ 张劲松⁴

1 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京, 211100

2 南京工程学院计算机工程学院, 江苏 南京, 210000

3 中国安全生产科学研究院, 北京, 100012

4 北京市测绘院, 北京, 100038

摘要：采用地面三维激光扫描技术(terrestrial laser scanning, TLS)、地基合成孔径雷达干涉测量(ground-based interferometric synthetic aperture radar, GB-InSAR)和无人机(unmanned aerial vehicle photography, UAV)航空摄影测量的综合遥感方案应用于崩塌体应急监测。引入迭代最近点法(iterative closest point, ICP)先实现 TLS 点云和 UAV 影像离散点云配准,再利用几何映射方法实现 GB-InSAR 二维形变图与 TLS 点云三维匹配。针对崩塌体应急缺少人工目标辅助校正几何映射偏差问题,综合目视解译以及 TLS 地形点云模拟 GB-SAR 图像提取各数据间同名特征点。而后基于同名特征点计算空间坐标变换参数,建立变换方程完成误匹配纠正。通过模拟数据及某滑坡崩塌残余体实际监测数据验证论文的匹配方法,实测匹配精度达像元级,满足应急监测需求。

关键词：地基合成孔径雷达干涉测量;地面三维激光扫描;无人机摄影测量;数据融合;崩塌应急监测

中图分类号: P237 文献标志码: A

GB-InSAR 为星载合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)在地面上的应用,通过对不同时刻的雷达复图像共轭相乘,可获得目标区域的高精度形变信息^[1]。地基系统使用滑动轨道以短重访周期反复成像,可有效减弱 InSAR 普遍面临的时间和空间失相关问题。近乎为零的空间基线,使得干涉建模不受基线误差干扰,精度较高,已广泛应用于滑坡、大坝、露天采矿等形变监测中^[2-6]。

SAR 雷达在斜距平面构像,形变结果以距离-方位图像表示,对于不熟悉 SAR 监测几何的人员存在不直观的问题,三维激光扫描技术可获得局部小范围内的三维地形以及高精度的雷达轨道信息,常将两种信息融合匹配用于形变监测^[7-10]。近年来,GB-InSAR 已多次应用于滑坡、崩塌残余危岩体应急监测行动中。滑坡现场多使用无人机快速获取区域高分辨率影像,将 GB-InSAR 时序形变

收稿日期: 2021-03-11

项目资助: 国家自然科学基金重点项目(41830110);中央高校基本科研业务费专项资金资助(B200202011);国家重点研究发展计划项目(2018YFC1503603, 2018YFC0808402)。

第一作者: 郑翔天, 博士后, 主要从事地基合成孔径雷达干涉测量数据处理工作。aforest0459@foxmail.com

通讯作者: 何秀凤, 博士, 教授。xfhe@hhu.edu.cn

图与三维激光扫描、无人机获得的信息融合,使区域形变三维可视化结果更加易用,优势信息互补,将更有助于分析崩塌体变形特征。现有匹配多基于几何映射方法,文献[11]基于平面坐标相似变换法将 GB-InSAR 形变图与三维激光扫描点云匹配,融合数据应用于大坝表面变形监测。文献[12]分析了相似变换的精度不足的问题,提出 GB-SAR 影像坐标到三维地形坐标转换方法。该方法与文献[13]根据信号模型及监测几何提出基于距离-方位双约束条件的 GB-SAR 的几何映射三维匹配方法基本原理相同,同属几何映射方法。文献[14]在 GB-InSAR 露天矿变形监测实验中,使用了多种人工目标并结合全站仪分别测量雷达轨道及各目标空间位置实现了 GB-InSAR 形变与全站仪形变的空间比对。系统内部不一致性、观测环境变化、观测场景图像不一致性均会对匹配造成影响,在露天矿和大坝形变监测时可依据人工角反射器等目标作为雷达图像和三维地形的同名控制点进行误匹配纠正。但在滑坡、崩塌应急情景下,人工目标在崩塌危岩体表面布设十分困难,依据明显地物的图像特征提取控制点校正匹配误差是一种有效方案。

论文以道路山体崩塌的应急监测为例,重点论述缺少人工目标作为控制点时,匹配融合方法如何获得准确直观的变形监测结果,为后续地质灾害、岩土力学专家进行二次滑坡预警提供可靠数据支撑。

1 监测现场概况与技术路线

1.1 监测现场概况

2018 年 8 月 11 日 8 时 30 分,北京市房山区大安山乡 x209 军红路 K18+350m 处发生山体崩塌灾害。此前,该区域已经在滑坡编录(1:10000)内收录,并列入群测群防计划中。邻近区域崩塌时有发生,最近一次发生于 GMT+8 7 月 19 日上午 11 时 25 分,军红路 K10+50m 处山体发生塌方,塌方体积约为 120 立方米。经初步勘查发现,该边坡地质条件特殊,除已发生崩塌部分残留体外,整个边坡都存在较大安全隐患,综合分析后决定组织矿山工作人员及村民安全转移。中国安全生产应急救援勘测队受应急管

理部指示与中国地质灾害防治技术指导中心相关专家组成联合调查组,携带 GB-InSAR 边坡雷达、三维激光扫描仪、无人机几种遥测仪器为当地居民提供支撑与技术服务。监测现场设站布属如图 1 所示, TLS 连续地进行地形点云采集,同时完成地形测绘及雷达天线行迹矢量测量任务。将 TLS 设站于不遮挡雷达视线位置,调整雷达天线对准崩塌危岩主体。



图 1 监测系统设站

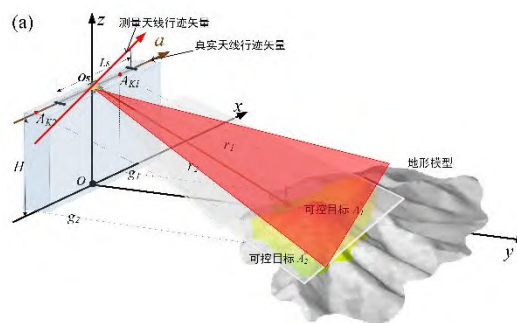
Fig.1 Setting up of deformation monitoring system.

1.2 技术路线

论文采用的匹配策略是先匹配 TLS 点云和 UAV 影像,然后再利用 TLS 点云、天线行迹矢量和雷达影像间的几何关系完成 TLS 点云与雷达影像的几何映射匹配。最后,以 TLS 点云为辅助,完成雷达影像和 UAV 影像的匹配。如下因素将影响 GB-SAR 影像和地形数据的实际匹配精度:

- 天线行迹矢量测量误差;
- TLS 点云与 UAV 影像的匹配精度。

首先讨论天线行迹矢量测量误差影响,如图 2a 示意的雷达监测几何,当测量天线行迹矢量与真实矢量间产生偏差时,估计的雷达波束与真实波束间即产生偏差,由此导致匹配结果偏差。



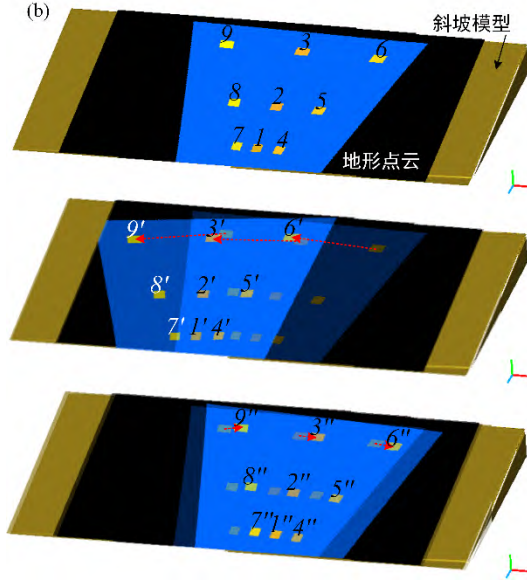


图 2 (a)雷达与地形几何关系(b)天线行迹测量偏差对匹配结果影响模拟

Fig.2 (a)Geometric mapping model (b)Mapping result when repeat-pass vector has been misestimated.

