

人群应急疏散中一种多智能体情绪感染仿真模型

刘翠娟^{1,3)}, 刘箴^{1)*}, 柴艳杰¹⁾, 刘婷婷²⁾, 倪仲锐¹⁾

¹⁾ (宁波大学信息科学与工程学院 宁波 315211)

²⁾ (宁波大学科学与技术学院 宁波 315211)

³⁾ (浙江万里学院智能控制研究所 宁波 315100)

(liuzhen@nbu.edu.cn)

摘要: 为了从情绪的视角分析紧急情境下人群的疏散行为, 梳理了现有情绪感染的研究工作, 总结了人群紧急状况下行为特点. 采用智能体描述人群个体, 提出一种多智能体情绪感染模型. 其主体框架分为感知层、情绪层、感染层、行为层和行动层. 归纳了产生情绪感染现象的 3 个条件及情绪感染的 3 个规则, 提出了情绪感染的算法, 考虑个体的个性和个体间距离因素, 采用情绪强度和人群紧密度来计算个体疏散速度. 用 C# 语言编制了仿真实验, 采用真实的地震疏散案例, 验证了仿真疏散时间和实际观测的基本一致. 通过与以往基于传染病思路的情绪感染模型对比, 所提出的模型可以更好地描述情绪感染从局部到整体的过程. 实验结果表明, 所提出的模型可以推演情绪驱动下的群体聚集行为, 有望为制定应急疏散预案提供一种可视化分析方法.

关键词: 应急疏散; 情绪感染; 个性模型; 可视方式

中图法分类号: TP391.41

DOI: 10.3724/SP.J.1089.2020.17944

A Multi-Agent Emotional Contagion Model in Crowd Emergency Evacuation

Liu Cuijuan^{1,3)}, Liu Zhen^{1)*}, Chai Yanjie¹⁾, Liu Tingting²⁾, and Ni Zhongrui¹⁾

¹⁾ (Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211)

²⁾ (Faculty of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211)

³⁾ (Intelligent Control Research Institute, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100)

Abstract: In order to analyze the evacuation behavior of the crowd in the emergency situation from the perspective of emotion, existing works on emotional contagion are reviewed and behavior characteristics of the crowd in emergency situations are summarized. A multi-agent emotional contagion model is proposed, in which individuals in the crowd are represented by agents. Its main frame is divided into perception layer, emotion layer, infection layer, behavior layer and action layer. Three conditions for the generation of emotional contagion and three rules for emotional contagion are summarized, algorithm for emotional contagion is proposed and individual personality and inter-individual distance factors are considered. Emotional intensity and crowd density are used to calculate the evacuation rate of the individual. A simulation experiment was compiled in C# language. Evacuation time is basically consistent in the simulation and in the real earthquake case. Compared with the existing emotional contagion model that based on infectious disease ideas, the proposed model can better describe the contagion process from local to global. The experimental results show that the proposed model can deduce crowd's emotion-driven aggregation behaviors. It could be a visual analysis

收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2019-09-02. 基金项目: 国家自然科学基金(61761166005); 浙江省自然科学基金(LY20F020007); 宁波市科技创新 2025 专项(2019B10032); 宁波市公益类科技计划项目(2019C50024); 宁波大学学科开放基金(xkx11518). 刘翠娟(1979—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为虚拟现实; 刘箴(1965—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, CCF 会员, 论文通讯作者, 主要研究方向为虚拟现实; 柴艳杰(1968—), 女, 学士, 讲师, 主要研究方向为虚拟现实; 刘婷婷(1980—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为人工智能、虚拟现实; 倪仲锐(1979—), 男, 硕士, 主要研究方向为虚拟现实.

method for the formulation of emergency evacuation plans.

