



无人机遥感数据支持下滑坡VR 场景探索分析方法

李维炼^{1,2} 朱 军² 朱秀丽¹ 付 林² 张昀昊²
胡 亚² 何秋玲² 黄鹏诚²

1 国家基础地理信息中心,北京,100830

2 西南交通大学地球科学与环境工程学院,四川 成都,611756

摘 要:滑坡灾害是最常见的地质灾害之一,无人机遥感和虚拟现实(virtual reality,VR)技术的快速发展为滑坡灾害沉浸式模拟与可视化分析提供了重要的数据资源和技术支持。拟重点开展滑坡灾害VR场景动态构建与探索分析研究,探讨了滑坡灾害数据多样化组织、VR场景动态融合表达等关键技术,提出了基于手柄射线的VR场景交互方法,在此基础上进行了原型系统研发与案例试验分析。试验结果表明,所提方法在无人机遥感数据支持下能够动态构建滑坡灾害VR场景,并且能够支持用户沉浸式交互与滑坡灾情信息分析。

关键词:无人机;遥感数据;滑坡灾害;虚拟现实;动态构建;探索分析

中图分类号:P237

文献标志码:A

滑坡灾害是最常见的地质灾害之一,具有突发性强、频率高、危害范围广和时空演变过程复杂等特点^[1-4]。据国家统计局统计数据(<http://data.stats.gov.cn/>),2008—2017年期间,全国共发生地质灾害151 493次,其中滑坡灾害101 993次,发生频率高达67%左右,远远高于泥石流、崩塌和地面塌陷等突发性较强的灾害。2018-10-10,川藏交界金沙江流域发生大规模山体滑坡,堵塞金沙江干流河道,形成堰塞湖,对金沙江下游群众生命财产安全构成极大威胁^[5]。可见,开展滑坡灾害研究对于提升中国滑坡灾害防灾减灾能力具有十分重要的意义。

空-天-地一体化遥感技术的不断发展,使得空间数据的获取能力不断增强,提升了中国在灾害预报、监测、响应和评估等方面的能力^[6-7]。时效性是灾害应急响应的生命,由于滑坡灾害突发性强且危害范围广,滑坡区域遥感数据的快速准确获取成为滑坡灾害应急救援和科学研判的前提和基础^[7-9]。卫星遥感受制于重返周期和天气恶劣等因素的影响,导致其获取的数据时效性不

强且精度不足;地面数据采集往往因灾区环境危险,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范围数据十分困难^[9-10]。因此,上述两种数据采集手段难以直接为滑坡灾害提供应急服务。无人机遥感具有成本低、机动性强、受气候条件影响小等优点,获取的高分辨率和强时效性遥感数据能够用于滑坡灾害响应和灾情评估^[11-13]。无人机遥感影像和数字高程模型(digital elevation model,DEM)能够用于基础地理场景构建,利用灾前灾后影像可以实现滑坡区域的变化对比,基于灾后无人机影像能够提取滑坡范围、方向等信息,利用灾前灾后DEMs数据能够计算滑坡体和堆积体体积。上述信息能够为滑坡灾害时空过程模拟提供必要的输入参数,利用滑坡区域灾前灾后影像还能够提取房屋、道路等专题信息,进而用于灾情损失评估。基于无人机遥感数据构建滑坡灾害虚拟地理环境能够再现滑坡灾害过程,在灾害分析评估、应急研判等方面具有独特的优势^[14-20]。

随着虚拟现实(virtual reality,VR)技术本身

收稿日期:2019-03-08

项目资助:国家重点研发计划(2016YFC0803101);国家自然科学基金(41871289);中央高校基本科研业务费专项资金(2682018CX35);西南交通大学博士研究生创新基金项目。

第一作者:李维炼,博士生,主要从事虚拟地理环境与灾害场景建模研究。vgewilliam@163.com

通讯作者:朱军,博士,教授。vgezj@163.com

以及消费级虚拟现实设备的发展,丰富了虚拟地理环境的表达^[21-24]。滑坡灾害 VR 场景具有沉浸感强、自然式人机交互以及主动感知场景信息等优点,使用户能够更快感知与认知灾害环境^[23,25-28]。然而,基于无人机遥感数据构建沉浸式滑坡灾害 VR 场景依然存在一些难题。与游戏场景不同,滑坡灾害具有突发性,其场景无法预先构建,需要集成基础地理数据、滑坡时空过程模拟数据和专题分析数据动态融合构建滑坡灾害 VR 场景。此外,滑坡灾害 VR 场景不仅需要从宏观尺度上对场景进行整体浏览,而且还要对灾害场景信息进行查询分析,需要设计多种 VR 交互模式,辅助用户主动感知灾害环境和有效获取灾情信息。

