李宏伟,王博,高南虎.地震灾情场景计算机在线模拟系统设计[J].地震工程学报,2019,41(2):526-531.doi:10.3969/j.issn. 1000-0844.2019.02.526

LI Hongwei, WANG Bo, GAO Nanhu. Design of a Computer Online Simulation System for Earthquake Disaster Scenes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(2):526-531. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.02.526

地震灾情场景计算机在线模拟系统设计

李宏伟1,王 博2,高南虎3

(1. 太原城市职业技术学院,山西太原 030027; 2. 中共厦门市委党校,福建 厦门 361027;3. 山西省大气探测技术保障中心,山西太原 030002)

Design of a Computer Online Simulation System for Earthquake Disaster Scenes

LI Hongwei¹, WANG Bo², GAO Nanhu³

(1. Taiyuan City Vocational College, Taiyuan 030027, Shanxi, China;

2. Xiamen Party Institute of CPC, Xiamen 361027, Fujian, China;

3. Atmospheric Sounding Technology Guarantee Center of Shanxi Province, Taiyuan 030002, Shanxi, China)

Abstract: The traditional large-scale multi-channel seismic simulation system lacks the visual integration of the earthquake disaster scene, and the viewing effect is poor. Thus, a computer online simulation system of earthquake disaster scenes based on GIS was designed for this paper. The system was composed of a data layer, a logic layer, and an application layer. From two aspects of the system level division and software realization, the online simulation of an earthquake disaster scene was developed. According to the GIS data of the research area and the underlying support of the development components, a 3D pixel set model of the buildings at the scene was constructed using the automated integration function of the disaster scene-generating module in the logic layer. A simulated reconstruction of the disaster scene was then realized through determination of the ground motion field and the three-dimensional coordinate transformation. The experimental results

收稿日期:2018-08-13

基金项目:山西省自然科学基金(201701D121055)

第一作者简介:李宏伟(1982-),男,山西太原人,硕士,讲师,研究方向:计算机网络技术。E-mail:lihongwei520@163.com。 通信作者:高南虎(1974-),男,山西太原人,博士,工程师,研究方向:软件工程。

showed that the minimum mean error of the simulated earthquake disaster scene image was only 3.4, and the function and performance of the system could meet actual needs.

Keywords: earthquake; disaster scenario; computer; online simulation; scene integration; GIS

0 引言

当发生破坏性地震后,对现场情况进行快速直 观的了解,是地震地区震后最紧急的工作之一。获 得地震现场的具体信息(位置、分布、生命状态等)是 进行快速救援工作的前提^[1]。但因现实状况的复杂 性,在短时间内获得灾区所有待救人员的具体信息 是非常困难的。且在进行应急指挥调度和全面救援 方案制定时,需要对已有信息进行整合,进而完成模 拟。例如,地震灾害地区各地建筑结构的损坏情况, 哪些地区是待救人员的密集区域。根据这些信息, 才能进行更有效率、质量更高的救援行动^[2]。地震 灾情场景模拟是一种重要的分析和决策工具,对地 震灾情场景进行直观模拟和快速分析,可以为应急 指挥决策和救援工作提供有效的帮助。

通过计算机仿真技术对地震灾情场景和建筑损 坏情况进行模拟,能够预估地震地区建筑的结构损 坏程度和分布状态,当前相关学者也提出过一些比 较好的方法,但都存在一定的缺陷^[3]。例如:文献 [4]设计了大型多道地震物理模拟系统,但未对灾情 场景进行整合,模拟的场景真实度差。文献[5]所设 计的地震模拟振动台扩展系统,不能通过改变模拟 规则对建筑物进行建模,运算复杂,系统性能差。

为了解决上述方法中存在的问题,本文设计基于 GIS 的地震灾情场景计算机在线模拟系统,从总体系统软件层次划分以及软件实现两方面完成灾情场景的在线模拟,满足地震救援工作的实际需要。

