

1-8-2019

Modeling on Information Exchange Behavior in Emergency Evacuation

Tianlu Mao

1. Lab for Advanced Computing Research, Beijing 100190, China;;

Xiangjun He

1. Lab for Advanced Computing Research, Beijing 100190, China;;

Yingfan Huang

1. Lab for Advanced Computing Research, Beijing 100190, China;;2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

Jiang Hao

1. Lab for Advanced Computing Research, Beijing 100190, 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.

Modeling on Information Exchange Behavior in Emergency Evacuation

Abstract

Abstract: A method for modeling the information exchange behavior in an emergent crowd evacuation is proposed in this paper. *It describes several aspects of information exchange in dynamic environments, includes contents, characteristics and ways of exchange. The influence model of know information on evacuation decision is built by cost evaluation and path planning.* Combined with the existing crowd locomotion model, our method could model and simulate crowd evacuation in emergent situation. Realistic results with dynamic information exchanges and dynamic behavioral decision of crowds are given. The simulation results have a high coincidence degree with the real person experiments.

Keywords

crowd simulation, emergency evacuation, motion modeling, information exchange, path planning

Recommended Citation

Mao Tianlu, He Xiangjun, Huang Yingfan, Jiang Hao. Modeling on Information Exchange Behavior in Emergency Evacuation[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(7): 2482-2488.

应急撤离场景中群体信息交流行为建模

毛天露¹, 何相君¹, 黄英凡^{1,2}, 蒋浩¹

(1. 中国科学院计算技术研究所前瞻研究实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 提出了一种应急撤离场景中群体信息交流行为的建模方法, 从动态环境中信息交流的内容、特点、方式等角度, 对应急撤离中的信息交流行为进行描述; 并通过代价评估、路径规划等, 建立已知信息对撤离决策的影响模型; 结合已有的群体运动模型, 实现了应急撤离行为的建模与仿真。可以较好地描述群体之间信息交流, 并基于信息进行行为决策, 模拟实现逼真的撤离行为, 仿真结果与真人实验有较高的吻合度。

关键词: 群体仿真; 应急撤离; 运动建模; 信息交流; 路径规划

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 07-2482-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201807007

Modeling on Information Exchange Behavior in Emergency Evacuation

Mao Tianlu¹, He Xiangjun¹, Huang Yingfan^{1,2}, Jiang Hao¹

(1. Lab for Advanced Computing Research, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A method for modeling the information exchange behavior in an emergent crowd evacuation is proposed in this paper. It describes several aspects of information exchange in dynamic environments, includes contents, characteristics and ways of exchange. The influence model of know information on evacuation decision is built by cost evaluation and path planning. Combined with the existing crowd locomotion model, our method could model and simulate crowd evacuation in emergent situation. Realistic results with dynamic information exchanges and dynamic behavioral decision of crowds are given. The simulation results have a high coincidence degree with the real person experiments.

Keywords: crowd simulation; emergency evacuation; motion modeling; information exchange; path planning

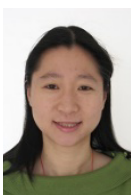
引言

群体行为建模是模拟大量实体或人物的运动(或动态)的过程, 包括特定群体如何移动以及运动模式如何变化^[1]。近年来, 随着群体行为建模方法的不断完善与发展, 其应用也越来越广泛。

涉及的领域包括公共安全、模拟训练、计算机动画、影视特效等。

面向应急撤离的群体行为建模, 通过对紧急撤离情况下人群的运动过程进行建模与仿真计算, 能够辅助大型公共建筑结构的设计、支持大型活动中的客流管理, 指导公共场所应急预案制定等, 为人群相关的公共安全问题的研究提供科学的分析与辅助工具。

现有的应急撤离模型研究, 主要集中在对普通群体仿真模型的优化, 以及构建应急撤离情况下群体的运动规则。较少考虑群体中个体之间的信息



收稿日期: 2017-08-15 修回日期: 2017-12-01;
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0802500),
国家自然科学基金(61532002), 十三五装备预先研究
共用技术(41402050301-170441402065), 中科院 STS
项目 (KFJ-SW-STS-155);
作者简介: 毛天露(1977-), 女, 浙江, 博士, 副研
究员, 研究方向为虚拟现实与智能人机交互。