简述几何映射方法的基本原理。首先，遍历 TLS 点云中各点 A_i 相对于孔径中心 O_s 的斜距 R_i^{3D} ：

$$R_i^{3D} = \|O_s - A_i\|_2, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

式中， $\| \cdot \|_2$ 表示空间向量的 2-范数， N 为总点数。遍历地形点云中每个顶点相对于雷达孔径中心 O_s 的方位角，此处以相对垂直中心平面左侧为方位负角度，则近似的方位角为：

$$\theta_i^{3D} = \begin{cases} -\arctan\left(\frac{|A_i^k O_s|}{|A_i^k A_i^k|}\right), & \text{dot}(A_i^k O_s, A_i^k P_2) \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{|A_i^k O_s|}{|A_i^k A_i^k|}\right), & \text{dot}(A_i^k O_s, A_i^k P_2) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中， θ_i^{3D} 为第 i 个点相对孔径中心的方位角， A_i^k 为第 i 个点在天线行迹轴线的垂足， $\| \cdot \|$ 为向量的模， $\text{dot}(\cdot)$ 表示向量点乘。然后通过插值方法即可获得三维空间点在二维雷达图像中的像素位置，将对应像素的形变测量结果赋值给三维空间点即实现了几何映射。

采用数据模拟量化天线行迹矢量测量误差对几何映射影响。建立斜坡模型，截取斜坡模型的一部分均匀离散化为地形点云，然后模拟生成具有九个面目标形变图，以模拟生成的天线行迹、斜坡模型和形变图作为几何映射输入，实现无天线行迹测量偏差、

水平向偏转 10° 和竖直向偏转 10° 的匹配结果如图 2b 所示。通过对天线行迹矢量的水平旋转和竖直旋转 $1^\circ \sim 10^\circ$ ，统计 9 个子形变区的点云质心间的欧式距离作为偏差距离形成曲线如图 3 所示，曲线编号对应图 2b 中九个面目标。天线行迹角度测量偏差对几何映射匹配结果的影响近似为线性。当水平偏差 10° 时，平均距离 700m 的面目标几何映射偏差量可达 150m，竖直偏差 10° 时面目标几何映射偏差量也可达到 40m。说明几何映射方法需配合高精度天线行迹测量并结合控制点估计匹配偏差量以校正匹配偏差。

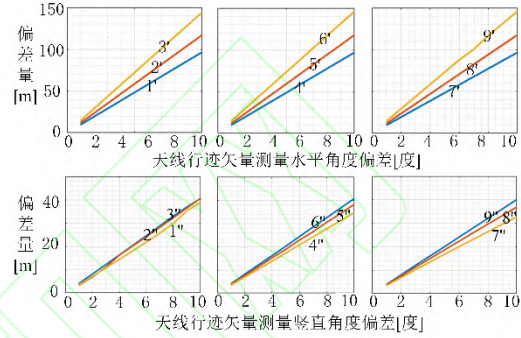


图 3 不同天线行迹矢量测量水平角度偏差以及竖直角度偏差-匹配偏差量曲线

Fig.3 The repeat-pass vector measurement deviation vs. mapping error.

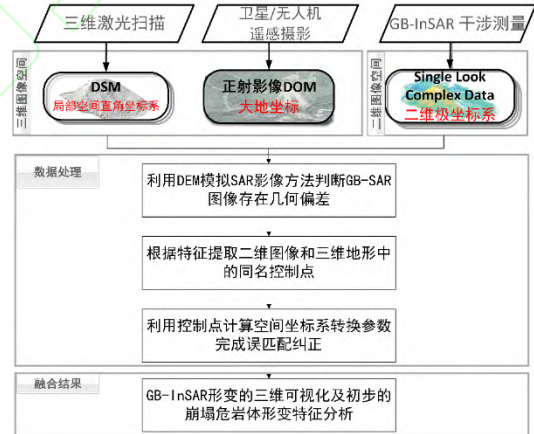


图 4 融合地基雷达干涉测量、三维激光扫描和无人机摄影测量的崩塌应急监测匹配流程

Fig.4 Integrated GB-InSAR, TLS and UAV photography for rockslide emergency monitoring.

针对崩塌危岩体表面难以布设人工目标问题，提出如图 4 所示匹配流程。首先，三维激光扫描获取重点观测区域的地形点云，无人机获取区域的正射影像，地基雷达持续监测获取崩塌危岩体时序形变图像。然后，使用 TLS 地形点云以及天线行迹矢量模拟 GB-SAR 幅度图。根据地貌或地质界线特征以及 SAR 图像的辐射特征提取一定数

量的控制点,小范围区域偏差可通过平移、旋转及缩放的空间坐标系线性变换组合进行校正。根据控制点计算空间坐标转换参数,利用转换参数建立方程完成误匹配纠正。最后,通过持续观测获得的三维可视化形变数据进行崩塌危岩体形变特征分析。

2 方法

2.1 TLS 点云与 UAV 影像匹配

TLS 点云与 UAV 影像匹配一般有两种方法:一种是将 TLS 点云转换为深度图像与 UAV 影像在二维匹配,另一种是 TLS 点云与 UAV 影像离散化后的点云在三维空间匹配。为满足现场三维可视化需求,使用第二种思路,引入点云匹配常用的迭代最近点 (Iterative closest point, ICP) 方法实现 TLS 点云和 UAV 影像匹配。UAV 影像采集使用大疆 Inspire2 无人机,影像处理使用了商业软件 Pix4d,利用软件将倾斜摄影影像离散化形成影像点云。小型无人机受到河道峡谷间的气流影响采集的 UAV 影像数据离散化形成点云后存在大量空洞,使用 Pix4d 软件内的最佳生成模型离散 UAV 影像形成点云后 UAV 影像中崩塌残余主体监测区点云空洞相对减少。分别截取 UAV 影像点云和 TLS 地形点云内崩塌主体区域子点云匹配。

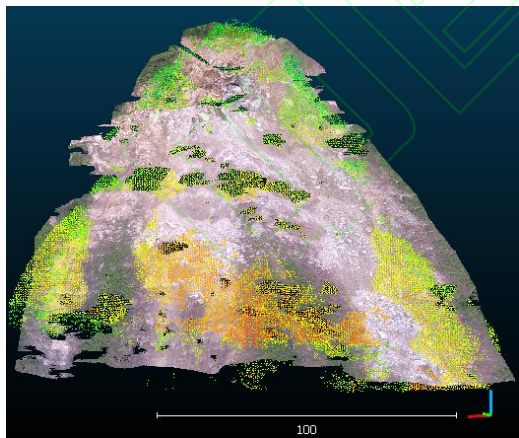


图 5 ICP 方法匹配 TLS 点云与 UAV 影像离散点云
Fig.5 TLS point cloud and UAV image point cloud co-registration result by the ICP method.

