

多时相 DEM 匹配探测泥石流地表变形的新方法

张同刚, 岑敏仪, 秦军, 吴兴华

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 通过多时相 DEM 探测泥石流地区地表形变, 必须建立 DEM 的统一坐标系, 才能计算地表形变量。引入无控制三维表面匹配技术, 提出分块区域匹配方法配准两期 DEM。实例试验表明: 分块区域匹配方法比现有的 M-LZD 算法更能适合泥石流灾害地区的 DEM 匹配, 探测出的地表变化精度更高。

关键词: 多时相 DEM; 三维匹配; 差异探测; 泥石流

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2006)03-0096-04

中图分类号: TP751.1, P208

A New Method of Matching Multi-temporal DEM to Detect Terrain Deformation Caused by Debris Flow

ZHANG Tong-gang, CEN Min-yi, QIN Jun, WU Xing-hua

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

Abstract: The volume of terrain deformation caused by debris flow can be calculated by the multi-temporal DEM derived from aerial-photography only when they are in common coordinate. This paper introduces the technique of 3D surface matching without using control points. A new algorithm, Multiply Surface Patches Matching (MSPM), is proposed to match the two temporal DEMs. The experimental results on real data sets show that MSPM is more appropriate for DEM matching in debris-flow area and has higher accuracy than that of M-LZD algorithm.

Key words: multi-temporal DEM; 3D matching; deformation detection; debris flow

遥感技术由于可以快速获取大范围地表影像, 并具备重复观测能力, 在泥石流等自然灾害的评估、防治和预测等研究中得到了广泛地应用。目前通过不同时相的 DEM 的比较可以定量研究地表变化的范围和幅度, 进而可以确定泥石流灾害的影响范围、灾害等级, 为灾害防治及其预测预报研究打下基础。

多时相遥感像片除了获取时间不同, 获取的技术途径、使用仪器设备以及地面控制等方面也不尽相同, 导致生成的 DEM 不具有统一的地理坐标系。只有当多时相 DEM 纳入统一坐标系时, 方能进行比较并定量地求得地表变化的幅度及空间分布。本文以成都—昆明铁路沿线的普歪沟泥石流为试验区对此问题进行研究。

解决不同时相 DEM 配准的途径有 2 种: 一是控制点方法, 其优点是简单实用, 配准精度仅与建立控制点的精度有关, 与变形面积的大小无关, 因而应用广泛^[1-4]。不足在于需要为各期航片建立足够可靠的地面控制点。地面变形会导致灾害发生前航片地面控制点的建立和维护非常困难^[1,2,4], 有时甚至不

可能; 另外这种方法需要大量的外业工作, 工作效率不高; 二是无控制 DEM 表面匹配方法, 该技术不需借助控制点便可完成 DEM 配准。最常见的 DEM 表面匹配算法是最小高程差 (LZD) 算法, 采用稳健估计替代最小二乘来探测地表变形, 代表性算法有 M-LZD^[5-6]。M-LZD 能够探测到的局部表面变形面积最大可达整个匹配面积的 25%^[5-6]。普歪沟几十年间地面已发生了很大的变化, 无法为早期航片建立稳定可靠的控制点, 使得控制点方法无法使用。由航片获取的研究区域, 其地表变形面积超过 50%, 超出了 M-LZD 可探测变形的能力范围, 直接使用 M-LZD 算法将很难完成 DEM 匹配。因此, 需要寻找适用大面积变形的 DEM 表面匹配差异探测算法。

本文首先介绍普歪沟 DEM 生成, 然后在 M-LZD 方法的基础上进行改进, 提出适用于大面积变形的 DEM 表面匹配差异探测算法, 最后运用新算法进行普歪沟 DEM 的匹配, 通过断面检查和点抽样统计, 得出 DEM 匹配精度的定性和定量分析图表数据, 证明了新算法的有效性。