Key words: emergency evacuation; emotional contagion; personality model; visual mode

我国每年因各类突发事件造成的人员伤亡超过9万多人。突发事件造成的人员死伤原因主要有2种,一种是事件本身直接造成的人员伤亡,另外一种是由于聚集行为引发的拥挤、对抗等所造成的伤亡。通常,后一种原因造成的伤亡有时更为严重。在突发事件中,人群往往会表现出聚集行为,只有少数人能够保持冷静。突发事件中人群的聚集行为特征有别于通常的人群运动,人群处于一种非理智的状态,人群快速聚集,情绪相互感染,群体运动混乱,极易造成人群冲突,进而导致人群拥挤事件。例如,在2008年深圳舞王俱乐部火灾现场监控录像中不难发现,火灾发生后,由于人群恐慌,现场缺乏组织,顾客在慌乱中大都表现出拥挤行为,涌向前门出口,从而引发人群拥挤踩踏事故,造成多人伤亡。事故现场还有其他疏散出口,只有少数冷静的顾客从其他疏散出口顺利撤离。

开展人群疏散仿真研究可以推演人群在突发事件时的群体行为,该研究一直是群体仿真领域的一个热点话题。已有紧急情况下的人群疏散研究大多以力学和几何方法为基础,这类模型很少关注人群情绪感染对人群疏散的影响。现实生活中,人是有生命的个体,在应急疏散过程中,人的情绪起到不可忽视的作用,急需将情绪因素融入群体疏散模型中。此外,现有的人群疏散理论和实验数据大都是从人群非紧急事件或者日常演习中获取,难以真实地反映突发事件中的群体行为。基于伦理学的考虑,不可能用真人在灾害或事故中进行实验,因此收集真实的突发事故现场信息(如监控录像),通过虚拟仿真推演突发事件聚集行为具有重要的现实意义。

本文首先分析在人群应急疏散和情绪感染方面已经开展的相关工作,分析了现有研究的不足,提出情绪感染疏散模型(emotion contagion based evacuation model, ECEM);通过仿真实验验证模型的有效性;最后对本文工作进行总结。

1 相关工作

本节简要分析相关的已有研究,包括人群应急疏散、情绪感染机理和情绪感染模型3个方面。

1.1 人群应急疏散

为揭示人群疏散运动的行为特点,需要建立尽量接近实际的数学模型^[1]。紧急情况下的人群疏散模型主要可分为宏观模型和微观模型。

宏观模型侧重模拟人群的聚集特性与流动特性,认为人群的运动与流体和气体类似,将人群看做流动的单一聚合系统,因此不考虑人与人之间的相互作用。其优势是它们可以用来做粗略的分析,缺点是人群和流体是有区别的,人群不完全遵守物理定律,具有自主性,如方向选择、停止等行为,很难生成细粒度的模拟结果。

微观模型通过合理量化个体行为描述群体,可以方便地研究个体与群体的关系。研究较多的有离散型模型和连续型模型。离散模型的代表是元胞自动机模型。例如,Georgoudas等^[2]提出基于元胞自动机的群体疏散模型。Gutierrez-Milla等^[3]基于智能体建模的疏散模拟,采用云计算实现大规模人群模拟,用于预测突发事件时人群的行为。Helbing等^[4]的社会力模型是连续模型的典型代表。社会力模型假设行人受到的力包括目标驱动力、人与人之间的相互作用力和人与障碍物之间的作用力。在这3种力的共同作用下,行人不断地更新自身位置,趋向目标位置。虽然在社会力模型中提出了恐慌度的概念,但只是描述了个体对运动速度的期望程度,没有考虑个体之间的情绪影响。

Chao等^[5]基于社会力模型有效模拟混合交通中车辆-行人交互的过程。Han等^[6]在原始社会力模型中引入信息传递机制,使智能体通过信息交换改变运动方向,及时发现其他安全出口,能有效地提高紧急情况下的人群疏散效率。

人群应急疏散研究重点是建立相应的数学模型来模拟人群行为。现有模型的不足是对智能体之间的通讯联系的研究还需完善,对人群心理建模不够充分。紧急疏散在一定程度上受情绪影响,从社会心理学视角看,现有的疏散模型在描述人群行为方面尚有大量工作需要完善。

1.2 情绪感染机理

情绪感染机理主要是研究个体之间情绪感染的规则和原理。目前主流的情绪感染计算模型由Bosse等^[7]提出,认为情绪感染的双方分别扮演不

同的角色, 每个角色既能发送情绪, 也能接收情绪, 如图 1 所示.