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

• 2482 •

交流, 以及通过信息交流实现的互助行为。而现实生活中大量例子证明, 在应急撤离中群体会通过信息交流来获取环境信息做出相应的决策, 也会利用信息交流来实现引导等互助行为^[2]。群体内的信息交流可以有效加速火灾(烟雾蔓延)、地震(建筑结构改变)等动态环境下应急撤离效率。

为真实地描述应急撤离中环境的动态变化, 以及群体通过信息交流获取动态环境信息进行决策并实现应急撤离的过程。本文针对应急撤离场景下的信息交流行为进行建模研究, 从信息交流的内容、特点与方式等角度对交流过程进行描述; 在此基础上, 通过代价评估、路径规划, 构建基于已知信息对撤离行为决策的影响模型, 实现动态环境下的应急撤离过程仿真。最后, 通过将模型仿真结果与真人实验结果对比, 验证了模型的有效性。

1 相关工作

对群体运动行为的经验性研究工作已经持续了将近半个世纪^[3], 这些方法基于直接观察、照片、视频等形式来研究群体的运动行为。然而在一些比较复杂的场景中, 例如结构复杂的建筑物或极端拥挤的环境, 上述方法都不能合理准确的预测分析群体的运动模式, 进而产生了一系列对群体进行数学建模的仿真模型, 例如: 排队模型^[4], 随机模型^[5]等。然而, 群体行为并不是简单的个体行为的相加。为了更真实的描述群体内部的互动关系, Henderson^[6]将群体运动与气体或液体流动相对比, 进而演化出了基于流体动力学的群体仿真模型。与此相对应的基于智能体的模型, 则从群体中每个个体的具体运动模式或运动规则出发进行建模, 例如社会力仿真模型^[7], 元胞自动机模型^[8], AI 模型^[9]等。

针对应急撤离中的群体行为, 研究者们提出了一系列模型。Fang qin^[10]仿真了火灾过程中人群的疏散过程, 利用基于个体的仿真模型, 考虑到火灾过程中烟雾蔓延的过程, 采用 Fire Dynamics Simulator(FDS) 方法, 用流体力学的理

论建模火灾中烟雾蔓延的动态变化, 每个居民个体都包含了已有的建筑结构信息, 在撤离过程中, 个体的行为以及决策都受到环境和火灾情况的影响。Yamamoto^[11]也提出了一种针对高层建筑的个体仿真模型, 仿真了地震、火灾等突发状况下, 群体在高层建筑通道以及楼梯间内的撤离过程。并利用了真人实验进行对比, 对模型的合理性进行了验证。Ma^[12]则利用经典的社会力模型建模了在烟雾扩散场景下人群应急撤离过程。假设个体视野范围为仿真个体可以感知到的范围大小, 通过对比仿真的两个群体在不同视野范围情况下的撤离疏散过程, 验证了视野范围越小, 群体撤离时间越长甚至无法安全撤离。并基于仿真结果对应急撤离场景提出了优化建议: 扩大通道宽度、在拐角增加出口。Wagner^[13]则提出了一个针对音乐厅、球场等特殊场景下撤离仿真的模型。由于该模型要求场景中群体按照规则座位分布, 其适用范围有限。Song^[14]通过对比正常情况与应急撤离过程中群体行为特点的不同, 解决了在应急撤离情况下经典社会力仿真模型中部分参数配置不正确的问题。文章通过优化参数, 得到了一个更加真实的仿真结果。税斌^[15]使得每个个体都基于场景采用统一的寻路方式, 并使用 OCRA 方法在人群模拟中实现碰撞避免, 模拟效果较为真实。李焱^[16]提出了折半聚类算法, 并将这种算法用于人群分组, 并且把分组信息加入了社会力模型, 用以仿真人疏散。由于其提出的聚类算法性能优于传统的 k 中心聚类和统计信息网格算法, 使得社会力模型的模拟效果得到了提升。赵巍^[17]采用改进的社会力模型进行疏散模拟, 研究了在不同情况下人群疏散时间与外界环境之间的关系, 从而得出促进人群疏散最佳的环境条件, 有较强的现实意义。

