

8-13-2020

A Common and Hierarchical Crowd Evacuation Simulation Framework

Haibo Lin

School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

Liping Zheng

School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

Jianwei Wang

School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

Shujie Zhang

School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

A Common and Hierarchical Crowd Evacuation Simulation Framework

Abstract

Abstract: In order to establish a highly scalable platform for crowd evacuation simulation visualization, simulate the crowds in different environments on different population evacuation models, the expansion of crowd simulation systems are explored. By analyzing and improving the existing simulation framework Menge, *the level architecture of environment level, strategy level, tactical level, operation level and visualization level are designed, and the expansion interfaces are designed at each level.* In user-defined form, the different modules can be added to each level to achieve specific functions. The simulation framework can effectively support users to design and implement various crowd evacuation simulation experiments, and plays an important role in comparing the differences of different population evacuation models.

Keywords

crowd evacuation, simulation framework, level architecture, modular, menge

Recommended Citation

Lin Haibo, Zheng Liping, Wang Jianwei, Zhang Shujie. A Common and Hierarchical Crowd Evacuation Simulation Framework[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(8): 1524-1530.

一种通用的层次化人群疏散仿真框架

林海波, 郑利平, 王建伟, 张姝洁

(合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为建立一个具备高扩展性的人群疏散仿真可视化统一平台, 对不同人群疏散模型进行动态环境下的人群仿真, 探讨了人群仿真系统的拓展性问题。通过分析并改进现有仿真框架 Menge, 在其基础上设计了环境层、战略层、战术层、操作层和可视化层相结合的层次结构, 并在各层次设计了拓展接口, 以用户自定义的形式添加不同模块来实现各层次具体功能拓展。该仿真框架可以有效支持用户设计并实现各种人群疏散仿真实验, 对比较不同人群疏散仿真模型的差异具有重要作用。

关键词: 人群疏散; 仿真框架; 层次结构; 模块化; menge

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 08-1524-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0839

A Common and Hierarchical Crowd Evacuation Simulation Framework

Lin Haibo, Zheng Liping, Wang Jianwei, Zhang Shujie

(School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to establish a highly scalable platform for crowd evacuation simulation visualization, simulate the crowds in different environments on different population evacuation models, the expansion of crowd simulation systems are explored. By analyzing and improving the existing simulation framework Menge, the level architecture of environment level, strategy level, tactical level, operation level and visualization level are designed, and the expansion interfaces are designed at each level. In user-defined form, the different modules can be added to each level to achieve specific functions. The simulation framework can effectively support users to design and implement various crowd evacuation simulation experiments, and plays an important role in comparing the differences of different population evacuation models.

Keywords: crowd evacuation; simulation framework; level architecture; modular; menge

引言

许多研究者在研究人群仿真技术^[1-2], 不同的研究者研究的侧重点不同, 有的考虑环境熟悉度、团队因素等对人群疏散的影响^[3], 同时依赖

RVO(Reciprocal Velocity Obstacle)算法实现避障行为^[4]; 有的结合影子障碍物, 研究人群的避障算法, 改进 ORCA (optimal reciprocal collision avoidance) 模型^[5-6], 同时需要设置人群的疏散路线。虽然研究方向不同, 但是都必须搭建完整的人群仿真系统, 输入人群仿真场景, 解决人群的路线规划问题, 提供人群的避障算法, 可视化仿真结果^[7]。

为解决这一问题, 本文在 Curtis 等^[8]开发的 Menge 框架基础上, 结合 Schadschneider 等^[9]的行人动力学理论, 分别从战略、战术和操作 3 个层面



收稿日期: 2018-12-17 修回日期: 2019-04-30;
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0800100),
安徽省科技强警项目(1704d0802177);
作者简介: 林海波(1994-), 男, 浙江温州, 硕士生,
研究方向为可视化与仿真; 郑利平(1978-), 男, 湖北
麻城, 博士, 教授, 研究方向为可视化与仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 1524 •

模拟行人的各种行为, 取代了 Menge 以有限状态机(Behavior Finite State Machine, BFSM)模拟人群行为的方式, 更适合进行人群社会行为的仿真, 并新增环境层和可视化层, 形成一种层次化的人群疏散仿真框架。该框架在各层次预留拓展接口, 研究者可根据所研究方向设计自定义模块, 并通过各层次的接口插入系统中, 而在其他层次选择已有算法模块, 以模块重用的形式, 降低人群仿真实验的成本。本框架相对于 Menge 的创新点如下:

- (1) 引入层次化, 更好的支持人群社会行为仿真;
- (2) 仿真场景的动态变化, 支持模拟灾害演变对人群行为的影响;
- (3) 高扩展性, 可通过各层次预留的接口, 添加自定义模块, 实现代码重用。

1 层次化的人群仿真框架

本文针对行人 3 种行为水平设计的 3 层结构, 分别实现了模拟行人全局路线选择行为、心理因素或社会身份影响下的局部路线选择行为和为避免障碍物发生碰撞的避障行为。其次由于灾害发生, 人员疏散的环境复杂多变^[10], 环境因素在人群仿真中起到至关重要的作用, 因此战略层、战术层、操作层的基础上增加了环境层, 专门用于模拟仿真环境, 增加可视化层来实时展示人群仿真结果, 形成一个基于层次结构的人群仿真模块化框架。框架中各层次之间的组织关系如图 1 所示, 各层次的具体功能由插入的具体模块决定。环境层为战略、战

术、操作和可视化层提供环境数据的支持, 战略层为战术层提供全局路线信息, 战术层为操作层提供每一时刻的局部目标点, 操作层为可视化层提供人群每一时刻的位置信息。可视化层将每一时刻的人群位置信息和环境变化信息渲染并展示出来。

1.1 环境层

环境层数据来源于用户在 XML 文件中的定义各种标签, 主要包括定义 Agent 基础属性的 AgentProfile 标签、定义人群初始分布情况的 AgentGroup 标签、定义场景中障碍物分布情况的 ObstacleSet 标签、定义场景拓扑信息的 MapSet 标签。用户需要根据自己的仿真需求, 创建自己的 XML 文件即可。同时通过环境层接口加入环境变化模块可实现自定义环境变化, 模拟现实中灾害演变对人群行为的影响。

1.2 Agent 表征

1.2.1 人群疏散模型数学描述

令 Z 表示疏散环境, 其中 Z_d 表示危险区域, Z_s 表示安全区域。则疏散个体 Agent 所处的物理空间集合为 $Z = Z_d \cup Z_s$ 。个体 Agent 可定义为

$$a_i = (strategy_i, tactics_i, vel_i, pos_i) \quad (1)$$

式中: $strategy_i$ 为个体的战略目标, 即全局路径关键点, 关键点是 Z 中的路口、门、安全区等决定路线走向的节点。 $tactics_i$ 为个体的战术目标, 即个体依据一定规则决定的局部目标。 vel_i 为个体可操作的移动速度, 即不会与障碍物碰撞的速度。 pos_i 为个体每一时刻所处的位置。

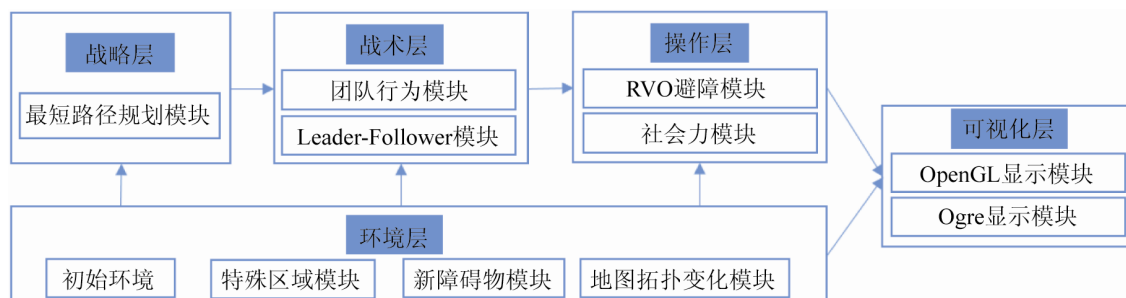


图 1 框架中各层次之间的组织关系

Fig. 1 Organizational relationships between levels in the framework

在 t 时刻, 仿真人群为 $A^t = (a_1^t, a_2^t, \dots, a_n^t)$, 其中 n 为人群数量。根据不同的 pos_i 取值, A^t 中的元素可以分为危险区域中滞留的人员集合 A_d^t 和已经到达安全区域的人员集合 A_s^t 。对于个体 a_i^t 位置 pos_i^t , 若 $pos_i^t \in Z_d$ 即 $a_i^t \in A_d^t$, 则 a_i^t 仍需疏散; 若 $pos_i^t \in Z_s$ 即 $a_i^t \in A_s^t$, 着 a_i^t 已完成疏散。假设 t 时刻有 $a_i^t \in A_d^t$, 仿真的时间步长为 $step$, 则 $t+step$ 时刻的个体位置可以表示为:

$$pos_i^{t+step} = pos_i^t + step * vel_i^t \quad (2)$$

本框架设计了战略层、战术层、操作层, 其核心目的在于支持用户自定义算法, 分步计算 vel_i^t 。其中战略层负责计算 $strategy_i$, $strategy_i$ 不必每一时刻都重新计算; 战术层负责计算 $tactics_i$; 操作层负责计算 vel_i^t 。最后由式(2)计算 pos_i^{t+step} 得到不同时刻的个体位置信息, 实现模拟人群的疏散轨迹。

1.2.2 Agent 层次化属性

本框架将 $strategy_i$, $tactics_i$, vel_i , pos_i 等基础属性定义在 `BaseAgent` 类中的, 另外定义了 `GlobalPlanAgent` 类、`TacticalPlanAgent` 类和 `OperationalPlanAgent` 类作为各层次专有的 Agent 类的父类, 可通过继承对应的 Agent 父类并添加新的 Agent 属性, 构建出新的 Agent 类型, 实现各层次可使用不同的 Agent 属性设计行为模型。

假设战略层使用 Dijkstra 最短路径规划算法为个体规划全局路线, 可为 Agent 添加环境熟悉度属性, 依据环境熟悉度高低, 为 Agent 计算不同的 $strategy_i$, 对于不熟悉环境的个体不做战略规划。同理, 也可在战术层和操作层分别添加专有的 Agent 属性, 使得设计的算法模型更加丰富灵活, 例如在战术层为 Agent 添加团队影响力属性, 依据团队影响力大小, 选出人群中的领导者, 并为 Agent 添加描述恐慌情绪的属性^[11], 据此找出人群中的跟随者, 并将领导当前的位置作为跟随者的战术目标 $tactics_i^t$, 实现由领导带领其他跟随者行动, 跟符合紧急情况下的人群心理状态。或将传统社会力模型^[12-14]中的相关参数作为 Agent 的操作层属性, 实

现个体避障行为的差异性仿真。

1.3 可视化层

可视化层的可显示所有 Agent 的实时位置 pos^t 和环境中障碍物的变化情况, 目前可选择 OpenGL 或 Ogre 作为渲染引擎。

1.4 总体框架

本框架在各层次预留了添加自定义模块的接口, 可添加不同模块, 并以图 2 所示的流程将各模块整合, 进行人群疏散仿真。仿真中, 环境层提供每一时刻的环境信息, 并监听环境变化事件, 再经过战略层、战术层和操作层计算确定下一时刻所有 Agent 的可行速度, 计算出下一时刻的实际位置, 最后可视化层显示环境和人群的位置信息。如此循环, 直到所有 Agent 完成疏散, 结束仿真。