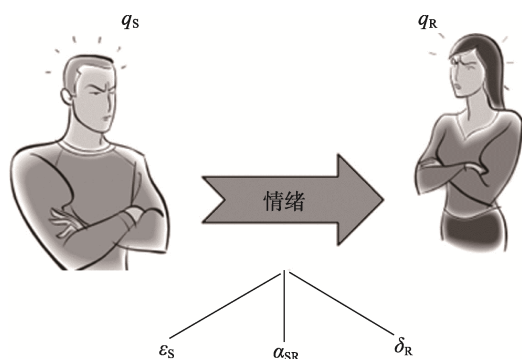


图 1 情绪感染

情绪从发送者传递到接收者的强度为

$$\gamma_{SR} = \varepsilon_s \alpha_{SR} \delta_R.$$

其中, q_s 是发送者的情绪; q_R 是接收者的情绪; ε_s 是发送者的情绪表达; δ_R 是接收情绪的敏感度; α_{SR} 是从发送者到接收者的渠道强度.

从上述公式可以看出, 情感感染强度与发送者的情绪表达、传输渠道、接收者的敏感度 3 个因素有关.

1.3 情绪感染模型

情绪感染概念来源于心理学, 涉及个体、情绪以及情绪传播的心理过程. 从目前研究的成果来看, 主流情绪感染模型主要有 2 种, 一种基于热力学原理, 邻近的物质以每一物质所特有的比率将能量转移给对方; 另一种是基于流行病学的概率阈值模型. Bosse 等^[8]最早提出基于热力学的 ASCRIBE 模型, 采用多智能体的方法模拟群体情感, 它的基本原理类似散热现象. Tsai 课题组^[9-10]在 ASCRIBE 模型的基础上提出 ESCAPE 模型, 考虑了智能体对环境的熟悉程度和身份(家庭关系、权威人士等), 模拟了机场疏散中的情绪感染过程. 向南等^[11]基于社会力模型构建个体驱动力, 采用热传递原理构建情绪感染模型, 模拟行人动态聚集过程. 现有的实验证明, 基于热力学的模型能有效展示情绪感染现象.

基于流行病学的 Durupinar 模型^[12]是一种概率阈值模型, 其将智能体分为易感染(susceptible)和已经感染(infected) 2 种, 它们可以根据接收情绪强度的多少在一定程度上互相转换. Fu 等^[13]模拟情绪感染的动态效果, 提出基于流行病学的模型(susceptible infected recovered susceptible, SIRS), 认为初始感染比例对最终的稳定系统影响不大,

群体密度和个体运动速度可以加速情绪感染, 该研究成果有助于管理者实现高效化人群疏散管理. 曹梦晓等^[14]对 Durupinar 模型进行改进, 在情绪感染模型中融入个性因素. Mao 等^[15]的情绪模型中将人群中的情绪看做某种程度上疾病的传染过程, 在 SIRS 模型的基础上进行改进, 得到 CA-SIRS 模型(cellular automaton SIRS), 它将行人分为易感染、感染和免疫 3 种类型. 在每个时间步长内行人更新情绪强度的计算公式为

$$M(i, t) = M(i, t-1) + \sum_{j=1}^n \left[1 - \frac{1}{1 + \exp(-D)} \right] \times I_j \times R_{j,i} \times S_{j,i}.$$

其中, I_j 表示行人 j 的情绪强度; $R_{j,i}$ 表示行人 i 接收行人 j 发送的情绪的能力; $S_{j,i}$ 表示行人 j 发送情绪至行人 i 的发送能力; D 表示行人 i 和 j 之间的欧氏距离; I_j , $R_{j,i}$, $S_{j,i}$ 的取值范围为(0,1).