因此,本文以无人机遥感数据为基础,利用 VR 技术研究滑坡灾害 VR 场景探索分析方法。

重点探讨了滑坡灾害数据多样化组织、动态融合表达以及交互探索分析等关键技术,以实现用户在滑坡灾害 VR 场景下的沉浸式交互与探索分析。

1 总体研究思路

无人机遥感数据支持下的滑坡灾害 VR 场景动态构建与探索分析总体研究思路如图 1 所示。首先,基于滑坡灾害区域灾前灾后影像和 DEM 进行滑坡灾害信息和专题信息提取;然后,针对不同数据类型进行多样化组织,并在空间语义约束下实现基于各类数据的滑坡灾害 VR 场景融合构建;最后,实现 VR 环境下的滑坡灾害沉浸式探索分析。

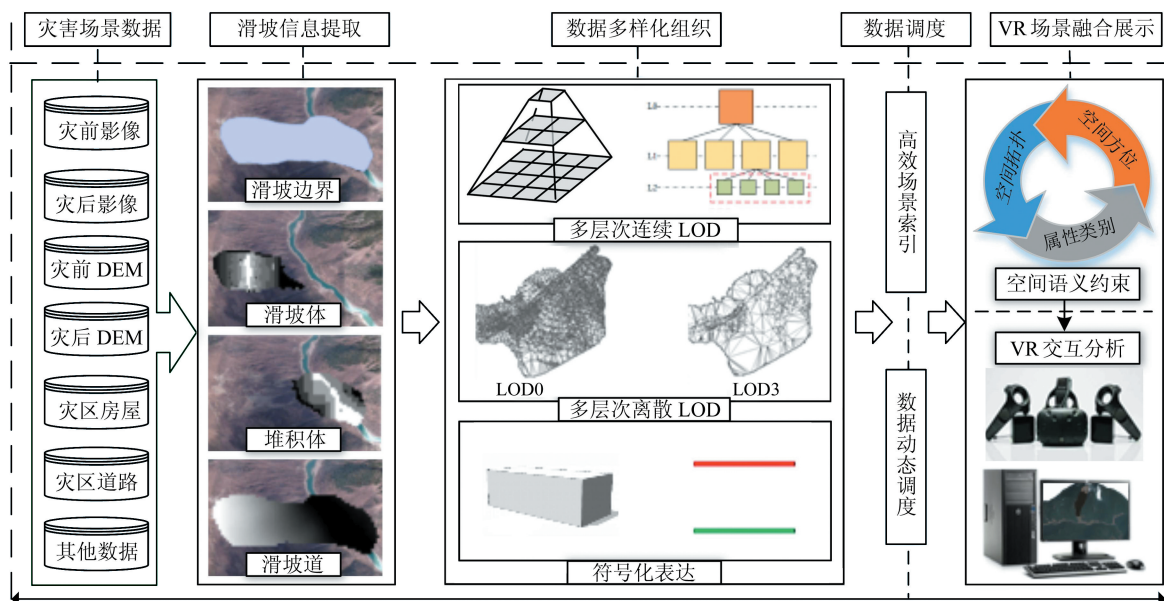


图 1 总体研究思路

Fig. 1 Overall Research Method

2 滑坡 VR 场景动态构建方法

2.1 数据多样化组织

滑坡灾害 VR 场景数据主要包括灾前灾后影像和 DEM、滑坡灾害数据、灾区房屋和道路等专题数据。本文针对上述数据进行了多样化组织,详细思路如图 2 所示。

为了实现地理场景的真实感表达,同时提升大范围地理场景的绘制效率,本文针对遥感影像和 DEM,提出了同一层级多瓦片尺寸连续多细节层次(level of detail, LOD)数据组织方法。当用户视点和方位保持不变时,瓦片数量保持不变,降