收稿日期: 2005-04-20

资助项目: 国家自然科学基金资助项目 (40271092); 西南交通大学博士生创新基金

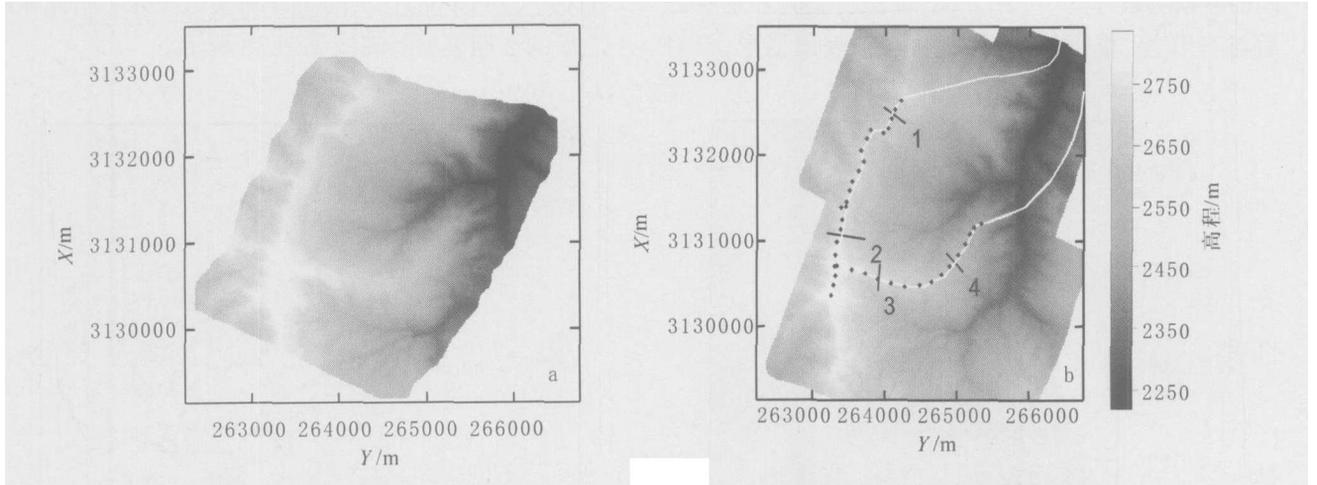
作者简介: 张同刚 (1977—), 男 (汉族), 江苏省盐城市人, 博士研究生。研究方向为数字摄影测量, 模式识别, 遥感图像处理等。电话: (028) 87600676, E-mail: chnztg@gmail.com。

1 试验区 DEM

首先采用 GPS 控制点对 1987 年航片建立的立体模型进行绝对定向,建立整个普歪沟的基准模型。由于 1957 年航片距今已有 40 a 多了,期间由于泥石流活动和交通设施建设等经济活动的影响,地面变化巨大,已经不可能为 1957 获取的航片建立有效的野外控制点,只好在数字摄影测量工作站通过在 1987 年立体模型上转刺控制点的方法对 1957 年立体模型

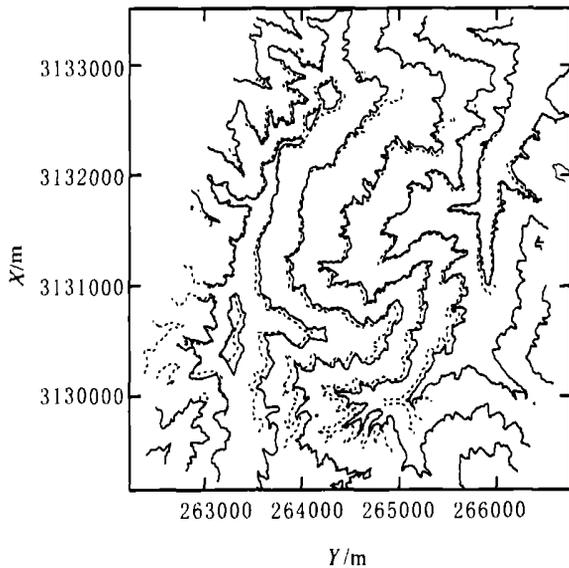
进行绝对定向。按照绘制 1/2 000 地形图的作业要求,对 2 个不同时相的数字模型测绘等高线,最后通过等高线内插生成 DEM(图 1),DEM 的数据间隔为 10 m,面积约 3.8 km²。