1 地震灾情场景计算机在线模拟系统设计

1.1 系统软件层次划分

基于 GIS 的地震灾情场景计算机在线模拟系统,包括数据层、逻辑层和应用层。系统层次划分用 图 1 描述。数据层由地震专用数据库、工程结构数 据数据库、社会经济环境数据库以及城市基本地理 信息数据库构成,这些数据库形成属性数据以及三 维空间数据。逻辑层根据数据层中的属性数据以及三 空间三维数据进行灾情场景生成和场景整合^[6],其 由灾情场景生成模块和灾情场景整合模块构成。应 用层根据逻辑层的灾情场景生成结果,进行地震灾 情影响场分析、工程易损性分析、人员伤亡分析、经 济损失估计,最终制定出减灾规划和对策^[7]。



Fig.1 Hierarchical division diagram of the system

1.2 灾后场景模拟流程设计

系统通过逻辑层中的灾情场景生成模块进行灾情 场景模拟。地震发生后,断层破裂产生的能量会以波 的形式传播,地震波传到地表后经过局部放大形成剧 烈的地面震动^[8]。在地面震动的情况下,建筑、桥梁、 道路等工程结构会受到不同程度的损坏,即视觉上的 灾情场景。与城市规划、虚拟场景漫游不同,地震灾情 场景模拟的关键在于展现地震现场各种物体的损坏状态,特别是建筑物的损坏状态^[9]。因此,地震灾情场景 生成设计不但要采集单个场景元素损坏状态,还要令 场景三维图像的分布满足震害的空间分布规律^[10]。

灾情场景的生成有3种方式:手工、自动和半自动^[11]。基于地震灾害救援工作的实际需求,系统采用自动方式进行地震现场灾前和灾后场景的生成。

灾前场景的生成依靠所研究地区的 GIS 基本 数据和 GIS 开发部件的底层支持。根据建筑物图 层中的几何数据和建筑物的高度信息,运用 3D 建 模方法,能够准确、自动地生成大范围的建筑物三维 几何模型;根据所研究地区的数字高程数据,自动生 成三维地形。

灾后场景的生成依靠震动衰减规律和建筑物震

害预测得到。依据地震基本数据(震中、震源深度、 震级)和地震传播与衰减规律,得到灾区的地震动影 响场^[12]。根据振动前后图像数据差异变化能够判 断地震中受损建筑物的损坏等级。根据建筑物的不 同损坏等级即可构建震后灾情场景约束。灾后场景 设计流程如图 2 所示。



图 2 灾后场景建立流程

Fig.2 Establishment process of post-disaster scenario

1.3 灾情场景整合过程设计

系统采用逻辑层中的灾情场景整合模块经过模 拟命令系统以及模拟编辑系统实现地震灾情场景的 整合^[13]。场景整合包括场景编辑和脚本编辑。灾 情场景整合过程设计如图 3 所示。



图 5 火相吻京堂台 Fig.3 Integration of disaster scene

地震灾情场景整合模块包括模型数据、脚本文 件等,其中场景编辑部分是重要的工具,它们共同组 成一个完整的地震灾情模拟场景^[14]。灾情整合模 块的主要功能是将分散的图像信息组合成完整的三 维图像场景;编译整合后供在线模拟系统使用。

1.4 系统灾前场景的三维模拟

灾前场景三维模拟采用地震区域的 GIS 公共 数据作为数据源^[15]。在 GIS 数据库中,建筑物图层 包括建筑物的平面几何数据和高度信息。根据这两 种数据就可以构建建筑物的三维虚拟模型。把初始 平面多边形点集转化为空间多边形点集,再运用 Construct Extrude 方法把多边形拉伸为立体模型。 图 4 为灾前建筑物场景模拟结果。



图 4 灾前建筑物场景 Fig.4 Building scene before the disaster

1.5 系统灾后场景三维模拟

灾后场景建立是通过地震动场判定和震害预测 方法共同实现的。通过 Form Earthquake 窗口编辑 地震后图像像素变化的基本信息,依据烈度衰减模 型算出每个建筑物所在位置的影响变化烈度;将影 响烈度输入系统,根据建筑物结构类型、建造时间、 高度等因素,估算出每个建筑物的损坏等级,并将数 据存储在场景文件中;检索所有场景文件,形成完整 的灾后场景三维模拟,如图 5 所示。



