

12-16-2020

Multi-Agent Behavior Simulation for Metro Station Passenger

Zequn Li

1. College of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; ;

Fengting Yan

1. College of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; ;

Zhicai Shi

1. College of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; ;4. Shanghai Key Laboratory of Integrated Administration Technologies for Information Security, Shanghai 201620, China;

Yumei Jian

1. College of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; ;

See next page for additional authors

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.

Multi-Agent Behavior Simulation for Metro Station Passenger

Abstract

Abstract: Metro station is a typical public place with large crowd density. The characteristics of crowd behavior and the guidance based on the characteristics of crowd behavior can effectively train the crowd for emergency evacuation. *Adopting the method of multi-agent and characteristics by measuring station building scene, analyzing the influence factors of passenger behavior characteristics, based on the passenger conformity rule, the single-agent passenger route choice behavior model is established. The multiple agents behavioral decision system in the virtual metro stations is established, the WebVR experiment is used to research the influencing factors of passenger herd behavior and decision-making behavior, which provides a theoretical basis for the emergency evacuation strategy during peak periods, and effectively alleviates crowd congestion in metro stations.*

Keywords

Multi-Agent, WebVR metro station, Passengers' behavior, Emergency decision

Authors

Zequn Li, Fengting Yan, Zhicai Shi, Yumei Jian, Changhua Hua, Yongzhan Si, and Xiang Yang

Recommended Citation

Li Zequn, Yan Fengting, Shi Zhicai, Jian Yumei, Hua Changhua, Si Yongzhan, Xiang Yang. Multi-Agent Behavior Simulation for Metro Station Passenger[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(12): 2341-2352.

基于多智能体的虚拟化地铁站乘客行为仿真

李泽群¹, 闫丰亭¹, 史志才^{1,4}, 简玉梅¹, 花常花², 司勇占³, 项阳¹

(1. 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620; 2. 上海立信会计金融学院 工商管理学院, 上海 201620;
3. 日照职业技术学院 通用航空学院, 山东 日照 276800; 4. 上海市信息安全综合管理技术研究重点实验室, 上海 200240)

摘要: 地铁站是典型的人群密度大的公共场所, 根据人群行为特点以及基于人群行为特点的引导, 可以有效培训人群应急疏散。采用多智能体的方法, 通过度量地铁站建筑场景特点, 分析乘客行为特征的影响因素, 基于乘客从众心理规律, 提出单 Agent 属性定义及约束规则, 建立乘客 Agent 路径选择行为模型, 在虚拟地铁站内为多智能体建立 MAS (Multi-Agent System) 行为决策系统, 通过 WebVR 实验研究乘客从众行为以及决策行为的影响因素, 为高峰期人员流动策略的制定提供理论依据, 有效地缓解地铁站内人群拥挤现象。

关键词: 多智能体; WebVR 地铁站; 乘客行为; 应急决策

中图分类号: TP306 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 12-2341-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-FZ0431

Multi-Agent Behavior Simulation for Metro Station Passenger

Li Zequan¹, Yan Fengting¹, Shi Zhicai^{1,4}, Jian Yumei¹, Hua Changhua², Si Yongzhan³, Xiang Yang¹

(1. College of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
2. College of Business Administration, Shanghai Lixin Accounting and Finance College, Shanghai 201620, China;
3. General Aviation College of Rizhao Vocational and Technical College, Rizhao 276800, China;
4. Shanghai Key Laboratory of Integrated Administration Technologies for Information Security, Shanghai 201620, China)

Abstract: Metro station is a typical public place with large crowd density. The characteristics of crowd behavior and the guidance based on the characteristics of crowd behavior can effectively train the crowd for emergency evacuation. Adopting the method of multi-agent and characteristics by measuring station building scene, analyzing the influence factors of passenger behavior characteristics, based on the passenger conformity rule, the single-agent passenger route choice behavior model is established. The multiple agents behavioral decision system in the virtual metro stations is established, the WebVR experiment is used to research the influencing factors of passenger herd behavior and decision-making behavior, which provides a theoretical basis for the emergency evacuation strategy during peak periods, and effectively alleviates crowd congestion in metro stations.

Keywords: Multi-Agent; WebVR metro station; Passengers' behavior; Emergency decision

引言

地铁站内乘客众多, 年龄差异大且行为复杂,



收稿日期: 2020-03-21 修回日期: 2020-07-01;
基金项目: 上海市信息安全综合管理技术研究重点实验室开放研究课题基金(AGK2019004);
作者简介: 李泽群(2000-), 男, 安徽, 硕士生, 研究方向为 WebVR; 闫丰亭(通讯作者, 1980-), 男, 山东, 博士, 硕导, 研究方向为 WebVR+AI; 史志才(1964-), 男, 黑龙江, 博士, 教授, 研究方向为互联网加密传输。

高峰期间极易造成人员拥挤踩踏^[1-3], 基于多智能体方法进行人群行为研究具有重要意义^[4]。本文以上海徐家汇地铁站为研究对象, 通过对复杂地下空间结构以及出入口情况的测量, 在早高峰、中午高峰、下午高峰及晚高峰进行了人群行为的观测。乘客身份复杂、认知能力各异, 高峰期间人群疏散耗费时间长, 这些特点给地铁站人群应急疏散带来很

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

• 2341 •

多困难^[5]。为有效分析地铁站内人群行为特征,也为应急培训、演练及制定预案提供科学依据,需要在仿真实验中完成人群行为建模^[6]。人群行为建模应包括如下内容^[7]: 1) 模型环境构建; 2) Agent 属性定义; 3) Agent 行为准则; 4) 外部环境影响的定义; 5) Agent 路径决策算法; 6) 群体 Agent 行为决策。

地铁站环境因素、外在各种引导因素、人与人之间的关系因素,甚至突发事件带来的影响因素,都对人群行为造成不同程度的影响^[8-10]。针对这些因素对人群行为的影响,一些专家^[11]认为采用多智能体系统(MAS, Multi-Agent System)的方法可以很好地研究群体乘客的行为特点,形成 Multi-agent 模型,为群体日常行为进行决策,也可以为突发紧急事故进行决策。陈和燕^[12]认为,利用 Multi-agent 可以更好地仿真人群行为。即可以从微观角度为单 Agent 移动决策提供具体解决方案,也可为 Multi-agent 的行为处理提供更加逼真的行为过程。房汇鑫^[13]提出了基于单智能体进行群智能行为的仿真研究,通过独立智能体分布式决策计算,形成群体智能决策,缩短计算时间,提高计算效率和计算精确度。

