

基于FLAMEGPU的洪涝应急疏散仿真与应用

姜 恒, 吴 楠, 陈文钊

(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京市 100082)

摘要: 针对极端降雨事件频发导致城市洪涝风险加剧的问题, 传统微观仿真平台在模拟大规模、高精度人员疏散时存在计算效率低、行为模型简化过度等局限。探讨了基于GPU并行计算的FLAMEGPU (flexible large-scale agent modelling environment for graphics processing units) 平台在解决此问题中的应用潜力。首先, 剖析了FLAMEGPU的并行架构及其在智能体建模中的技术优势; 其次, 构建了耦合水动力与行人行为的精细化智能体模型, 该模型综合考虑了人员属性、水深流速对速度的影响、体力衰减、恐慌情绪、涉水失稳概率等行为逻辑; 最后, 以北京市通州副中心交通枢纽站为典型案例, 设计进行仿真验证。结果表明: FLAMEGPU能高效完成万级规模智能体的计算, 仿真时间在可接受范围内。研究验证了FLAMEGPU为解决大规模、高精度的洪涝疏散仿真提供了高效的技术路径, 其仿真成果可为优化城市基础设施应急疏散方案、提升公共安全水平提供量化决策支持。

关键词: 行人仿真; 智能体建模; FLAMEGPU; 应急疏散; 洪水风险

中图分类号: U491

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0250-05

Flooding Emergency Evacuation Simulation and Application Based on FLAMEGPU

JIANG Heng, WU Nan, CHEN Wenzhao

(Beijing Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: In response to the increasing risk of urban flooding and waterlogging risks caused by frequent extreme rainfall events, traditional micro-simulation platforms have the limitations such as low computational efficiency and oversimplified behavioral models when simulating the large-scale and high-precision personnel evacuations. The application potential of the GPU-based parallel computing platform of FLAMEGPU (flexible large-scale agent modelling environment for graphics processing units) in addressing this issue is discussed. Firstly, the parallel architecture of FLAMEGPU and its technical advantages in agent-based modeling are analyzed. Subsequently, a refined agent-based model coupling hydrodynamic and pedestrian behaviors is built, which comprehensively considers the behavioral logics such as the individual attributes, the impact of water depth and flow velocity on movement speed, the physical fatigue, the panic emotion, and the probability of instability when wading through water. Finally, the Tongzhou Sub-Center Transportation Hub Station in Beijing is taken as a case study to design and conduct the simulation verification. The results indicate that FLAMEGPU can efficiently complete the computing of intelligent agents at a scale of tens of thousands, and the simulation time is within an acceptable range, which has verified that FLAMEGPU provides an efficient technical path for solving large-scale and high-precision flooding evacuation simulations. Its simulation outcomes can provide the quantitative decision support for optimizing the emergency evacuation schemes for urban infrastructure and enhancing the public safety levels.

Keywords: pedestrian simulation; agent-based modeling; FLAMEGPU; emergency evacuation; flooding risk

0 引言

行人微观仿真对于提高城市规划、公共安全、建筑设计等多个领域的水平都具有重要意义。行人微

观仿真体现了从微观到宏观的系统思维, 展现了利用计算模型来理解和预测复杂现象的能力^[1]。通过行人微观仿真, 我们能够更好地设计和规划我们的环境, 以应对快速变化的社会和城市发展需求, 但是机场、高铁站、商业综合体等人群高度密集的场所以对行人仿真的规模、速度和精细度提出了前所未有的挑战。传统的、基于中央处理器(CPU)的仿真平台

收稿日期: 2025-12-12

基金项目: 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2022-K-034)

作者简介: 姜恒(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事交通规划设计及研究工作。

在处理成千上万个具有复杂交互行为的微观个体时,常因计算架构的限制而面临严峻的性能瓶颈,计算时间呈指数级增长,甚至无法完成仿真。这一矛盾迫使研究者在“模型规模”、“行为复杂度”和“计算效率”三者之间做出艰难取舍,往往不得不通过过度简化行为模型来换取仿真的可行性,从而导致仿真结果与真实世界的情况产生显著偏差^[2]。