ICP 方法对初值要求较高,需要先实现 TLS 点云和 UAV 影像点云间的粗匹配,然后再使用 ICP 方法进行精匹配。崩塌体表面有大量巨型岩石,分别根据 UAV 离散点云的岩石纹理特征和 TLS 点云的几何特征可

确定两点云内岩石对应的点集取质心为公共点,3 个公共点即可完成粗匹配。将粗匹配后的点云输入 ICP 方法迭代寻优,得到精匹配转换矩阵 T ,再使用点云的齐次坐标变换方法完成 TLS 点云和 UAV 影像点云的精匹配如图 5 所示。本次实验采集的数据,TLS 地形点云以及无人机影像均非实际情况下可采集的质量最优数据,从图 5 的结果来看两点云的崩塌源区部分匹配较一致,总体偏差为 1.9m。

2.2 GB-SAR 影像与 TLS 点云匹配

2.2.1 GB-SAR 影像模拟

崩塌应急监测现场缺乏人工目标,难以确定匹配结果偏差。鉴于星载 SAR 图像几何校正时常使用像模拟方法且效果良好^[15-16]。拟将该方法在 GB-SAR 领域延伸,常规的 SAR 影像模拟方法主要有三种:系统相干模拟方法、非相干影像模拟方法和基于 SAR 影像的模拟方法^[17-18]。其中非相干影像模拟方法以外部 DEM 和传感器运行轨迹为输入参数,基于成像几何建立成像方程与辐射模型,算法简单实用。本节对非相干影像模拟方法做出改进,使用 TLS 地形点云作为精细 DEM。核心步骤如下:

步骤 1: 模拟图像的图像空间范围以观测近距 R_{min} 、观测远距 R_{max} 、方位向最大角度 θ_{max} 、最小角度 θ_{min} 几个参数界定,通过读取真实采集的 GB-SAR 影像的测绘带范围参数获取。

步骤 2: 使用外部量测设备测量雷达天线行迹。外部量测设备使用三维激光扫描仪,在天线口面上张贴激光强反射标靶,三维激光扫描仪在雷达收发前端直线往复运动过程中连续扫描,通过反射标靶中心识别获得方位向采样点,标靶及行迹矢量轴线示意图如图 6a。扫描获得的数据如图 6b 所示,亮度最高的条带为雷达天线的运行轨迹,反射标靶为直径 5cm 的圆形反光贴片,用于识别运行轨迹首尾两端的高亮圆形中心,利用高亮点集进行空间直线拟合的最小二乘寻优估计,即得到天线的精确运行轨迹。

步骤 3: 生成模拟图像的网格矩阵,距离向斜距序列 s_r :

$$S_{ri} = S_{r0} + i_r * dr \quad (3)$$

式中, s_{ri} 为序列索引 i_r 位置处的斜距值, $i_r = 0, 1, 2, 3, \dots, N_r - 1$, N_r 为距离向细分单元

数, s_{r_0} 取观测近距 R_{min} , dr 为细分距离。

$$S_{ai} = S_{a0} + i_a * da \quad (4)$$

式中, s_{ai} 为方位向序列索引 i_a 位置处方位角, $i_a = 0, 1, 2, 3, \dots, N_a - 1$, N_a 为方位向细分单元数 s_{a0} 取方位角最小值 θ_{min} , 模拟图像尺寸为 (N_r, N_a) 。斜距序列和方位角序列生成后, 生成模拟图像二维极坐标网格。

根据三维激光扫描获得的地形点云模拟 GB-SAR 影像, 依据式 (1)、式 (2) 遍历计算点云中的每点相对雷达斜距及相对方位角。点云的空间分辨力高于雷达, 一个雷达像元对应多个点, 取样和量化不能实现一一映射, 需要采用适当的重采样和插值方法给点云赋值。选取最近邻方法, 即模拟图像网格点的像素值取值为与它斜距、方位最近的三维空间点云的幅值(灰度)。所有 TLS 点遍历结束, 即完成 GB-SAR 模拟影像与三维地形几何关系的模拟。

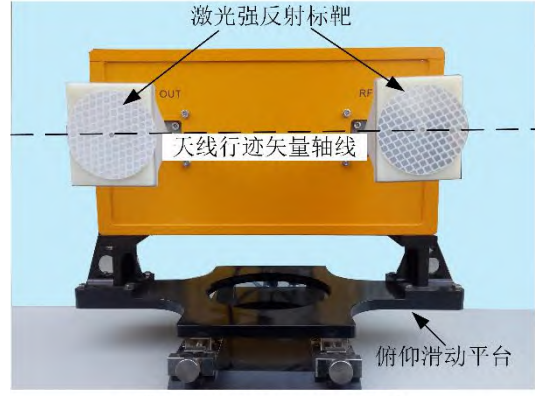
步骤 4: GB-SAR 图像灰度模拟是对地物后向散射强度进行模拟, 根据星载 SAR 常用的模拟方法依据 SAR 波束中心矢量与地面目标点所在平面的法线矢量得到局部入射角, 然后利用经验模型计算其灰度。使用三维地形点云计算局部入射角 η_i 使用下式:

$$\eta_i = \arccos \frac{-n_i \cdot SA_i}{|n_i| |SA_i|}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

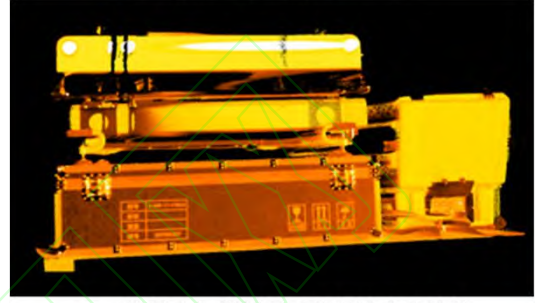
式中, SA_i 为空间任意 A_i 点与雷达相位中心所成矢量, n_i 为 A_i 点与其 k 个近邻空间点所成的平面法向量, N 为三维地形点云点数。灰度使用经验模型 Mulheman 模型计算^[18]:

$$\sigma_i = \frac{0.0133 \cos \eta_i}{(\sin \eta_i + 0.1 \cos \eta_i)^3} \quad (6)$$

式中, σ_i 为空间任意 A_i 点根据局部入射角 η_i , 计算得到的模拟灰度值。模拟图像如图 7 所示, 图 7a 为 TLS 点云, 表面颜色反映了激光反射强度差异, 图 7b 标注了明显的道路特征, 根据道路边缘明显特征确定存在几何偏差。



(a) 激光强反射标靶及行迹轴线



(b) 三维激光扫描测量天线行迹实验结果

图 6 测量天线行迹矢量示意图

Fig.6 Antenna footprints vector measuring.

2.2.2 控制点提取

根据图像特征提取特征点并完成误匹配纠正, 控制点解译思路如下:

通过目视解译, 分别在 GB-SAR 影像及三维地形中寻找有效特征用于控制点提取, 本次监测崩塌体两侧的道路以及崩塌体裸露的岩体和植被覆盖区的分界线可作为线性特征, 可分别在雷达二维图像及三维地形数据上清晰辨认。根据线特征的起伏、走向, 对雷达影像和三维地形进行分割, 形成图像子搜索区, 在子区内依据几何特征和辐射特征提取一定数量控制点。