基于 Multi-agent 的 MAS 研究非常火热^[14-15]。谷陶^[16]利用 MAS 技术在微观交通模拟中开展研究,构建了微观交通模型,证明了基于 MAS 方法的优势及必要性。Li 等^[17]利用 MAS 对突发事件中乘客群体行为现象进行了计算仿真,发现实验结果和实际情况非常吻合,实验很安全,且符合人伦条件的要求。MAS 技术基于单乘客行为进行群体疏散行为研究,在考虑个体个性、个体与环境间作用力以及群体间作用力的前提下,进行较好地仿真群体乘客在地铁站内疏散的行为。

本文基于地铁站建筑场景特征、乘客群体的个体特征、个体间影响因素以及个体受环境影响的因素,基于 MAS 技术映射乘客个体与 Agent 间的关系,为乘客行为建模,基于引导者追随者模式,仿真高密度人群疏散场景,为地铁站人群高峰期提供

应急预案的理论支持,为改善疏散逃生的环境提供实验依据,同时避免了真实应急演练培训中潜在的人员伤亡及财产损失。

1 地铁站建筑场景模型

本文采用徐家汇地铁站为研究对象,该地铁站乘客多,地铁站内场景复杂。通过激光度量地铁站现场,采集了场景数据,抽取地铁站场景拓扑结构,形成完整的徐家汇地铁站 3D 场景模型。由于场景数据量大,无法在 Web 网页端实时显示和交互,本文采用了数据轻量化技术,对冗余数据做了剔除,然后完成了数据的清洗,最后针对有用数据进行数据分割及流式化重组,从而在 Web 端实时可视化渲染地铁站日常运作情景,满足多人在线虚拟站内行走交互。

根据徐家汇地铁站激光测量数据,在 Maya 中创建单个物体。通过编辑(移动、缩放、旋转)预制物体的点、线、面,得到基于测量参数的物体形状,在“通道盒/层编辑器”中可以调整物体尺寸、角度以及线的细分数;在“属性编辑器”中赋予模型材质、贴图。统一了建筑构件制作的流程,通过多边形建模的方法完成各种建筑的主体结构,通过调整几何结构体的长宽高比例,然后进行基于通道盒、层编辑器技术完成结构体的按需缩放,通过调度边的函数进行边平滑处理,使用倒角方法完成“分数”及“分段”的边角圆滑处理。对于模型面的处理,通过适当插入循环边及挤出技术,形成复杂模型的凹槽,将其他简单形状模型进行位置调整,完成复杂模型和简单模型的融合。

根据地铁站内部场景的建筑构件种类,完成建筑构件的制作并形成了构件数据库。将初步的.fbx 或.obj 格式的模型库,导入到 Unity3D 场景中并形成模型数据库,同时调整光照,进行材质贴图处理,构建出完整的场景模型库。然后,使用 C#脚本语言根据构件的序号和位置进行调度使用,构造地铁站场景。该技术路线既避免了数据从一次性内存加载的弊端,又满足了按需加载的要求。

基于徐家汇地铁站真实建筑场景数据, 进行该地铁站内站台处的仿真模拟, 以网格为单位对轨道交通站台的实际布局结构进行模拟, 网格的大小通常对应于个体占据的平面空间大小。以往的研究^[14]发现个体占据平面空间的大小是一个 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 到 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 之间的方格, 结合突发事件中乘客由于想要尽快撤离车站而产生的拥挤情况, 本文采用 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 的方格, 并对模型环境进行逐步实现。

徐家汇地铁站具有独特的结果特征, 在不同的地铁线间通过一条长形地下走廊实现连通, 在人群高峰期会形成大批量对流乘客, 极易造成堵塞、恐慌或踩踏。图 1 的地铁站内立柱数量有 48 根, 分布均匀, 但也会阻挡乘客的视线。通过 2 部楼梯与 2 部电梯完成对人群的分流, 但闸机口处是直接面向地下走廊, 极易造成人潮堵塞。该场景 45° 的俯视图及场景站内布局如图 1~2 所示。

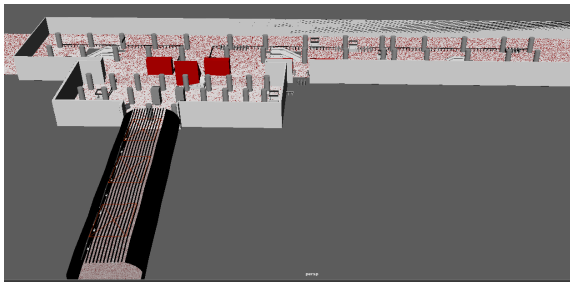


图 1 徐家汇地铁站场景模型 45° 角俯视图(48 根立柱)
Fig. 1 45° view scene of Xujiahui subway station
(48 columns)

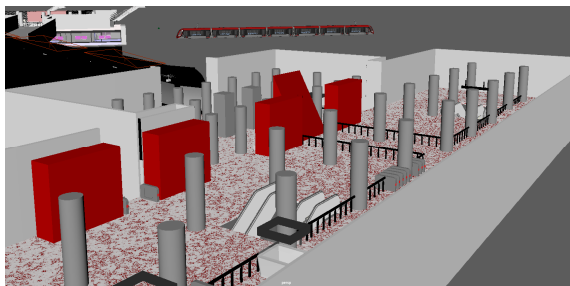


图 2 地铁站内局部场景
Fig. 2 Inside scene of Xujiahui subway station

2 乘客属性定义与约束规则

2.1 乘客属性定义

基于 MAS 系统, 本文定义了地铁站单个乘客

Agent 的属性及行为: 1) 个体 Agent 具有感知外部信息的能力; 2) 个体 Agent 具有自我决策能力; 3) 个体 Agent 具备完整的行为库; 4) 个体 Agent 具有自适应动态决策能力。

根据以上目标, 本文针对地铁站内乘客人员的 Agent 进行个体属性及行为定义:

定义 1: 乘客 Agent 个体属性集合 $P_Agent = \{A_t, S_t, D_t, V_t, B_t, SA_t\}$ 。这里的 A_t 是 Agent 个体对象 A 在时刻 t 的行为目标; S_t 是该对象 A 在时刻 t 对外界信息感应的数据集; D_t 是该 A 在 t 时刻根据目标及 S_t 数据集, 进行智能计算后的决策结果集合; V_t 是该对象 A 在 t 时刻的对应行进速度; B_t 是该对象 A 在 t 时刻的对应个体行为; SA_t 是该对象 A 在 t 时刻是否开启自适应动态决策能力的标识。

考虑到地铁站内乘客人员的行为目标基本是进站乘车或下车出站, 所以可以为乘客 Agent 个体基于当前物理位置规划到达目标位置的最优路径。每个个体 Agent 的最优路径往往分为多个阶段完成规划, 该阶段的分段是根据地铁站内空间结构及设施所决定。

定义 2: 乘客 Agent 个体行为目标集合 $P_Aim = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 。这里的 a_1 是 Agent 个体 A 当前的起点位置, 而 a_2 是其下一目标点的位置, 以此类推, 直到最终的目标点 a_n 。这里的 a_1 或者是地铁站的入口处, 或者是地铁站站台登地铁的黄线位置。反之, 这里的 a_n 或者是地铁站入口的位置, 或者是地铁站站台登地铁的黄线位置。