图 5 灾后建筑物场景 Fig.5 Building scene after the disaster

系统完成一类建筑的模拟,可以在其他区域上 运用相同规则,与其他区域的属性直接连接,关联的 属性会依据区域属性的改变而自动改变,例如建筑 物层数、单元数、震害指数等参数,无需因为建筑物 属性的不同而重新建模。得到地震灾情场景计算机 在线模拟算法如下:

灾害建筑破坏现场提供的图像条件与现场采集 图像完全相同。模拟的点在三维虚拟平面上沿 *x*、 *y*、*z*方向的不平衡转换模拟坐标为*F*_x、*F*_y、*F*_z:

$$\begin{cases} F_x = -\rho v_{\rm S} (v_x^{\rm m} - v_x^{\rm ff}) A + F_x^{\rm ff} \\ F_y = -\rho v_{\rm S} (v_y^{\rm m} - v_y^{\rm ff}) A + F_y^{\rm ff} \\ F_z = -\rho v_{\rm S} (v_z^{\rm m} - v_z^{\rm ff}) A + F_z^{\rm ff} \end{cases}$$
(1)

式中:A 为受到地震影响的破坏区域面积; v_x^m 、 v_y^m 、 v_z^m 表示为虚拟边界像素点沿x、y、z方向的像素变 化速度, $v_x^{\rm ff}$ 、 $v_y^{\rm ff}$ 、 $v_z^{\rm ff}$ 表示自由场边界像素点沿x、y、z方向的像素变化速度; $F_x^{\rm ff}$ 、 $F_y^{\rm ff}$ 、 $F_z^{\rm ff}$ 为自由场单元沿 x、y、z方向的约束条件; ρ 表示震害指数; v_s 表示不 平衡因数。至此建筑物结构震害模拟三维像素转换 完成。

2 实验分析

2.1 城市震害模拟测试实验

将已经编辑完成的建筑物震害模拟规则引入到 需要模拟的实际区域地形中,在3分钟之内就可以 生成地震灾情场景模拟结果。以某城市为例进行模 拟实验。模拟得到的城市整体建模如图6所示,震 害指数为0.7时建筑的破坏状态如图7所示。

从图 6、图 7 可以看到,将本文系统应用到城市 级别地震灾情场景模拟是可行的,模拟结果能够展 现出城市场景震害分布的规律性,并且城市建筑模 型的细节部分也符合实际建筑的情况。

2.2 模拟场景图像精确度验证

实验对本文系统和大型多道地震物理模拟系 统以及地震模拟振动台扩展系统就地震场景模拟



图 6 城市整体建模 Fig.6 Integral modeling of the city



图 7 震害指数为 0.7 时建筑的破坏状态 Fig.7 Damage state of the building with an earthquake damage index of 0.7

图像的精确度进行对比。在三个系统中输入相同的 震害指数,系统根据震害指数对某地区的地震灾情 场景进行模拟,并输出模拟后的场景图像,实验对三 个系统所模拟的场景图像进行 100 次运算,计算不 同标记点模拟图像与实际图像误差的平均值,得到 三个系统模拟场景图像的精确度结果如图 8 所示。 由该图可以看出,相对于其他两种系统,本文系统在 相同标记点的情况下,所模拟的场景图像的最低误 差均值为 3.4,另外两种系统的最低误差均值分别为 4.7、4.9。因此本文系统模拟的地震场景图像具有 较高的精确度。



图 8 三种系统模拟场景图像精确度对比

Fig.8 Comparison between the accuracy of scene images simulated by three systems

2.3 系统功能测试

系统功能测试是为了测试本文系统功能的完成 情况,是否能够满足地震救援工作的需求。因为本 文系统包括数个功能模块,以下只给出主要功能模 块的测试情况,本文系统功能测试结果如表1所列。 由表1可以看出,用户登录、用户注册、场景生成、场 景编辑、救援场景等系统主要功能均通过测试,说明本文系统功能成功实现,能够满足地震灾情场景在 线模拟的需求。

