

黄鹏诚, 朱军, 李维炼, 等. 无人机遥感数据驱动下的滑坡动态可视化方法研究[J]. 灾害学, 2020, 35(1): 230–234.
[HUANG Pengcheng, ZHU Jun, LI Weilian, et al. Research on landslide dynamic visualization method driven by UAV remote sensing data[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(1): 230–234. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2020.01.042.]

无人机遥感数据驱动下的滑坡动态可视化方法研究^{*}

黄鹏诚, 朱 军, 李维炼, 周乐韬, 何秋玲, 付 林, 路井涛

(西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756)

摘 要: 传统滑坡模拟数据获取困难, 模拟物理机理复杂, 不利于媒体宣传、提升公众安全意识以及快速灾害应急。无人机技术的飞速发展能够为滑坡动态可视化快速提供重要的数据支撑, 为此, 该文拟重点开展无人机遥感数据驱动下的滑坡灾害动态可视化研究, 通过探讨滑坡特征分析与信息提取、空间约束规则下的滑坡过程计算方法、数据驱动的滑坡可视化方法等关键技术, 提出了基于无人机遥感数据的滑坡灾害快速动态模拟方法, 研发了原型系统并进行案例试验。试验结果表明, 该文的研究方法在无人机遥感数据支持下能够快速动态模拟滑坡演进过程, 有助于为应急灾害、媒体宣传以及提升公众灾害风险意识提供重要的理论依据支撑。

关键词: 无人机遥感; 数据驱动; 空间约束; 滑坡过程模拟; 动态可视化

中图分类号: X43; P208; P333.2; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2020)01–0230–05

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2020.01.042

滑坡是自然界中最常见的地质灾害之一, 具有分布范围广、突发性强、频率高和危害性大等特点^[1–3]。据国家统计局发布的官方消息(<http://data.stats.gov.cn/>), 2012–2017年期间, 全国发生地质类灾害共53184次, 其中滑坡灾害37367次, 发生频率高达70%。《国家综合防灾减灾规划(2016–2020年)》明确十三五期间要完善防灾减灾宣传教育机制, 加强对不同社会群体灾害知识科普, 提升全民防灾减灾意识和自救互助技能。仙台减少灾害风险框架指出框架的首要任务是了解灾害风险^[4–6]。可见开展滑坡灾害研究, 还原滑坡时空演进过程, 对于媒体宣传普及滑坡灾害的发生、发展过程及危害, 提升公众的风险意识等具有十分重要的意义^[7–11]。

传统滑坡模拟运动数据采集通常因灾区环境危险复杂, 导致人员和设备一时无法抵近, 直接获取滑坡灾害区域的大规模数据十分困难^[12–16]。现有滑坡模拟方法大多基于物理机理模型, 运用离散元、颗粒细胞数据、光滑粒子流动力学等数值模拟方法^[17–23], 构建滑坡动态仿真模型。但存在模拟数据获取难、力学参数不易确立、数学模型建立复杂等问题, 导致对滑坡时空演进过程进

行精准模拟仍是一个世界难题^[24]。而在灾害应急快速响应以及媒体宣传普及中往往更关注的是灾害大致的运动轨迹及其影响范围, 而不需要考虑复杂的滑坡运动机理, 建立数学模型。

随着无人机遥感技术的发展, 无人机遥感具有机动性强、时效性强、受天气条件影响小等优势^[25–28], 能够实现快速获取高分辨率遥感数据, 快速用于灾害应急响应。无人机DEM数据和影像数据能够用于基础地理场景构建, 利用灾前灾后影像能够提取范围、方向以及房屋、道路等专题信息, 利用灾前灾后DEM数据能够计算滑坡体和堆积体体积。这些信息能够为滑坡过程计算提供必要的输入参数。因此, 基于无人机遥感的滑坡灾后数据的采集对于快速还原滑坡灾害时空演进过程具有独特的优势。

因此, 本文以无人机遥感数据为驱动, 重点探讨了滑坡特征信息提取、空间约束规则下的滑坡过程计算方法、数据驱动的滑坡可视化方法等关键技术, 以实现滑坡过程可视化模拟。为灾害应急、媒体普及宣传以及提升公众灾害风险意识提供重要的理论依据支撑。

^{*} 收稿日期: 2019–07–08

修回日期: 2019–08–22

基金项目: 国家重点研发计划资助(2016YFC0803105); 国家自然科学基金(41874008, 41871289)