已有的应急撤离仿真模型, 基于一般群体行为模型, 通过考虑应急撤离中特定的决策、行为、环境等因素来描述应急撤离过程。但较少考虑应急撤离中的群体信息交流, 以及通过信息交流实现信息获取、引导互助等有效撤离的行为。

2 信息交流行为建模

2.1 应急撤离场景下信息交流行为建模

为了仿真建模群体在应急撤离状况下的信息交流行为,首先需要定义交流的信息种类,以及交流的具体方式,通过建模抽象构建信息交流的仿真计算模型。

2.1.1 信息交流内容与特点

信息的种类多种多样,群体之间在不同环境与状态下,所交流的信息种类也不同。在应急撤离场景下,为尽快逃离危险场景,人群进行交流的核心内容是与逃生直接相关的、能够影响群体撤离行为决策的信息,主要包括:事件信息、目标点及其状态信息、关键路径点及其状态信息。

事件信息是指在应急撤离场景下,导致应急撤离的事件信息。导致群体发生应急撤离的事件有很多种,包括:火灾、地震、洪水、恐怖袭击、撤离演习等。不同事件,会导致相应不同角色身份的人做出不同的反应。

目标点及其状态信息是指,在应急撤离过程中,群体之间会交流已知的目的地信息。具体包括目的地是否可达以及目的地当前的状态。

关键路径点及其状态信息是指,在应急撤离过程中,群体之间在交流目的地信息的同时,也会进一步交流自己所获取到的一些关键路径点的信息。包括关键路径点是否关闭,流量是否过大等。

2.1.2 信息交流方式

随着社会发展,科学技术不断进步,群体进行信息交流的途径也变得越发多样,然而在应急撤离场景中,信息交流的途径主要有:1)口口相传,群体之间主要通过交谈、喊话告知对方自己所获取到的信息;2)广播通知、短信通知等由相关工作人员发布的即时信息;3)群体之间物理位置相隔较远,但是通过短信、微信等新型的远程沟通方式进行交流信息等。

尽管在应急撤离情况下,群体之间交流途径依然具有多样性,然而,在已经确立信息交流内

容的基础上,信息交流的途径尽管多样,始终保持着“告知者—接受者”的行为特点。信息交流始终是从信息的发送方,无论发送方通过什么途径,最终到达接收方的过程。

本文将信息交流途径抽象为一个概率选择模型。对于任何一种信息而言,当交流发生时,此信息是否被接受者 i 接受的概率 p_e^i ,是受到此人 i 的接受概率 p_s^i 以及此信息的发送者 j 的发送概率 p_s^j 影响:

$$p_e^i = p_s^j \times p_a^i \quad (1)$$

当最终的值 p_e^i 大于设定的某个阈值 θ 时,则表示当前个体接收到此信息,并将此信息标记为已知信息。

2.2 已知信息对个体行为决策影响

进一步的,在应急撤离场景中,个体会根据已知信息做出相应的决策行为,这不仅包括开始撤离时间,以及撤离过程中的路径选择。在应急撤离场景中所交流的信息最终主要与当前场景内的道路信息有关,这些信息作用在个体上主要决定个体的路径选择过程。已有的路径选择模型有:采用距离最短的方式、采取时间最短的方式、根据道路优先级进行选择等。然而,这些方法都没有办法很好的利用已知信息或者是将已知信息与当前决策行为进行统一,为了更加真实的还原在应急撤离场景下群体之间的路径选择行为,我们提出了一种基于已知信息的最小代价路线选择算法。

2.2.1 最小代价函数

最小代价函数表示为:

$$f_{\min} = \min \left(\sum (L + P + S) \right) \quad (2)$$

式中: L 表示衡量路径长度的代价值:

$$L = \text{dis}(\text{Path}) \times e_1 \quad (3)$$

式中: P 为衡量路径中关键路径点的流量代价值:

$$P = \sum (p_{\text{high}}) \times e_2 \quad (4)$$

$$S = 1 \times e_3 \quad (5)$$

式中: S 表示路径上特殊状态代价值。

对于 P 来说, 记录的是超过流量阈值的路径点, 并且对其超出部分求和, 对于 S 来说, 在特殊状态下, 例如目标点关闭, 路径封闭等, 直接令其等于最大代价值 \max , 用以表示无法通行。