表1 本文系统功能测试结果

Table 1 Function test results of the proposed system

序号	功能模块	测试步骤	测试结果	确认
1	用户登录	进入系统,录入用户名密码,点击登录	登录成功	通过
2	用户注册	进入系统,点击注册,输入所需信息,点击提交	注册成功	通过
3	退出登录	进入个人中心,点击退出登录	退出成功	通过
4	场景生成	进入系统,输入震害指数等所需参数,点击场景生成按钮	成功生成场景图	通过
5	场景编辑	进入系统,点击场景编辑按钮	成功进入场景编辑界面	通过
6	脚本编辑	进入系统,点击脚本编辑按钮	成功进入脚本编辑界面	通过
7	救援场景	进入系统,点击救援场景按钮	成功进入场景救援界面	通过
8	指挥场景	进入系统,点击指挥场景按钮	成功进入指挥场景界面	通过

2.4 系统性能测试

给出系统灾情场景生成模块的性能测试结果

系统性能测试是在不同用户并发数条件下进行的,通过不同的用户并发数量测试系统性能。以下

(表 2)。 由表2可知,在并发用户数为22时,系统最短、

表 2	灾情场景生成模块性能测试结果
	人们动家工场关系在能动的有不

Cable 2 Performance test results of disaster scenario generation methods	odule
--	-------

测试功能	灾情场景生成									
并发用户数运行情况										
并发用户数/个		22	52	103	151	202				
	进入用户数/个	20	51	104	153	203				
	最短响应时间/s	0.233	0.315	0.471	0.675	0.832				
灾情场景生成	最长响应时间/s	0.851	0.925	1.127	1.436	1.868				
	CPU 占用率/%	29.40	38.84	64.72	73.61	81.91				
	内存消耗/M	491	696	958	1 245	1 667				

最长响应时间分别为 0.233 s、0.851 s, CPU 占用率 为 29.40%, 内存消耗为 491 M; 当并发用户数不断 增加, 直到并发用户数为 202 时, 系统最短、最长响 应时间分别为 0.832 s、1.868 s, CPU 占用率为 81.91%, 内存消耗为 1 667 M。可见, 随着并发用户 数量增加, 系统反应时间、CPU 占用率、内存消耗也 随之增加, 系统运行稳定, 未发生逻辑错误, 所得数 据符合正常值, 因此本文系统能够满足地震灾情场 景在线模拟的性能需要。

3 结论

针对我国地震现场救援工作的实际需要,设计 并实现了基于 GIS 技术的地震灾情场景计算机在 线模拟系统。该系统以震区地理信息数据和地震基 本参数作为数据源,能够在短时间内分析和估计震 区建筑结构的损坏程度及其空间分布情况,预判主 要搜救区域,为紧急救援和指挥决策提供有力支持。 所设计的系统采用自动方式进行灾前和灾后场景生 成。经实验验证,系统能够实现地震灾情场景的模 拟,模拟结果能够展现出震害分布的规律性;场景图 像最低误差均值仅为 3.4;系统在用户并发数高达 202 个时,最长响应时间仅为 1.868 s,内存消耗仅为 1 667 M;在高并发用户数下,系统仍然运行稳定,所 设计的系统适合应用到现场救援工作中。

参考文献(References)

- [1] 杨天青,姜立新,董曼,等.基于共享模式的地震灾情集成发布 平台设计与实现[J].震灾防御技术,2016,11(2):375-383.
 YANG Tianqing,JIANG Lixin,DONG Man, et al. Design and Implementation of Integrated Publishing Platform for Earthquake Disaster Based on Shared Mode[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention,2016,11(2):375-383.
- [2] 岳乌云高娃.地震后重建过程中的建筑最低成本分析[J].地震 工程学报,2017,39(6):1150-1155.
 YUE Wuyungaowa. Lowest-cost Analysis of Buildings During Post-earthquake Reconstruction [J]. China Earthquake Engineering Journal,2017,39(6):1150-1155.
- [3] 王东明,朱达邈,李永佳.中国地震灾害损失调查评估培训系统 在线考试子系统的设计与实现[J].地震研究,2015,38(3): 508-516.

WANG Dongming, ZHU Damiao, LI Yongjia. Design and Implementation of Online Examination Subsystem for China Earthquake Disaster Loss Investigation Assessment Training System[J]. Journal of Seismological Research, 2015, 38(3): 508-516.

[4] 王国庆,魏建新,刘伟方,等.大型多道地震物理模拟系统设计 方案及实现[J].岩性油气藏,2016,28(6):95-102.