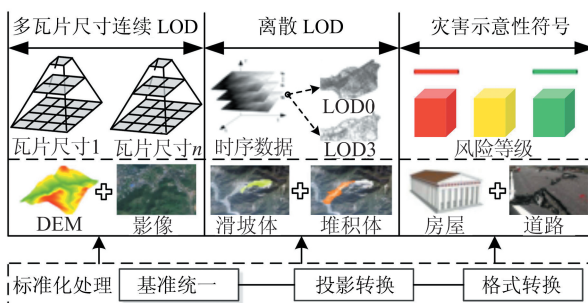


图 2 滑坡灾害 VR 场景数据多样化组织

Fig. 2 Diversified Data Organization of Landslide Disaster VR Scene

低瓦片尺寸能够大幅度降低场景需要绘制的节点数或用于贴图的纹理数据量,从而提升场景绘制

效率。以 DEM 为例,通过降低瓦片尺寸,能够降低绘制的三角形数量,绘制一张瓦片所需要的三角形数量与瓦片尺寸的关系见式(1):

$$N_{\text{delta}} = 2T_{\text{width}}^2 + 8T_{\text{width}} \quad (1)$$

式中, N_{delta} 表示绘制一张瓦片所需的三角形总数; T_{width} 表示瓦片尺寸。当 DEM 瓦片尺寸由 T_{width} 变为 $\frac{T_{\text{width}}}{2}$ 时,三角形总数减少为 $\frac{1}{4}N_{\text{delta}} + 2T_{\text{width}}$,即基本上减少为原来的 1/4。由此可见,降低地形瓦片尺寸,可以大大减少场景所需要绘制的三角形数量。

为实现滑坡灾害时空过程的快速可视化,本文根据灾区影像和 DEM 提取出滑坡边界、滑坡体和堆积体等信息,并通过滑坡边界、运动方向和滑坡总量的共同约束,对滑坡中间过程进行时空插值,得到一系列滑坡过程时序数据。此外,利用文献[14]所述的数据组织优化方法,对滑坡时序数据进行优化,构建了离散 LOD0~LOD3 滑坡时序数据模型。

由于灾害应急过程的响应时间短,高精度、高真实感的房屋和道路数据难以获取,并且丰富的语义信息往往比真实感表达更加重要。本文针对灾区房屋和道路,采用简模搭配预警色进行组织,形成灾害示意性符号,既实现了灾情信息的有效传递,又保证了一定的真实性,辅助进行灾情分析。

2.2 场景动态融合表达

在对滑坡灾害数据进行标准化处理和多样化组织后,如何基于 DEM、遥感影像、滑坡时空过程、灾区房屋和道路等数据快速动态构建一个滑坡 VR 场景就成了关键。本文构建了空间语义约束规则,用来引导和限制各个滑坡场景对象融合,滑坡 VR 场景动态融合表达框架见图 3。

空间方位语义主要包括空间位置和空间姿态,空间方位语义用来处理滑坡灾害对象、灾区建筑和地形模型之间的地理位置配准和姿态表达问题。空间位置分为平面位置和高程位置,其中高程位置可同平面位置一样,在场景对象构建时指定,也可根据其平面位置和地形模型实时计算,本文以经纬度和高程表示模型的空间位置;空间姿态主要包括偏航角、俯仰角、翻滚角,用于匹配模型间的空间姿态。

拓扑空间语义用于约束场景对象之间的拓扑关系,包括相邻、包含和重叠。相邻表示对象 A 与对象 B 有公共面,如建筑底面与地形场景表面;包含表示滑坡边界包含所有滑坡点;重叠表示

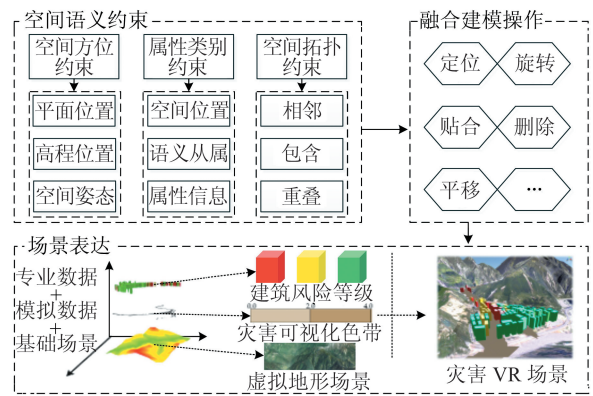


图 3 空间语义约束的滑坡 VR 场景动态构建

Fig. 3 Dynamic Construction of Landslide VR Scene with Spatial Semantic Constraint

自下而上规定模型的组合顺序,例如地形模型最下,滑坡模型和建筑物模型在上。在处理模型与地形相邻贴合的问题上,本文利用模型二维坐标和三维地形模型,实时计算不同 LOD 层级下各灾害模型的三维坐标,以解决模型悬浮和深埋等问题。