定义 3: 乘客 Agent 个体具备的数据集合 $P_Sen = \{s_1, s_2, \dots, s_t, \dots, s_n\}$ 。这里的 s_t 是 Agent 个体 A 在时刻 t 所感知采集到的各种数据值。

定义 4: 乘客 Agent 个体决策 D_t 算法。单乘客 Agent 在时刻 t , 面向目标集合数据的 a_t , 基于 iACO 算法^[18-20], 完成个体 A 在该时刻的决策计算, 计算的结果数据存入集合 P_Deci 。

定义 5: 乘客 Agent 个体行进速度 $P_Vel = \{v_1, v_2, \dots, v_t, \dots, v_n\}$ 。这里的 v_t 是该 Agent 个体 A 在时刻

t 的行为决策, 对应着的行为速度。不同 Agent 个体因为其本身的个体属性不同具有不同的行为速度。这里的个体属性分为儿童、少年、青年男子、青年女子和老人, 该 5 类乘客的反应速度及行走速度具有显著差异。

儿童平均速度为 1.31 m/s, 少年平均速度为 1.42 m/s, 青年男子平均速度为 1.55 m/s, 青年女子平均速度为 1.45 m/s, 老年人速度为 1.21 m/s。这里将平均行进速度记作 v_0 。考虑到乘客行进速度受到周围人群密度的影响, 这里采用公式(1)~(4)计算 Agent 个体实时行进速度。

$$v_{t+1} = v_t + \Delta v_{t+1} \quad (1)$$

如果人群密度 ρ 值小于 0.58, 则

$$v_{t+1} = v_0 \quad (2)$$

如果人群密度 ρ 值大于 3.8, 则

$$v_{t+1} = 0.37 v_0 \quad (3)$$

实际行进速度还需要考虑人与人, 人与物之间的碰撞检测。与静态没有行走的乘客人员发生碰撞 $v_{t+1}=0$ 为最高优先级, 其次是当前面的乘客速度低于 $v_{t+1}=0.37 v_0$ 时, 以前面乘客的行走速度为第二优先级。第三优先级则是在不存在第一优先级及第二优先级情况下的 v_{t+1} 。

如果人群密度 ρ 值大于 0.58 且小于 3.8, 则

$$v_{t+1} = v_t \times \{0.21 + 0.27 \times [1.5 - 0.75 \ln(\rho)]\} \quad (4)$$

定义 6: 乘客 Agent 个体行为集合 $P_Beh = \{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n\}$ 。这里的 b_i 是该 Agent 个体 A 在时刻 t 基于决策所采取的行为。Agent 个体所具有的行为分别是站立行为 *Stand*, 行走行为 *Walk*, 奔跑行为 *Run*, 弓背行走行为 *BoWalk*, 弓背奔跑行为 *BoRun*, 其中在 *BoWalk* 行为和 *BoRun* 行为过程中, 智能体是捂住鼻子进行的, 这是因为外部烟雾的蔓延已经妨碍到乘客人员的正常行为。

定义 7: 乘客 Agent 个体自适应动态决策集合 $P_Ada = \{0, 1\}$ 。这里根据决策计算的效率与客户端帧频刷新的阈值, 是否小于 0.2 s 和大于 32 帧为前提, 决定是否开启自适应动态决策的功能。假如每

次决策计算耗费的时间小于 0.2 s 且客户端帧频刷新率大于 32 帧, 那么启动 P_Ada 集合的 true 函数, 布尔值取值 1; 假如每次决策计算耗费的时间大于 0.2 s 或者客户端帧频刷新率小于 32 帧, 那么关闭 P_Ada 集合的 true 函数, 启动 false 函数, 布尔值取值 0。

2.2 乘客自组织行为准则

通常情况下地铁站内人群的行为规则可以基于以上乘客 Agent 属性, 完成网格映射机制的 Agent 行为决策及行为方式。乘客 Agent 可以从当前位置, 向着目标位置移动, 并在移动过程中避免人与人碰撞及人与物碰撞。其中, 人与人碰撞可以采用视域内人员间的碰撞避让, 人与物碰撞可以采用地图网格的布尔值, 通过“允许”与“禁止”进行判断。

基于 Agent 的乘客个体在地铁站内发生紧急事件时, 会形成 Multi-agent 群体疏散逃生的行为。在突发事故发生初期, 往往缺少外界引导, 乘客群体会表现出恐慌心理条件下的群体行为。乘客群体会向着相对最安全、路径最短的安全区域疏散。

基于地面数据网格化技术, 群体 Agent 会在单 Agent 基础上形成基于群体追随力的逃生模型。

定义 8: Multi-agent 群体吸引力。恐慌情况下, 单 Agent 盲目追随周围区域中较近的人员, 并快速向着群体移动方向移动, 称这种驱动个体向着群体目标方向移动的力为 Multi-agent 群体吸引力, 简称 Ma 吸引力, 记作 F_{Ma} 。

单 Agent 在 Ma 吸引力作用下, 进行加速移动, 从一般速度 v_0 开始加速到其最大速度 v_{Max} , 考虑到儿童、少年、青年男、青年女及老人的体重是不同的, 体力也是不同, 最终反映到行走速度是不同的。假设不同人员的体重是 M_p , 体力值表示为 F_p , 那么其加速度是 A_p , 其通常行走速度是 V_p , 本文通过统计的方法, 得到了不同身份人员的平均行走速度: 儿童平均速度为 1.31 m/s, 少年平均速度为

1.42 m/s, 青年男子平均速度为 1.55 m/s, 青年女子平均速度为 1.45 m/s, 老年人速度为 1.21 m/s。那么外在吸引力对人员的作用, 以及该类力对于单个人的力的作用所形成的加速度, 可以先做一个统一计算。约定每个乘客统一质量为 $M=1$, 量纲是人质, 则加速度 $a=F_{Ma}/M$ 。这里的 F_{Ma} 量纲是人质牛顿, a 量纲是牛顿/人质。那么 $a=F_{Ma}$, 所以

$$v_{\text{Max}}=v_0+at=v_0+tF_{Ma} \quad (5)$$

单 Agent 对应乘客身份, 具有真实乘客的属性以及心理特征。突发事故导致乘客心理应激, 产生压力, 并匆忙进行路径选择。该情况下, 基于 F_{Ma} 吸引力的作用, 单 Agent 启动追随疏散逃生的行为模式, 在疏散逃生的过程中会受到周围人群密度的影响以及其他人员的行为及情绪的影响, 对于这些影响因素, 本文采用多维元素网格映射的方法, 将其拟合为多维函数式, 与吸引力 F_{Ma} 共同计算行进的作用力。

