

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202409014



基于 SketchUp 和 OSG 的区域建筑 震害模拟三维动态可视化

颜学渊¹, 郑欣颖¹, 刘旭宏², 赵瀚彬¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 针对现有震害模拟可视化方法建模环节存在的不足,设计一种基于 SketchUp 草图大师的区域建筑三维建模方法。该方法解决了传统建模方法中过于依赖原始数据和模型维护困难的问题,实现区域建筑建模的灵活性和模型的可维护性。利用 OSG 三维渲染引擎和 Qt 框架搭建震害模拟三维动态可视化平台,完成区域建筑震害模拟的三维动态可视化。以福建省福州市台江区某区域为例,对该区域进行三维建筑建模和震害模拟结果的动态可视化展示。结果表明:所提建模方法和平台具有可行性。

关键词: 区域建筑三维建模; 三维动态可视化; 震害模拟; 草图大师; OSG 三维渲染引擎

中图分类号: X 43; TP 391.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)01-0038-08

Three-Dimensional Dynamic Visualization of Regional Building Seismic Damage Simulation Base on SketchUp and OSG

YAN Xueyuan¹, ZHENG Xinying¹, LIU Xuhong², ZHAO Hanbin¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A regional building three-dimensional(3D) modeling method based on SketchUp sketch master is designed to solve the shortcomings in the modeling segment of existing seismic damage simulation visualization methods. The method overcomes the problems of traditional modeling methods overdependent on original data and model maintenance difficulties, the flexibility of regional building modeling and the maintainability of the models are achieved. A 3D dynamic visualization platform for seismic damage simulation is constructed using OSG 3D rendering engines and Qt framework, the 3D dynamic visualization of regional building damage simulation is accomplished. Taking Taijiang District, Fuzhou City, Fujian Province as an example, 3D building modeling and dynamic visualization displays of seismic damage outcomes are carried out. The results show that the modeling method and platform are feasible.

Keywords: regional building three-dimensional modeling; three-dimensional dynamic visualization; seismic damage simulation; sketch master; OSG three-dimensional rendering engine

收稿日期: 2024-09-21

通信作者: 颜学渊(1982-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事结构减隔震方面的研究。E-mail:xyx820910@sina.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278490);福建省科技计划项目(2022Y3001, 2023J01343, 2023-K-104, 2023-K-105, 2023-K-109);福建省中青年教育科研资助项目(JAT231056);福建理工大学科技资助项目(GY-Z220228)

目前,中国城市化程度已经达到非常高的水平,大量人口和建筑集中在城镇区域。一旦城镇区域发生地震,势必会造成严重人员伤亡和财产损失^[1]。经验和理论表明,合理的震前规划是城镇区域抗震减灾最为有效的手段之一^[2],而震害模拟可视化技术对建筑震害模拟结果进行可视化展示,可有效评估震害预损失,辅助制定震前规划。因此,利用计算机可视化技术开展震害模拟可视化工作具有十分重要的现实意义。

静态可视化方法^[3-6]采用颜色、破坏纹理贴图、符号化等方式对建筑震害程度进行可视化展示,是当前震害模拟可视化中比较成熟的技术。然而,该方法仅对建筑的震害结果进行静态展示,不能体现震中建筑的实时变化情况 & 震害细节,不具备直观性,致使建筑震害信息不能在震害损失评估及震前规划中被充分利用。因此,需要一种更真实、直观的建筑震害模拟可视化方案。动态可视化方法通过表征在建筑体震害中动态的晃动现象,弥补静态可视化不够直观的缺点,为制定震前规划提供更为直观的依据。

在动态可视化研究中,区域建筑三维建模环节是主要部分,模型的准确度和可维护性将直接影响震害模拟工作的意义与应用价值。目前,基于建筑 2D 数据的竖向拉伸建模法^[1,5-12]是震害模拟可视化研究中应用较多的方法。该方法将现有的建筑 2D 数据作为建模数据源,直接通过建筑轮廓的竖向拉伸完成建模,并利用已有的建筑 2D 数据(数据来源广泛,兼顾经济、快速、批量)建模,十分契合区域建筑震害模拟可视化快速、经济、大批量的建模需求。但这种方法建立的模型真实感不强,且过于依赖建筑 2D 数据的准确性。因此,该方法建立的模型的真实感和准确性往往不尽如人意。目前,研究人员的研究重点大都集中于增强模型的真实感^[1,9-10,13],而对于解决该方法对建筑 2D 数据依赖性的研究较少。在众多建筑建模方法中,基于三维软件的建模法因其建模灵活、简单、兼容性强的优点^[14-17],被广泛应用于建筑建模领域。因此,本文基于 SketchUp 和 OSG 的区域建筑震害模拟三维动态可视化。