滑坡灾害时空过程语义用于约束滑坡从滑坡体到堆积体的时空过程,主要包括滑坡边界、总量和方向 3 个约束条件,如图 4 所示。滑坡边界用于约束从滑坡体到堆积体各个滑坡点的运动范围,删除溢出边界的滑坡点,保证整个滑坡过程在滑坡边界范围内;整个滑坡过程中,滑坡的土方总量恒定,图 4 中 P_{DEM}^1 表示滑坡后体积, P_{DEM}^2 表示滑坡前体积, L_{DEM}^1 表示滑坡体体积, L_{DEM}^2 表示堆积体体积,即滑坡后土方量等于滑坡前土方量减去滑坡体土方量并加上堆积体土方量;滑坡方向约束用于规定滑坡点的方向,以滑坡道中心线为基准,使得滑坡点沿着中心线运动。

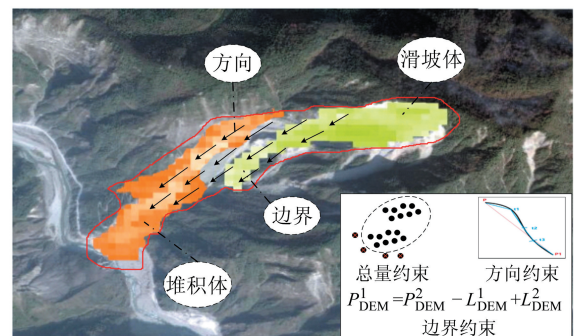


图 4 滑坡时空过程语义约束

Fig. 4 Spatio-Temporal Process Semantic Constraint of Landslide

在上述空间方位、空间拓扑和时空过程语义条件约束下,通过定位、贴合、平滑、删除等融合建

模操作,有效实现了从滑坡灾害概念模型到滑坡灾害 VR 场景的生成。此外,为了在滑坡灾害 VR 场景绘制效率和灾情信息传递有效性之间取得平衡,本文针对部分灾害对象采用特征可视化方法展示。例如,根据建筑物不同受灾等级,采用应急预警色展示。

3 滑坡 VR 场景探索分析方法

3.1 VR 场景交互方法

本文采用基于手柄射线的 VR 交互方法,如图 5 所示,用户利用射线可与场景进行交互分析。首先,由于用户需要头戴 VR 头盔,初次体验时难以快速了解手柄按键功能,因此本文采用图片、文字以及示意性符号等方式对手柄按键功能进行增强提示。然后,通过头盔重力感应实时构建 VR 手柄射线和焦点。最后,通过 VR 手柄射线即可与场景进行常规交互和查询分析。

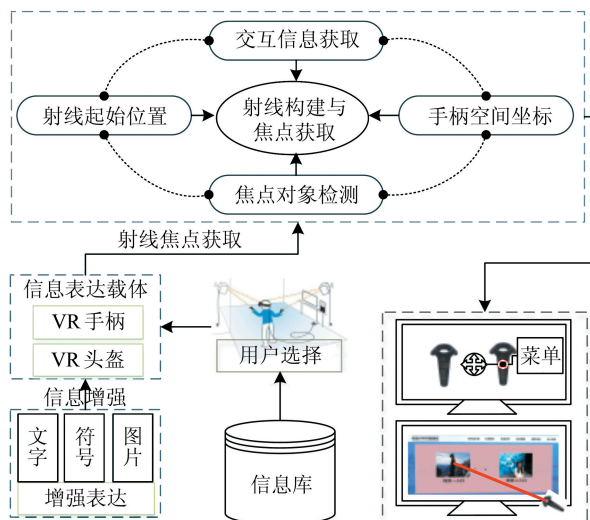


图 5 滑坡灾害 VR 场景用户交互方法

Fig. 5 Method of User Interaction of Landslide Disaster VR Scene

3.2 场景交互探索分析

与小范围 VR 场景不同,滑坡灾害 VR 场景需要高效的漫游交互和探索分析(图 6)。本文设计了俯视鸟瞰、自动漫游、移动行走和平移旋转等多种交互方式对场景进行浏览。俯视鸟瞰使用户从高空位置以俯视视角浏览和感知整个灾害场景,移动行走使用户从地面对灾害场景进行详尽预览以及查询分析,自动漫游沿着预设路径自动浏览整个滑坡灾害 VR 场景。除常规交互以外,用户可以交互控制滑坡的时空演变过程,进而沉浸式感知整个滑坡过程并对比分析滑坡前、中、后

的差异,进而提升用户的灾害风险意识。此外,用户可以对滑坡所涉及的灾情信息(滑坡体、堆积体体积、滑坡范围、风险房屋等)进行交互查询分析,从而辅助科学决策。通过对滑坡灾害 VR 场景的交互探索分析,不仅可以使用户沉浸式感知灾情,而且在提升灾害风险意识的同时,为救援路线规划和科学研判提供决策支持信息。