由于地面变化巨大,在两立体模型上寻找同名点精度很难保证。试验结果表明绝对定向后模型的平面中误差高达 10 m,高程中误差高达 9.8 m。从 100 m 等高距的等高线(图 2)上可以看出它们之间存在明显的偏差。



(其中 b 图中白色线条表示普歪沟泥石流发生区域; 表示检查点;短直线和数字表示检查断面及编号)

图 1 航片生成的 DEM :1957DEM(a) ,1987DEM(b)



(实线表示 1987 年等高线,虚线表示 1957 年等高线,等高距 100 m)

图 2 1957 和 1987 等高线图

2 无控制 DEM 匹配方法

无控制 DEM 表面匹配方法以刚体转换模型为基础,建立对应点对的函数关系,在预定的目标函数条件下,求取两表面间的转换参数。DEM 匹配完成

后,两期 DEM 将纳入统一坐标系,对两期 DEM 作差,就可以定量地求得 DEM 间变形的幅度和分布。

2.1 M-LZD 算法

表面匹配的著名算法称为 LZD 算法,它以两个表面上的平面坐标相同的点为对应点(如果不存在就内插一个临时点),然后根据对应点间的 Z 坐标差的平方和最小的原则建立目标方程,根据最小二乘来求解两表面的转换参数,这组参数能够拉近 2 个表面。反复迭代上述过程,在预设约束限值下完成匹配工作。LZD 算法的目标函数为:

$$p_i \times dZ_i^2 = \min \tag{1}$$

式中: p ——权; dZ ——对应点的高差。当两表面存在变形时,需要用 M-LZD 算法代替 LZD 算法。Pilgrim 导出的 M-LZD 算法^[5-6],最大能探测 25% 的表面变形。其算法的目标函数为:

$$(dZ_i) = \min \tag{2}$$

式中: (\cdot) ——为 M-估计的数学模型。在计算中, M-估计通过等价权原理转化为选权迭代最小二乘^[7],这样, M-LZD 的目标函数可以改写为:

$$\bar{p}_i \times dZ_i^2 = p_i \times w_i \times dZ_i^2 = \min \tag{3}$$

式中: \bar{p} ——为等价权; w ——权因子。

2.2 分块区域匹配方法

泥石流灾害地区的地表面变形有显著特征:泥石流活动影响的范围通常在山坡和山沟中,一般不会影响到大的分水岭或山脊。

为此,新算法采取以下步骤。

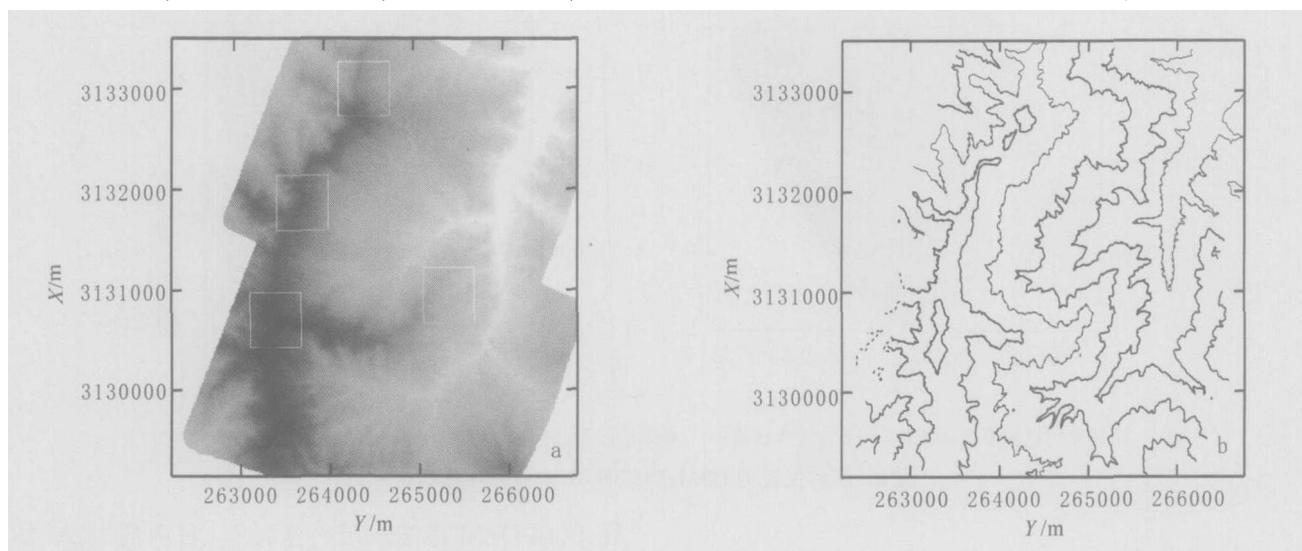
首先在基准模型 S 上未发生变形的部分选取 N ($N-1$) 个小区域 (small surface patch, SSP), 然后在待匹配模型 M 上对应部分找 N 个对应的 SSP。采用 $M-LZD$ 算法匹配这 N 对 SSP, 求得模型 S 和 M 间的转换参数 T 。利用 T 对 M 进行旋转和平移之后与 S 作差, 根据设定的阈值, 剔除表面变形, 再对

剔除变形后模型 M 与基准模型 S 重新利用 $M-LZD$ 算法进行精确匹配, 最终求得 M 和 S 的精确转换参数 T 。

为表述方便, 本文称新算法为分块区域匹配算法 (MSPM), 考虑到 SSP 在 MSPM 算法中的作用与控制点类似, 故称为广义控制点 (G-CP)。

2.3 DEM 匹配试验

试验以 1987 年 DEM 为基准模型, 1957 年 DEM 为待匹配模型, 用 MSPM 算法进行匹配, 其选取的 4 个 G-CP (图 3a) 在大的山脊和大山头处。匹配完成之后的 2 期模型等高线见图 3b 所示。



(a 图中白色小方块表示 G-CP; b 图中实线表示 1987 年 DEM 等高线, 虚线表示 1957 年 DEM 等高线, 等高距 100 m)

图 3 G-CPs 分布示意图(a) 和匹配完成之后的 DEM 等高线图(b)

2.4 DEM 匹配精度评估

泥石流地区不同时相 DEM 之间的高程变化, 主要有以下 3 部分组成: DEM 生成过程中的随机误差、匹配误差和实际地面变化 (主要由泥石流活动引起)。根据泥石流活动的特点, 在大的分水岭、山脊和山头实际地面变化较小的地方选取 4 个检查断面, 它们分别位于左上方的分水岭和下方的大山脊上, 均匀分布在整個 DEM 区域。断面的编号和位置参见图 2b。

从 4 幅断面图 (图 4) 可看出, 匹配前的 DEM, 在高程和平面上差别较大, 高程上的差别更为明显, 反映匹配前二期模型之间存在较大的差异。匹配后的 DEM, 山脊的平面位置重合得较好, 高程也相差不大, 表明 DEM 已配准。匹配后 DEM 之间的细小差异主要由 DEM 的随机误差所致。山脊两侧在高程上存在差异 (图 4), 1987 年模型上的高程均低于 1957 年匹配后的模型, 这是 1957—1987 年 30 a 间水土流失在 DEM 上的反映。检查断面的位置和编号见图 1b。