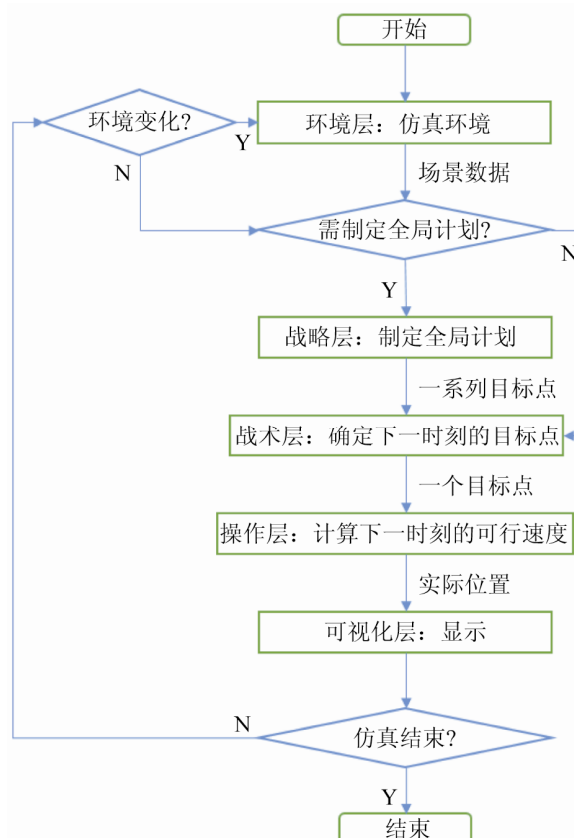


图 2 仿真流程

Fig. 2 Simulating process

2 框架接口说明

为实现高可拓展性, 框架采取模块化设计^[15-16], 使用了工厂模式并提供了 C/C++ 接口, 便于用户添加自定义模块^[17-19], 实现自定义的人群仿真。当用户在模块中创建好需要的子类和子工厂类之后, 只需添加一个能获取子工厂类对象的函数, 并以动态链接库(.dll)的形式导出即可在框架中使用该模块。下面将详细介绍环境层相关类与接口定义, 并简单介绍其他层的主要接口定义。

2.1 环境层

环境层相关类如图 3 所示, 环境变化类的公共父类是 `EnvironmentalChange` 类, 其方法 `getEnvironmentalChange()` 是实现环境变化的接口, 新增的环境变化类需要继承 `EnvironmentalChange` 类, 并实现其中的接口。 `EnvironmentalChangeFactory` 是环境变化工厂类的公共父类, 其方法 `instance()` 用于获取 `EnvironmentalChange` 实例, 对应的子工厂类需要继承工厂父类, 并使用 `_name` 属性作为唯一标识, 通过 `instance()` 方法生成具体的环境变化实例。 `EnvironmentalChange DataBase` 类作为存储环境变化对象的数据库类, 工厂类生成的实例可以通过该类的 `addBuiltins()` 方法添加到该类的 `_factories` 属性中, 仿真过程中可以从 `_factories` 中遍历可用的环境变化对象, 若符合触发条件, 即可实现环境变化。另外导出动态链接库即导出返回子类工厂对象的方法。

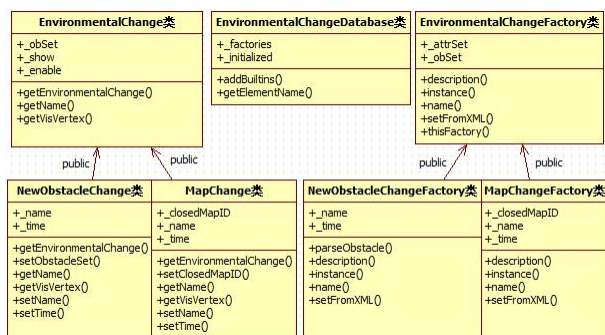


图 3 环境层类图

Fig. 3 Class diagram of environmental level

目前环境层的变化形式有新增障碍物、特殊区域类和道路变化类 3 种, 用户可以自定义环境变化的时机和变化形式。模块中核心的内容就是生成环境变化的接口, 其定义如下:

环境层接口

接口 1: `getEnvironmentalChange`

输入: `connectionMapTemp`: 场景中门的信息

`pathMapTemp`: 场景中的路径信息

`agents`: 所有智能体

`globalTime`: 当前时刻

`obstacleSet`: 接收新增障碍物的指针

返回值: 环境是否变化

功能: 实现动态环境

2.2 Agent 的行为

战略层、战术层和操作层的设计模式与环境层类似, 同样用到的工厂模式和动态链接库, 不再赘述, 下面介绍各层次实现自定义 Agent 行为的接口。

战略层路线规划接口

接口 2: `getGlobalPlan`

输入: `connectionMapTemp`: 场景中门的信息

`pathMapTemp`: 场景中的路径信息

`maps`: 场景中的区域信息

`agentPos`: 智能体的当前位置

返回值: 一组目标点

功能: 用于在战略层添加自定义战略模块, 拓展战略层功能

战术层目标计算接口

接口 3: `computeNextGoal`

输入: `globalGoals`: agent 的全局规划结果

`agent`: 当前需要计算战术目标的个体

`nearAgents`: 附近的智能体

返回值: 一个目标点

功能: 用于在战术添加自定义战术模块, 拓展战术层功能

操作层避障速度计算接口

接口 4: computeNewVelocity

输入: agent: 当前操作的个体

nearAgents: 附近的其他智能体

nearObstacles: 附近的障碍物

TIME_STEP: 时间步长

返回值: 下一时刻的实际位置

功能: 用于在操作层添加自定义避障模块, 拓展操作层功能

本框架在各层次设计了专门用于初始化 Agent 层次化属性的接口, 通过该接口即可定义每个 Agent 具备不同的初始属性值, 接口定义如下:

人群属性初始化接口

接口 3: initAgentInfo

输入: maps: 场景中的区域信息

agents: 全部个体的集合

返回值: 无

功能: 初始化人群的层次化属性信息

2.3 可视化层

可视化层是相对独立, 只需每一时刻都为可视化层提供人群位置数据和场景中障碍物等数据, 即可按照模块的功能将这些数据渲染成对应的图形, 向用户展示仿真结果, 并保证实时刷新。

3 框架及应用

3.1 本框架的开发环境

本框架基于 Windows7 操作系统, 使用 Visual Studio 2015 开发平台, 开发语言为 C++, 并使用 OpenGL 或 Ogre 进行三维仿真场景的渲染。程序运行初始界面如图 4 所示。使用本框架需要先选择仿真实验的场景文件和行为模型。将自定义模块对应的.dll 文件放在指定目录下, 即可在此页面选用。例如图 4 中选择了 nangjing.xml 文件作为仿真场景, 同时分别为战略层、战术层、操作层选择了相应的算法模块, 并且指定了 3 个环境变化事件。

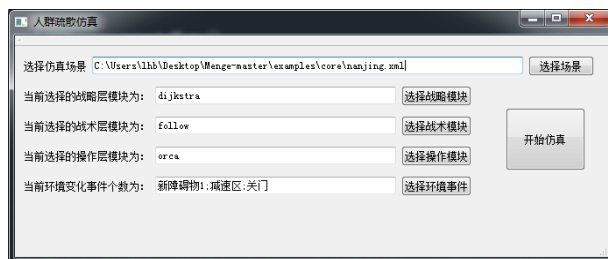


图 4 程序首页

Fig. 4 HomePage

3.2 本框架的案例

在案例中设计了如图 5 所示的仿真场景来模拟应急情况下人群的疏散行为。白线表示场景中的墙, 蓝色的点表示场景中的 Agent。图 5 中额外添加部分标记, 标记①~⑤分别表示各区域之间的门, 其中③和⑤是通往安全区域的门, 3 种不同颜色的箭头标记表示初始状态下 Agent 可能选择的疏散路线。

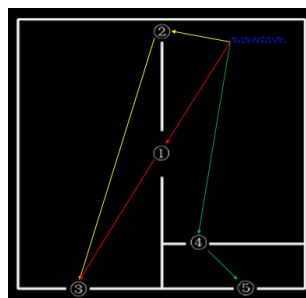


图 5 仿真场景的初始状态图

Fig. 5 Initial state diagram of simulation scene

在战略层选择的模块功能为以 Dijkstra 算法给 Agent 规划最短的疏散路线。在仿真开始时, 根据 Agent 的环境熟悉度, 给环境熟悉度高的个体, 规划最短疏散路线, 而其他个体由于对环境属性程度不足, 不具备获取最短疏散路线的条件, 没有战略层行为^[3]。本案例中初始情况下战略层规划的路线是经过 4 号门, 从右下方的 5 号门离开。

在战术层, 添加了 Follow 模块, 该模块的功能是为部分 Agent 选择跟随目标。在操作层, 选择使用 ORCA 避障模块来实现 Agent 的避障行为, ORCA 算法由 RVO 算法^[4]完善而来。在环境层添加了 3 个模块, 第 1 个在仿真的第 5 时刻, 生成一

一个新的三角形障碍物。第 2 个在仿真的第 10 时刻在①号门周围产生一个减速区域, 当 Agent 通过该区域时会明显减速。第 3 个在仿真的第 15 时刻, 关闭场景中的 4 号门, 此后人群会改变方向, 不再前往 4 号门方向。最后可视化层负责计算并显示 Agent 的位置。整个仿真过程如图 6 所示, 其中图 6(f)是使用 Ogre 渲染的结果图。从图 6 中可看出, 当新障碍出现后, 人群会主动绕开障碍物。当下方的 4 号门关闭后, 人群会及时转向, 前往 1 号门。当经过中心减速区时, 人群因移动速度降低表现出聚拢现象, 离开减速区后又会加速朝出口前进, 最终所有人都从左下方的 3 号门离开, 仿真结束。