1 基于 SketchUp 的区域建筑三维建模

建筑 2D 数据拉伸建模能满足三维模型快速和经济的要求,但存在过于依赖原始建筑 2D 数据、数据更新时间间隔较长、测量误差较大等问题。若数据本身存在错误,将导致建筑模型错误,进而直接影响震害模拟工作的意义与应用价值。为解决此问题,研究在建筑 2D 数据拉伸建模的基础上,结合三维软件建模灵活的优点,引入 SketchUp 三维建模软件,修正拉伸模型中数据不准确的部分,提升模型的准确度和可维护性。以福建省福州市台江区某区域为例,对该区域展开三维建筑建模,验证该方法的可行性。基于 SketchUp 的区域建筑三维建模技术路线图,如图 1 所示。

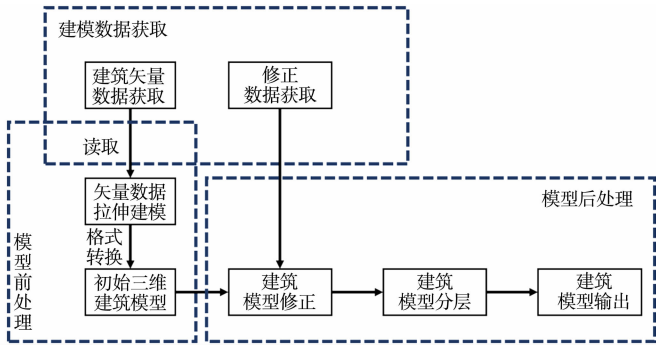


图 1 基于 SketchUp 的区域建筑三维建模技术路线图

Fig. 1 Technical roadmap of regional building 3D modeling based on SketchUp

1.1 建模数据获取

区域建筑三维建模所需要的数据,一部分来源于现有建筑轮廓矢量数据(简称矢量数据),另一部分来源于实地调研测量数据。因此,使用矢量数据作为建模数据的基础来源,用于初步生成建筑三维模型;使用实地调研测量获得的修正数据作为建模数据补充来源,用于错误建筑的修正工作。

矢量数据是一种描述建筑物外部轮廓形状和矢量图形的 2D 数据,通常包括建筑的外形、尺寸、高度、地理坐标和空间关系信息。采用地图软件获取所需矢量数据,获取的同时需将数据转换成 shp (shapfile)格式用于后续处理。矢量数据获取及处理流程图,如图 2 所示。

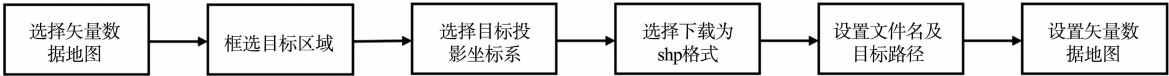


图 2 矢量数据获取及处理流程图

Fig. 2 Flowchart of acquisition and processing of vector data

修正数据采用实地调研测量的方式获取。在实际调研中经常出现道路过于狭窄、测量视线被遮挡等复杂情况(图 3)。因此,需要一种灵活、适应复杂测量情况的测量方案。基于此,选用手持激光测距仪(测距仪)和数显电子角尺(电子角尺)作为距离及角度测量设备,用于获取问题建筑的轮廓、尺寸和相对位置关系信息。调研主要工作如下:1) 测量获取问题建筑的轮廓尺寸、高度、相对关系等数据信息,为后续问题建筑的修正工作提供准确的数据来源;2) 收集并汇总区域内所有建筑的建筑年代、结构类型等基本信息,为后续建筑信息展示提供数据来源。