在人群应急管理中融入情绪因素, 已取得诸多研究成果. Aydt 等^[16]提出了一种基于现代评价理论的情感引擎, 展现不同人群的情绪感染模式. 针对拥挤人群的特殊性, 刘箴等^[17-18]提出情绪感染仿真模型, 考虑管理员对情绪控制的重要性, 并建立了相应的仿真演示原型系统. 在人群实时路径规划方面, 人群情绪对路径选择也有影响^[19]. Li 等^[20]采用基于 Agent 的仿真方法研究群体情绪演化过程. 王春雪等^[21]从神经生理学视角, 建立突发事件恐惧情绪感染概率模型. Saifi 等^[22]模拟人群中的紧急情绪、行为和影响, 结合个性模型和模糊逻辑实现多场景人群行为仿真. 不同情绪传染模型在广场疏散中的不同行为, 证明情绪感染是真实场景模拟的一个重要因素^[23]. Başak 等^[24]从视频中提取人群数据, 采用数据驱动的方法能有效地模拟人群情绪感染的过程.

综上所述, 目前关于情绪感染的研究还处于起步阶段, 大多停留在理论层面, 重在分析情绪感染的机理, 与现实情绪感染现象还存在差异: (1) 无论是热力学还是流行病学原理, 它们对情绪感染最初阶段的描述还不够清晰, 实际的案例表明, 情绪感染往往始于最先处于情绪状态的智能体, 实际感染过程中接触并不一定是感染必须的条件, 只要智能体能够感知其他智能体, 就能相互受到情绪感染. (2) 现有的情绪感染模型是基于无差异化个体, 不能体现出个性对情绪感染的影响. 从社会心理学的视角看, 情绪感染引发从众行为, 智能

体重点关注周围智能体的情况。因此,紧急情况下的群体疏散行为研究需要从心理学和社会学角度建立人群中个人行为规律与社会行为的理论框架。本文将个性模型融入情绪感染模型,结合邻居智能体,采用计算机仿真技术,对人群疏散进行有效的模拟。

1.4 紧急疏散案例调查分析

近年来,随着监控录像的普及,已经有很多紧急疏散的视频案例。如中国汶川大地震、尼泊尔地震等。通过对这些监控录像进行分析,可以发现人群紧急疏散中的真实行为,有助于完善以往的疏散理论,并通过统计案例分析结果,获得准确的人群仿真参数。文献[25]通过收集地震疏散案例,统计了人群疏散的速度和加速度,分析人群的典型行为。本文在此基础上,又收集了几十个火灾疏散的视频监控。通过分析发现,人群紧急疏散中能明显观察到恐慌情绪现象,人群疏散时往往出现争先恐后的现象,并且个体疏散速度明显比平时快很多,最快的室内疏散速度可达到 3~5 m/s。个体对紧急事件的感知反应有差异,最先疏散次序有差异,这些观察为本文的情绪感染计算提供了实际依据。

2 基于情绪感染的疏散模型

人群应急疏散主要是模拟人群在紧急情况下的疏散行为,特别是在情绪感染情况下的群体行为现象。人群常常是由不同个性特征的个体组成,一旦发生突发事件,不同个性的个体对事件的反应也有所不同。本文的疏散模型结合了个性模型。OCEAN 模型是 Goldberg^[26]从心理学视角提出的个性模型,用 5 种特质描述个体的个性。OCEAN 模型可以影响人群的感知^[27]。Lhomme 等^[28]的主要贡献是描述了从 OCEAN 个性特征到情绪传染强度的计算映射。本文并不是将每个个性看做不同的维度,而是根据个性将人群分为 5 类。下面给出 ECEM 的整体框架和感染算法。