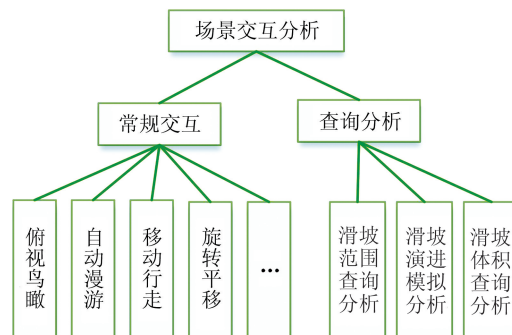


图 6 滑坡灾害 VR 场景探索分析模式

Fig. 6 Exploration and Analysis Mode of Landslide Disaster VR Scene

4 原型系统与案例分析

4.1 案例数据处理与原型系统研发

本文选择 2018-10-10 金沙江特大滑坡灾害作为案例并开展试验分析。此次滑坡灾害导致金沙江干流河道被堵塞形成堰塞湖和洪水,对下游居民生命财产安全构成极大威胁。采用的试验数据包括滑坡前卫星遥感影像和 DEM、滑坡后无人机遥感影像和 DEM、灾区建筑、道路和人口等专题数据。

在数据处理方面,首先对影像和 DEM 进行裁剪和坐标转换,并对其进行切片和优化组织,形成多瓦片尺寸连续 LOD 金字塔模型。然后利用栅格计算、提取分析和栅格镶嵌提取灾区滑坡边界、滑坡体、堆积体和滑坡道,并进行时空插值得出滑坡过程时序数据。对灾区建筑物进行几何拉伸并按照风险等级高中低分别赋予红色、黄色和绿色,对道路按照完好和损毁两个等级分别赋予绿色和红色。

在此基础上,选择 Microsoft Visual Studio 2013. Net 开发环境,采用 C++ 和 OpenScene-Graph 研发了滑坡灾害 VR 场景交互探索分析原型系统。系统运行的试验环境为戴尔 T7610 图形工作站,CPU 为 2x Intel Xeon 5-2760,内存为 64 GB,显卡为 NVIDIA Quadro K5000,操作系统为 Windows7 SP1,VR 交互设备为 HTC VIVE。

4.2 滑坡 VR 场景动态构建与探索分析

4.2.1 场景动态融合表达

本文采用空间方位、空间拓扑和时空过程等语义条件来约束和引导滑坡灾害 VR 场景动态构建过程。在 WGS84 坐标系下,以地形格网单元的坐标值为基础,在空间方位约束下实现滑坡体、堆积体、房屋和道路模型的正确定位,通过构网、姿态计算、赋值加载、纹理映射实现上述对象的组合与建模工作。通过空间拓扑约束实时计算不同的 LOD 地形场景下建筑和道路模型所对应的高程信息,使得不同瓦片层级下的滑坡点、建筑和道路模型不至于悬空或者深

埋,保证各个灾害对象空间拓扑关系的正确表示。在时空过程约束下,能够保证滑坡灾害从滑坡体到堆积体的正确运动过程,防止滑坡点溢出边界和滑坡总量变化,有效地规范整个滑坡的时空运动过程。

图 7(a)至图 7(d)展示了金沙江滑坡灾害 VR 场景融合建模效果,即滑坡前、开始滑坡、滑坡中和滑坡后的整个时空运动过程。图 7(b)中的区域②与图 7(a)中的区域①相比,其高程发生了明显的沉降。图 7(d)中的区域④与图 7(c)中的区域③相比,房屋明显被滑坡堆积体深埋,导致严重受损。