建筑高度修正前、后效果对比图,如图 4 所示。实地调研数据及信息获取流程图,如图 5 所示。

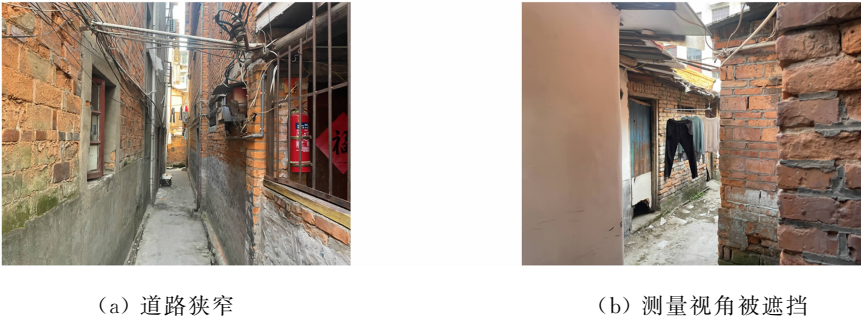


图 3 实地调研的复杂情况

Fig. 3 Complex situations of field research

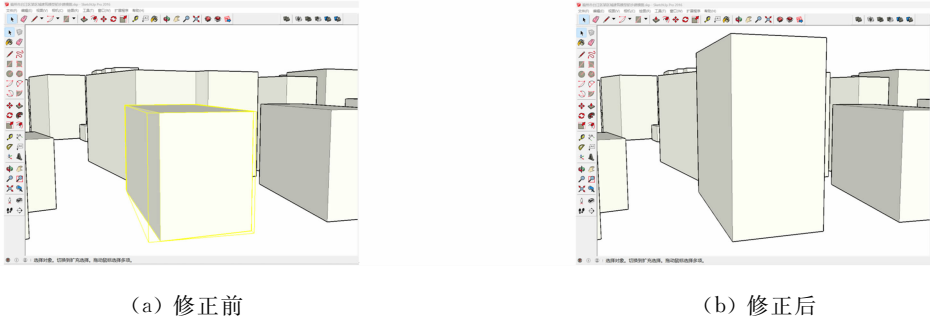


图 4 建筑高度修正前、后效果对比图

Fig. 4 Comparison of effect before and after correction of building depth

1.2 模型处理

模型处理工作分为模型前处理工作和模型后处理工作。前处理工作是利用操作引擎(FME)完成 shp 格式文件的读取、竖向拉伸建模和从 shp 格式到 skp 格式的数据转换工作,建立区域的初始三维建筑模型。后处理工作利用 SketchUp 三维建模软件完成,主要包括问题建筑的修正、建筑模型的分层、输出 3 个环节。

在初始建筑三维模型的基础上,利用 SketchUp 和实地调研数据对目标区域问题建筑进行修正,解决基于 2D 建模法过于依赖原始数据的问题,提升建筑模型的准确性,共包括 3 部分。首先,在初始三维建筑模型中,存在由于拆除而不存在的建筑模型,利用 SketchUp 的删除指令,结合实际调研情况,删除多余的问题建筑;其次,对于实际高度与模型数据不同的建筑模型,利用 SketchUp 的移动指令,结合实际调研的建筑高度数据,修正问题建筑的模型高度;最后,对

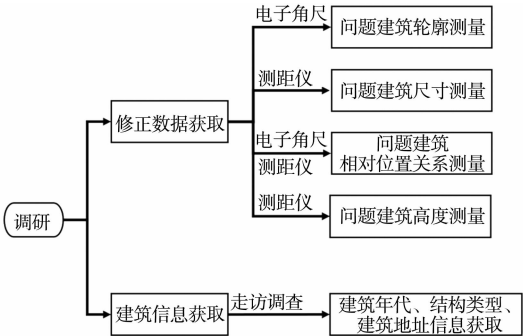


图 5 实地调研数据及信息获取流程图

Fig. 5 Flowchart of acquisition of data and information from field research

于缺失及建筑轮廓错误的建筑模型, 综合利用 SketchUp 的直线、旋转、推拉等各项指令, 结合实际调研的问题建筑轮廓、尺寸、高度、相对关系等信息, 重建缺失及轮廓错误建筑。具体流程有 3 步: 1) 根据问题建筑与现有建筑的相对位置关系对问题建筑进行定位; 2) 根据问题建筑的轮廓和尺寸数据重建问题建筑的 2D 平面轮廓; 3) 根据问题建筑的高度信息拉伸建筑模型完成问题建筑的三维模型重建。示例区域修正前后效果对比如图 6 所示。

