

# 耦合 LOD1.3 模型与人口大数据的城市应急疏散模拟研究

郭翠翠

新疆疆海测绘科技有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i6.2368

**[摘要]** 针对传统城市应急疏散模拟中空间形态表征粗糙、人口动态特征刻画不足的问题,提出耦合 LOD1.3 三维城市模型和人口大数据的模拟方法。利用 LOD1.3 模型准确提取出建筑轮廓、道路网络等空间要素,再结合手机信令、POI 等人口数据建立动态人口分布模型,从而实现空间和人口的双向驱动疏散仿真。以某核心城区为实证区,模拟地震场景下的疏散过程,结果表明该方法可以明显提高疏散时间预测精度和路径规划合理性,给城市应急管理决策提供更加精准的技术支撑。

**[关键词]** LOD1.3 模型; 人口大数据; 应急疏散模拟; 空间-人口耦合

**中图分类号:** U642.3+5 **文献标识码:** A

## Research on Urban Emergency Evacuation Simulation Based on Coupled LOD1.3 Model and Population Big Data

Cuicui Guo

Xinjiang Jianghai Surveying and Mapping Technology Co., Ltd.

**[Abstract]** To address the limitations of traditional urban emergency evacuation simulations—such as coarse spatial representation and inadequate characterization of population dynamics—we propose a simulation method that integrates LOD1.3 3D urban models with population big data. The LOD1.3 model accurately extracts spatial elements like building outlines and road networks, while population data from mobile signals and POIs (Points of Interest) are combined to establish a dynamic population distribution model. This approach enables bidirectional evacuation simulation driven by both spatial and demographic factors. Using a core urban area as a case study, the earthquake evacuation simulation demonstrates that this method significantly improves the accuracy of evacuation time predictions and the rationality of route planning, providing more precise technical support for urban emergency management decision-making.

**[Key words]** LOD1.3 model; population big data; emergency evacuation simulation; space-population coupling

### 引言

城市化进程造成人口和建筑的聚集,突发事件的安全风险也越来越大,高效的应急疏散是城市安全保障的重要部分。传统的疏散模拟用二维空间数据和静态人口数据,难以有效地刻画微观空间特征和时段性人口流动,造成较大的模拟误差。LOD1.3 模型能够准确地表达空间信息,人口大数据可以实时地反映出人口的时空变化,两者相结合可以达到空间和人口特征精准匹配的目的,克服传统技术的瓶颈。本文从空间和人口两个角度出发,探索耦合技术路径和仿真框架,实证检验其有效性,给城市应急疏散管理水平的提高提供新的范式。

### 1 相关研究进展

#### 1.1 城市应急疏散模拟研究现状

国内外应急疏散模拟研究分为静态规划和动态仿真两种主要方法。静态规划以 GIS 为平台,叠加风险区和避难场所、采用

最短路径算法规划路线,但是没有考虑人群交互与交通拥堵动态变化,适用性有限;动态仿真以多智能体 (ABM)、元胞自动机等为方法,可以模拟个体行为和群体效应,提高模拟的真实性,但是现有的动态仿真大多采用简化空间表征,不能精准地量化空间形态对疏散路径的约束作用。

#### 1.2 LOD 模型在应急领域的应用现状

LOD (Level of Detail) 三维城市模型根据精度分为 LOD0、LOD1、LOD2、LOD3、LOD4 五个等级,LOD1.3 模型包含建筑屋顶、墙面、基础轮廓、道路中心线、人行道等要素,平衡了精度和建模效率,在城市规划、灾害评估等领域已经初步使用。在应急领域,现有研究大多用 LOD2 及以上精度模型进行建筑内部疏散模拟,但是高精度模型数据采集成本高、更新周期长,不适合城市尺度的大范围疏散模拟。LOD1.3 模型可以快速获取城市宏观空间格局和微观关键要素,数据更新效率比高精度模型要高,具有

城市尺度疏散模拟的应用潜力,但是目前还没有形成与人口数据深度耦合的技术体系。

### 1.3 人口大数据在疏散模拟中的应用现状

人口数据是疏散模拟的主要输入,传统静态人口数据依靠普查统计,存在更新滞后、空间粒度粗糙等不足,不能满足动态疏散场景的要求。大数据技术的发展给人口监测提供了一条新的途径,手机信令可以反映实时流动轨迹,POI数据可以反映场所人口集聚情况,两者结合可以精准刻画人口时空动态分布。现有的研究虽然尝试利用手机信令数据来改善避难资源配置,但是并未将人口动态特征和空间形态结合起来,使得数据价值无法完全发挥出来。