e_1, e_2, e_3 分别表示归一化参数。

2.2.2 适应最小代价函数的 A* 路径规划算法

在应急撤离中, 个体选择的合理有效的撤离路径, 理应是根据自身已有的信息进行自我评价, 进一步选择的局部最优路径。因此, 我们根据此代价函数 f , 利用个体经过信息交流后的信息内容, 来决定当前的撤离路线。首先, 个体会尝试计算所有可能到达目的地的路线, 进一步计算不同的路径点的代价值, 舍弃无法通行的路径点, 然后选择代价最小的路径。

A* 算法是一个较为常用的启发式的路径规划算法。启发式搜索就是在状态空间中对每一个搜索的位置进行评估, 得到最好的当前结果, 再从这个结果的位置处进行搜索直到目标。这样可以节省大量的额外的搜索路径, 提高了整体的搜索效率。在启发式搜索中, 对当前位置处的结果的代价估计是十分重要的, 采用了不同的估价有可能导致不同的效果。A* 算法将 Dijkstra 算法和 BFS 算法相结合, 利用启发式函数 $f(n)$ 在迭代过程中寻找最优的路径。

$$f(n) = m_1 \times g(n) + m_2 \times h(n) \quad (6)$$

式中: $g(n)$ 表示从初始结点到任意结点 n 的代价, $h(n)$ 表示从结点 n 到目标点的启发式评估代价 (heuristic estimated cost)。 m_1, m_2 为归一化参数。为了适应本文提出的方法, 我们在 A* 算法的基础上进一步的做出了调整与修改。首先, 我们改变了 $g(n)$ 的定义。我们将 $g(n)$ 定义如下:

$$g(n) = \text{dis} \times c_1 + \text{pro} \times c_2 \quad (7)$$

式中: dis 表示欧式距离长度; pro 表示下一个路径点的流量值; c_1, c_2 分别为归一化参数。

紧接着, 我们定义启发估值 $h(n)$ 为:

$$h(n) = \text{dis}_m^n = |n_x - g_x| + |n_y - g_y| \quad (8)$$

式中: dis_m^n 表示从当前即将选择的点 n 到目标

点 g 的 Manhattan 距离。

紧接着, 个体根据上述的代价函数, 对自身所有可达的目标点, 计算所有路径的代价值。

在实际应急撤离过程中, 部分个体受制于自身获取到的信息有限, 出现了朝着已经无法通行或较难通行的道路继续前进的盲目撤离行为。现有的模型多假定个体已经获得了场景的全部初始信息, 或者全部当前信息, 因此很难去仿真这一盲目撤离行为。本文方法假定每个个体已知的信息是有限的, 并通过提出的信息交流模型, 动态更新个体当前的信息, 可以进一步的仿真在真实情况下存在的盲目撤离行为。

3 应急撤离行为建模与仿真

在上述信息交流行为模型基础上, 结合已有的人群运动模型, 实现了应急撤离行为的建模与仿真。首先对环境进行初始化, 定义相关环境语义信息, 同时生成相关的环境拓扑图, 包括路径以及流量图。在模拟过程中, 整个场景中的个体不断与周围群体进行信息交流, 通过本文提出的信息交流概率模型, 交流整个场景中实时的动态信息。进一步通过已知信息, 计算最小代价函数, 选择个体当前最优的路径。在路径正确选择以后, 结合 RVO 运动仿真模型^[18], 进行局部的前进避障, 实现撤离过程的仿真计算。

完整的应急撤离模型框架如图 1 所示, 个人的局部前进行为受概率交流模型、最小代价函数以及 RVO 模型控制, 所有个体的行为组成了整体的应急撤离模型。

4 实验分析

4.1 仿真试验分析

4.1.1 多出口场景下群体应急撤离过程

这一实验展示多出口情况下群体的应急撤离过程。设计场景中, 随着几处目标点(出口)的相继起火, 群体在感知以及信息交流作用下紧急撤离。在撤离过程中群体通过信息交流获取环境动