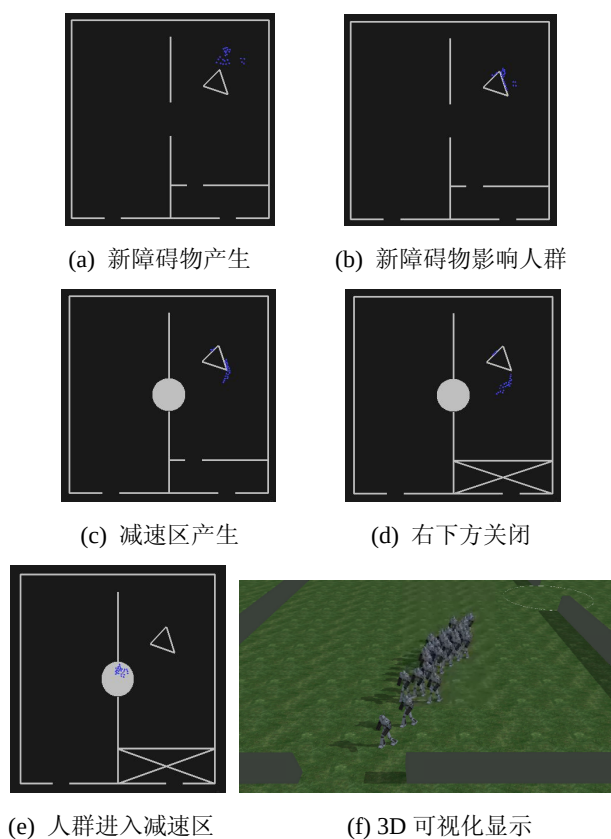


图 6 人群疏散过程图

Fig. 6 Crowd evacuation process

3.3 与 Menge 对比

本节将以使用 Menge 实现上述仿真实验为例详细说明两者的异同点, 如表 1~2 所示, 在仿真环境方面, Menge 无法实现环境的动态变化, 上述案例中的三角形障碍区等环境变化事件, 无法在

Menge 中实现。其次目标点选择方面, Menge 只根据 Agent 当前所处的状态设置不同目标点, 因此需要预设一系列状态和相关状态的转换条件, 并指定 Agent 初始状态, 这种目方式不利于实现需要实时计算目标点的行为。最后在可拓展性方面, 本文在环境层、战略层、战术层、操作层分别设计了相应的接口, 支持用户添加相应功能模块设计自定义的人群疏散仿真实验, 而 Menge 只可选择不同避障算法, 因此本文框架相比 Menge 具备高可拓展性。

表 1 功能对比表

Tab. 1 Functional comparison

框架	仿真场景设计	模拟环境变化	人群疏散模型	可拓展性
Menge	加载 XML 文件	否	不支持社会行为	一般
本框架	加载 XML 文件	是	支持社会行为	高

表 2 实现方式对比表

Tab. 2 Comparison of implementation methods

框架	环境层	战略层	战术层	操作层	可视化层
Menge	静态环境	行为有限状态机		避障算法	Agent
本框架	动态环境	路线规划算法	社会行为	避障算法	Agent, 环境

4 结论

(1) 本文提出的层次化人群疏散仿真框架, 通过各层次的拓展接口可插入相应算法的模块, 通过各模块组合可形成完整的人群疏散仿真实验。

(2) 用户设计的算法模块可逐渐积累, 形成算法库, 提高了代码的重用性, 减少设计仿真实验的工作量。

(3) 通过实验和案例表明, 所提的仿真框架具有较高实用性, 降低了进行人群疏散仿真实验的实现门槛, 提升了仿真实现效率。

参考文献:

- [1] Nasir F M, Sunar M S. A survey on simulating real-time crowd simulation[C]//International Conference on