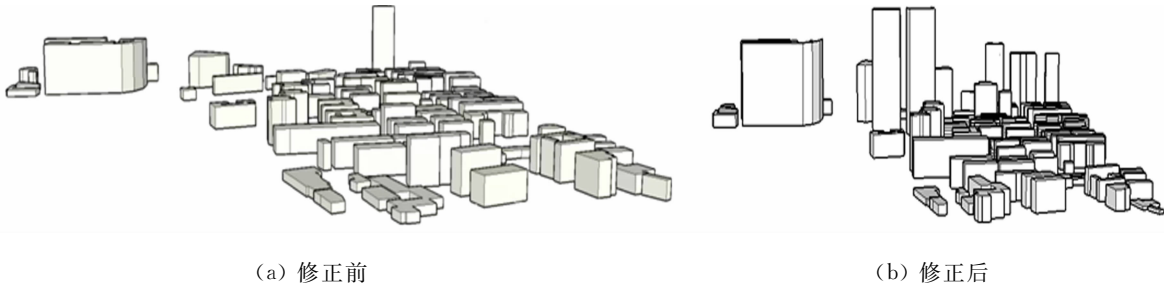


图 6 示例区域修正前、后效果对比图

在修正后建筑三维模型的基础上, 利用 SketchUp 对建筑模型进行分层。SketchUp 交错平面指令实现建筑模型的批量分层工作, 用于配合建筑各层震害时程数据展示建筑各层层间位移, 提升震害模拟三维动态可视化的真实感。

分层后区域建筑局部三维模型效果图, 如图 7 所示。分层后区域建筑三维模型效果图, 如图 8 所示。在分层后建筑三维模型的基础上, 利用 SketchUp 将模型分组、命名并输出为 obj 格式文件, 以便后续导入区域建筑震害模拟三维动态可视化平台进行三维动态渲染。

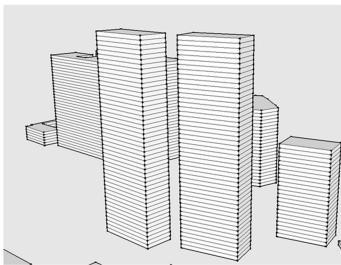


图 7 分层后区域建筑局部三维模型效果图
Fig. 7 Renderings of layered regional building 3D model after stratification

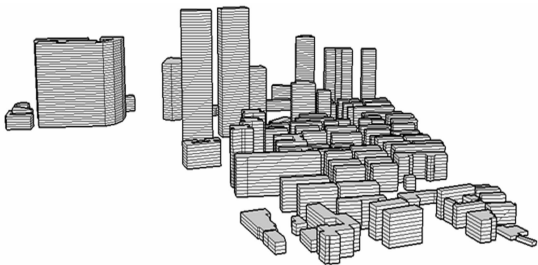


图 8 分层后区域建筑三维模型效果图
Fig. 8 Renderings of regional building 3D model after stratification

2 区域建筑震害模拟三维动态可视化平台

2.1 需求分析及平台框架设计

震害模拟动态可视化可通过更加直观的方式帮助用户获取震害详细信息, 从而助力震前规划。因此, 对震害模拟可视化平台提出了界面简洁、操作简单、实现用户灵活、直观地获取全面的震害模拟信息的需求。基于此, 开发区域建筑震害模拟三维动态可视化平台的架构, 该架构由基于 OSG 的可视化程序框架和基于 Qt 的图形用户界面框架搭建而成^[18]。