第一作者简介: 黄鹏诚(1994–), 男, 四川广元人, 硕士研究生, 主要从事虚拟地理环境研究。E-mail: hpc3795@163.com

通讯作者: 周乐韬(1977–), 男, 四川德阳人, 博士, 副教授, 主要从事高精度卫星导航与定位研究。E-mail: ltzhou@swjtu.edu.cn

1 数据驱动下滑坡可视化方法

1.1 滑坡特征信息提取

滑坡时空过程实质是从滑坡体到堆积体的过程, 因此, 本文主要采用人工解译方法和填挖方技术两种方法来提取滑坡边界、滑坡体、堆积体、滑道、滑坡中心线等特征信息, 定量计算滑动位移、滑坡体积、滑坡面积、滑坡分区, 以及水体、房屋、道路等滑坡承灾体信息, 满足滑坡时空过程的需求, 以提升滑坡动态可视化的效率。

承灾体信息和滑坡边界信息提取, 该文主要采用人工解译方法, 对采集的遥感影像进行矢量化得到滑坡边界、道路、水体等信息。滑坡体、堆积体与滑坡体体积主要使用填挖方技术根据滑坡区域灾前灾后 DEM 数据进行差值计算得到, 然后对填挖结果进行栅格转矢量操作, 并用矢量裁剪填挖结果即可得到滑坡体、堆积体栅格数据及其矢量数据。滑动路程即滑动轨迹则是分别以滑坡体和堆积体的质心为起始点, 根据滑坡范围中心线绘制得到。

1.2 空间约束下滑坡过程计算

针对传统滑坡可视化模拟存在力学参数确定难, 模型建立复杂、模拟结果并非十分理想等问题, 为了满足灾害应急处置时快速进行滑坡模拟可视化, 该文利用灾前灾后的遥感数据在约束条件下利用扩展法四面体插值形函数对滑坡过程进行计算, 得到一系列不同时刻的滑坡空间模拟数据, 为滑坡动态可视化提供一种新的思路。

1.2.1 空间约束规则建立

利用滑坡体、堆积体进行滑坡时空过程计算时, 虽然滑坡的范围、规模、类型等情况不同, 但计算过程中需要考虑的影响因素是一致的。本文将通过建立滑坡运行过程中的滑动轨迹、滑动速度(公式 1)、滑动时间(公式 2)、滑动连续性、物质平衡(公式 3)、动量守恒(公式 4)、滑动范围这七项主要的约束规则, 分析对滑坡灾害时空过程计算的影响情况, 为滑坡时空过程计算提供依据, 从空间形态变化对滑坡过程进行模拟, 避免复杂物理机理的研究。

$$v = \sqrt{2g(H - 10^{\log V + bL})} \quad (1)$$

式中: v 为最小滑动单元滑动速度; V 为滑坡体积; H 和 L 分别表示滑坡后缘顶点到估算点的高差和水平距离; g 表示重力加速度; $a = -0.15666$, $b = 0.62219$ 。

$$T = \sum \frac{\Delta S_i}{v_i} \quad (2)$$

式中: T 为滑动到第 i 个时刻的滑动总时长, 在每个微小 ΔS 内可以把滑坡运动看作匀速直线运动。

$$V_{\text{总}} = \sum_{n=1}^{\infty} \Delta S_{\text{grid}} \cdot \Delta h + \Delta V (0 \leq i \leq N, |\Delta V| < \text{Error}) \quad (3)$$

式中: $V_{\text{总}}$ 表示滑坡体积, ΔV 表示滑坡过程中引起的物质耗散, Error 为事先设定的体积缩放阈值, ΔS_{grid} 为最小栅格单元面积, Δh 为最小栅格单元高程变化(即掩埋深度)。

$$m_i v_i + m_{i+1} v_{i+1} = m_i v'_i + m_{i+1} v'_{i+1} \quad (4)$$

式中: V_i , V_{i+1} 都是作用前同一时刻的瞬时速度, V'_i , V'_{i+1} 都是作用后同一时刻的瞬时速度。

1.2.2 滑坡过程计算

经过滑坡特征信息提取计算所需的滑坡体、堆积体、滑道、中心线数据之后, 通过滑坡过程约束分析所得约束因子, 在参与约束的约束条件下利用扩展法四面体插值形函数进行滑坡时空过程的空间数据计算, 从而得到滑坡高程变化时空插值结果数据, 整体流程如图 1 所示。