恐慌从众的个体心理不稳定, 且不可预判。通过概率随机数值的选取, 可以仿真个体心理变动的群体效果。本文从 $1\sim X$ 中进行随机数的生成, 基于生成的数值模拟个体在群体中的跟随行为, 从而产生对应权重值。对于地铁站内场景空间结构熟悉的乘客智能体, 会基于其本身所具有的知识自然成为疏散逃生的引导者, 而对于场景不熟悉的人群会追随引导者并进行疏散和逃生。

基于“领导者-追随者”的从众行为虽然可以减少决策计算力的要求, 也能逼真地呈现人群行进场景, 可以仿真真实人群的疏散逃生。但盲目的追随也会造成局部逃生区域的拥挤, 会浪费掉其它可以疏散逃生的通道。为了更好地弥补这一缺陷, 本文采用在网格地图上设置可逃生出口吸引力 F_{exit} 变量, 将该变量放入出口对象 `exitObject` 类中, 通过实例化的方法生成各个出口对象的具体吸引力 F_{exit} 。

以乘客 Agent A 为研究对象, 考虑对象的从众指数 C , A 对象与安全地点的距离 D_A (量纲为 m)

以及该对象半径 5 m 内人群密度 ρ_A (量纲为人数/ m^2), 这里给出各个出口对象的吸引力 F_{exit} (量纲为人质牛顿) 的公式:

$$F_{\text{exit}}=C/(D_A\rho_A) \quad (6)$$

最终, 单个 Agent 会在群体吸引力 F_{Ma} 以及出口吸引力 F_{exit} 两个向量的作用下, 共同完成该智能体的行为过程。

$$v_{\text{Max}}=v_0+at=v_0+t(F_{Ma}+F_{\text{exit}}) \quad (7)$$

2.3 乘客行为约束准则

地铁站环境及空间结构是影响乘客行为的重要因素。定义 1 中提出了 S_t 是对象 A 在时刻 t 对外界信息感应的数据集, 也就意味着地铁站的场景数据是 Agent 智能决策的基础数据集。

地铁站内的场景数据种类及数量众多。首先, 场景空间结构数据映射到 2D 空间内, 映射数据量巨大; 其次, 场景空间内的视频引导因素, 以及各种标签的引导因素, 数据量也很大; 再者, 地铁站管理部门发布的数据信息也很多。总体上, 地铁站这些数据会直接影响到 Agent 决策结果。

通常情况, 人群在地铁站内根据已有知识自然规划出最优路径。如果没有该地铁站内的空间结构知识, 也就没有空间结构连通的知识, 那么可以借助导航指示标签、咨询工作人员或通过视频信息, 完成地铁站内的寻路行为。在人群高峰阶段, 工作人员会通过广播提供一些注意信息, 也会在视频屏幕上滚动提示地铁站内的人员密度情况, 便于乘客避开高峰区。如果发生紧急事件, 会导致人群恐慌, 各种辅助指导的手段都会使用, 其中包括跟随有疏散知识的人员或者工作人员, 进行疏散逃生; 又或者使用指示牌、视频, 并同时根据广播引导的信息, 进行疏散逃生。在研究过程中, 本文提出并遵循了如下的约束规则:

(1) 信息引导约束规则。乘客 Agent 在外部广播、导引牌等信息的引导下行进。通过调研发现, 在紧急事故出现后, 1/10 的乘客会基于个体判断,

完成疏散。大约 9/10 的乘客会选择信息引导，并基于信息的引导完成疏散。追随者根据引导者的路线，完成群体自组织行为，宏观上完成信息的引导，微观上进行个体路径决策。

(2) 拥塞约束规则。当出现人群拥塞的情况，后续的 Agent 会严重受到拥塞带来的影响。需要针对 Multi-agent 在地图网格行进中，根据乘客 Agent 本身的情况，决定对应 Agent 的下一步的状态位置。基于乘客 Agent 个体的强壮度赋予对应 Agent 占据下一状态位置的优先级。其中青年男性的强壮度高于青年女性的强壮度，青年女性的强壮度高于少年人的强壮度，少年人的强壮度高于儿童的强壮度。假如是同类型身份的 Agent，随机选择一个 Agent 占据该状态位置。对应地，基于强壮度的 Agent 可以逐个选择次优先级的状态位置。

(3) 危险因素约束规则。考虑到各种危险因素所造成的危险区域，以及不同危险区域造成的人员伤亡程度，作为 Agent 状态决策的输入数据，通过 iACO 算法，为乘客 Agent 计算整条移动路径，通过路径数组的时间间隔位置变化，来可视化 Agent 行为过程。

3 Agent 行为算法

3.1 单 Agent 行为算法

考虑地铁站场景因素的约束、乘客 Agent 的属性，以及乘客 Agent 所遵守的行为约束规则，通过 iACO 算法为单 Agent 规划最优目标路径，并完成可视化的乘客行进过程。从压力测试的角度，需要考虑在灾害发生的情况下，单 Agent 的路径规划算法。当轨道交通突发事件发生后，乘客 Agent 的主目标将立刻变为以最快速度移动到属性为出口的网格，并且规避中间可能产生的危险。在此过程中，会根据现场的情况，每到达一个网格后进行路径选择，该选择将综合乘客自组织行为准则和外部环境影响下的行为准则。在主目标改变后，Agent 将通过下述算法进行路径选择：

判断 Agent 位置属性变量 $p_position$ 是否为 0，如果为 0 表示 Agent 已经在目标位置；如果为其他数值，表示 Agent 还没有到达目标位置，进入到 step 1。

step 1: 将 Agent 当前 $p_position$ 的坐标 (x_0, y_0, z_0) 和目标位置的坐标 (x_e, y_e, z_e) 作为首个输入数据。

step 2: 判断是否发生危险以及危险的类型，如果没有发生危险执行 step 3；如果发生了危险执行 step 4。

step 3: 读入障碍物地图数据 Map_{data} ，根据 step 1 的位置数据，使用 iACO 算法进行最优路径规划。

step 4: 根据危险的类型绘制安全地图数据 Map_{data} ，根据 step 1 的位置数据，使用 iACO 算法进行最优路径规划。

step 5: 根据最优路径数组，进行单 Agent 群体吸引力 F_{Ma} 以及出口吸引力 F_{exit} 的计算。

step 6: 根据合力值，计算单 Agent 行进加速值。

step 7: 判断该 Agent 的身份，并根据身份类型匹配其行进速度。

step 8: 在时间 $t+1$ 的状态位置，判断有无其他 Agent 选择同一 $p_position$ 。如果没有，则该 Agent 下一步的状态位置为该 $p_position$ ；如果有其他 Agent 下一步状态位置也是该位置，判断各个 Agent 的强壮度，并按优先级确定下一步的位置 $p_position$ 。

step 8: 如果事故标签是 fire，则判断逃生时间 t 的累加值是否大于 6 min，如果 $t > 6$ min，则 Agent 死亡，疏散人数减 1。否则进入 step 9。

step 9: 如果事故标签是 0，则判断是否到达目标位置的坐标 (x_e, y_e, z_e) ，如果没有到达目标位置，则继续执行 step 8。如果到达目标位置，则执行 step 10。

step 10: 从需要路径规划 Agent 数组中删除该 Agent 变量，并返回该 Agent 关键字，同时在数据库中标记该 Agent 属性为 Completed。

step 11: 判断需要路径规划 Agent 数组中是否

还有 Agent 对象, 如果为 0 则表示所有的 Agent 完成了移动或者死亡。如果数组值大于 0, 则继续进行 step 8, 直到需要路径规划 Agent 数组为 0。