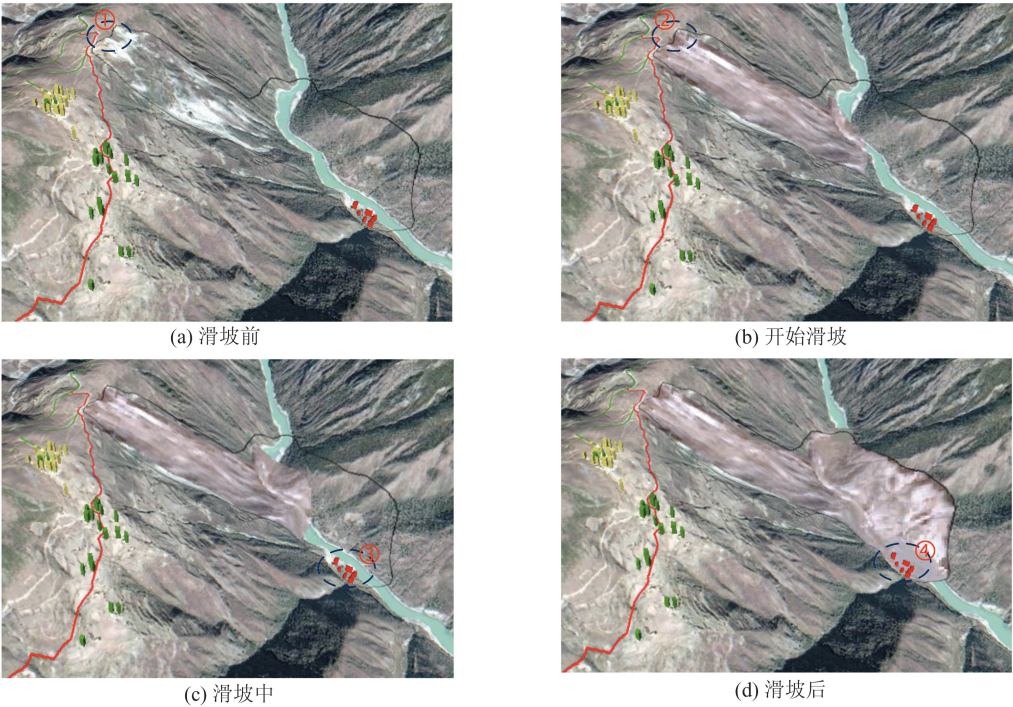


图 7 滑坡灾害 VR 场景融合表达

Fig. 7 Fusion Visualizations of Landslide Disaster VR Scene

4.2.2 场景交互探索分析

用户与滑坡灾害 VR 场景沉浸式交互与灾情查询分析对于提升灾害风险意识与灾害决策具有重要意义。本文中,用户可以通过 VR 手柄射线进行移动行走、自动漫游等常规交互,同样可以查询滑坡范围、滑坡体体积以及滑坡总面积等信息,为救援路径规划和科学研判提供重要决策信息,如图 8 所示。

当滑坡灾害发生时,人民的生命财产安全永远是第一位,所以用户关心的是灾区建筑和道路的受损和掩埋情况。本文采用预警色红、黄和绿分别表示建筑物严重受损、中度受损和轻微受损,并用绿色表示道路畅通,红色表示道路损毁,用户利用手柄射线可查询房屋的受损等级和附属信

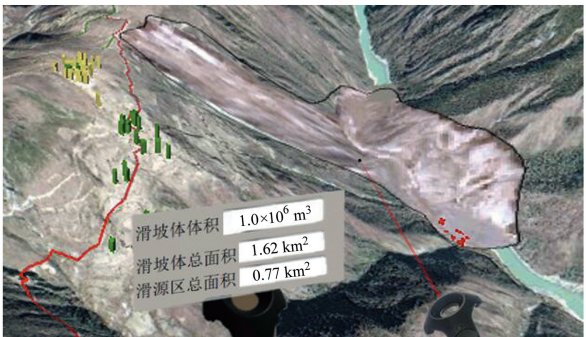


图 8 滑坡灾情信息查询分析

Fig. 8 Query Analysis of Landslide Disaster Information

息,如图 9 所示。

为了支持用户对滑坡灾害 VR 场景进行高效

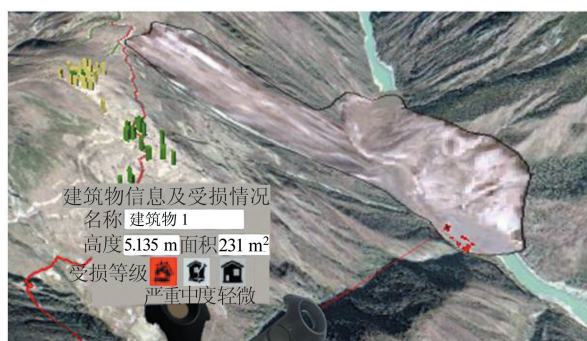


图9 滑坡灾区建筑物信息查询分析

Fig. 9 Query Analysis of Residential Buildings in Landslide Disaster Areas

的探索分析,本文分别测试了滑坡灾害 VR 场景在自动漫游和查询分析两种交互模式下的实时绘制效率,两种模式的平均渲染帧率均高于 90 帧,可以支持用户进行高效的探索分析,如图 10 所示。由于自动漫游是从较高的视点浏览场景,场景加载数据细节层次低,故实时渲染帧率略高于查询分析。