滑坡高程变化时空过程计算, 首先需要计算滑动路程、滑动速度得到滑动时间, 并根据滑动时间计算插值时刻数设为 $N+1$; 然后在中心线 S 上等间距取 $N+1$ 个点, 依次编号 $0, 1, 2, \dots, N-1, N$, 共计 $N+1$ 个滑体质心, 并计算质心坐标(公式 5); 最后在物质平衡约束、边界约束条件下以质心为原点搜索滑体栅格范围, 以边界为观测值根据扩展法四面体插值形函数(公式 6)迭代计算得到滑体空间数据, 并根据动量守恒依次检查和修正栅格单元的分布及值, 并且再次检查插值结果是否满足相应约束条件。根据以上步骤依次迭代计算得到所有不同时刻的滑体堆积空间数据。

$$P_i = (x_0 + i\Delta x, y_0 + i\Delta y) \quad (5)$$

式中: $P_i(X_i, Y_i)$ 表示中心线 $S = \{(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_N, y_N)\}$ 上第 i 点的质心。

$$W_p(x, y, t) = \sum_{i=1}^4 W_i(x, y, t) W(i) \quad (6)$$

式中: $W(i) = \frac{V_i}{V}$, 表示形函数(V_i 表示所求点 P 与四面体的面构成的四面体体积; V 表示四面体体积), $\sum_{i=1}^4 W(i)$, $W_i(x, y, t)$ 为观测值, $W_p(x, y, t)$ 为所求点的估算值。