在分水岭和大的山脊等部位随机选取 38 个检查点 (图 1b), 这些部位的高程变化主要由随机误差和匹配误差组成。

如果没有明显的匹配误差和实际地面变化, 两期 DEM 对应点对的高差主要是随机误差。如果存在明显的匹配误差或者实际地面变化, 它们的高差就会比随机误差大得多。以检查点的高差作为统计量, 分别求匹配前、 $M-LZD$ 和 MSPM 方法匹配后的统计精度 (见表 1)。

表 1 检查点高差统计结果

项目	最大偏差/m	最小偏差/m	平均偏差/m	中误差/m
匹配前	10.31	-25.00	7.41	±115.40
$M-LZD$	108.40	-13.41	63.17	3487.23
MSPM	0.37	-1.99	-0.85	±0.45

从表 1 中所列的统计结果可以很明显地看出: $M-LZD$ 方法匹配后检查点上的高差没有减小反而增加, 表明存在较大的匹配误差; MSPM 方法匹配后

检查点上的高差显著减小,高差的各项统计指标均小于匹配前。这就清楚地表明了 MSPM 方法的精度高,显著优于 M-LZD 方法。另外,MSPM 方法匹配后的检查点上高差中误差与 DEM 生成过程中的随机误差基本相当,表明这些检查点上的高差基本上是由随机误差引起的。

3 地表变化探测结果

由 MSPM 算法探测到的普歪沟 30 a 地表变化如图 5 所示。从图 5 中可以看出,整个普歪沟泥石流活动区,左上方的分水岭、下方大的山脊等部位,地表高程几乎没有变化。

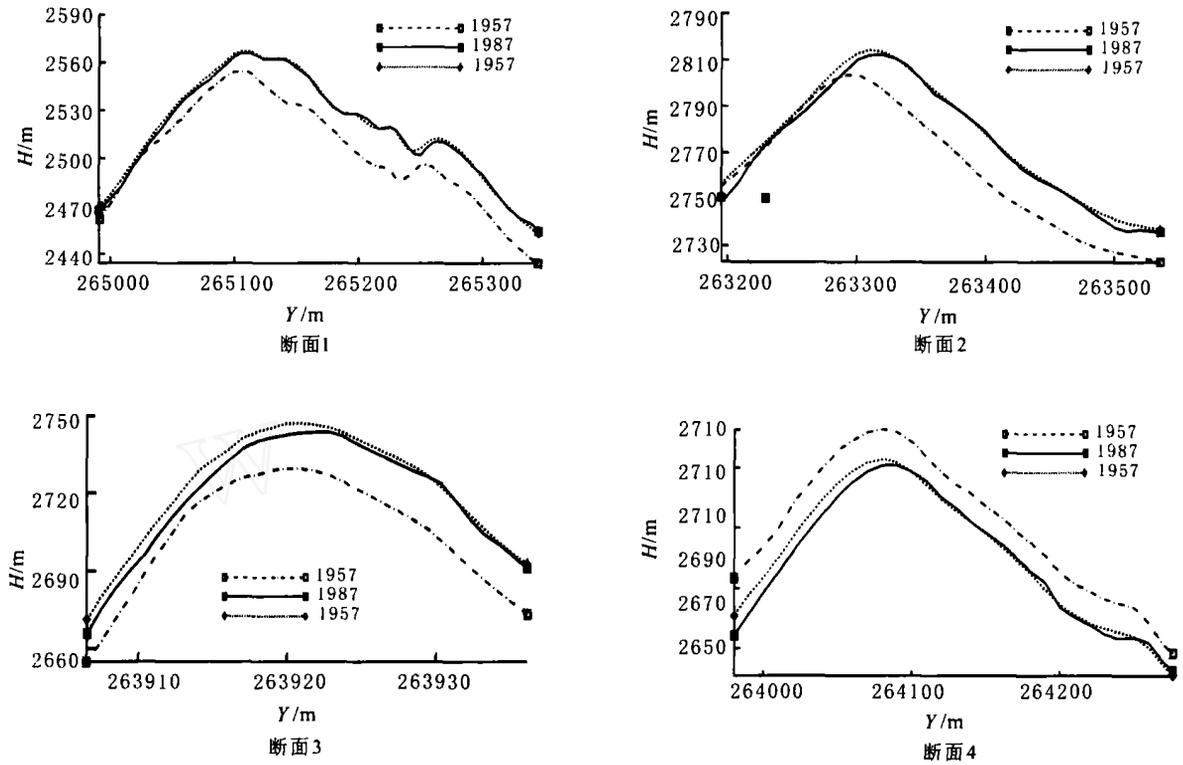
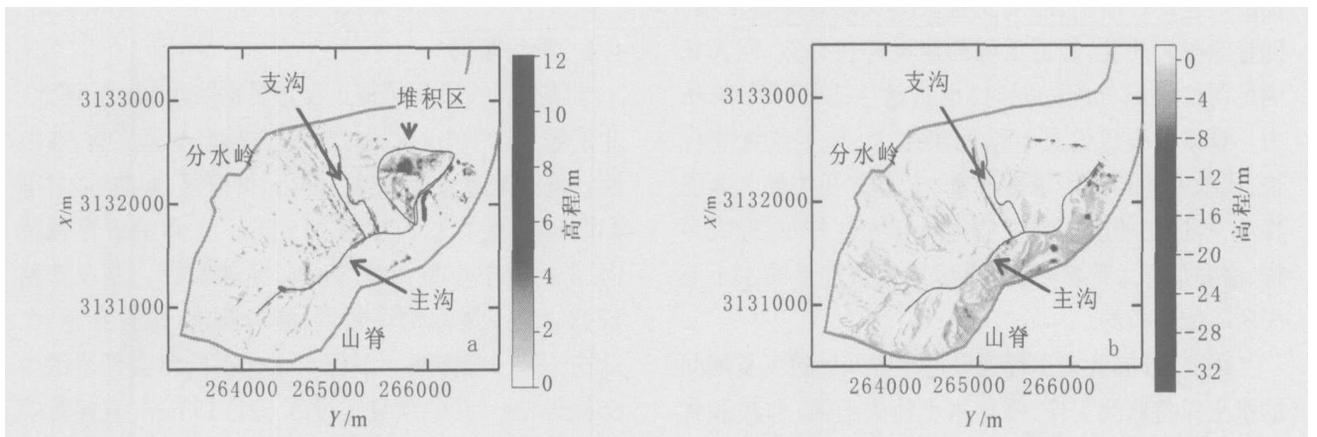