### 1.4 研究不足与本文创新点

从现有的研究中可以总结出三个核心的不足:一是空间表征精度与应用尺度不匹配,高精度LOD模型很难适应城市大范围的疏散,低精度的空间数据不能满足精准模拟的要求;二是人口数据和空间要素没有耦合起来,没有建立动态的人口分布与空间约束的双向关联机制;三是现有的模拟框架大多侧重于单一要素的优化,缺少“空间-人口”协同驱动的系统设计。本文的创新点在于:①提出LOD1.3模型的适配性应用方案,兼顾疏散模拟的空间精度和计算效率;②建立多源人口大数据融合模型,实现人口时空动态的精准刻画;③建立空间要素提取、人口动态匹配、协同仿真优化的完整框架,实现空间与人口要素的深度耦合。

## 2 耦合LOD1.3模型与人口大数据的疏散模拟框架

### 2.1 核心技术路径

本文构建的疏散模拟框架以“空间精准表征、人口动态刻画、协同仿真优化”为逻辑主线,分为三个主要部分:一是基于LOD1.3模型的空间要素精准提取,建立包含建筑、道路、避难场所等核心要素的三维空间数据库;二是多源人口大数据的融合,建立动态人口时空分布模型,实现人口数量、密度、流动方向的精准匹配;三是耦合仿真模型,把空间约束条件和人口动态特征当作输入,用多智能体算法模拟疏散过程,输出疏散时间、路径拥堵度等核心指标,为疏散策略优化提供依据。

### 2.2 LOD1.3模型构建与空间要素提取

#### 2.2.1 LOD1.3模型数据采集与构建

采用无人机倾斜摄影测量和激光雷达(LiDAR)融合技术采集数据,结合现有的城市规划矢量数据来创建LOD1.3的三维城市模型。数据采集流程为:无人机倾斜摄影得到多角度影像,获取高密度点云数据;用LiDAR技术补充建筑顶部、道路细节信息,提高数据精度;用ContextCapture等建模软件进行点云匹配、纹理映射,生成包含建筑、道路、绿地等要素的LOD1.3模型;结合GIS技术进行坐标校准,保证模型与实际空间精准匹配。模型主要要素为建筑(轮廓、高度、层数)、道路(中心线、宽度、坡度、交叉口)、避难场所(位置、容量、出入口)。

#### 2.2.2 空间约束要素提取

以LOD1.3模型进行空间约束要素提取,为疏散模拟提供基

础参数。使用ArcGIS和Python联合编程来完成要素提取:①道路网络提取:从模型中提取道路中心线,建立道路拓扑网络,计算道路宽度、通行能力等参数,根据坡度数据将道路分为平缓路段和陡坡路段,设置不同的通行速度阈值;②建筑约束提取:提取建筑轮廓得到障碍区域,标注建筑出入口位置作为疏散起点候选,计算建筑间距和遮挡范围,识别疏散通道瓶颈;③避难场所提取:标注公园、广场等避难场所的空间范围,根据场地面积和设施配置计算容纳容量,确定出入口位置和疏散服务半径<sup>[1]</sup>。

### 2.3 人口大数据融合与动态分布建模

#### 2.3.1 数据源选择与预处理

选择手机信令数据、POI数据、人口普查数据作为主要的数据源,进行多源融合预处理。手机信令数据:选择某通信运营商连续7天的信令数据,包含用户ID、时间戳、基站位置等信息,通过数据清洗剔除异常数据(信号漂移、重复记录),根据基站覆盖范围进行用户位置定位;POI数据:采集实证区商业、住宅、办公等类型的POI数据,提取场所类型、营业时间、建筑面积等属性,划分人口集聚等级;人口普查数据:获取街道级静态人口数据,作为动态人口分布模型的基准值。经过数据标准化处理,将不同的格式、不同的尺度的数据转换到同一个空间坐标系下。

#### 2.3.2 动态人口分布模型构建

用时空融合算法来构建动态人口分布模型,从而达到对人口时空动态进行精确刻画的目的。模型分为三个层次:①基础人口分布层,以人口普查数据为基础,结合POI建筑面积和类型,使用空间插值算法生成静态人口密度分布栅格;②动态人口调整层,根据手机信令数据,分析不同时段(工作日早晚高峰、周末)的人口流动轨迹,计算各个区域的人口流入/流出量,建立时段性人口调整系数;③实时人口校正层,将实时交通数据和社交媒体签到数据融合起来,对人口分布做动态校正,提高模型对突发人口流动的适应性。最后输出不同时段、不同空间粒度的动态人口分布数据,给疏散模拟提供准确的人口输入<sup>[2]</sup>。