智能体建模(Agent-Based Modeling, ABM)作为一种“自下而上”的建模范式,其理念与行人仿真的内在需求高度契合^[3]。ABM通过定义具有自主性、适应性和交互性的微观个体(智能体)及其行为规则,通过模拟这些个体的并行运作,自底向上地“涌现”出宏观的系统性模式^[4]。然而,经典的ABM实现通常运行在串行或有限并行的CPU上,其计算强度随智能体数量的增加而线性乃至指数增长,这成为制约其在大规模场景中应用的“阿喀琉斯之踵”。近年来,利用图形处理器(GPU)的众核并行架构来加速ABM计算,已成为突破这一瓶颈的重要技术路线。GPU拥有数千个计算核心,专为处理大规模数据并行任务而设计,非常适合于同时运行成千上万个智能体的代码^[5]。

FLAMEGPU(Flexible Large-scale Agent Modelling Environment for Graphics Processing Units)正是这一技术路线上的一个代表性开源平台。它由英国谢菲尔德大学研究团队开发,旨在为复杂系统研究提供一种能够充分利用GPU强大算力的大规模智能体建模环境。行人微观仿真是FLAMEGPU的应用场景之一^[6]。

1 FLAMEGPU平台的技术优势及其在行人仿真中的适用性

1.1 面向大规模并行的核心架构设计

FLAMEGPU与传统ABM平台最根本的区别在于计算范式的转变:从顺序执行到大规模并发^[7]。

1.1.1 智能体函数并行化与线程映射

在FLAMEGPU中,仿真模型的核心是定义一系列agent function(智能体函数),如感知环境、做出决策、更新状态、移动等。仿真运行时,FLAMEGPU引擎会将每一个智能体的实例映射到GPU的一个CUDA线程上。这意味着,在物理层面,成千上万的智能体的同一函数是在GPU的核心上同时执行的。极大地提高了智能体状态更新的吞吐量,是实现超大规模仿真的基石^[8]。

1.1.2 分层状态管理与模拟循环

FLAMEGPU采用结构化的分层状态机来管理仿真流程,通常包括初始化(Init)、模拟循环(Simulation Loop)和输出(Exit)3大阶段。其中,模拟循环是核心,它又被细分为多个有序的、可并行的子阶段。例如,一个典型的循环可能包括:

(1)感知阶段:所有智能体并行地读取环境信息或其他智能体发出的消息。

(2)决策与状态更新阶段:所有智能体根据感知到的信息,并行地执行其行为规则,更新自身内部状态(如速度、目标、恐慌程度等)。

(3)移动阶段:所有智能体根据新的状态,并行地更新其在空间中的位置。

(4)环境更新阶段:并行更新环境状态(如洪水淹没深度)。

这种分阶段的并行确保了计算的有序性,同时每一阶段内部又实现了最大程度的并行化。

1.1.3 基于空间的异步消息传递

智能体间的交互是ABM复杂性的来源。FLAMEGPU提供了一种灵活的消息传递机制。智能体可以将其状态信息(如位置、速度、意图)以“消息”的形式广播到其周围一个自定义的空间范围内。其他智能体在感知阶段可以并行地读取这些消息。这种机制是去中心化和异步的,智能体无需知道其他智能体的具体标识符,只需关心其邻近空间内的信息聚合,这非常符合行人依靠视觉感知局部环境进行决策的真实情况,也为实现复杂的人群自组织现象提供了技术基础^[9]。

1.2 相较于传统仿真平台的核心竞争力

将FLAMEGPU置于现有的仿真工具生态中进行横向对比,其核心竞争力更为凸显。表1从多个维度对其与NetLogo、AnyLogic等平台进行了系统比较。

通过对比可知,FLAMEGPU提供了更高的仿真效率、更自由的智能体定义能力、更便利的数据交换,具有很强的扩展性并且开源免费,非常适合于处理洪涝疏散这类需要耦合物理过程与复杂人类行为的大规模仿真问题。Mohammad Shirvani基于FLAMEGPU开发了一个耦合的洪水-人群交互模拟器,^[10]后来他进一步深化模型,增加行人行为规则的复杂性,^[11]Mohammad Shirvani的研究证明了方案的可行性。