对于所有 Agent 都采用上述算法进行路径选择, 直至所有的 Agent 完成疏散或者死亡, 疏散过程结束, 模型终止。

3.2 MAS 行为系统

基于单 Agent 的路径规划算法, 考虑 Multi-agent 中每个 Agent 的自组织能力, 进行 Multi-agent 建模。

本文以徐家汇地铁站为人群活动的场所, 基于宏观的场景及场景地图, 通过网格地图量化地图空间, 以 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 的网格为单位, 模拟轨道交通站厅及站台布局, 构建模型环境; 将每一个乘客个体定义为一个 Agent, 根据定义 1 到定义 7 对 Agent 的个体属性进行定义; 根据 3.1 中乘客个体行为准则, 定义 Agent 的移动规则; 以公式(7)中描述的群体吸引力 F_{Ma} 以及出口吸引力 F_{exit} 两个向量的矢量和, 借助 iACO 算法实现单智能体路径规划, 为 Multi-agent 进行群体行为建模。考虑了通常情况下群体移动内外因素, 考虑了发生紧急事故情况下的群体移动内外因素。最终建立了能够描述日常和突发事件情况下的轨道交通站厅、站台上乘客行为特征的 MAS 行为系统。

4 群体乘客建模

针对该大规模地铁站的人群数量进行多指标统计, 其中针对 1~7 号地铁出口在不同高峰期人群数量进行详细统计, 针对每个地铁站出口乘客的不同年龄阶段、性别情况进行分类统计, 并基于统计数据对群体建模。

4.1 徐家汇地铁站高峰期人群数据

由于徐家汇地铁站的人群高峰主要出现在早高峰时段、中午高峰时段、下午高峰时段以及晚高峰时段, 对于每个时段的 7 个出入口进行乘客人数

的详细统计, 具体情况如表 1 所示。

表 1 徐家汇地铁站高峰人群数据表(各出站口人群流量)
Tab. 1 Data table of peak crowd in Xujiahui subway station
(flow value of crowd at each exit)

站口	早高峰时段 (07:00-09:30)	中午高峰时段 (11:00-12:30)	下午高峰时段 (15:00-16:00)	晚高峰时段 (18:00-20:00)
1	4 307	2 014	1 983	4 013
2	5 677	2 847	3 216	5 035
3	3 954	1 763	964	3 721
4	6 244	2 701	817	4 792
5	4 173	2 103	796	3 847
6	1 400	701	219	1 326
7	3 261	1 048	563	2 976

表 1 中, 在出口 1~7 分别设置了一台摄像机, 该摄像机在每天高峰期采集视频数据, 通过对 4 个高峰阶段的乘客数进行统计, 最终获得了一周内各个出入口高峰时间段的乘客人数。

基于 4 个时间阶段对 7 个出入口乘客人数的统计, 进一步对每个出入口乘客年龄情况进行分类统计, 分类标准是依据年龄及性别, 分为老人、青年男子、青年女子、少年、儿童这 5 类。本文通过视频记录下乘客的数据, 以 10 min 为统计单位, 统计获取到真实数据如表 2 所示。

表 2 各站口每 10 分钟人流情况(早高峰时间)
Tab. 2 Traffic flow per 10 minutes at each station (AM)

站口	老人	青年男	青年女	少年	儿童	人数总和
1	21	211	327	51	3	613
2	17	52	36	18	0	111
3	12	76	152	32	7	279
4	21	63	96	4	4	188
5	8	47	63	7	2	127
6	6	85	98	0	0	189
7	0	54	63	17	1	135

4.2 数据建模

基于差异性乘客人员的年龄及性别, 本文对以上 5 类乘客人员行走速度进行了跟踪统计, 并获得了行走速度中位数、均值和标准差。

在日常情况下, 乘客人员的行走速度对于单个个体相对比较稳定。通过对老人、青年男子、青年

女子、少年、儿童这 5 类乘客的宏观分析,可以发现每个阶段成员的步速相对是稳定的。基于 1~7 号口乘客人员一周的视频数据统计,分别在一天内 4 个高峰阶段(人群流入、流出量大),对乘客的身份和步速进行了统计。在步速上,基于视频中乘客第一次出现的时间以及在视频范围内离去的时间与该乘客所行走的距离,可以测算出其本身的行走速度 v_0 。在检测的 20 个出入口处,重点统计并计算了出口 1~7 的乘客的数量。将每周的 4 个高峰时间段进行了划分,针对每个时间段的乘客数进行记录统计,根据估计的年龄进行分类记录,最终统计了一周 7 天的乘客数量。通过对 5 类乘客行走速度的中位数、均值和标准差的统计及计算,得到数据如表 3 所示。

表 3 5 类乘客人员的步行速度 V
Tab. 3 Speeds of five style passengers

类别	人数	中位数/(m/s)	均值/(m/s)	标准差/(m/s)
青年男	588	1.38	1.38	0.12
青年女	835	1.25	1.28	0.18
少年	129	0.75	0.74	0.21
老年	85	0.63	0.62	0.28
儿童+	17	0.39	0.38	0.31

根据以上日常高峰期人员的行为数据,作为定义 3 中的数据集合 $P_Sen=\{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n\}$ 的数据。基于乘客 Agent 属性以及定义 5 中的公式(1)~(3),可以计算出乘客 Agent 在周围人群密度 ρ 值情况下的行进速度,基于公式(4)可以计算出当人群密度 ρ 值大于 0.58 且小于 3.8 时,5 种不同年龄阶段乘客 Agent 的速度 v_{t+1} 。基于定义 8 中的公式(5)可以计算乘客 Agent 在群体中进行自组织后的最大速度 v_{Max} 。如果考虑各个出口对象的具体吸引力 F_{exit} ,那么可以根据公式(6)以及牛顿力学公式(7)综合计算乘客 Agent 行进速度。

地铁站作为外部场景因素,需要考虑各个出口对象的具体吸引力 F_{exit} ,同时也要考虑地铁站所有的场景障碍物地图。对于场景中的墙壁、立柱、闸机以及其他静态障碍物都需要计入到定义 3 的