图 4 匹配前和 MSPM 匹配后的 4 个检查断面



(图中线条表示普歪沟泥石流发生区域,参见图 1b;正值表示堆积,负值表示冲刷)

图 5 普歪沟地表堆积(a)和冲刷(b)情况

主沟和子沟的沟底高程明显抬高,堆积作用明显,沟的两侧有冲刷。下方山坡的坡度在 30°~40°,部分地方的坡度更大,地表高程显著降低,反映了该区域发生过垮塌和较强的冲刷。沟口堆积区的地面高程显著抬高,沟内泥石流活动带来的大量固体物质在此堆积。

4 结 语

在无法或难于建立地面控制点,也没有明显可靠的地貌特征点时,无控制表面匹配技术提供了 DEM 匹配的最佳解决方案。

(下转第 108 页)

坡体松散堆积物产生量的影响,存在因有限尺度引起的截至范围,(4),(5)式只能在一定尺度范围内成立。

近 20 a,研究区在 1989 年和 2003 年分别暴发了规模较大的坡面泥石流,且成群成带发生,而规模不大的坡面泥石流活动比较频繁。因此,通过一定时间尺度的观测分析,对泥石流暴发的规模、频率以及周期等自组织临界性进行研究,可以对泥石流的活动规律进行预测、预报。