表1 FLAMEGPU与传统仿真平台核心特性对比

特性	FLAMEGPU	其他仿真平台
并行计算能力	基于GPU的并行计算,支持大规模智能体模拟,能显著提高仿真效率	主要基于CPU的计算,对于大规模复杂模型的并行处理能力有限
智能体类型	支持离散和连续智能体的定义,能够模拟从微观到宏观的复杂系统	智能体类型相对固定,通常更适合某种特定类型的仿真模型
动态消息传递	通过动态消息机制,智能体之间可以实时交换信息,增强了模型的动态性和适应性	动态消息传递机制较弱,智能体之间的信息交换通常需要通过全局变量或固定的时间步长
模型验证和测试	提供了丰富的验证工具,支持通过对比实验和实际数据来验证模型的准确性和可靠性	验证工具相对较少,模型的验证过程较为复杂
用户体验和可扩展性	API简洁,易于使用,提供了丰富的文档和示例,方便用户快速上手。同时,支持自定义智能体类型和行为规则,具有很强的扩展性	用户体验因平台而异,部分平台的学习曲线较陡。可扩展性有限,通常需要更复杂的代码修改来实现自定义功能
成本和开源性	开源免费	部分平台开源,部分平台需要购买

2 洪涝疏散精细化模型构建

为实现对洪涝疏散过程的模拟,本研究基于FLAMEGPU构建了一个耦合水动力与行人行为的精细化Agent模型。该模型的核心在于定义了行人智能体及其在洪涝环境下的复杂行为规则。

2.1 智能体的定义和行为规则

在行人ABM中,有两种指定类型的智能体:导航智能体和行人智能体。导航智能体被定义为离散的网格,覆盖研究区域的导航地图。每个导航智能体存储引导和指示一个或多个位于其上的移动行人朝着目的地移动所需的信息,如入口、出口、地形障碍物和墙壁的位置。行人智能体是连续类型的,允许它们在空间和时间上改变坐标。行人智能体在导航网格上移动时,从导航智能体接收引导和方向信息作为消息。

在水动力ABM中,只有一种类型的智能体,即离散的洪水智能体。它们形成一个与导航智能体网格对齐的二维网格。所有洪水智能体中存储的洪水变量状态通过一个水动力学的异步函数进行更新。

水动力ABM和行人ABM之间的耦合是通过导航智能体网格作为中间层实现的,通过消息在两个模型之间传递信息。

智能体的具体属性与行为规则如表2所示。

表2 智能体的属性与行为规则

智能体类型	属性与行为规则
导航智能体(离散)	存储地形信息(入口、出口、障碍物),为行人提供导航信息。
洪水智能体(离散)	存储水深、流速、地形高度和粗糙度等水动力学变量,通过异步函数更新状态。
行人智能体(连续)	具有位置、速度、身高、体重等属性;根据洪水智能体提供的信息(如水深和流速)调整行为(如步行速度和稳定性)。

2.2 正常环境下行人的速度模型

正常环境下行人速度模型比较简单,根据年龄和性别,在速度设定范围内给智能体随机赋予初始行走速度。同时,接受避撞算法的调整。

2.3 涉水环境下行人的速度修正模型

行人在涉水环境中的移动速度主要受以下因素影响:

2.3.1 水深与流速

采用Bernardini等人^[12]提出的经验公式计算涉水速度。

$$v_p = a \cdot M^b \tag{1}$$

$$M = V^2 \cdot \frac{h}{g} + \frac{h^2}{g} \tag{2}$$

式中: v_p 为个体的移动速度,m/s; a 和 b 是与年龄相关参数, h 为洪水的深度,m; V 为洪水的速度,m/s; g 为重力加速度。

2.3.2 体力衰减

在洪水灾害的紧急情况下,人们在疏散过程中往往会感受到逐渐增强的疲劳感和体力消耗,进而影响行人的疏散速度,根据Zheng Y等人^[13]的研究,速度定义如下:

$$\omega = \frac{1.0}{(0.982 + \exp(1.12t - 4.0))} \tag{3}$$

$$v_g = \omega v_p \tag{4}$$

式中: v_g 为行人速度,m/s; ω 为疲劳导致的速度降低的比率; t 为行人疏散时长,s。

2.3.3 情绪因素

恐慌情绪会导致行人速度增加。^[14]根据Bernardini等人^[12]的实验中确定的“最大兴奋条件”,可以对行人智能体应用情绪规则,以增加他们的步行速度。

$$v_m = bv_g \tag{5}$$

式中: v_m 为情绪影响下的行人速度,m/s; b 为情绪影响系数,男性为1.60,女性为1.76。

2.4 涉水环境下行人状态模型

采用危险等级(HR)进行涉水人群的风险统计

分析,使用人体失稳模型判断个体行人的涉水状态。

英国 Department for Environment Food and Rural Affairs 编写的洪水中人体失稳风险评估报告^[15]中采用危险率作为评估洪水中人员危险程度的依据,该公式涉及水深、流速及漂浮物因子,根据计算所得的危险率划分出 4 个洪水危险等级(HR):“低”(0.0<HR<0.75)、“中”(0.75<HR<1.5)、“高”(1.5<HR<2.5)和“严重”(2.5<HR<20)。

$$HR = h \cdot (V + 0.5) \tag{6}$$

式中:V为水流速度,m/s;h为水流深度,m。

行人在洪水中的稳定性是决定其生命安全的关键。夏军强^[16]等人推导出洪水中人体发生滑移/倾倒失稳时的公式。根据评估的 $U_{c滑移}$ 和 $U_{c倾倒}$ 与洪水速度V的大小,判断行人状态。

$$U_{c滑移} = \alpha \left(\frac{h_f}{h_p} \right)^\beta \sqrt{\frac{m_p}{\rho_f h_p h_f} - \left(a_1 \frac{h_f}{h_p} + b_1 \frac{a_1 m_p + b_2}{h_p^2} \right)} \tag{7}$$

$$U_{c倾倒} = \alpha \left(\frac{h_f}{h_p} \right)^\beta \sqrt{\frac{m_p}{\rho_f h_p h_f} - \left(\frac{a_1}{h_p^2} \frac{b_1}{h_p h_f} + \frac{b_1}{h_p h_f} \right) (a_2 m_p + b_2)} \tag{8}$$

式中: $a_1=0.633$, $b_1=0.367$, $a_2=1.015 \times 10^{-3}$, $b_2=-4.937 \times 10^{-3}$; ρ_f 为水体密度,kg/m³; h_f 为水深,m; h_p 为人体身高,m; m_p 为体重,kg。在式(7)中, α 为 7.975, β 为 0.188;在式(8)中, α 为 3.472, β 为 0.018。

3 模型的条件和分析成果

3.1 模拟场景

以通州副中心交通枢纽为例,远期高峰小时人流量约为 7.4 万人,根据步行速度和换乘时间,预估同时在线智能体应为 9 600 人。

3.2 洪水条件确定

研究了四种洪水条件,这些洪水条件是通过固定洪水水量,同时成比例地加倍洪峰流量(Q_{peak})并减半洪水持续时间(t_{inflow})来生成的。具体条件如下:

$$Q_{peak}=160 \text{ m}^3/\text{s}, t_{inflow}=7.5 \text{ min}$$

$$Q_{peak}=80 \text{ m}^3/\text{s}, t_{inflow}=15 \text{ min}$$

$$Q_{peak}=40 \text{ m}^3/\text{s}, t_{inflow}=30 \text{ min}$$

$$Q_{peak}=20 \text{ m}^3/\text{s}, t_{inflow}=60 \text{ min}$$

经过模拟,水量固定的情况下,洪峰流量越大,持续时间越短,最大危险等级(HR)就越高。

$Q_{peak}=160 \text{ m}^3/\text{s}, t_{inflow}=7.5 \text{ min}$ 情况下,最大 HR 在洪水开始的前 10 分钟处于较高范围。作为最坏情况,后续仅针对 $Q_{peak}=160 \text{ m}^3/\text{s}, t_{inflow}=7.5 \text{ min}$ 的洪水条件进行研究。