P_Sen 数据集合中。不仅如此,需要对地铁站内各区域空间数据进行计量并完成统计。图 3 是徐家汇地铁站 2D 数据图,图中标识出了各个区域空间的长、宽、高的平面数据,这些数据对应映射到 3D 空间数据。

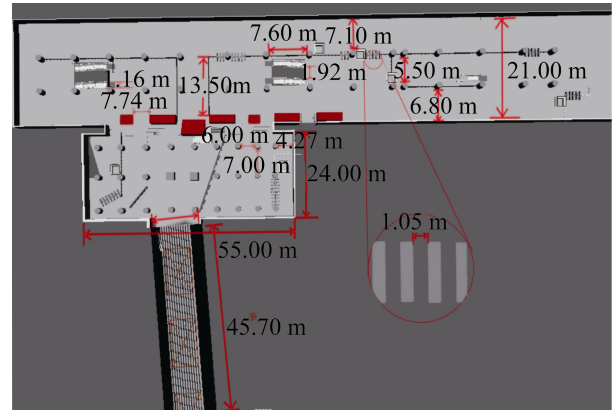


图 3 徐家汇地铁站空间数据
Fig. 3 Space data of Xujiahui subway station

影响 Agent 决策的因素很多,本文将这些影响因素结构化为集合 $I=\{g, o, E, \dots\}$ 。其中 g 表示环境影响因素,比如:引导人员因素、指示牌因素、视频因素、语音广播因素、各种指示灯因素等外部信息源对乘客造成的影响; o 表示其他 Agent B 在当前 Agent A 下一步状态的位置中,也就是 Agent A 的目标网格中已被其他 Agent 占据,这就需要 Agent A 进一步根据优先级选择其他的 p-position,这个信息也会造成对 Agent A 的影响,本文称这种影响为拥挤阻塞现象所造成的影响。应急 E 因素是在发生紧急情况下的多种因素的集合,其中 E 中包含了水灾、火灾、踩踏等紧急事件。 E 表示为集合 $\{f, w, t\}$,例如 f 元素一旦为真则表示火灾发生, f 事件的发生自然对乘客 Agent 行为造成严重的影响。对乘客 Agent 造成影响的因素众多,本文主要考虑以上的影响因素,其他的影响因素相对出现的概率较小,其影响度相对较弱,所以这些影响因素暂时不放入该 MAS 系统模型中。另外,如果以上影响因素不发生,也就是 I 为空集时,乘客 Agent 采用自组织方式完成行为决策。

在决策中使用单 Agent 行为算法, 可以计算单 Agent 在以上内部属性与外部条件影响下的最优行动路径, 基于行动路径数组与 8 个定义的元素相结合, 完成 Multi-agent 群体行进的 VR 行动场景。其中, 基于定义 4 的个体决策 D_t 算法, 可以为单 Agent 规划最优的路径。日常情况下, 地铁站由于视野相对比较开阔, 障碍物较少, 所以乘客人员和乘客 Agent 可以对应匹配最优路径规划。当出现紧急事故, 那么会导致人群的恐慌, 在恐慌中引导人员需要起到引导的作用, 这样起到引导作用的 Agent 占到总 Agent 数量的 1/10, 起引导作用的 Agent 具有更加成熟的逃生知识与逃生方案。有 9/10 的 Agent 是跟随人员, 恐慌下的从众心理驱使这类乘客 Agent 进行从众疏散逃生。

无论是引导人员还是跟随人员, 在个体或者群体形成的最优路径行进过程中, 都会不自觉出现根据当前情况再次选择最优的下一步 p_position 的新位置。在这个选择过程中, 本文给出 dir 表示 Agent 的移动方向, 即乘客在行进过程中通过视域内的最优行进方向做进一步地决策, 根据新的决策调整下一步方向 dir。实验中设定每个乘客 Agent 所在位置有 8 个邻居位置, 其中前方、左前方、右前方、左方和右方这 5 个方向网格是该乘客 Agent 最倾向的下一步状态位置。乘客 Agent 会根据时刻 t 到时刻 $t+1$ 的过程中, 进行决策下一步的实际 p_position, 同时完成 Multi-agent 间的避碰。

5 实验结果与分析

本文使用激光采集法, 采集了徐家汇地铁站建筑空间数据, 并进行了场景建模及各类人物角色的建模, 通过 C# 语言实现了算法以及 MAS 系统。通过基于环境网络的引导计算, 利用自组织原则以及上文提出的约束规则, 通过文中给出的 8 个定义, 形成了单 Agent 类以及 Multi-agent 类, 实例化后赋予对应乘客 Agent, 进行日常高峰期人群行为的仿真研究。在进行上海轨道交通徐家汇地铁站站厅

及候车站台实例研究中, 发现该地铁站上下 4 层共有 20 个出入口, 有 5 条地铁线路的交汇口, 该地铁站基本可以看作一个矩形连通空间和一个基于通道相连的两个地铁站空间。考虑整体地铁站通过一个大型中间通道连接, 所以可以选择通道的其中一侧进行重点研究。通过对照分析, 最终选择 7 个出入口为研究对象, 本文选择高峰期的站台情况进行分析, 经过实际调研并相应模型化, 发现早高峰和晚高峰期间乘客人员数量最多, 在统计了一周期间乘客数量后, 基于差异性乘客生理特征指标, 发现地铁站内乘客的一些普遍行为特征。例如当统一化站台人数为 300 人时, 其中老人、儿童占 15%。当通过统计分析, 在选取某一安检口进行人流量调研时发现:

- (1) 混合人群(青年男性、青年女性、少年、儿童、老年人)过安检机检查的平均速度 v 为 0.5 m/s;
- (2) 混合人群过验票闸机的平均速度 v 为 0.35 m/s;
- (3) 10 min 内, 通过单个安检口的混合人群平均值是 83 人次。

根据日常高峰期人群流量的最高值, 构建地铁站整体模型以及站内场景模型, 形成围绕地铁站内行李检查以及闸机入口的动态场景, 如图 4 所示。基于生理年龄特征乘客的比例情况, 离散分布乘客 Agent 在站内的位置, 模拟真实场景及乘客行为。在没有灾害情况下 I 集合中 g 、 o 元素需要考虑, E 元素不必考虑, 形成基于场景障碍物地图网格化模式下的外在影响因素的限制, 也就是在函数 $I(g)$ 和 $I(o)$ 影响下的单 Agent 的决策 D_t , 以及基于该决策计算后的行为。在出现紧急情况下需要考虑 $I(E)$ 函数, 并指定 E 具体类型, 比方水灾类型、火灾类型、地震类型。在 $I(E)$ 函数指定类型后, 场景中乘客 Agent 会按照 1:9 的比例随机形成引导者和跟随者, 为引导者进行 iACO 路径规划, 起到引领疏散的行为作用, 而跟随者根据 F_{Ma} 群体吸引力和 F_{exit} 出口吸引力完成疏散行为, 如图 5 所示。