WANG Guoqing, WEI Jianxin, LIU Weifang, et al. Design of Large-scale Multi-channel Seismic Physical Modeling System and its Implementation[J].Lithologic Reservoirs, 2016, 28(6); 95-102.

- [5] 李青宁,程麦理,尹俊红,等.地震模拟振动台扩展系统理论分析及试验研究[J].振动与冲击,2015,34(7):81-84.
 LI Qingning, CHENG Maili, YIN Junhong, et al. Theoretical and Experimental Analysis on Shaking Table Extended System for Seismic Simulation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015,34(7):81-84.
- [6] 史华.基于复杂网络的建筑物强震下抗毁性估计模型[J].地震 工程学报,2017,39(6):1024-1028.

SHI Hua. Invulnerability Estimation Model of Buildings with Complex Networks under Strong Earthquakes[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(6):1024-1028.

- [7] 严铭姣,肖梅玲,杨旸,等.地震人群疏散动力模型及仿真分析
 [J].云南大学学报(自然科学版),2016,38(2):238-244.
 YAN Mingjiao,XIAO Meiling,YANG Yang, et al. On Seismic Dynamic Model of Crowd Evacuation and the Simulation Analysis[J].Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition),2016,38(2):238-244.
- [8] 李小光,卜方玲,徐新.基于手机加速度计的地震场景分层识别 方法[J].计算机工程与应用,2017,53(6):252-257.
 LI Xiaoguang, BU Fangling, XU Xin. Hierarchical Seismic Scene Recognition Method Based on Mobile Accelerometer[J].
 Computer Engineering and Applications,2017,53(6):252-257.
- [9] 杨笑梅,赖强林.考虑非线性特征及二维效应的日本小田原试 验场地地震动模拟分析[J].地震工程与工程振动,2015,1(6): 34-41.

YANG Xiaomei, LAI Qianglin. The Simulation and Analysis of the Ground Motion at the Test Site, Odawara, Japan Considering the Nonlinear and 2 Dimension Characters[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 1(6): 34-41.

- [10] 张文英,何坤金,张荣丽,等.基于开源场景图形的三维可视化 与信息管理系统设计[J].计算机应用,2016,36(7):2056-2060. ZHANG Wenying, HE Kunjin, ZHANG Rongli, et al.3-D Visualization and Information Management System Design Based on Open Scene Graph[J].Journal of Computer Applications, 2016, 36(7): 2056-2060.
- [11] 崔铁军,马云东,王来贵.地震作用下废弃采空区引起地表沉 降模拟与研究[J].系统仿真学报,2016,28(3):634-639.
 CUI Tiejun, MA Yundong, WANG Laigui.Simulation and Research on Surface Subsidence Caused by Abandoned Goaf Under Earthquake[J].Journal of System Simulation, 2016, 28 (3):634-639.
- [12] 王耀,王桂梅,周结,等.煤矿常见灾害性地质异常体地震正演研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(1):236-241.
 WANG Yao, WANG Guimei, ZHOU Jie, et al. Seismic Forward Modeling of Usual Coal Mine Geological Hazard Body
 [J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017,13(1):236-241.
- [13] 刘舒悦,朱建明,黄钧,等.地震救援中基于信息实时更新的两 阶段应急物资调配模型[J].中国管理科学,2016,24(9):124-132.

LIU Shuyue, ZHU Jianming, HUANG Jun, et al. A Two-stage Operation Model for Emergency Management Based on Information Dynamic Updating In Earthquake Rescue[J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(9):124-132.

- [14] 胡宗达,杨长春,矣雷阳,等.基于非限制性结构的地震动加速 度计仿真设计[J].计算机仿真,2016,33(1):127-132.
 HU Zongda, YANG Changchun, YI Leiyang, et al. Seismic Accelerometer Simulation Design Based on Unconstrained Structure[J].Computer Simulation,2016,33(1):127-132.
- [15] 陈茂源,孙炜,梁野,等.电力二次系统内网安全监视功能的研究与实现[J].江苏电机工程,2014,33(3):31-34.
 CHEN Maoyuarl, SUN Wei, LIANG Ye, et al. Research and Implementation of Power System Secondary Network Security Monitoring [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33 (3):31-34.