2.1 情绪感染疏散仿真的流程

ECEM 的整体框架如图 2 所示。

感知层。当突发事件发生时,智能体能够感知环境信息,包括突发事件、障碍物和其他智能体。

情绪层。主要是智能体的情绪强度发生变化,具体体现在速度变化上。

感染层。主要是实现不同智能体之间的情绪

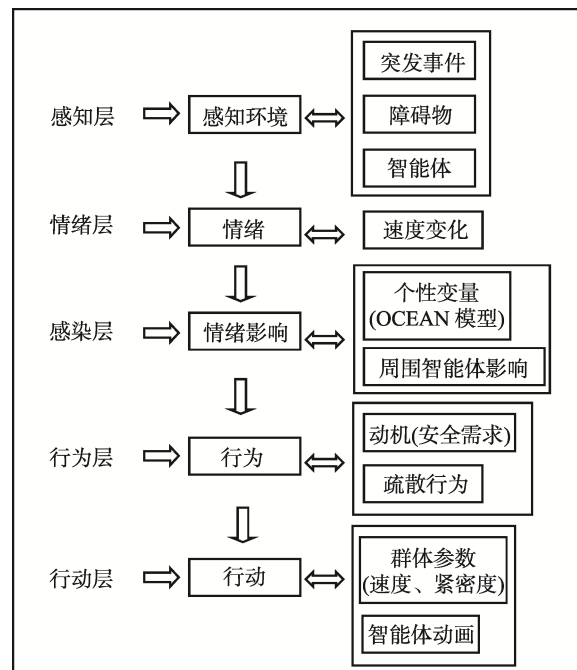


图2 ECEM 框架

感染,融合 OCEAN 个性模型,对智能体感知范围内的邻居智能体进行相互影响,实现情绪强度从高到低的感染过程。

行为层。主要是个体智能体在安全需求动机的驱动下实现的疏散行为。

行动层。是智能体运动的执行层,结合智能体的群体参数(速度和紧密度),由个体到群体实现人群疏散动画。

2.2 情绪感染产生的条件

情绪感染并不是一直存在的,而是在特定条件下产生并呈现的群体现象。产生情绪感染现象需要满足以下条件:

(1) 有突发事件产生(例如爆炸、火灾、地震等),且突发事件在智能体感知范围内。只有感知到危险信息,才能激发智能体情绪发生变化。

(2) 智能体之间存在情绪强度差异。类似于热传递现象,智能体间的情绪有高低不同时,才能发生情绪感染,相同的情绪强度无法实现互相感染。

(3) 智能体间的距离小到一定的阈值才会触发情绪感染,该阈值可称为情绪感染半径。

2.3 情绪感染规则

情绪感染模型关注突发事件中人群的情绪变化。从已有的监控视频来看,突发事件情况下,负面情绪占绝对优势,对负面情绪的观测、分析、控制等更具有实际意义。因此,本文的人群疏散模型只考虑恐慌情绪。鉴于突发事件的紧急性,在安全

撤离到出口前, 智能体的情绪呈现逐步增长的趋势, 即在疏散过程中情绪强度只增不减, 而逃离出口后情绪强度才呈现下降趋势. 情绪感染强度是一个动态变化的值, 初值为 0, 终值为 1.

情绪感染现象指情绪从一个智能体传递给另一个智能体的过程. 情绪感染规则如下:

规则 1. 情绪感染的方向由高到低. 情绪强度高的智能体影响情绪强度低的智能体. 最终使情绪强度低的智能体的情绪强度等同于高情绪强度, 而情绪强度高的智能体的情绪强度保持不变.

规则 2. 情绪感染范围是有限的. 智能体的检测范围即是情绪感染的范围. 在感染范围内个体之间的情感传播特性与热传递很相似, 系统定期更新情绪感染效果.

规则 3. 情绪感染是一个过程. 情绪感染不是瞬间行为, 情绪强度逐步增加, 直至最高.

突发事件会激发个体的情绪变化, 越靠近危险源, 智能体的情绪强度越高. 因此, 危险源附近智能体的情绪初始强度最高, 以此进行感染. 个体在没脱离危险之前, 情绪强度不会降低. 当个体情绪强度达到某一高度(例如 1), 则不再继续升高. 情绪感染的方向由高到低, 即高情绪强度影响低情绪强度, 但高情绪强度保持不变. 模型采用最近邻居检测的办法, 结合听觉和视觉, 将智能体的感知范围界定为以智能体为中心的圆形区域. 不考虑情绪强度低于当前智能体的邻居智能体, 以减少计算时间. 此外, 从时间维度看, 情绪感染是一个过程, 而不是一蹴而就的瞬间行为.

2.4 情绪感染算法

下面给出情绪感染疏散模型中的情绪感染模拟算法和速度模拟算法.