- Interactive Digital Media. Bali: IEEE, 2016: 1-5.
- [2] 赵巍, 刘畅, 廉兴宇, 等. 人群运动仿真和疏散优化方法设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(3): 523-529.
- Zhao Wei, Liu Chang, Lian Xingyu, et al. Simulation of Crowd Movement and Design and Implementation of Evacuation Optimization Method[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(3): 523-529.
- [3] 邓媛媛. 基于社会行为的疏散仿真方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- Deng Yuanyuan. Research on Evacuation Simulation Method Based on Social Behavior[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [4] Berg Van Den, Lin Ming, Manocha Dinesh. Reciprocal Velocity Obstacles for real-time multi-agent navigation [C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. Kobe: IEEE, 2008.
- [5] 何高奇, 江东旭, 金祎, 等. 结合影子障碍物和 ORCA 模型的人群仿真方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(3): 233-247.
- He Gaoqi, Jiang Dongxu, Jin Yi, et al. Crowd behavior simulation based on shadow obstacle and ORCA models [J]. SCIENTIA SINICA Information, 2018, 48(3): 233-247.
- [6] Jur Van Den Berg, Guy Stephen J, et al. Reciprocal n-body Collision Avoidance[J]. Springer Tracts in Advanced Robotics (S1610-7438), 2011, 70(4): 3-19.
- [7] 曹宁博, 陈永恒, 曲昭伟, 等. 基于社会力模型的行人路径选择模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(2): 352-357.
- Cao Ningbo, Chen Yongheng, Qu Zhaowei, et al. Pedestrian route choice model based on social force model[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(2): 352-357.
- [8] Curtis Sean, Best Andrew, Manocha Dinesh. Menge: A Modular Framework for Simulating Crowd Movement [EB/OL]. [2018-12-17]. <http://gamma.cs.unc.edu/Menge>.
- [9] Schadschneider Andreas, Klingsch Wolfram, et al. Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications[M]. New York: Springer New York, 2011.
- [10] 袁媛, 汪定伟. 灾害扩散实时影响下的应急疏散路径选择模型[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(6): 1563-1566.
- Yuan Yuan, Wang Dingwei. Route Selection Model in Emergency Evacuation under Real Time Effect of Disaster Extension [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(6): 1563-1566.
- [11] 向南, 张明敏, 朱凌云. 动态人群情绪感染并行仿真算法[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(9): 1964-1969.
- Xiang Nan, Zhang Mingmin, Zhu Lingyun. Paralleled Dynamic Crowd Emotion Contagion Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 1964-1969.
- [12] Helbing Dirk, Molnar Peter. Social Force Model for Pedestrian Dynamics[J]. Physical review. e (S1539-3755), 1998, 51(5): 4282.
- [13] 隋杰, 万佳慧, 于华. 基于社会力的应急疏散仿真模型应用研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(6): 1197-1201.
- Sui Jie, Wan Jiahui, Yu Hua. Research on Simulation of Emergency Evacuation Based on Social Force Model[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(6): 1197-1201.
- [14] 黄鹏, 刘箴. 一种面向人群仿真的改进型社会力模型研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(9): 1916-1919.
- Huang Peng, Liu Zhen. Study on Improved Social Force Model for Crowd Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(9): 1916-1919.
- [15] 张纯禹, 马礼伟. 易扩展仿真软件框架的设计、实现与应用[C]//中国 CAE 工程分析技术年会会议. 桂林: CCAC, 2015.
- Zhang Chunyu, Ma Liwei. An Extensible Framework for Engineering Simulation Software: Its Architecture, Implementation and Applications[C]// China CAE Annual Conference (CCAC 2015). Guilin: CCAC, 2015.
- [16] 孙云晨, 刘弘, 张桂娟. 支持跨平台的实时人群运动仿真系统[J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36(4): 862-867.
- Sun Yunchen, Liu Hong, Zhang Guijuan. Cross-platform System for Real-time Crowd Simulation[J] Journal of Chinese Computer Systems, 2015, 36(4): 862-867.
- [17] Best Andrew, Curtis Sean, Kasik David, et al. Ped-Air: A Simulator for Loading, Unloading, and Evacuating Aircraft[J]. Transportation Research Procedia (S2352-1465), 2014, 2: 273-281.
- [18] Shoulson Alexander, Marshak Nathan, Kapadia Mubbasir, et al. ADAPT: the agent development and prototyping testbed[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics (S1077-2626), 2014, 20(7): 1035-1047.
- [19] 张学锋, 白晨曦. 双层教学楼人员疏散仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(5): 1070-1076.
- Zhang Xuefeng, Bai Chenxi. Study of Crowd Evacuation in Two-Story Teaching Building[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(5): 1070-1076.