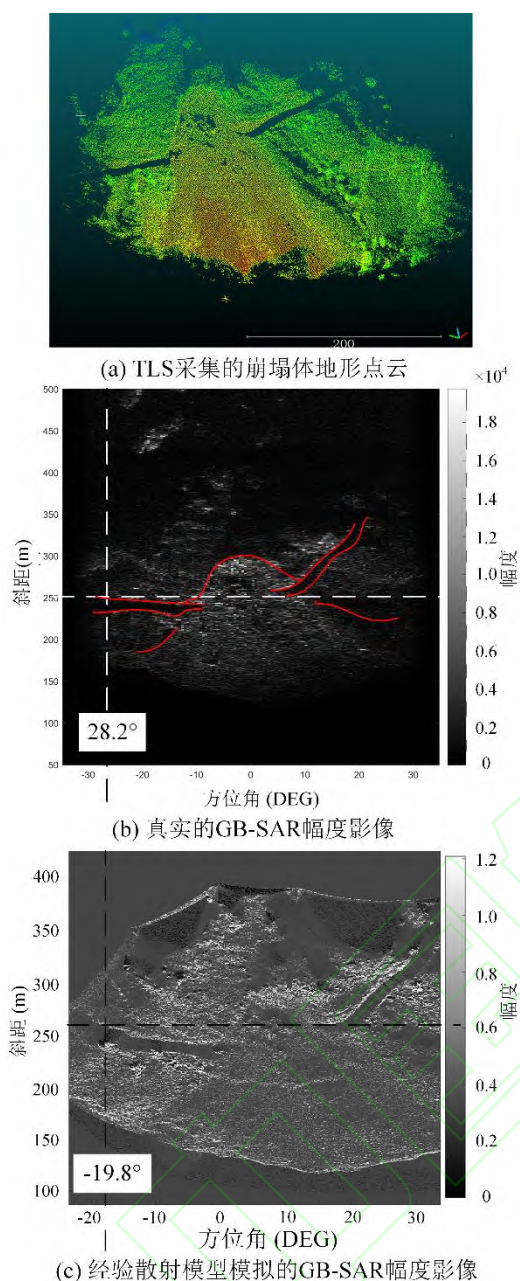


图7 实际采集图像以及模拟的GB-SAR图像中地物的几何位置对比

Fig7 Geometric positions comparison between actual image and simulated one

实际采集的 GB-SAR 影像特征非常模糊, 目视解译控制点需要遵循一定的先验信息, 主要包括

- 通过无人机摄影测量或三维激光扫描点云解译的明显地物目标尺寸占据雷达图像的空间分辨单元数量;
- 地物目标在雷达图像中的辐射特征, 比如叠掩、阴影和类角反射器特征。

其中, GB-SAR 的空间分辨力可通过下式计算:

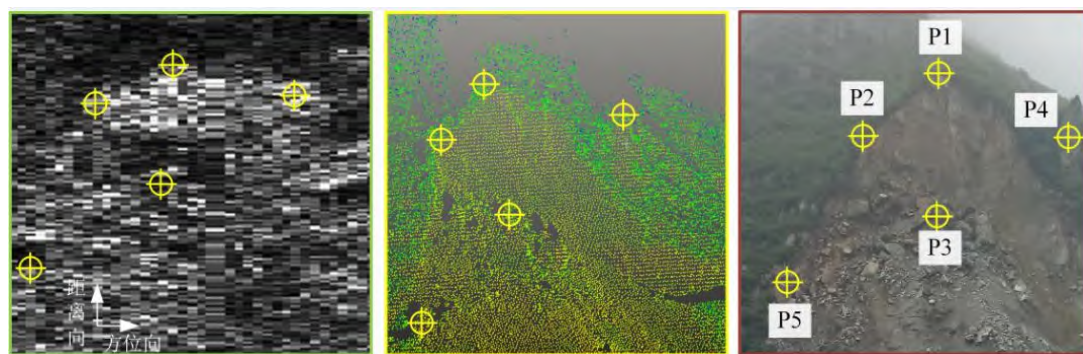
$$\delta_r = \frac{c}{2B} = \frac{c}{2(K-1)\Delta f} \quad (7)$$

$$\delta_\theta = \frac{\lambda_c}{2L_s}$$

式中, c 代表光速, B 表示雷达信号带宽, K 表示步进频率信号的跳频点数, Δf 表示频率步进间隔, λ_c 表示电磁波中心频率载波波长, L_s 表示合成孔径长度, 空间分辨力并不一定等同于图像中像元对应的空间大小, 因为一个空间分辨单元可能会对应数个像元。

部分大型岩块可视为类二面角反射器, 有强散射特性, 在 SAR 图像中亮度高于周边像元; 大型岩块在三维激光扫描点云中具有“凸包”特征。这里以崩塌体危岩区为例, 定性记录几处典型控制点如图 8 所示, 具体解译标志如下:

P1 点雷达图像解译标志, P1 点位于崩塌危岩区的顶端, GB-SAR 雷达波入射角度较好, 裸露岩面与残余岩体表面植被覆盖区呈现明显的线状分界, SAR 图像像元在该位



(a) 崩塌体危岩区 GB-SAR 影像; (b) 危岩区三维激光扫描地形点云; (c) 区域的雷达视角光学影像

图8 依据特征提取的控制点示意图

Fig8 Control points selection according to features

置为线状起伏的尖端，两侧的明暗分界像元斜距相对变小、方位角相对增大，与地质界线的特征比对后选取明暗分界尖状区的幅值较高的像元为 GB-SAR 图像的 P1 控制点。P1 点三维激光扫描点云解译标志，P1 点处于裸露岩面与植被覆盖区交界，根据点云的起伏特征来分析，岩体部分岩体崩塌在下方堆积，而残余岩体呈凸起状。所以，在分界处 TLS 点云的局部曲率变化明显，可明显识别尖端特征选取尖端位置且激光点云的反射强度较大的点为 P1 的同名控制点。

P2 点位于第一个尖端特征的左侧，在 GB-SAR 影像及三维激光点云上的解译标志与 P1 点相似。

P3 点位于崩塌体危岩区中部位，此处堆积数块巨型岩块，无人机解译结果显示单体岩块尺寸约 8m×6.5m，高约 4m，在点云中表现为起伏凸起的块体特征，激光光束被遮挡在后方形成点云空洞。因为三维激光扫描仪设站位置与地基雷达站相近，在 GB-SAR 影像 P3 点巨岩呈二面角强反射像素群，后部雷达波受遮挡形成阴影，表现为 SAR 图像幅值较小，亮度低，选取子区内幅值较大的像元以及点云中凸起的顶端分别为同名控制点。

P4 点对应了危岩区右侧的一处耸立的石柱，该石柱经无人机影像解译，高约 18m，在地形点云上可通过空间形变辨认出该石柱的位置。GB-SAR 中解译是通过其对应像素和裸露岩面的右侧边界相对位置，而且石柱与裸露岩面间有一段植被覆盖区，在雷达图像上表现为明暗相间的条带，石柱表面朝向雷达的外立面无植被覆盖，雷达入射角度较好，在 SAR 图像上应表现为亮度较高的像素群，由于不具备更精细的分辨特征，取像素群中心像素为 SAR 图像控制点，截取石柱对应的点云取质心处作为同名控制点。

P5 点为崩塌危岩区与左侧道路交界处的一块巨型岩石，控制点提取过程与 P3 点类似，在三维点云中根据点云空洞以及凸包选取控制点，在 GB-SAR 图像中根据其空间位置与地质界线的几何关系，确定具有 SAR 阴影区的子像素群，根据岩块的类二面角特性，选取像素群中幅值较大的像素为同名控

制点。

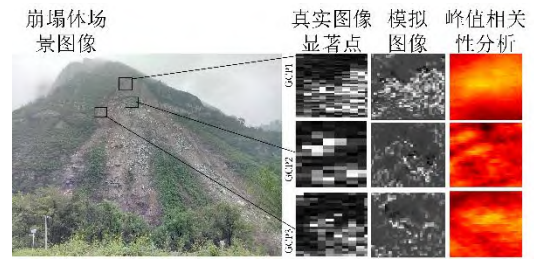


图 9 使用模拟图像检核目视解译控制点示意图
Fig.9 Simulated SAR image for GCPs refinement.