2.2 基于 OSG 的震害模拟可视化程序框架

基于 OSG 的震害模拟可视化程序框架总架构, 如图 9 所示。该框架基于 OSG 开源图形引擎搭建, 由匹配模块、三维动态渲染模块、用户操作交互模块组成。

匹配模块负责识别区域建筑三维模型, 与导入的震害模拟时程数据、建筑信息相匹配。震害模拟时程数据主要为层间位移角, 区域建筑信息包括建筑面积、层数、用途、建设年代等。该模块主要基于 OSG 中自带的访问者机制(NodeVisitor)开发, 该机制主要用于对 OSG 场景树中各个节点的访问和执行预定操作。该模块能够遍历区域建筑三维模型中的场景树, 识别每个建筑模型节点, 并执行预定的数据匹配操作, 从而实现建筑模型识别, 以及建筑信、息震害时程数据的匹配。

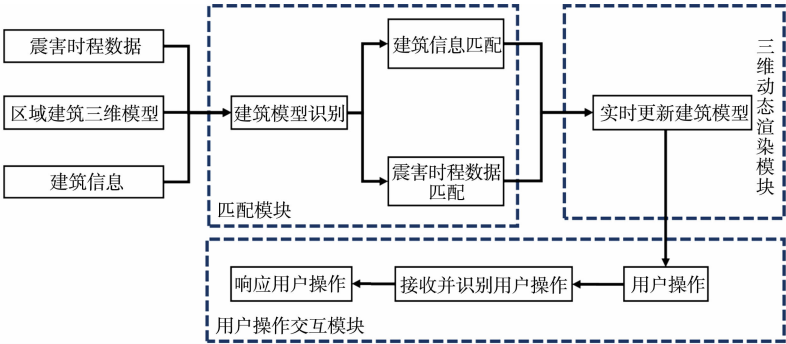


图 9 基于 OSG 的震害模拟可视化程序框架总架构

Fig. 9 Overall structure of seismic disaster simulation visualization program framework based on OSG

三维动态渲染模块根据震害模拟时程数据实时更新建筑模型,绘制建筑震害模拟动画。将区域建筑破坏状态划分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、毁坏 5 个等级。对于多层常规结构^[19],完好状态下应保持弹性状态,并规定弹性位移角限值取 1/550;有轻微塑性变形时,变形应小于 2 倍弹性位移限值;中等破坏状态下的层间位移限值应取弹性限值和弹塑性限值的平均值;严重破坏状态下的层间位移限值应取 90%的不倒塌弹塑性变形限值。因此,将基本完好状态下位移角限值取为 1/550,轻微破坏的位移角限值取 0.004 0,中等破坏下位移角限值取 1/120,严重破坏状态下的位移角限值取 0.016。对于毁坏状态下的位移角限值则取值为 0.033 3^[20]。

位移判定准则,如表 1 所示。表 1 中: θ 为层间位移角建议值。

表 1 位移判定准则

Tab. 1 Displacement determination criteria

破坏等级	θ	建筑展示颜色
基本完好	$0.0018 \leq \theta < 0.0040$	蓝色
轻微破坏	$0.0040 \leq \theta < 0.0083$	绿色
中等破坏	$0.0083 \leq \theta < 0.0160$	黄色
严重破坏	$0.0160 \leq \theta < 0.0330$	紫色
毁坏	$\theta \geq 0.0330$	红色

三维动态渲染模块主要基于 OSG 中自带的更新回调机制(UpdateCallback)开发,该机制主要用于完成需要在每帧绘制时执行的工作。该模块能够在每帧绘制时访问震害时程位移数据,并根据位移数据动态更新建筑模型,通过颜色展示建筑震害,从而实现根据震害模拟时程数据实时更新建筑模型,绘制建筑震害模拟动画。

用户操作交互模块负责接收并响应用户对三维场景操作,实现用户对场景的漫游及建筑信息的浏览功能。该模块主要基于 OSG 中自带的事件更新回调机制(EventCallback)开发,该机制主要完成用户临时定义需要执行的工作。该模块能够接收用户对三维场景的拖拽、缩放等视角操作和单击建筑模型的鼠标操作,并根据操作切换场景照相机视角或弹出建筑信息展示窗口,从而实现三维场景漫游和建筑信息浏览功能。