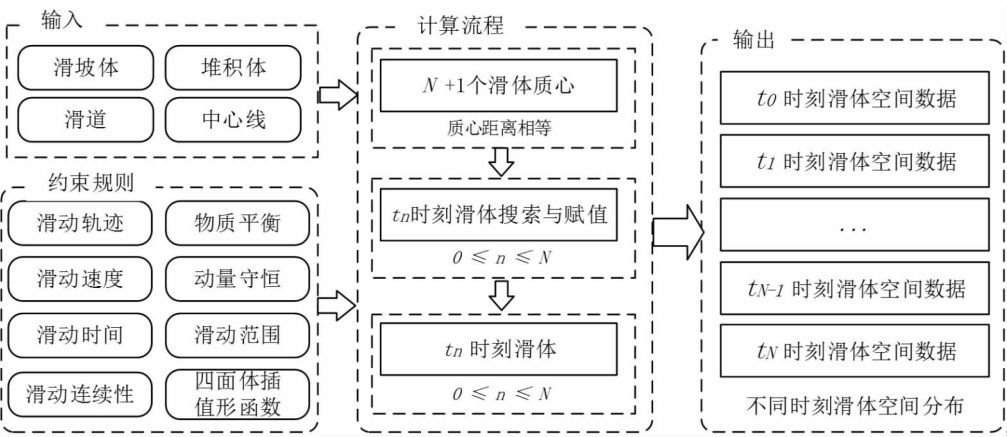


图1 滑坡时空过程计算流程

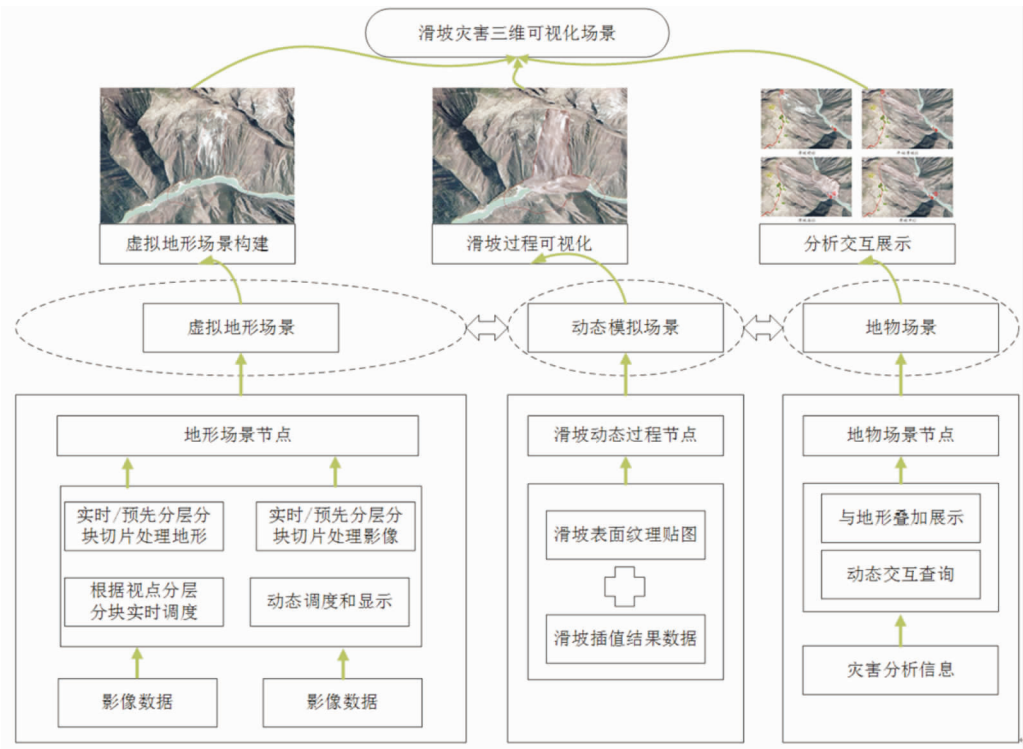


图2 滑坡可视化方法

1.3 滑坡可视化表达

滑坡灾害场景快速可视化表达流程如图2所示。

(1)虚拟地形场景构建主要是先将滑坡发生区域灾前DEM和遥感影像数据进行分块进行切片处理，建立不同细节层次的地形模型和影像模型；然后根据用户视点改变来实时调度多细节层次的地形和影像，并实时加载与绘制，从而显示当前视点下的三维地形场景。

(2)动态模拟场景构建主要是对滑坡过程进行尽快速度模拟。空间约束规则下的滑坡过程计算结果为不同时刻的栅格单元，然而并非每个单元中都有掩埋深度值，本文只对结果数据中含有

掩埋深度值的栅格单元遍历，组织成三角网结构，并将灾前灾后遥感数据进行采样融合处理，生成不同时刻插值结果数据对应的纹理，对不同时刻的滑体堆积表面进行纹理贴图，进行实时渲染与可视化展示，实现滑坡过程三维动态可视化效果。

(3)地物场景构建主要是将滑坡灾害区域的水文、交通、房屋等专题矢量数据，滑坡边界、堆积体、滑坡体等灾害分析信息与地形叠加进行展示及交互查询。并根据灾害分析信息的特点，利用颜色、文字、点状符号、线状符号、面状符号等进行标绘，从而辅助灾区的各类灾害分析信息进行丰富全面的表达，提高认知效率。

2 原型系统研发与案例试验

2.1 原型系统研发

该文实验硬件配置上选择高档图形工作站, CPU 的处理器为 Intel Xeon X5670 33GHz, 16GB 主机内存, 显卡为 NVIDIA Quadro 4000, 操作系统为 Windows7 64 位旗舰版。利用 Qt 和 C++ 语言, 结合第三方开源库 OSG、GDAL, 研发了滑坡灾害动态演进可视化模拟系统, 系统主界面如图 3 所示。系统主要功能包括: ①提供 DEM 数据和影像数据的动态调度和显示功能; ②提供滑坡特征信息提取分析、滑坡时空过程计算等预处理功能; ③提供滑坡过程可视化模拟与灾情信息展示功能。

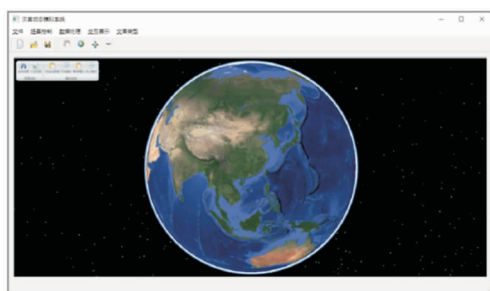


图 3 滑坡过程可视化模拟与交互分析系统主界面

2.2 案例区域介绍

该文选择金沙江白格村山体滑坡作为案例并展开试验分析。金沙江白格村山体滑坡位于金沙江右岸深切峡谷偏远地区西藏自治区昌都市江达县波罗乡白格村与四川省甘孜州白玉县绒盖乡则巴村交界处($98^{\circ}43'1''E$, $31^{\circ}4'51''N$), 距离波江达县城约 78 km、罗乡政府约 15 km, 如图 4 所示。