完成控制点的目视解译后，使用模拟图像检核控制点。检核是指利用峰值幅度相关性分析方法确定较精确的控制点坐标。峰值幅度相关性分析过程如图 9 所示。在真实 GB-SAR 图像上截取多个带有 GCP 点的等尺寸子图作为目标窗口(fixed window)，模拟图像内裁切出的图像作为匹配窗口(moving window)，让目标窗口在裁切的粗配准窗口左右上下逐一移动计算归一化互相关系数，互相关系数峰值处即为各子图最佳匹配位置，相关系数计算的表达式如下：

$$C(u, v) = \frac{\sum_x \sum_y [T(x, y) - \mu_T] [I(x - u, y - v) - \mu_{I(u, v)}]}{\sqrt{\sum_x \sum_y [T(x, y) - \mu_T]^2 \sum_x \sum_y [I(x, y) - \mu_{I(u, v)}]^2}} \quad (8)$$

式中， c 为互相关系数，取值在 0.1~1 之间； $T(x, y)$ 表示模拟图像中 (x, y) 的灰度值； $I(x, y)$ 表示真实图像 (x, y) 的灰度值； μ_T 为模拟图像子图均值； $\mu_{I(u, v)}$ 为待配准的带有 GCPs 真实图像子图均值。使用待配准的图像片在参考图像中进行匹配，获得归一化相关系数最大的位置提取控制点对。

2.2.3 坐标变换方法进行误匹配纠正

区域地形起伏变化不大且范围较小时，可认为雷达天线行迹估计偏差所造成的误匹配是真实位置平移、旋转和缩放组合变换的结果。建立坐标变换方程如式 (9)，确认变换参数是解决误匹配问题关键。之所以先使用几何映射方法然后再应用控制点进行误匹配纠正，是因为论文采用的坐标变换方法，往往不适用于两个空间直角坐标系之间偏差角度过大的情况。

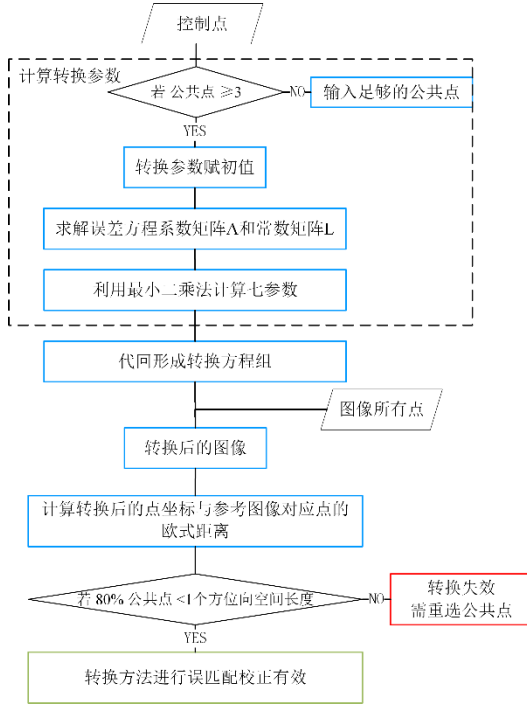


图 10 检验线性变换方法是否有效匹配的流程
Fig10 GB-InSAR and 3D terrain data mismatching correction process of using linear transformation.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_T = \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} + \lambda \cdot \mathbf{R}_x(\omega_x) \mathbf{R}_y(\omega_y) \mathbf{R}_z(\omega_z) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_S \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_x(\omega_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_x & \sin \omega_x \\ 0 & -\sin \omega_x & \cos \omega_x \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_y(\omega_y) = \begin{bmatrix} \cos \omega_y & 0 & -\sin \omega_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \omega_y & 0 & \cos \omega_y \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_z(\omega_z) = \begin{bmatrix} \cos \omega_z & \sin \omega_z & 0 \\ -\sin \omega_z & \cos \omega_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中, $[X \ Y \ Z]_T^T$ 为经坐标变换后的坐标系统的坐标, $[T_X \ T_Y \ T_Z]^T$ 为平移因子, λ 为尺度变换因子, $\mathbf{R}_x(\omega_x)$ 、 $\mathbf{R}_y(\omega_y)$ 、 $\mathbf{R}_z(\omega_z)$ 为坐标系间各坐标轴的旋转矩阵, ω_x 、 ω_y 、 ω_z 为偏转角, $[X \ Y \ Z]_S^T$ 为未经变换的坐标系统下的坐标。将式 (9) 以待定参数为变元使用泰勒级数展开至一阶项, 完成模型的线性化表示。线性化用矩阵的形式表示误差方程为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{R}' \hat{\mathbf{x}} - (\mathbf{L} + \mathbf{X}_T) \quad (10)$$

式中, $\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} I & \lambda^0 M & N \end{bmatrix}$, $\hat{\mathbf{x}}$ 表示计算坐标变换七参数的改正数, 这里 $\hat{\mathbf{x}} = [dT_X \ dT_Y \ dT_Z \ d\omega_z \ d\omega_y \ d\omega_x \ d\lambda]^T$

, $N = \mathbf{R}^0 [X \ Y \ Z]_S$, \mathbf{x}_T 即 $[X \ Y \ Z]_T^T$, $\mathbf{L} = -[T_X^0 \ T_Y^0 \ T_Z^0]^T - \lambda^0 \mathbf{R}^0 [X \ Y \ Z]_S^T$ 具体的迭代解算方法本文不再赘述, 可参考文献[19]。

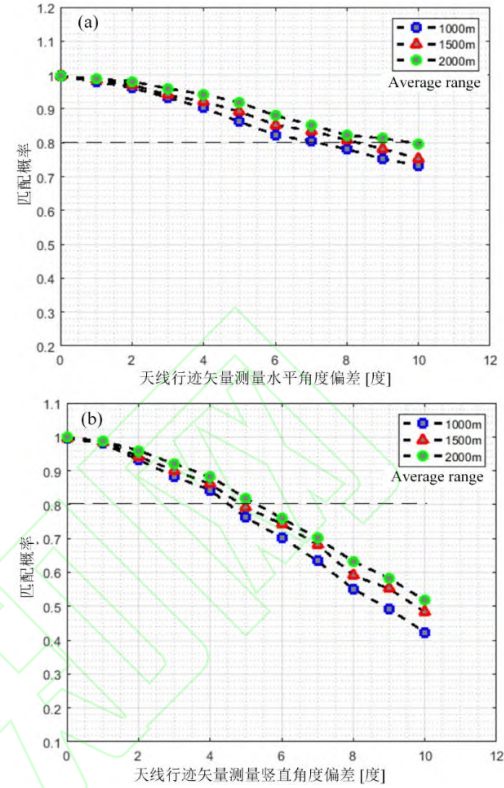


图 11 坐标变换应用于校正天线行迹测量偏差对匹配结果影响 (a) 水平角度偏差-匹配概率 (b) 垂直角度偏差-匹配概率。

Fig.11. (a) Repeat-pass horizontal angle measuring error vs. probability. (b) Repeat-pass vertical angle measuring error vs. probability.

根据图 10 所示的具体的校正方法核心流程表述如下:

1) 初匹配: 使用图 6 示意方法测量合成孔径参数, 参数包括雷达天线行迹向量 \mathbf{v} 及 GB-SAR 每一方位采样位置 x_m 坐标点集 $P_{xm} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_M\}$ 。借助 \mathbf{v} 与地形点云 $P_{terrain}$ 的相对几何关系, 利用式(1)、式(2)实现雷达数据的初匹配。初匹配获得 $P_{terrain}$ 与二维图像 I_{radar} 的初始映射关系表, 记为 f_{rough} 。通过映射表 f_{rough} 查找操作, 遍历 I_{radar} 的像素值赋值给 $P_{terrain}$ 对应点, 形成待校正的匹配点云 P_{rough} 。

2) 基于控制点计算变换方程参数: 利用 3 个初始的公共点作为图 10 所示流程的输入, 转换参数初值 λ 取 1, 其他参数初值可根据文献[20]计算。使用最小二乘迭代寻优, 求

解式 (9) 转换关系方程参数。将 $P_{terrain}$ 带入方程得到误匹配校正参考点集 $P_{transform}$ ，映射关系记为 $g_{transform}$ 。

3) 误匹配校正：利用映射 $g_{transform}$ 遍历 $P_{terrain}$ 与 $P_{transform}$ 最近欧式距离。形成距离 v_{dist} 向量及最近邻索引 v_{idx} 向量。查找 v_{idx} ，将 $P_{transform}$ 每点形变量赋给 $P_{terrain}$ 内索引为 v_{idx} 点，形成 $P_{corrected}$ 完成误匹配纠正。