2.3 基于 Qt 的图形用户界面框架

基于 Qt 的图形用户界面框架总架构,如图 10 所示。该框架基于 Qt 图形用户界面开发框架搭建,由三维场景交互模块、程序数据交互模块和程序窗口界面模块组成。

三维场景交互模块负责将 OSG 三维场景嵌入 Qt 开发的用户界面中。该模块主要基于 Qt 中自带的信号与槽机制和 OSG 中自带的 osgQOpenGLwidget 类开发。其中,信号与槽机制涉及到信号与槽两个概念,前者是指对象发出的事件或状态变化情况的通知;后者是指对象中被用来响应该通知的函数,可以执行特定的操作。二者通过 QObject::connect()函数进行连接,当信号相关联的事件发生时,对象会发出相应的信号,与之连接的槽函数将自动被调用,执行用户自定义的操作。osgQOpenGLwidget 类中添加了 Qt 与 OSG 交互所需的功能与接口。在该模块中,使用 osgQOpenGLwidget 类对象完成三维场景的初始化操作,即准备接收绘制指令并渲染 OSG 三维场景。这时,osgQOpenGLwidget 类

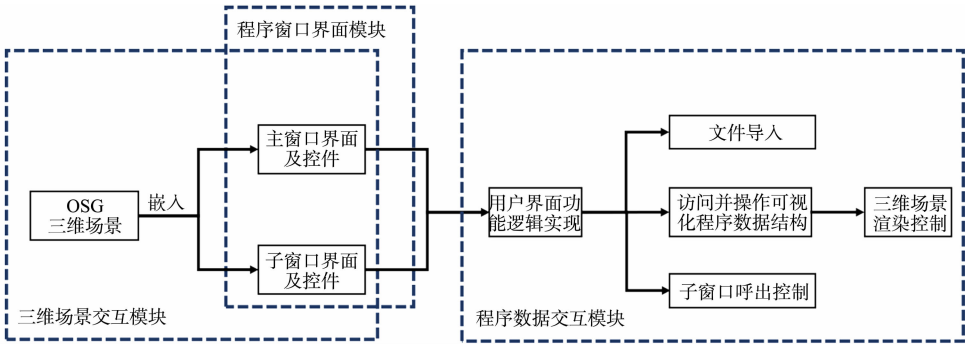


图 10 基于 Qt 的图形用户界面框架总架构

Fig. 10 Overall structure of graphical user interface framework based on Qt

对象会发出初始化完成的信号,并连接到自行设计的槽函数中执行其中三维场景嵌入用户界面的操作,从而实现三维场景与用户界面的交互。

程序数据交互模块负责用户界面功能的逻辑实现和封装用户界面对震害模拟可视化程序框架中数据结构的访问和操作,实现文件导入,以及对三维场景渲染控制和子窗口呼出的控制。该模块主要基于 C++ 的全局变量和信号与槽机制开发。全局变量是指在函数外部定义,可以被本程序所有对象或函数引用的变量。在该模块中,将基于 OSG 的震害模拟可视化程序中需要与用户界面交互的关键变量统一设置为全局变量,并设计用户界面逻辑,实现操作关键全局变量。在用户对界面进行操作时,利用信号与槽机制触发信号,连接槽函数执行其中对全局变量或其余变量的操作。

程序窗口界面模块负责绘制程序所需的主窗口和子窗口的用户界面及其控件。该模块主要基于 Qt 中自带的 QWidget 类及其子类开发。在该模块中,设计主窗口和子窗口的用户界面及其控件,并绘制其布局。

3 示例及平台介绍

选取福建省福州市台江区某区域为示例,使用区域建筑震害模拟三维动态可视化平台对该区域进行震害模拟结果的三维动态可视化展示,验证该可视化平台的可行性。

3.1 示例区域概述

福州市台江区共有 100 余栋多高层城市建筑,涵盖了包括钢筋混凝土结构、砖混结构、底部框架上部砖混结构在内的多种结构类型,覆盖范围广泛,具有很强的普适性和参考价值。

3.2 平台环境概述

区域建筑震害模拟三维动态可视化平台的开发和运行借助 Visual Studio 集成开发环境(IDE)、OSG 等软件和 CPU、显卡等硬件的配合。平台开发环境,如表 2 所示。