态信息，并影响撤离出口选择这一行为决策，再据此动态改变撤离路线。

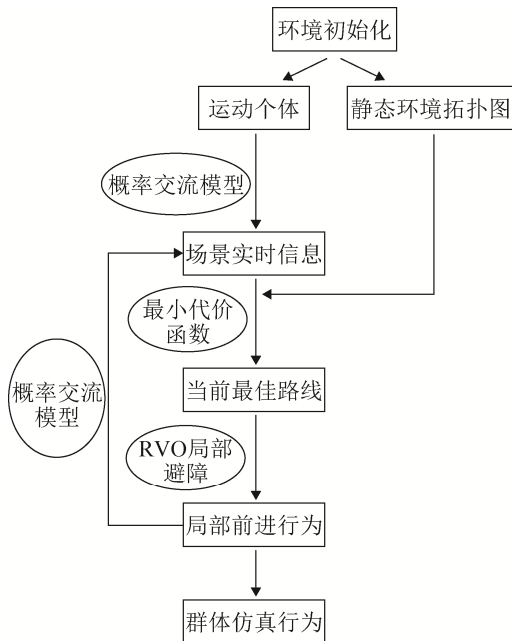


图1 应急撤离行为建模框架

Fig. 1 Model framework of behavior in emergency evacuation

当未知某个目标点不可通行的情况下，个体会选择全部目标点中代价最小的目标点。而当已知某个出口关闭时，附近的个体会选择就近的其他出口撤离，同时会在撤离过程中告知周围人群。在这个过程中由于群体中交流感知范围有限，有可能发生朝着一个同样已经发生火灾的目标点撤离的行为。

4.1.2 同条件下撤离时间对比验证

在上节的场景中进行30人的仿真实验。人群初始位于场景中央，随机向4个目标点运动，4个目标点中前3个相继起火，仿真实验表明，当有信息交流时，总的撤离时间为482 s，而当没有信息交流是，总的撤离时间为598 s。

为了进一步验证信息交流可以促进撤离进度、提高撤离效率，我们设计了一个50人次的仿真实验，对比不同交流概率下不同比例人群撤离时间。可以观察到，在不同交流概率下，撤离时间明显不同，如图2所示。随着交流概率的增加，撤离时间

也显著的减少。

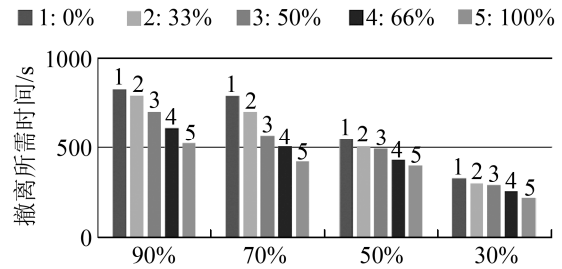


图2 50人仿真实验在不同交流概率下撤离时间对比
Fig. 2 Simulated evacuation time under different communication probabilities with 50 persons

4.2 真人试验分析

4.2.1 真人实验方案

真人实验有助于更加直观的了解到应急撤离仿真模型与真实情况的对比，同时也有助于我们通过对比验证，定量分析实验结果。本次真人实验设计如下：

人数：40人次

地点：某学校宿舍周边区域

场景：在类似一个正方形通道的场景内，周长约500 m，设定可通行区域为“日”字型区域。在场景的4个顶点处分别布置4个目标点，令中心为起点。

实验过程：所有人集中在起点处，各自随机选择一个目的地(4个目的地中只有一个是正确的)。每隔10 s，出发一个实验人员。规定人员的运动路线是设定的“日”字型路线。实验过程中，实验人员保持匀速，不与非实验人员交流。实验人员在到达某个目的地后，如果发现此目的地不可行，则依据已经获取到的信息自主选择下一个目的地。根据任务要求，实验中可以互相交流，交流内容包括各自已知的不正确目的地。

在实验完成后，将所有实验数据汇总并统计分析。同时为了与本文的模型进行仿真对比验证，本文同样搭建了等比例的真实实验仿真场景，按照真人实验要求布置了场景人物，并且完成了同样的数据统计分析工作。