为量化分析论文方法的校正效果，选取对匹配结果影响较大的天线行迹矢量水平角度偏差和竖直角度偏差为例。在图 2 所示的斜坡模型表面随机生成不重叠的 50 个形变子区。分别模拟 0~10° 的角度偏差生成平均距离为 1000m、1500m 和 2000m 的误匹配结果。选取 30 个以上的 GCPs，使用论文的方法对偏差进行校正，结果如图 11 所示。横轴为偏转角度，纵轴为校正后偏差在一个雷达空间像元内的点数与总点数之比。论文方法在天线轨迹测量水平偏差 7° 及竖直偏差 4° 校正后位置偏差在一个像元内的点数在 80% 以上。而目标平均距离 2000m 的校正效果要好于 1500m 和 1000m 的目标。

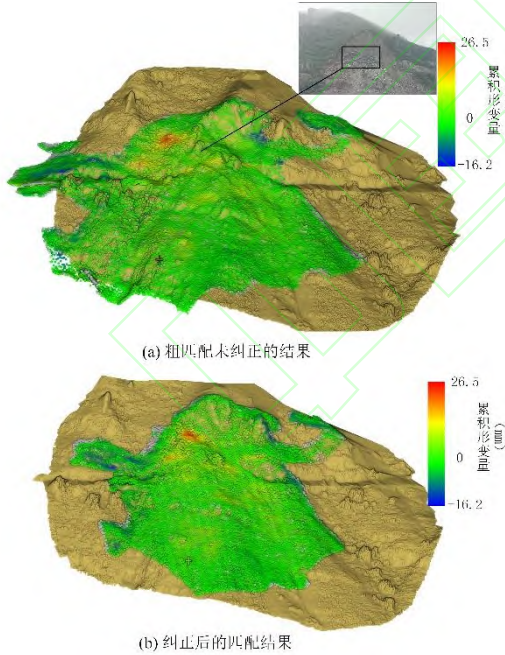


图 12 TLS 点云与 GB-InSAR 形变图几何映射粗匹配及误匹配纠正结果

Fig.12. The uncorrected mapping result and corrected mapping result between TLS PCL and GB-InSAR.

4 结果

4.1 误匹配纠正结果

通过目视解译与模拟图像检核得到 20 个控制点坐标。雷达形变图与 TLS 点云模

型误匹配未纠正结果及纠正后结果分别如图 12a、12b 所示。累积形变图对应了 8 月 12 日 12:00 至 8 月 13 日 12:00 的雷达形变测量结果。误匹配结果将形变量较大区域对应至自然坡体，该局部区域未发现明显变形。形变图匹配结果中累积形变较大的区域对应了坡体表面的崩塌岩体堆积区，崩积区表面岩石在降雨的影响下持续沿雷达视向形变，符合实际规律。

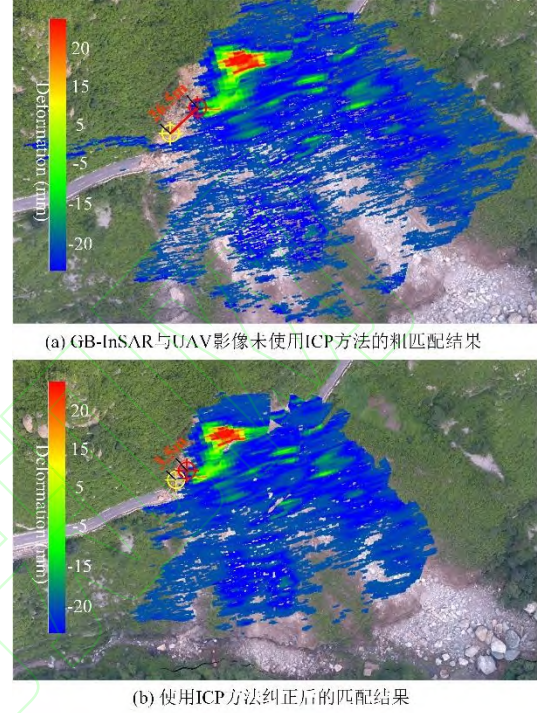


图 13GB-InSAR 与 UAV 影像粗匹配结果以及使用 ICP 方法纠正后的结果

Fig.13. The uncorrected mapping result and the corrected mapping result using ICP between UAV and GB-InSAR cumulative deformation map.

完成雷达图像与 TLS 点云匹配后，再借助 TLS 点云完成形变图与 UAV 影像离散点云匹配获得图 13 的结果。图中黄色标识和红色标识分别为 UAV 影像地形点云与形变点云中的作为检验几何纠正效果的控制点，校正前的偏差为 26.5m，校正后为 3.5m 效果良好，但仍未达像素级。最终各点计算偏差的均方根误差为 1.423m，大于雷达的距离分辨率 0.3m，且与雷达的方位向空间分辨率 2.2m（场景平均距离 250m）相当。

4.2 数据融合结果与分析

形变点云层遮挡下部的地物目标，导致形变异常位置不能直接辨识，使用有效的数据融合方案可缓解该问题。常用的图像数据融合方法有：来源于红外与光学图像融合领域的 NRL (the United States Naval Research

Laboratory, NRL)假彩色方法、(Hue Intensity Saturation, HIS)HIS 色彩空间转换色调亮度饱和度变换方法、基于生物视觉特性的融合方法、仿生的颜色对抗假彩色融合方法,具体实现方式可参阅文献[21],论文此处本着简单、高效原则,采用 NRL 方法融合,并与叠合的形变结果进行对比分析。

简述 NRL 实现方法,无人机采集的影像赋存的为地物目标的纹理信息以 RGB 表示,则 NRL 融合可用下式实现:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{NRL} = \begin{bmatrix} IR \\ I_{VG} \\ I_{VB} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, $[R \ G \ B]_{NRL}^T$ 为经过 NRL 变换后的图像,有红、绿、蓝三通道,红色通道使用了 GB-InSAR 和点云融合后的形变值 IR ,绿色通道和蓝色通道使用无人机影像的绿色通道 I_{VG} 和蓝色通道 I_{VB} 。然后,使用 NRL 方法进行可视化显示结果如图 14。雷达累积形变结果使用了历时 3 天的 GB-InSAR 累积形变图,时间从 2018 年 8 月 12 日上午 10 时至 8 月 15 日上午 9 时,共 262 幅形变图。形变三维可视化结果揭示该区域残余危岩体在 3 天内仍持续朝向雷达视线方向形变,总体上有沿边坡向下位移的趋势。在监测时间段内,

8 月 12 日持续降雨,8 月 13 日降雨停歇,8 月 14 日又恢复降雨,可以通过匹配结果分析每日降雨对崩塌危岩体的影响分析变形。

为定量地分析监测数据,在数据融合结果上分别在形变量相对较高的子形变区内选取具代表性点形成图 14 曲线所示结果。分析点位选取时首先锁定在累积形变较高的子区域内,再根据 NRL 融合结果,选取危岩体的裸露岩面,而非表面的堆积的巨型岩石^[22]。因为岩石在表面不稳固,总体的变形量偏大,难以基于不稳固岩块评价残余岩体的危险性。崩塌体后缘局部块体沿坡面向下运动。在无降雨期间形变量较小,受降雨影响形变量会增加,降雨停止后形变再次趋稳。单日累积位移最大达 31.33mm,3 日平均的位移为 6.45mm。

在 8 月 13 日降雨停止后,除斜坡上堆积岩块的某部分仍然向雷达移动,从所有选取的点位来看残余岩石从雷达上表现为整体远离雷达形变。而从数据的整体趋势分析,13 日的形变量在降雨停歇后整体趋稳,崩塌体右侧山体在无降雨期间形变量较小。单日累积位移最大为 20.28mm,平均为 6.32mm。在 13 日的 23 时左右,又再次突发降水,此时,所有选点均表现为一个形变量陡增的态