表 2 三维动态可视化平台开发环境

Tab. 2 Development environment for 3D dynamic visualization platform

软件名称	版本	硬件名称	设备参数
Visual Studio	VS2019	CPU	i7-12700H
OSG	3.6.5	操作系统	Windows11 x64
Qt	5.15.2	显卡	RTX3060 Laptop
—	—	内存	16 GB

3.3 平台功能介绍

区域建筑震害模拟三维动态可视化平台功能包括文件导入模块、渲染控制模块和建筑信息展示模块。其中,文件导入模块负责导入和解析平台展示所需的区域建筑三维模型文件、震害模拟时程数据和区域建筑信息文件;渲染控制模块负责控制渲染的开始与暂停、渲染的帧率及不同的震害动画展示模式;建筑信息展示模块负责展示具体建筑的建造年代、建筑类型、震害程度等信息。各模块的控制界面,如图 11~14 所示。

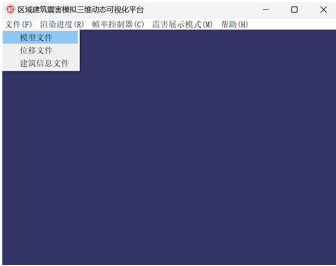


图 11 文件导入界面

Fig. 11 Interface of file import

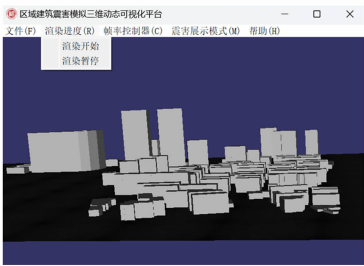
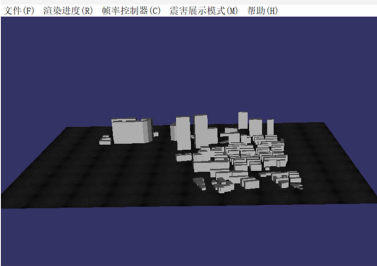
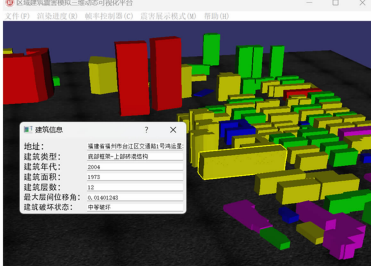


图 12 渲染进度控制界面

Fig. 12 Interface of rendering progress control



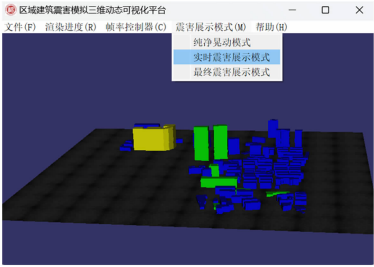
(a) 区域模型展示模式



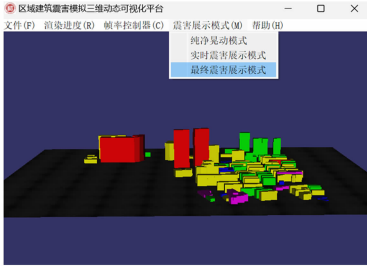
(b) 建筑信息展示模式

图 13 区域模型图

Fig. 13 Regional model



(a) 实时震害展示模式



(b) 最终震害展示模式

图 14 震害模拟画面图

Fig. 14 Seismic damage simulation

4 结论

基于 SketchUp 三维软件、OSG 开源图形引擎和 Qt 图形用户界面开发框架,实现区域建筑的三维建模和其震害模拟结果的三维动态可视化展示,并对福州市台江区某区域建筑的震害模拟结果进行三维动态可视化展示。

- 1) 提出基于 SketchUp 的区域建筑三维建模方法。该方法解决了传统震害模拟可视化建模方法中过于依赖原始数据和模型更新维护困难的问题,实现高效、经济、灵活、精确、轻量的区域建筑三维建模,适用于区域建筑震害模拟结果的三维动态可视化展示。
- 2) 开发区域建筑震害模拟三维动态可视化平台。该平台界面简洁,操作简单,能够全面展示区域建筑震害的过程,辅助用户更加灵活、直观地获取区域建筑震害信息。
- 3) 研究结果能够用于震前规划制定、震后救灾开展和地震安全教育等方面工作,为提高城镇区域建筑韧性和抗震减灾工作提供技术支持。

参考文献:

[1] 许镇,陆新征,韩博,等. 城市区域建筑震害高真实度模拟[J]. 土木工程学报,2014,47(7):46-52. DOI:10.15951/j.tmgcx.2014.07.032.