4.2.2 平均有效交流次数

个体有效交流是指: 在实验过程中, 个体某次交流后得知目前所前往的目的地是错误的, 并且更换新的目的地。此时说明此刻交流是有效的。有效交流次数可以反映整个实验过程中, 群体受到信息交流的影响程度的多少, 实验结果如图 3 所示。

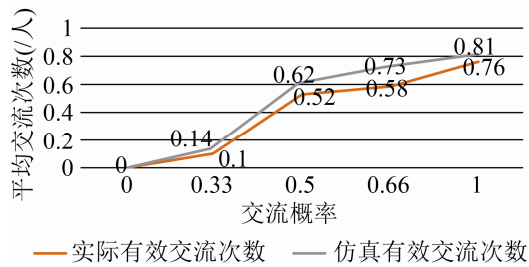


图 3 仿真与真人实验平均有效交流次数对比图

Fig. 3 Comparison of average number of effective communication in simulation and real-person experiments

首先分析真人实验部分可知, 随着交流概率的增加, 平均有效交流次数也在增加, 进一步的说明了交流对加快群体撤离具有促进作用。同时, 由图可知, 在交流概率处于中间阶段时, 对群体的撤离促进作用最为明显。其次, 将真人实验与仿真实验对比, 我们发现本模型仿真实验结果曲线与真人实验结果大致吻合, 整体增长趋势都是先缓中急后缓。进一步说明了在仿真撤离实验中, 信息交流确实可以促进群体正确高效的撤离, 同时还验证了本文所提出的信息交流模型是合理有效的, 且满足真实的情况。

4.2.3 实际经过总点数

实际经过总点数是指, 所有个体经过的所有非正确目的地数目之和。实际经过总点数越少, 说明整个群体撤离行为越有效率。结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 仿真结果与真人实验结果基本吻合, 随着交流概率的增加, 总经过点数也在逐步下降。点数下降说明了交流行为越多越有效的减少了盲目撤离行为。最后仿真实验结果与真人实验都证明了交流概率越高, 群体撤离过程效率

越高, 耗时越少。

表 1 仿真与真人实验实际经过总点数统计表

Tab. 1 Total number of points agents passed in simulation and real-person experiments

概率	实际总经过点数	仿真总经过点数
0	57	62
0.33	54	58
0.5	48	52
0.66	39	41
1	18	23

4.2.4 带有引导员角色的仿真实验与真人实验

在真实的应急撤离场景中, 往往还存在着有引导作用的个体, 例如管理人员, 消防员, 警察等。这些引导人员会在一定程度上帮助其它群体撤离。引导员往往具有最新最全面的信息。为了控制变量, 我们假设整个撤离过程中, 群体之间不发生交流, 但存在引导员的引导。在场景中我们在靠近某错误出口处设置一名引导员, 引导员会告知周围群体正确的目的地。对仿真测试以及真人实验结果进行了对比分析, 如表 2~3 所示。

表 2 仿真与真人实验平均有效交流次数统计表

Tab. 2 Statistics table of average number of effective communication in simulation and real-person experiments

概率	实际有效交流次数	仿真有效交流次数
0	0	0
0.33	0.1	0.14
0.5	0.52	0.62
0.66	0.58	0.73
1	0.76	0.81
引导员	0.36	0.45

表 3 仿真与真人实验实际经过总点数统计表

Tab. 3 Total number of points agents passed in simulation and real-person experiments

概率	实际总经过点数	仿真总经过点数
0	57	62
0	57	62
0.33	54	58
0.5	48	52
0.66	39	41
1	18	23
引导员	52	48

如表 2~3 所示, 当存在单一引导员且位于某出口附近时, 可以发现, 无论是仿真还是真人实验结果都大致与群体之间交流概率在 0.33~0.5 之间相当。在真实撤离场景中, 引导员等不同身份的人在信息交流概率模型中有较大的劝说以及接受概率, 这说明了信息交流在会由于角色身份不同也会存在不同。应急撤离场景中, 不同身份人员对撤离结果影响有不同。

5 结论

群体行为建模通过对正常情况或者紧急情况下人群的运动过程进行仿真模拟, 能够消除可避免的安全隐患、完善建筑设计、支持大型活动客流管理、指导公共场所应急预案制定等。本文主要研究了应急撤离场景中群体信息交流行为的建模, 提出了一种基于信息交流的应急撤离仿真模型。提高了应急撤离仿真模型的真实度和仿真结果的准确性。