基于实现的 MAS 系统, 实验中需要出站的人数为 300 人, 分别可从 7 个出口出站, 通过对所有乘客 Agent 离开地铁站统计, 绘制如图 6 的折线, 其中红线表示在无引导因素作用下的人群离开的时间情况; 绿线表示在有引导因素作用条件下人群

离开的时间情况。通过该折线可以看到, 在有引导因素影响情况下, 人群全部离开的时间是没有引导因素影响下人群全部离开所耗用时间的 2/3。所以, 在 $I(g)$ 和 $I(o)$ 影响作用下, 人群离开的速度要高于没有引导因素的情况。

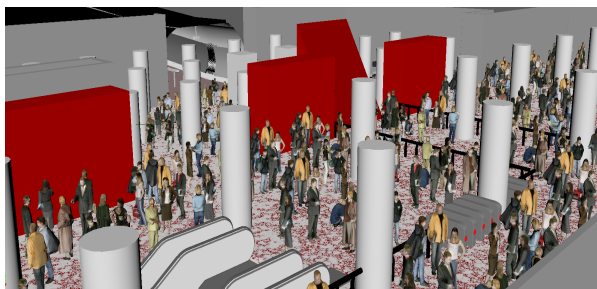


图 4 无引导因素 20 s 后的站台

Fig. 4 No guiding station scene (after 20 seconds)

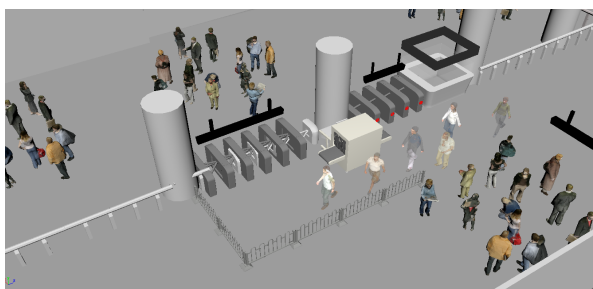


图 5 有引导因素 20 s 后的站台

Fig. 5 Guided by guiders (after 20 seconds)

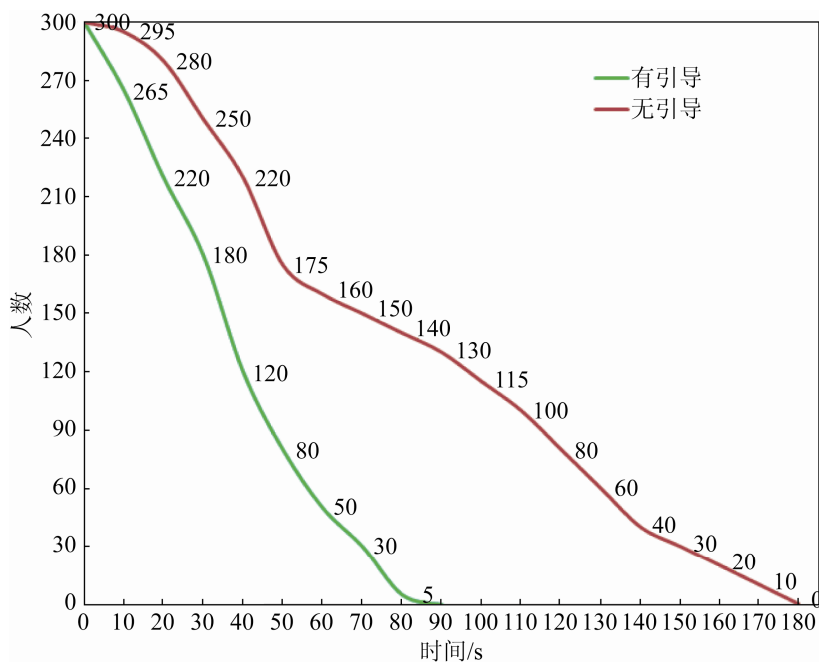


图 6 乘客人数随时间变化

Fig. 6 Passenger numbers changing over time

从图 6 可以看到, 地铁站人员初期离开的较快。在没有引导因素影响下, 乘客 Agent 处于自组织方式离开地铁站, 当地铁站内剩余约 2/3 的乘客人员时, 离开地铁站的人员速度减慢, 直到人员数量剩余约 1/2 时, 人员离开地铁站的速度迅速加快, 在约有 10 人时, 乘客人员离开的速度再次减缓, 直到所有乘客 Agent 离开地铁站, 共耗时 3 min。

整个人群离开地铁站的过程和现实中通过视频录制所得到过程及结果非常近似。

从图 6 还可以看到, 在出现 $I(g)$ 和 $I(o)$ 影响作用下乘客人员开始离开地铁站的速度就较没有引导的情况快, 这是因为有引导的情况可以让后面追随的乘客人员通过跟随离开地铁站, 所以很多乘客 Agent 无需自行寻找出口, 只需跟随引导人

员便可快速找到出口, 并且这一速度相对比较稳定, 只是在中间出现人群堵塞的时候, 人群离开速度相对减缓, 但很快人群离开速度又加快, 这是因为拥挤的信号传导到各个引导人员处, 引导人员广播拥挤信号到其追随者 Agent, 这样各追随者 Agent 就会更好地选择出口, 快速离开地铁站。在 $I(g)$ 和 $I(o)$ 影响作用下, 乘客人员离开地铁站总耗时为 89 s, 所用时间是完全自组织方式所耗用时间的一半。

特别地, 由于徐家汇地铁站具有比较独特的连通结构, 在地铁站的中间部分有一处连通走廊(见图 7), 该走廊宽度也会影响整个地铁站人流量。基于本文实现的 MAS 系统在该区域进行的人员数量压力测试, 分别对“没有引导影响”和“有引导影响”情况下进行的实验, 穿过该区域的乘客进入等待地铁场景(见图 8)。实验表明, 在该区域完全自组织方式下人员双向流动情况是 600 人/min, 在有引导方式下人员双向流动情况是 850 人/min。