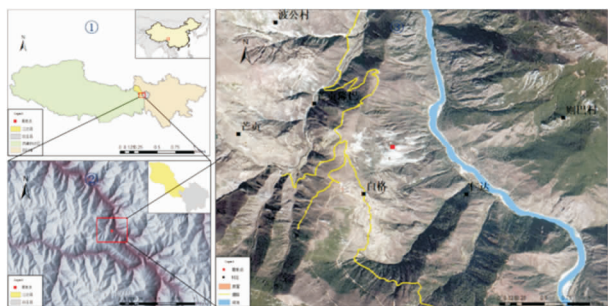


图 4 案例区域

2.3 案例试验分析

2.3.1 滑坡特征信息提取

该文在无人机遥感数据的支撑下, 对金沙江山体滑坡区域的滑坡体、堆积体、房屋、道路等特征信息进行提取。首先利用人工目视解译法提取出灾害区域的水体、房屋、道路、滑坡边界等信息, 接着利用填挖方和数学计算方法提取滑坡体、堆积体、滑道等信息, 然后利用计算几何定量计算滑坡面积、滑坡体积、滑动路程等信息, 并以不同颜色进行了展示, 如图 5 所示。

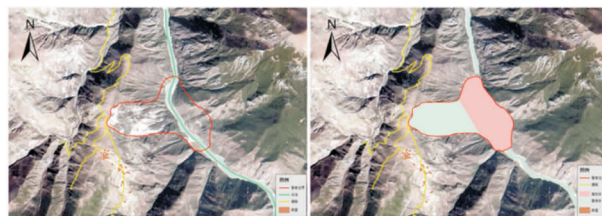


图 5 滑坡特征信息

2.3.2 滑坡动态可视化结果

对滑坡特征信息提取和时空过程计算, 得到滑坡灾害时空过程各个时刻结果数据后, 在 WGS84 坐标系下, 以地形格网单元的坐标值为基础, 通过构建规则三角网、赋值加载、纹理映射实现滑坡演变过程动态可视化表达。图 6 展示了金沙江滑坡灾害演进效果, 即滑坡前、开始滑坡、滑坡中和滑坡后的整个时空演变过程。同时, 可直观自然地展示滑坡的淹没范围、堆积体、以及灾情破坏情况等信息, 为媒体宣传以及提升公众灾害风险意识提供重要的理论依据支撑。

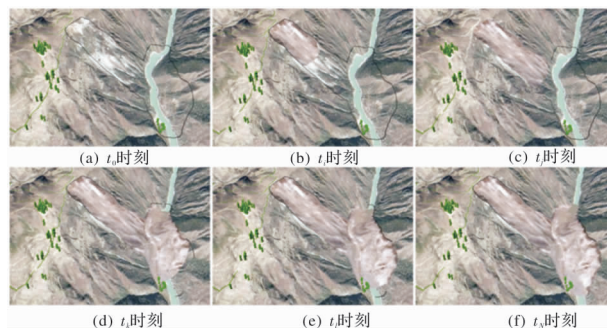


图 6 金沙江白格村山体滑坡过程可视化模拟

3 结论与展望

本文在无人机遥感数据的支持下, 重点开展了滑坡灾害动态可视化模拟研究, 通过对灾前灾后遥感数据进行提取分析, 为滑坡灾害演进过程计算及动态可视化模拟提供了重要的数据支撑, 同时构建空间约束规则, 用于滑坡过程演进时刻数据计算, 实现了滑坡灾害时空演进过程动态可视化展示。本文研发了滑坡灾害动态可视化模拟原型系统并选择了金沙江滑坡开展案例试验, 试验结果表明, 本文方法在无人机遥感数据支撑下能够快速动态滑坡灾害场景, 能够为用户提供直观自然地有效方法。在未来的研究中, 将考虑到监测数据等多种数据的驱动, 继续对滑坡灾害模拟开展进一步研究。

参考文献:

- [1] Vessia G, Coco L, Rossi M. Introduction to a thematic set of papers on methods to assess the reliability of landslide hazard mapping[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,