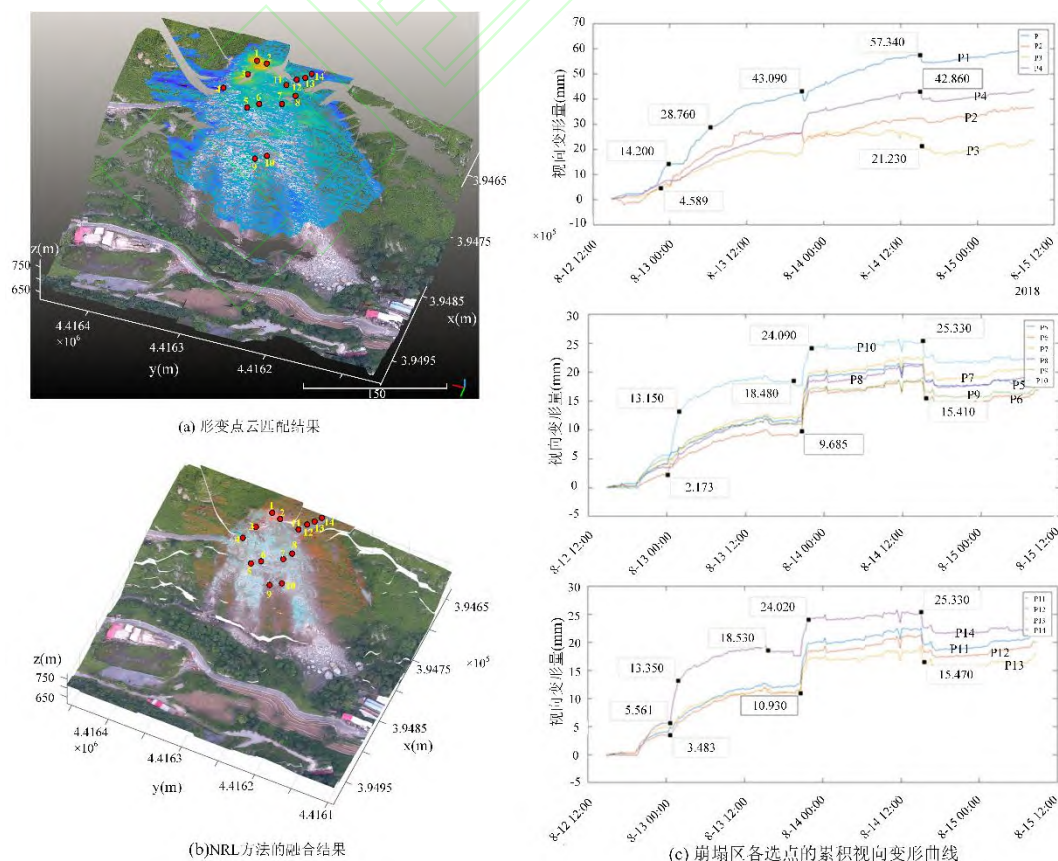


图 14 根据日累积变形过程选取点进行分析

Fig14. Cumulative daily deformation process according to select points analysis.

势, 14 日白天降雨减弱, 时断时续, 危岩体上部的块体仍然在持续地变形, 堆积体及两侧道路代表的翼部变形相对缓慢。下伏岩体和顺层岩石主要滑动方向为 SE30°左右。这直接指向附近的村庄, 威胁到那里的居民。崩塌体前缘宽约 300 m, 后缘宽约 500 m, 长 370 m。经过短期监测, 危岩体在持续降雨时段变形明显, 经专家组研判, 需通过对危险岩体使用炸药爆破的方式快速治理。融合方案揭示危岩体右侧的部分裸露岩体(图 14 的 11、12、13 和 14 号点)表现出和残留的大型岩块类似的变形特征, 因此, 炸药埋设点设计时应兼顾到该子区。

5 结语

SAR 系统能够全天时、全天候、遥感工作, 已在各行业中得到广泛应用。随着 SAR 技术的快速发展, 迫切需要对 GB-InSAR 变形监测数据融合方法研究, 进一步推进 GB-InSAR 应急的常态化业务化运行。使用论文提出的方法可以有效地使用 GB-InSAR 与滑坡现场的空间数据主要包括 TLS 三维激光扫描以及无人机航摄数据, 通过三天的应急监测, 进行了初步地滑坡危险分区, 为后续的山体爆破治理提供支撑。主要工作:

- 基于 TLS 的稠密地形点云模拟 GB-SAR 图像, 判断匹配存在几何偏差;
- 基于特征提取了二维 GB-SAR 影像和三维地形匹配的同名控制点;
- 利用几何映射进行粗匹配然后利用同名控制点进行了误匹配纠正。

受限于应急现场的工作条件, 以及图像解译的主观性, 控制点选取的精度并不高, 最终的匹配融合位置精度远远达不到像元级精度。在后期, 可以通过 SAR 图像模拟, 以及 GB-SAR 监测实践过程中积累的地物目标解译成果形成模板库, 不断提高控制点的解译精度。论文并未深入地讨论匹配融合结果的位置精度进行更深入讨论, 因为应急现场已无法再获取更高精度的对照实验结果, 希望在后续的研究中继续加强。从现实角度来看, 暂时很难单一的依靠 GB-InSAR 一种方法对将要发生的滑坡进行准确地预警。但是, 危险边坡临滑阶段存在诸多先兆

可为预警提供参考。论文所述的实例, 在崩塌发生前就通过人工巡查的方式提前发现了灾害, 及时地截断了通车路口, 人们幸免于难。这也预示着, 如果把快速遥感的方法和人工方法不断融合相互佐证, 有望正确地预报二次灾害的发生, 及预测发生时间与规模, 并确定其影响范围, 提前发出预警信号, 避免人民生命财产的损失。另外, 快速发展的机载 SAR 和无人机 SAR 数据, 在各架次间定位参数误差若相对稳定, 本文方法也将一定程度上适用。近年来, 机载和无人机 SAR 发展迅速, 无人机 SAR 系统作为新兴的遥感观测系统, 兼具无人机平台和 SAR 传感器的优点, 在常态化的自然资源调查监测与应急灾害响应中具有极大应用前景。

致谢: 感谢中国地质调查局地质环境监测院中国地质灾害防治技术指导中心的魏云杰教授在 GB-InSAR 边坡雷达崩塌体形变监测过程中给予的指导与建议。

参考文献

- [1]Zheng X, Yang X, Ma H, et al. Integrative Landslide Emergency Monitoring Scheme Based on GB-INSAR Interferometry, Terrestrial Laser Scanning and UAV Photography[C]. Journal of Physics: Conference Series, 2019: 052069.
- [2]Carla T, Tofani V, Lombardi L, et al. Combination of GNSS, satellite InSAR, and GBInSAR remote sensing monitoring to improve the understanding of a large landslide in high alpine environment[J]. Geomorphology, 2019, 335: 62-75.
- [3]Pieraccini M, Miccinesi L. Ground-Based Radar Interferometry: A Bibliographic Review[J]. Remote Sensing, 2019, 11: 1029.
- [4]Confuorto P, Di Martire D, Infante D, et al. Monitoring of remedial works performance on landslide-affected areas through ground- and satellite-based techniques[J]. Catena, 2019, 178: 77-89.
- [5]Lombardi L, Nocentini M, Frodella W, et al. The Calatabiano landslide (southern Italy): preliminary GB-InSAR monitoring data and remote 3D mapping[J]. Landslides, 2017, 14(2): 685-696.
- [6]Zheng X, He X, Yang X, et al. Terrain Point Cloud Assisted GB-InSAR Slope and Pavement