参考文献:

- [1] Junior J C, Musse S R, Jung C R. Crowd Analysis Using Computer Vision Techniques[J]. IEEE Signal Processing Magazine (S1053-5888), 2010, 27(5): 66-77.
- [2] Sivers von I, Templeton A, Köster G. Humans do not Always Act Selfishly: Social Identity and Helping in Emergency Evacuation Simulation[J]. Transportation Research Procedia (S2352-1465), 2014(2): 585-593.
- [3] O'Flaherty C A, Parkinson M H. Movement on a City Centre Footway[J]. Traffic engineering and control (S0041-0683), 1972, 13(10): 434-438.
- [4] Løvås G G. Modeling and Simulation of Pedestrian Traffic Flow[J]. Transportation Research Part B: Methodological, Pergamon(S0191-2615), 1994, 28(6): 429-443.
- [5] Ashford N, O'LEARY M, McGinity P D. Stochastic Modeling of Passenger and Baggage Flows Through an Airport Terminal [J]. Traffic Engineering & Control (S0041-0683), 1976, 17(5): 207-210.
- [6] Henderson L F. On the Fluid Mechanics of Human Crowd Motion[J]. Transportation research(S0041-1647), 1974, 8(6): 509-515.
- [7] Helbing D, Molnar P. Social Force Model for Pedestrian Dynamics[J]. Physical Review E, American Physical Society(S1063-651X), 1995, 51(5): 4282-4286.
- [8] Muramatsu M, Nagatani T. Jamming Transition in Two-dimensional Pedestrian Traffic[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications(S0378-4371), 2000, 275(1/2): 281-291.
- [9] Reynolds C W. Steering Behaviors for Autonomous Characters [J]. Game developers conference (S1474-547X), 1999: 763-782.
- [10] Tang F, Ren A. Agent-based Evacuation Model Incorporating Fire Scene and Building Geometry[J]. Tsinghua Science & Technology(S1007-0214), 2008, 13(5): 708-714.
- [11] Yamamoto F. Investigation of an Agent-Based Modeling on Crowd Evacuation and Its Application to Real Buildings[J]. International Conference on Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management(S0302-9743). Springer, Berlin, Heidelberg, 2013: 373-382.
- [12] Ma P, Wang B. The Escape of Pedestrians with View Radius[J]. Physica A(S0378-4371), 2013, 392(1): 215-220.
- [13] Wagner N, Agrawal V. An Agent-based Simulation System For Concert Venue Crowd Evacuation Modeling in the Presence of a Fire Disaster[J]. Expert Systems with Applications(S0957-4174), 2014, 41(6): 2807-2815.
- [14] Song Y, Gong J, Li Y. Crowd Evacuation Simulation for Bioterrorism in Micro-spatial Environments Based on Virtual Geographic Environments[J]. Safety science (S0925-7535), 2013(53): 105-113.
- [15] 税斌. 基于 ORCA 碰撞避免的人群疏散模拟[J]. 现代计算机(专业版), 2016(2): 73-75.
- [16] SHUI Bin. Crowd Evacuate Simulation Based on ORCA Collision Avoidance[J]. Modern Computer, 2016(2): 73-75.
- [17] 李焱, 刘弘, 郑向伟. 折半聚类算法在基于社会力的人群疏散仿真中的应用[J]. 计算机应用, 2017, 37(5): 1491-1495, 1511.
- [18] LI Yan, LIU Hong, ZHENG Xiangwei. Application of Binary Clustering Algorithm to Crowd Evacuation Simulation Based on Social Force [J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(5): 1491-1495, 1511.
- [19] 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.
- [20] ZHAO Wei, LIU Chang, LIAN Xing-yu, et al. Simulation of Crowd Movement and Design and Implementation of Evacuation Optimization Method[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(3): 523-529.
- [21] Van den Berg J, Lin M, Manocha D. Reciprocal Velocity Obstacles for real-time multi-agent navigation[J]. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE (S1050-4729), 2008: 1928-1935.