[2] 张鹏程. 村镇区域砌体结构信息智能获取与震害预测[D]. 大连:大连理工大学,2021. DOI:10.26991/d.cnki.gdllu.

- 2021.000477.
- [3] 陈相兆,孙柏涛,李芸芸,等. 基于 CityEngine 的城市建筑群三维震害模拟研究[J]. 地震工程与工程振动,2018,38(4):93-99. DOI:10.13197/j. eeev. 2018. 04. 93. chenxz. 014.
- [4] ÖZSOYÖ A E,SANRI K I,ÜNEN H C. Visualization of seismic vulnerability of buildings with the use of a mobile data transmission and an automated GIS-based tool[J]. Structures,2020,24:50-58. DOI:10.1016/j. istruc. 2020. 01. 004.
- [5] ZHAI Yongmei,CHEN Shenglong. A seismic hazard prediction system for urban buildings based on time-history analysis[J]. Mathematical Problems in Engineering,2020,2020:1-18. DOI:10.1155/2020/7367434.
- [6] ZHAI Yongmei,CHEN Shenglong,OUYANG Qianwen. GIS-based seismic hazard prediction system for urban earthquake disaster prevention planning[J]. Sustainability,2019,11(9):2620. DOI:10.3390/su11092620.
- [7] HORI M,ICHIMURA T,KOKETSU K,*et al.* Current state of integrated earthquake simulation for earthquake hazard and disaster[J]. Journal of Seismology,2008,12(2):307-321. DOI:10.1007/s10950-007-9083-x.
- [8] 韩博,陆新征,许镇,等. 基于高性能 GPU 计算的城市建筑群震害模拟[J]. 自然灾害学报,2012,21(5):6-22. DOI:10.13577/j. jnd. 2012. 0503.
- [9] 孙柏涛. 城市震害三维模拟系统的实现方法[J]. 地震工程与工程振动,2010,30(5):1-8. DOI:10.13197/j. eeev. 2010. 05. 001.
- [10] 王东明,陈敬一,高杰. 基于地震巨灾情景构建的应急救援演练虚拟仿真系统架构与设计[J]. 自然灾害学报,2021,30(4):18-34. DOI:10.13577/j. jnd. 2021. 0403.
- [11] 张灿. 基于地震动参数的城市建筑震害情景构建[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所,2022. DOI:10.27491/d.cnki. gzdl. 2022. 000016.
- [12] 王可鑫. 基于基督城震害和精细化仿真的城市抗震韧性研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2020. DOI:10.27490/d.cnki. ggjgy. 2020. 000052.
- [13] 陆新征,田源,许镇,等. 一种新型城市地震灾害模拟方法:城市抗震弹塑性分析方法[J]. 科学通报,2020,65(11):1055-1062. DOI:10.1360/TB-2019-0679.
- [14] BARTONEK D,BUDAY M. Problems of creation and usage of 3D model of structures and theirs possible solution[J]. Symmetry,2020,12(1):181. DOI:10.3390/sym12010181.
- [15] 许捍卫,房晓亮,任家勇,等. 基于 SketchUp 的城市三维建模技术[J]. 测绘科学,2011,36(1):213-214.
- [16] 谷彦斐,徐泮林,丁鹏文,等. 基于 SketchUp 与 ArcGIS 的数字校园设计与实现[J]. 测绘与空间地理信息,2019,42(9):148-150.
- [17] 单杰,李志鑫,张文元. 大规模三维城市建模进展[J]. 测绘学报,2019,48(12):1523-1541.
- [18] 李昌明,李东年,赵正旭,等. 基于 OSG 与 Qt 的 FAST 三维场景仿真[J]. 计算机应用与软件,2022,39(2):1-5,62.
- [19] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范:GB 50011-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [20] 清华大学、西南交通大学、北京交通大学土木工程结构专家组. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报,2008,29(4):1-9. DOI:10.14006/j. jzjgxb. 2008. 04. 001.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)