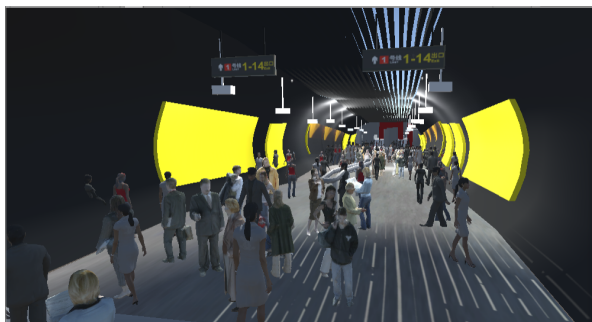


图 7 区域 1 到区域 2 需要经过的通道
Fig. 7 Passage of region 1 to region 2

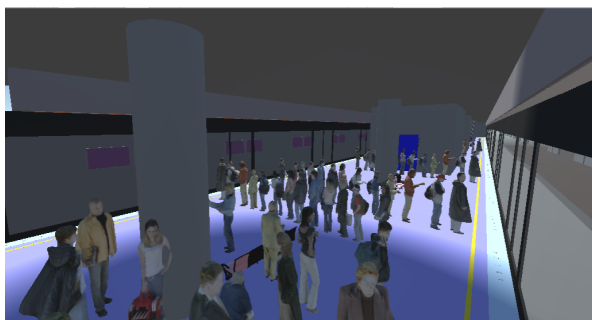


图 8 穿过通道后的乘客等车场景
Fig. 8 Multi-agent waiting for subway

6 结论

本文就地铁站内人群行为进行了研究。利用 Multi-agent 思想, 基于单 Agent 的个体属性与行为规则, 形成群体的行为。针对单 Agent 的个体属性给出了定义, 分别研究了对应的属性特征。基于乘客行为约束规则和群体乘客自组织行为规则, 给出了 Multi-agent 行为模型, 形成了在各种外部影响因素和个体属性差异情况下的地铁站人群行为 MAS 系统。在加入引导员或广播信息等引导因素后, 堵塞会被大大缓解, 乘客疏散速度也明显加快。

后续研究中, 将调查更丰富的数据, 提炼更多实际影响因素, 重点考虑火灾、水灾、踩踏、拥挤和地震产生的通道障碍形成的人群行为特点。

参考文献:

- [1] 王朔, 朱士友, 俞军燕, 等. 地铁车站应急预案 VR 模拟与情景设计[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(7): 183-188.
Wang Shuo, Zhu Shiyu, Yu Junyan, et al. VR Simulation and Scenario Design of Metro Station Emergency Plan[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2019, 29(7): 183-188.
- [2] 陈长坤, 秦文龙. 地铁站异质人群疏散折返行为模拟分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(9): 24-30.
Chen Changkun, Qin Wenlong. Simulation Analysis of Evacuation and Reentry Behavior of Heterogeneous Crowd in Subway Station[J]. China Production Safety Science and Technology, 2018, 14(9): 24-30.
- [3] 慕建康. 地铁车站行人避让与超越行为仿真模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 1-76.
Mu Jiankang. Simulation Model of Pedestrian Avoidance and Overtaking Behavior in Subway Stations[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019: 1-76.
- [4] 蔡湧, 赵蕾, 艾安源, 等. 基于 Anylogic 的地铁站火灾人员疏散模拟及结构合理性分析[J]. 山西建筑, 2019, 45(8): 208-210.
Cai Yong, Zhao Lei, Ai Anyuan, et al. Fire Evacuation Simulation and Structural Rationality Analysis of Subway Station Based on Anylogic[J]. Shanxi Architecture, 2019, 45(8): 208-210.
- [5] 郑勋. 城市轨道交通车站乘客微观行为分析与建模[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 1-85.
Zheng Xun. Analysis and Modeling of Passenger Micro Behavior at Urban Rail Transit Stations[D]. Beijing:

- Beijing Jiaotong University, 2019: 1-85.
- [6] 王勃超. 基于 Agent 地铁人员疏散模型仿真研究[D]. 浙江: 中国计量学院, 2016: 1-78.
Wang Bochao. Simulation of Subway Evacuation Model Based on Agent[D]. Zhejiang: China Institute of Metrology, 2016: 1-78.
- [7] Yao X M, Han B M, Yu D D, et al. Simulation-based Dynamic Passenger Flow Assignment Modelling for a Schedule-based Transit Network[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society* (S1026-0226), 2017, 23(10): 1-15.
- [8] 惠彬秦. 基于元胞自动机的地铁站应急疏散研究[D]. 西安: 长安大学, 2019: 1-56.
Hui Bin Qin. Study on Emergency Evacuation of Subway Station Based on Cellular Automata[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019: 1-56.
- [9] 高鹏, 徐瑞华. 城市轨道交通车站客流仿真中的事件驱动模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(11): 2121-2128.
Gao Peng, Xu Ruihua. Event Driven Model in Passenger Flow Simulation of Urban Rail Transit Station[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2010, 30(11): 2121-2128.
- [10] 薛铸鑫. 视频数据驱动的智能人群仿真方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018: 1-67.
Xue Zhuxin. Research on Intelligent Crowd Simulation Method Driven by Video Data[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences), 2018: 1-67.
- [11] 方苗苗. 基于 Multi-Agent 的地铁车站应急疏散仿真研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 1-78.
Fang Miaomiao. Simulation Study on Emergency Evacuation of Subway Station Based on Multi Agent[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019: 1-78.
- [12] 陈和燕. 地铁站火灾模拟与人员安全疏散时间研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019: 1-83.
Chen Heyan. Study on Fire Simulation and Evacuation Time of Subway Station[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019: 1-83.
- [13] 房汇鑫. 地铁车站人员疏散特性研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019: 1-67.
Fang Huixin. Study on Evacuation Characteristics of Subway Station[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2019: 1-67.
- [14] 袁宁. 考虑火灾产物影响下的地铁站台火灾疏散问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 1-85.
Yuan Ning. Study on Subway Platform Fire Evacuation Considering Fire Products[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019: 1-85.
- [15] Liu J, Chen X H. Simulation of Passenger Motion in Metro Stations During Rush Hours Based on Video Analysis[J]. *Automation in Construction* (S0926-5805), 2019, 10(7): 114-128.
- [16] 谷陶. VR 环境中基于多粒度建模方法的火灾疏散模拟[D]. 上海: 华东师范大学, 2019: 1-78.
Gu Tao. Simulation of Fire Evacuation Based on Multi Granularity Modeling Method in VR Environment[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019: 1-78.
- [17] Li Z T, Lo S M, Ma J, et al. A Study on Passengers' Alighting and Boarding Process at Metro Platform by Computer Simulation[J]. *Transportation Research Part A-policy and Practice* (S0965-8564), 2020, 132(2): 840-854.
- [18] Yan F T, Jia J Y, Hu Y H, et al. Smart Fire Evacuation Service Based on Internet of Things Computing for Web3D[J]. *Journal of Internet Technology* (S1607-9264), 2019, 20(2): 521-532.
- [19] Yan F T, Hu Y H, Jia J Y, et al. RFES: A Real-time Fire Evacuation System for Mobile Web3D[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering* (S2095-9184), 2019, 20(8): 1061-1074.
- [20] Yan F, Hu Y, Jia J, et al. Interactive WebVR Visualization for Online Fire Evacuation Training[J]. *Multimedia Tools and Applications* (S1380-7501), 2020, 23(4): 78-93.