- 2017, 76(2): 393–395.
- [2] 朱庆, 丁雨淋, 苗双喜, 等. 动态观测数据驱动的滑坡灾害精准模拟分析方法[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 396–403.
- [3] 李维炼, 朱军, 朱秀丽, 等. 无人机遥感数据支持下滑坡VR场景探索分析方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 1065–1072.
- [4] Amina Aitsi – Selmi, Shinichi Egawa, Hiroyuki Sasaki, et al. The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction: Renewing the Global Commitment to People's Resilience, Health, and Well-being[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2015, 6(2): 164–176.
- [5] Sendai Tsutomu. LIXIL Product safety activities[J]. Journal of Japan Society for Safety Engineering, 2015, 54(3): 211–215.
- [6] Ilan Kelman. Climate Change and the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2015, 6(2): 117–127.
- [6] Pachauri R K. Managing the risks of extreme events and DISASTERS[J]. UN Chronicle, 2012, 49(1/2): 12–14.
- [7] 徐华龙. 矿山灾害仿真模拟与救援培训系统研究[J]. 中国煤炭, 2017, 43(11): 69–73, 96.
- [8] 许强, 郑光, 李为乐, 等. 2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1534–1551.
- [9] 左健扬, 倪万魁, 景博. 三维可视化滑坡地质模型的研究与应用[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 60–64.
- [10] 李维炼, 朱军, 胡亚, 等. 面向多用户类型的泥石流应急灾害信息特征可视化方法[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 231–234.
- [11] 李德仁, 眭海刚, 单杰. 论地理国情监测的技术支撑[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(5): 505–512, 502.
- [12] Miet Van Den Eckhaut, Javier Hervás. State of the art of national landslide databases in Europe and their potential for assessing landslide susceptibility, hazard and risk[J]. Geomorphology, 2011, 139: 545–558.
- [13] J G Leskens, M. Brugnach, A Y Hoekstra, et al. Why are decisions in flood disaster management so poorly supported by information from flood models? [J]. Environmental Modelling and Software, 2014, 53: 53–61.
- [14] 童庆禧, 孟庆岩, 杨杭. 遥感技术发展历程与未来展望[J]. 城市与减灾, 2018(6): 2–11.
- [15] 董文全, 蒙继华. 遥感数据时空融合研究进展及展望[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(2): 1–11.
- [16] Ataollah Shirzadi, Himan Shahabi, Kamran Chapi, et al. A comparative study between popular statistical and machine learning methods for simulating volume of landslides[J]. Catena, 2017, 157: 213–226.
- [17] 谭冬生, 洪政, 袁小龙, 等. 基于Open GL的滑坡三维可视化计算及动态模拟研究[J]. 铁道工程学报, 2013(8): 57–61, 114.
- [18] HUANG Y, XU Q, XIE P, et al. Run-out analysis of flow-like landslides triggered by the Ms 8.0 2008 Wenchuan earthquake using smoothed particle hydrodynamics[J]. Landslides, 2012, 9(2): 275–283.
- [19] WANG F, Sassa K. Landslide simulation by a geotechnical model combined with a model for apparent friction change[J]. Physics & Chemistry of the Earth Parts A/b/c, 2010, 35(3): 149–161.
- [20] 胡嫚. 土质滑坡SPH运动模型及监测方法研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [21] 王志超, 李大鸣. 基于SPH-DEM流-固耦合算法的滑坡涌浪模拟[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1226–1232.
- [22] 张永柱, 吴剑, 王能永, 等. 基于离散元法的滑坡模拟研究[J]. 山西建筑, 2016, 42(26): 79–81.
- [23] 崔云, 孔纪名, 倪振强, 等. 强降雨在滑坡发育中的关键控制机理及典型实例分析[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 13–17.
- [24] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505–513, 540.
- [25] 罗国坤. 无人机航空遥感系统在应急救援中的应用[J]. 民营科技, 2016(10): 15.
- [26] 陈天博, 胡卓玮, 魏铎, 等. 无人机遥感数据处理与滑坡信息提取[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(5): 692–701.
- [27] 雷添杰, 李长春, 何孝莹. 无人机航空遥感系统在灾害应急救援中的应用[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(1): 178–183.

Research on Landslide Dynamic Visualization Method Driven by UAV Remote Sensing Data

HUANG Pengcheng, ZHU Jun, LI Weilian, ZHOU Letao, HE Qiuling, FU Lin and LU Jintao
(Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: Traditional landslide simulation data acquisition is difficult, and simulation physical mechanism is complex, which is not conducive to media publicity, public safety awareness and rapid disaster emergency response. The rapid development of UAV technology can provide important data support for landslide dynamic visualization. Therefore, this paper will focus on the research of landslide dynamic visualization driven by UAV remote sensing data. By discussing landslide characteristics analysis and information extraction, landslide process calculation method and number under spatial constraint rules. According to the key technologies such as driving landslide visualization method, a fast dynamic simulation method of landslide disaster based on UAV remote sensing data is proposed. A prototype system is developed and a case study is carried out. The experimental results show that the proposed method can quickly and dynamically simulate the landslide evolution process with the support of UAV remote sensing data. It is helpful to provide important theoretical support for emergency disaster, media publicity and public awareness of disaster risk.

Key words: UAV remote sensing; data driven; spatial constraints; landslide process simulation; dynamic visualization