- Deformation Differentiate Method in an Open-Pit Mine[J]. *Sensors*, 2020, 20(8):2337.
- [7]Ferrigno F, Gigli G, Fanti R, et al. GB-InSAR monitoring and observational method for landslide emergency management: the Montaguto earthflow (AV, Italy)[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2017, 3(12): 7247-7273.
- [8]Zheng X, Yang X, Ma H, et al. Integrated Ground-Based SAR Interferometry, Terrestrial Laser Scanner, and Corner Reflector Deformation Experiments[J]. *Sensors (Basel)*, 2018, 18(12): 4401.
- [9]Schaefer L N, Di Traglia F, Chaussard E, et al. Monitoring volcano slope instability with Synthetic Aperture Radar: A review and new data from Pacaya (Guatemala) and Stromboli (Italy) volcanoes[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 192: 236-257.
- [10]WU Xinghui, MA Haitao, ZHANG Jie. Development Status and Application of Ground-Based Synthetic Aperture Radar[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1073-1081. doi: 10.13203/j.whugis20190058
吴星辉, 马海涛, 张杰. 地基合成孔径雷达的发展现状及应用[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 7(44): 1073-1081.
- [11]Zou J, Tian J, Chen Y, et al. Research on Data Fusion Method of Ground-Based SAR and 3D Laser Scanning[J]. *Journal of Geomatics*, 2015, 40(3): 26-30.
邹进贵, 田径, 陈艳华, et al. 地基 SAR 与三维激光扫描数据融合方法研究. *测绘地理信息*, 2015: 26-30.
- [12]Peng W, Cheng X. A Method of Transforming GB-SAR Image Coordinate to 3D Terrain Coordinate[J]. *Journal of Yangtze River entific Research Institute*, 2018.
王鹏, 邢诚. GB-SAR 影像坐标到三维地形坐标转换方法[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(6): 122-127.
- [13]Yang J, Qi Y L, Tan W X, et al. Three-dimensional matching algorithm for geometric mapping between GB-SAR image and terrain data[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 32(3): 422-427.
杨俊, 乞耀龙, 谭维贤, et al. 地基 SAR 图像与地形数据的几何映射三维匹配方法[J]. *中国科学院大学学报*, 2015, 32(3): 422-427.
- [14]Yang X, Wang Y, Qi Y, et al. Experiment study on deformation monitoring using ground-based SAR[C]. *Conference Proceedings of 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, 2013: 285-288.
- [15]RENSanhai, CHANG Wenge, LIU Xiangjun. The Impaction Analysis of Parameter Error in the Geometric Rectification Method Based on SAR Image Simulation[J]. *Signal Processing*, 2010, 26(10):1588-1594.
任三孩, 常文革, 刘向君. 基于 SAR 影像模拟几何校正算法参数误差影响分析[J]. *信号处理*, 2010, 26(10):1588-1594.
- [16]Yang S C, Huang G M, Cheng C Q. Correction method of SAR image geometric positioning parameters based on DEM[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2019, 21(4):580-587.
杨书成, 黄国满, 程春泉. 基于 DEM 的 SAR 影像几何定位参数校正方法[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(4):580-587.
- [17]YOU Hongjian, DING Chibiao, Wu Yirong. Space borne SAR Image Simulation and Its Application in Geo rectification[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2006(01):65-71.
尤红建, 丁赤飏, 吴一戎. 基于 DEM 的星载 SAR 图像模拟以及用于图像精校正[J]. *中国空间科学技术*, 2006(01):65-71.
- [18]ZHANG Yonghong, ZHANG Jixian, YANG Chongyuan. A Qusasi-automatic Rectific-ation Method of SAR Image Based on Image Simulation[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003(02):106-111.
张永红, 张继贤, 杨崇源. 基于影像模拟的 SAR 几何校正准自动方法[J]. *遥感学报*, 2003(02):106-111.
- [19]YAO Yibin, HUANG Chengmeng, LI Chengchun, KONG Jian. A New Algorithm for Solution of Transformation Parameters of Big Rotation Angle's 3D Coordinate[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(3): 253-256.
姚宜斌, 黄承猛, 李程春, et al. 一种适用于大角度的三维坐标转换参数求解算法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2012, 37(03): 253-256.
- [20]WANG Baofeng, Xu Ning, Yu Chunping, et al. Quick Arithmetics for the Transformation Approximation of Two Space Rectangular Coordinate Systems[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2007, 27(004): 20-24.
王保丰, 徐宁, 余春平, et al. 两种空间直角坐标系转换参数初值快速计算的方法[J]. *宇航计测技术*, 2007, 27(004): 20-24.

[21]SUNFengmei. Research on Color Fusion Methods for Multi-sensor Images[D] Hunan University, 2009.

孙凤梅. 多传感器图像彩色融合方法研究[D]. 湖南大学,2009

[22]LI Zhenhong, SONG Chuang, YU Chen, et al. Application of Satellite Radar Remote Sensing to Landslide Detection and Monitoring: Challenges and Solutions [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 967-979

李振洪, 宋闯, 余琛, 肖儒雅, 陈立福, 罗慧, 戴可人, 葛大庆, 丁一, 张宇星, 张勤. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用:挑战与对策[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7):967-979.



Integrated GB-SAR Images and Terrain Data for Emergency Deformation Monitoring Assisted by Point Clouds

ZHENG Xiangtian^{1,2} HE Xiufeng¹ YANG Xiaolin³ MA Haitao³ YU Zhengxing³
REN Guiwen³ ZHANG Hao³ ZHANG Jinsong⁴

1 School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China.

2 School of Computer Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210000, China.

3 China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012 China.

4 Beijing Surveying and Mapping Institute, Beijing 100038, China.

Abstract: Terrestrial laser scanning (TLS), ground-based interferometric synthetic aperture radar (GB-InSAR) and unmanned aerial vehicle photography (UAV) have been applied to emergency deformation monitoring of rockslide. The application leads to the new problem of 3D visualization of deformation data. Firstly, we introduced iterative closest point method (ICP) to complete the registration between the TLS point cloud and UAV terrain model. And then, geometric mapping method was applied to achieve data fusion between GB-InSAR deformation map and TLS point cloud. The mapping deviation is difficult to be corrected by conventional methods, because the lack of artificial control points on the rockslide. In this paper, visual interpretation and GB-SAR images simulation method were combined to extract the control points. Then the spatial coordinate transformation parameters were estimated base on the least square method. The transformation model was established to correct the mismatching. The proposed method was verified by the simulation data and the actual monitoring data of a landslide. The matching accuracy reaches the pixel level which meet the needs of emergency monitoring.

Key words: ground-based interferometric synthetic aperture radar(GB-InSAR) ; terrestrial laser scanning (TLS) ;

unmanned aerial vehicle photography ; data fusion ; emergency monitoring of rockslide

First author: ZHENG Xiangtian, PhD, associate professor, specialized in GB-InSAR data processing. E-mail: aforest0459@foxmail.com

Corresponding author: HE Xiufeng, PhD, professor. E-mail: xfhe@hhu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41830110); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (B200202011); the National Key Research Development Program of China (2018YFC1503603, 2018YFC0808402).

网络首发：

标题：点云辅助地基干涉 SAR 雷达影像与地形数据应急匹配方法

作者：郑翔天，何秀凤，杨晓琳，马海涛，于正兴，任贵文，张浩，张劲松

收稿日期：2021-03-11

DOI:10.13203/j.whugis20200280

引用格式：

郑翔天,何秀凤,杨晓琳,等.点云辅助地基干涉 SAR 雷达影像与地形数据应急匹配方法[J].武汉大学学报·信息科学版,2021,DOI: 10.13203/j.whugis20200280 (ZHENG Xiangtian, HE Xiufeng, YANG Xiaolin, et al. Integrated GB-SAR Images and Terrain Data for Emergency Deformation Monitoring Assisted by Point Clouds [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200280)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别，请以正式出版文件为准！

您感兴趣的其他相关论文：

利用方向相位特征进行多源遥感影像匹配

李欣，杨宇辉，杨博，尹峰

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(4): 488-494

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180445>

基于空间几何约束和结构特征的光学影像与 SAR 影像配准方法

王蒙蒙，叶沅鑫，朱柏，张过

武汉大学学报·信息科学版, 2021, doi: 10.13203/j.whugis20190354

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190354>