6 结 语

(1) 斜坡大量松散堆积物间存在长程相关的非线性作用,具有与沙堆模型相同的自组织临界特性,在各种内外触发变化因子的共同作用下,最终导致坡面泥石流的暴发。

(2) 坡面泥石流暴发的地貌、降雨量临界特性分析表明,研究区小流域山坡坡度在 $25^{\circ} \sim 37^{\circ}$ 、沟床比降在 480‰~760‰之间、流域面积小于 4 km^2 和坡面长度小于 400 m,且当日雨量和 1 h 雨强分别不低于 150, 40 mm 时,最有利于坡面泥石流的发生。

(3) 泥石流暴发的自组织临界性,暴发规模和频率间的幂律关系,可对泥石流活动规律进行预测。

[参 考 文 献]

- [1] 王士革. 山坡型泥石流的危害与防治[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(3): 45—50.
- [2] 罗德军, 艾南山, 李后强. 泥石流暴发的自组织临界现象

[J]. 山地研究, 1995, 13(4): 213—218.

- [3] 王裕宜, 詹钱登, 陈晓清, 等. 泥石流体的应力应变自组织临界特性[J]. 科学通报, 2003, 48(3): 976—980.
- [4] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality: An explanation of $1/f$ noise [J]. Physical Review Letters, 1987, 59(3): 381—384.
- [5] 梅可玉. 论自组织临界性与复杂系统的演化行为[J]. 自然辩证法研究, 2004, 20(7): 6—9.
- [6] 於崇文. 固体地球系统的复杂性与自组织临界性[J]. 地学前缘, 1998, 5(3): 159—182.
- [7] 张成恭, 编. 工程地质学(上册)[M]. 北京: 地质出版社, 1979. 52.
- [8] 王裕宜, 张军, 严壁玉. 泥石流侵蚀过程中应力特征的分析研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(2): 12—19.
- [9] 陆中臣, 贾绍风, 黄克新, 等. 流域地貌系统[M]. 大连: 大连出版社, 1991. 33—35.
- [10] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所编著. 泥石流研究与防治[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989. 61—74.
- [11] 崔鹏. 泥石流地貌要素的统计分析. 第二届全国泥石流学术会议论文集[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 296—302.
- [12] 谭万沛, 王成华, 等. 暴雨泥石流和区域预测与预报[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994. 220—221.
- [13] 崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献——以蒋家沟泥石流形成为例[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(1): 11—15.

(上接第 99 页)

将不同时期获得的 DEM 纳入到统一的坐标系, 是探测多时相 DEM 表面变形的前提。本文在 M—LZD 算法基础上, 采用分块表面区域匹配 (MSPM) 算法, 提高了 M—LZD 算法探测表面变形的能力。试验结果表明: 新方法更能适合泥石流灾害地区大面积变形的 DEM 表面匹配和变形探测, 匹配精度和探测出的地表变化量精度均比转刺控制点方法和 M—LZD 算法的结果更高。

本文提出的方法在其它如滑坡、火山等自然灾害引起的地表变化研究中也有一定的应用前景。

[参 考 文 献]

- [1] Oka N. Application of photogrammetry to the field observation of failed slopes [J]. Engineering Geology, 1998, 50: 85—100.
- [2] Kääb A. Photogrammetry for early recognition of high mountain hazards: New techniques and applications [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology,

Oceans and Atmosphere, 2000, 25(9): 765—770.

- [3] Kääb A. Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air and spaceborne optical data: Examples using digital aerial imagery and aster data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, 57(1-2): 39—52.
- [4] Kaufmann V, R. Ladstädter. Documentation of the retreat of a small debris-covered cirque glacier (Gössnitzkees, Austrian ALPS) by means of terrestrial photogrammetry [A]. in Proceedings of the 4th ICA Mountain Cartography Workshop [C]. 2004. Vall de Núria, Catalonia, Spain.
- [5] Pilgrim L J. Robust estimation applied to surface matching [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996, 51: 243—257.
- [6] Pilgrim L J. Surface matching and difference detection without the aid of control points [J]. Survey Review, 1996, 33(259): 291—304.
- [7] 周江文, 黄幼才, 杨元喜, 等. 抗差最小二乘法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995. 104—158.