3.3 分析结果

案例中以地面 1 层为安全区域,疏散开始后所有人员向地面 1 层移动,到达地面 1 层任意一点,视为完成疏散。

仿真结果显示,疏散进行到 300 s 时,总人数的 87.7% 完成疏散,疏散进行到 600 s 时,总人数的 95% 完成疏散,疏散进行到 1 200 s 时,总人数的 95.9% 完成疏散(存在部分行人智能体无法完成疏散,此时视为疏散任务结束)(见图 1)。

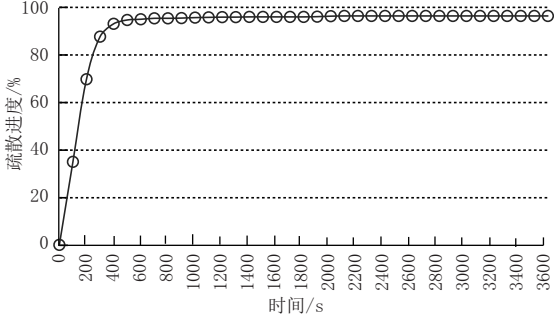


图 1 疏散进度(%)随时间变化

涉水人群主要处于低洪水风险等级,大约在第 100 s 时达到峰值,有 419 人,然后迅速回落,在 300 s 时有 114 人,在 600 s 时有 59 人,在 1 200 s 时有 60 人(见图 2)。