### 2.4 耦合仿真模型构建

用多智能体ABM算法来建立耦合仿真模型,实现空间约束和人口行为的双向驱动模拟。模型核心设计如下:①智能体定义:将疏散个体定义为智能体,属性包括年龄、性别、移动速度、初始位置、目标避难场所等,根据人口大数据确定智能体数量和属性分布;②空间环境建模:将LOD1.3模型提取的道路网络、建筑障碍等要素转化为智能体可感知的空间环境,设置道路通行能力、障碍物避让规则等约束条件;③行为决策规则:结合心理学、行为学理论设计智能体决策规则,路径选择(基于A\*算法优化最短路径和拥堵规避的平衡),速度调整(根据人群密度动态调整移动速度),互助行为(老弱病残等特殊群体的跟随和协助规则);④耦合机制:建立智能体与空间环境的实时交互机制,智能体在移动过程中实时感知周边空间拥堵状况和道路约束,动态调整疏散策略,同时智能体的集聚状态反作用于空间通行能力,实现空间和人口的动态耦合<sup>[3]</sup>。

### 3 实证研究

#### 3.1 实证区概况

选取某核心城区为实证区,面积约5km<sup>2</sup>,区域内包含商业中心、高密度住宅区、学校、医院等多种功能区,人口密度时空差异大。区域内道路网络密集,但部分老城区道路狭窄,存在疏散瓶颈;目前有3处大型避难场所,分别位于区域东北、西南、东南方向,需要对服务覆盖能力、疏散效率进行评价。以地震灾害作为模拟的场景,将地震发生的时间设定在早高峰时间段内(8:00-9:00),在这段时间内区域内人口高度集中,疏散压力大。

#### 3.2 数据准备与预处理

①LOD1.3模型数据:用无人机倾斜摄影和LiDAR融合技术采集实证区数据,建立LOD1.3模型,分辨率为0.5m,提取道路网络128km、建筑1562栋、避难场所3处,建立空间数据库;②人口大数据:获取某运营商7天手机信令数据(约50万用户)、实证区2345个POI数据、最新人口普查数据,预处理后得到100m×100m粒度的动态人口分布数据,早高峰时段实证区总人口约28万人,核心商业区域人口密度3.2万人/km<sup>2</sup>;③辅助数据:收集区域内道路坡度、交通监控实时数据、避难场所容量等数据,作为模型参数输入。

#### 3.3 模拟过程与参数设置

在NetLogo平台上开发并运行耦合仿真模型,参数设置为:①智能体数量:按照动态人口分布数据生成28万个疏散智能体,其中老年人口(移动速度0.8-1.2m/s)占12%,成年人口(移动速度1.2-1.8m/s)占75%,儿童(移动速度0.6-1.0m/s)占13%;②空间约束参数:道路通行能力按照宽度设定,主干道最大通行速度2.0m/s,次干道1.6m/s,支路1.2m/s,狭窄巷道0.8m/s;③疏散目标:智能体优先选择距离最近的避难场所,如果该场所超容,则自动选择次近场所;④模拟时间:步长设为1s,模拟总时长1800s(30分钟)。同时建立传统二维模型和静态人口数据的对比组,检验耦合模型的优势。

#### 3.4 模拟结果与分析

通过模拟可知,耦合模型测算实证区完全疏散时间24.5分钟,核心商业区、老城区、新建住宅区疏散时间分别为22分钟、19分钟、15分钟,预测误差为8.3%,远优于对比组18.2分钟疏散时间及26.7%误差;另外可以精准地找到商业中心周边的3条支路、老城区2处交叉口等拥堵点;增设临时通道、安排疏导人员后,拥堵时长缩短到4分钟以内,疏散效率提高了32%;还发现了原3处避难场所服务不均衡的问题(东北超容28%、西南利用率62%);分流优化后利用率均衡配置在85%-90%之间,充分证明了耦合模型的实用性。

### 4 结论

本文提出了耦合LOD1.3模型与人口大数据的城市应急疏散模拟方法,建立了空间要素提取、人口动态匹配、协同仿真优化的完整框架。经由实证研究可知,此方法可以准确表现城市空间形态及人口时空动态特性,明显改进疏散模拟的精确度和可信度,同传统方法相比,疏散时间预测误差减小18.4个百分点,能够有效找出疏散瓶颈以及资源配置的不足之处。未来,可以进一步完善智能体行为规则和动态空间响应机制,使模型在更多的灾害场景和城市区域中应用,提高城市整体应急疏散能力。

#### [参考文献]

- [1]王岩,寇立明,蒋远伟.基于Massmotion的城市轨道交通车站客流应急疏散仿真[J].智能城市,2023,9(07):17-19.
- [2]陈伟,汤一鸣,赵军,等.基于手机信令数据的城市尺度地震避难疏散模拟[J].地震研究,2023,46(04):611-621.
- [3]付甜.基于机器学习的城市轨道交通站点客流预测与应急疏散模拟[D].天津职业技术师范大学,2023.

#### 作者简介:

郭翠翠(1998--),女,汉族,河南鄢陵人,本科,地理信息系统工程,初级,从事研究方向:航测遥感。