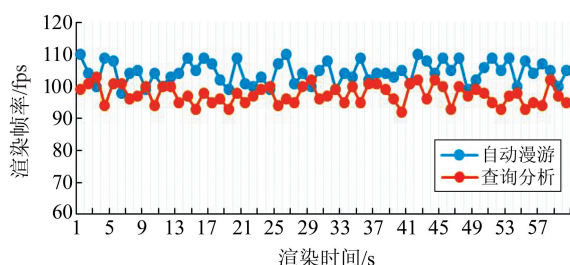


图10 滑坡VR场景探索分析实时渲染效率

Fig. 10 Real-Time Rendering Efficiency of Landslide VR Scene Exploration and Analysis

5 结 语

本文在无人机遥感和虚拟现实技术的双向支持下,重点开展了滑坡灾害 VR 场景动态构建与探索分析研究。通过对灾前灾后遥感数据和专题数据进行多样化组织,为滑坡灾害 VR 场景构建提供了重要的数据支持,同时构建了空间方位、空间拓扑以及时空过程等语义约束规则,用于引导无人机遥感数据下的滑坡灾害 VR 场景动态融合构建,并提出了基于手柄射线的 VR 场景交互方法,实现了用户在滑坡灾害 VR 场景下的沉浸式交互与探索分析。本文研发了滑坡灾害 VR 场景探索分析原型系统并选择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持下能够动态构建滑坡灾害 VR 场景,并且能够支持用户进行沉浸式交互与滑坡灾情信息分析。

在未来的研究中,将在滑坡时空过程可视化的基础上,继续对滑坡导致的堰塞湖以及洪水灾害开展进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Huang Runqiu. Large-Scale Landslides and Their Sliding Mechanisms in China Since the 20th Century [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 433-454(黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454)
- [2] Zhu Qing, Ding Yulin, Miao Shuangxi, et al. Precise Simulation Method for Dynamic Data Driven Landslide Hazards[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(2): 396-403(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] Zhu Qing, Miao Shuangxi, Ding Yulin, et al. Knowledge-Guided Gross Errors Detection and Elimination Approach of Landslide Monitoring Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(4): 496-502(朱庆, 苗双喜, 丁雨淋, 等. 知识引导的滑坡监测数据粗差定位与剔除方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(4): 496-502)
- [4] Cui Peng. Progress and Prospects in Research on Mountain Hazards in China[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(2): 145-152(崔鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题[J]. 地理科学进展, 2014, 33(2): 145-152)
- [5] Xu Qiang, Zheng Guang, Li Weile, et al. Study on Successive Landslide Damming Events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018 [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1 534-1 551(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): 1 534-1 551)
- [6] Li Deren. On Space-Air-Ground Integrated Earth Observation Network[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2012, 14(4): 419-425(李德仁. 论空天地一体化对地观测网络[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(4): 419-425)
- [7] Tong Qingxi, Meng Qingyan, Yang Hang. Development and Prospect of the Remote Sensing Technology[J]. *City and Disaster Reduction*, 2018(6): 2-11(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)