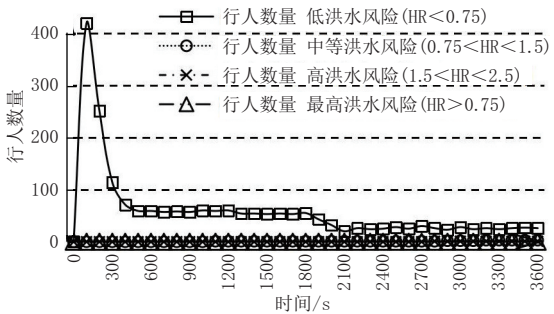


图 2 各洪水风险等级行人数量变化

由于涉水人群主要处于低洪水风险等级,所以处境比较安全。失稳分析显示,在整个仿真过程中也仅出现 4 个面临身体不稳定状态的行人,见图 3。

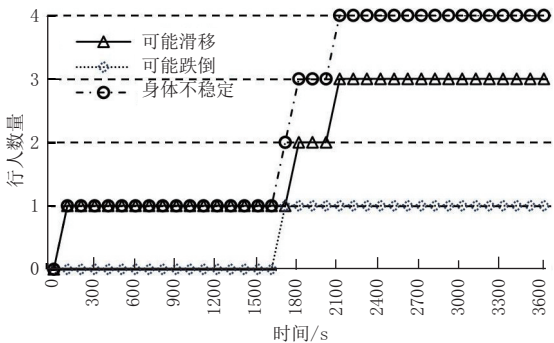


图 3 行人稳定性风险变化

4 结 论

FLAMEGPU 具有先进的架构,能够帮助研究人

员简化开发流程并提升模拟性能。其允许用户灵活定义智能体的属性与行为规则,使智能体反应更加精细和逼近现实,从而有效提高复杂系统模拟的准确性与有效性。因此,FLAMEGPU 特别适合需要处理海量智能体、高行为复杂度以及物理过程耦合的科学计算与工程仿真,在行人仿真、尤其是应急疏散这类对真实性和计算量均有极高要求的场景中表现突出。它的引入使得在可接受时间内运行高保真度模型成为可能,实现了从“粗略预估”到“精细模拟”的重要跨越,展现出广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 郭谨一,刘爽,陈绍宽,等.行人运动仿真研究综述[J].系统仿真学报,2010,22(10):2341-2348.
- [2] 胡明伟,史其信.行人交通仿真模型与相关软件的对比分析[J].交通信息与安全,2009,27(4):122-127.
- [3] 王芳.基于多智能体的地铁火灾和疏散仿真研究[D].北京:北京交通大学,2023.
- [4] 张诗波.基于Agent的行人交通微观仿真建模与分析[D].昆明:昆明理工大学,2007.
- [5] Macal M, North M J. Tutorial on agent-based modeling and simulation [J]. Journal of Simulation, 2010, 4(3): 151-162.
- [6] Twin Karmakharm, Paul Richmond. High-Performance Pedestrian Multi-Simulation Using GPU Cluster[EB/OL]. (2012-3-24) [2025-12-10]. http://developer.download.nvidia.cn/GTC/PDF/GTC2012/Posters/P0442_HighPerformance%20Pedestrian_Karmakharm.pdf
- [7] FLAME GPU Website [EB/OL]. [2025-12-16]. <http://www.flamegpu.com>.
- [8] 白明明.多智能体系统建模、仿真及工程应用研究[D].西安:西安电子科技大学,2012.
- [9] 罗浩.复杂动态环境下的多智能体路径规划[D].深圳:中国科学院大学(中国科学院深圳先进技术研究院),2024.
- [10] Mohammad Shirvani, Georges Kesserwani, Paul Richmond. Agent-based simulator of dynamic flood-people interactions[J]. arXiv: 19D8.05232, 2020(3): 1-26.
- [11] Mohammad Shirvani, Georges Kesserwani and Paul Richmond. Agent-based modelling of pedestrian responses during flood emergency mobility behavioural rules and implications for flood risk analysis[J]. Journal of Hydroinformatics, 2020(7): 1078-1091.
- [12] Bernardini G, Quagliarini E. How to account for the human motion to improve flood risk assessment in urban areas[J]. Water, 2020, 12(5): 1316.
- [13] Zheng Y, Li X G, Jia B, et al. Simulation of pedestrians' evacuation dynamics with underground flood spreading based on cellular automaton[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2019, 94: 149-161.
- [14] 王连震,庄涵颖,王宇萍,等.考虑空间认知能力和恐慌传播的地铁站应急疏散模型[J/OL].交通运输系统工程与信息,1-13 (2025-11-18) [2025-12-18]. <https://link.cnki.net/urlid/11.4520.u.20251114.1921.006>.
- [15] Wallingford H. Flood Risks to People Phase 2, The Flood Risk to People Methodology[J]. Flood and Coastal Defence R&D Programme. Department of the Environment, Flood and Rural Affairs - DEFRA, Londres, UK, 2005, 384.
- [16] 夏军强,吉安川,舒彩文,等.洪水中人体稳定性条件的理论分析及试验研究[J].灾害学,2014,29(3):4-11.
- [17] 姜恒,等.基于FLAMEGPU的洪涝应急疏散仿真与应用[J].城市道桥与防洪,2020(5):1-5;10.
- [18] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司.大挑臂复合截面预应力混凝土节段梁关键技术研究[R].上海:上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2024.
- [19] 邵长宇,王猛,郭济.突破节段梁预制拼装技术瓶颈——大悬臂节段预制复合截面脊骨梁设计[J].桥梁,2019,58(3)48-52.
- [20] 两孔连做节段拼装技术[J].桥梁建设,2018,48(4):98-103.
- [21] 卢永成,邵长宇,王天华.上海长江大桥跨江段桥梁设计[J].桥梁建设,2008(4):1-4;8.
- [22] 吴东升,卢永成,任才.城市高架变宽预制节段梁结构设计与关键技术研究[J].桥梁建设,2021,51(6):99-105.
- [23] 吴东升,卢永成,齐新,等.南昌市洪都大道高架桥节段梁结构设计

(上接第211页)