- [8] Sui Haigang. On the Facing Challenge of Real-Time Processing of Remote Sensing Data Under Disaster Emergency Response [J]. *Disaster Reduction in China*, 2013(24): 28-29(眭海刚. 论灾害应急响应遥感数据实时处理面临的挑战[J]. 中国减灾, 2013(24): 28-29)
- [9] Li Deren, Li Ming. Research Advance and Application Prospect of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(5): 505-513,540(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)
- [10] Li Deren, Sui Haigang, Shan Jie. Discussion on Key Technologies of Geographic National Conditions Monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(5): 505-512(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)
- [11] Kelcey J, Lucieir A. Sensor Correction of a 6-Band Multispectral Imaging Sensor for UAV Remote Sensing [J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(5): 1 462-1 493
- [12] Chen Tianbo, Hu Zhuowei, Wei Lai, et al. Data Processing and Landslide Information Extraction Based on UAV Remote Sensing [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(5): 692-701(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)
- [13] Lei Tianjie, Li Changchun, He Xiaoying. Application of Aerial Remote Sensing of Aircraft to Disaster Emergency [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(1): 178-183(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)
- [14] Lin H, Chen M, Lu G N, et al. Virtual Geographic Environments(VGEs): A New Generation of Geographic Analysis Tool [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 126(11): 74-84
- [15] Liu M W, Zhu J, Zhu Q, et al. Optimization of Simulation and Visualization Analysis of Dam-Failure Flood Disaster for Diverse Computing Systems [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2017, 31(9): 1 891-1 906
- [16] Li Y, Gong J, Zhu J, et al. Spatiotemporal Simulation and Risk Analysis of Dam-Break Flooding Based on Cellular Automata [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013, 27(10): 2 043-2 059
- [17] Chen M, Lin H, Kolditz O, et al. Developing Dynamic Virtual Geographic Environments(VGEs) for Geographic Research [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(10): 6 975-6 980
- [18] Yin L Z, Zhu J, Li Y, et al. A Virtual Geographic Environment for Debris Flow Risk Analysis in Residential Areas [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(11): 377
- [19] Evans S Y, Todd M, Baines I, et al. Communicating Flood Risk Through Three-Dimensional Visualization [J]. *Civil Engineering*, 2014, 167(5): 48-55
- [20] Denolle M A, Dunham E M, Prieto G A, et al. Strong Ground Motion Prediction Using Virtual Earthquakes [J]. *Science*, 2014, 343(6 169): 399-403
- [21] Chen M, Lin H. Virtual Geographic Environments (VGEs): Originating from or Beyond Virtual Reality (VR)? [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2018, 11(4): 329-333
- [22] Burdea G C, Coiffet P. Virtual Reality Technology [M]. London: Wiley-Interscience, 1994
- [23] Shen Shen, Gong Jianhua, Li Wenhong, et al. A Comparative Experiment on Spatial Cognition Based on Virtual Travel Behavior [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(11): 1 732-1 738(申申, 龚建华, 李文航, 等. 基于虚拟亲历行为的空间场所认知对比实验研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(11): 1 732-1 738)
- [24] Xu Bingli, Rao Yi, Chen Yuting, et al. Role Model-Based Geo-Collaboration of Virtual Geographic Environments [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(10): 1 580-1 587(徐丙立, 饶毅, 陈宇婷, 等. 使用角色构建虚拟地理环境群体协同方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(10): 1 580-1 587)
- [25] Zhao Qiping. Virtual Reality Review [J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2009, 39(1): 2-46(赵沁平. 虚拟现实综述[J]. 中国科学: 信息科学, 2009, 39(1): 2-46)
- [26] Zhang Fengjun, Dai Guozhong, Peng Xiaolan. Overview of Human-Computer Interaction in Virtual Reality [J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2016, 46(12): 1 711-1 736(张凤军, 戴国忠, 彭晓兰. 虚拟现实的人机交互综述[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(12): 1 711-1 736)
- [27] Biocca F, Levy M R. Communication in the Age of Virtual Reality [M]. Abingdon: Routledge, 2013
- [28] Boulos M N K, Lu Z, Guerrero P, et al. From Urban Planning and Emergency Training to Pokémon Go: Applications of Virtual Reality GIS (VRGIS)

and Augmented Reality GIS (ARGIS) in Personal,
Public and Environmental Health [J]. *International*

Journal of Health Geographics, 2017, 16(7): 1-11

A Exploratory Analysis Method of VR Scene in Landslide Based on UAV Remote Sensing Data

LI Weilian^{1,2} ZHU Jun² ZHU Xiuli¹ FU Lin² ZHANG Yunhao²
HU Ya² HE Qiuling² HUANG Pengcheng²

¹ National Geomatics Center of China, Beijing 100830, China

² Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Abstract: The landslide is one of the most common geological hazards in nature, the rapid development of unmanned aerial vehicle (UAV) technology and virtual reality (VR) technology provides important data resources and technical support for immersive simulation and visual analysis of the landslide. Firstly, this paper focuses on the dynamic construction and exploratory analysis of VR scene in landslide hazard, then some key technologies such as diversified organization of landslide data, dynamic fusion visualization of VR scene are addressed in detail, thus a VR scene interaction method based on handle ray is proposed. Finally, a prototype system is implemented and a case study region is selected for experimental analysis. The experimental results show that the proposed method can dynamically construct landslide VR scene based on UAV remote sensing data, and can support the user to carry out immersive interaction and disaster information analysis.

Key words: UAV; remote sensing data; landslide hazard; virtual reality; dynamic construction; exploratory analysis

First author: LI Weilian, PhD candidate, specializes virtual geographical environment and modeling of disaster scene. E-mail: vgewilliam@163.com

Corresponding author: ZHU Jun, PhD, professor. E-mail: vgezj@163.com

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFC0803101; the National Natural Science Foundation of China, No. 41871289; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2682018CX35; Doctoral Innovation Fund Program of Southwest Jiaotong University.