算法 1. 情绪感染模拟算法.

输入. 场景中的智能体.

输出. 智能体的情绪强度.

Step1. 对于所有的智能体, 如果智能体的情绪强度 $p < 1$, 查找智能体周围的邻居.

Step2. 对于智能体的邻居, 如果智能体的情绪强度小于邻居的情绪强度, 更新智能体的情绪强度.

Step3. 对于场景中的所有智能体, 如果智能体的情绪强度 $p > 1$, 将情绪强度更新为 1.

Step4. 结束.

情绪强度更新算法中, 考虑个性和距离 2 大因素. $t+1$ 时刻的情绪强度

$$p_i(t+1) = p_i(t) + \sum_{j=1}^m G(i, j) + D(i, d).$$

其中, $p_i(t)$ 为 t 时刻智能体 i 的情绪强度; $G(i, j) =$

$$\delta_i \times \varepsilon_j \times \left(1 - \frac{d_{ij}}{d_{\max}}\right) \times p_i(t) \text{ 和 } D(i, d) = e^{\left(-\frac{\|r_i - r_d\|}{2R}\right)}$$

分别为个性和距离对情绪的影响; δ_i 为智能体 i 的接收能力, 不同个性的智能体接收能力不同; ε_j 为智能体 j 的发送能力; 智能体 j 为邻居智能体中情绪强度 $p_i < p_j$ 的智能体, m 为邻居智能体中 $p_i < p_j$ 智能体个数; d_{ij} 表示智能体 i 和 j 之间的欧氏距离; $d_{\max}$ 表示情绪感染半径; $\|r_i - r_d\|$ 表示智能体 i 和危险源 d 之间的距离; R 表示智能体自身的半径.

根据 OCEAN 模型, 不同个性智能体对情绪的接收和发送能力有差异性. 在感染过程中, 情绪传输渠道是畅通的、一致的, 因此只考虑智能体情绪的接收和发送能力. 由于突发事件的特殊性, 在紧急情况下, 所有智能体的发送情绪能力相同, 只考虑不同人群对情绪的接收能力.

算法 2. 速度模拟算法.

对于场景中的所有智能体, 采用速度模拟算法计算疏散速度.

输入. 场景中的智能体.

输出. 智能体的疏散速度.

Step1. 对于所有的智能体, 如果智能体距离目标的距离小于 d_{targ} , 更新智能体周围的密度.

Step2. 更新智能体的恐慌情绪强度.

Step3. 更新智能体的运动速度.

Step4. 结束.

变量 d_{targ} 代表智能体与目标之间的距离.

人群的速度模拟算法考虑人群密度和恐慌情绪程度 2 大因素. 人群的疏散能力在很大程度上取决于人群状态, 人群紧密度是人群状态的主要参数, 人群紧密度 ρ_i 指智能体 i 感知范围内紧密相邻的其他智能体个数.

人群的恐慌强度可根据算法 1 进行更新. 智能体速度取决于人群紧密度及智能体的恐慌强度. 如果智能体 i 的人群紧密度 $\rho_i = 1$, 则更新智能体速度采用

$$v_i = (1 + p_i(t)) \times v_{\text{norm}};$$

否则

$$v_i = (1 + p_i(t)) \times \frac{v_{\text{norm}}}{\rho_i}.$$

其中, v_i 为智能体 i 的实际运动速度; $p_i(t)$ 为智能体 i 在 t 时刻的情绪强度; v_{norm} 为智能体正常速度.

基于前述的情绪感染理论,情感感染强度与发送者的情绪表达、传输渠道和接收者的敏感度3个因素有关。在紧急疏散情况下,个体的情绪表达能力相似;而在个体的检测范围内,传输渠道都是畅通的。因此,影响情绪感染的关键因素是接收者的敏感度,即个体的情绪接收能力。基于OCEAN个性理论,个性不同的个体对情绪的接收能力也会有所差异。在紧急疏散过程中,不同个性个体的感染能力有所不同。本文的个性感染参数设定如表1所示。其中, O 表示开放性, C 表示尽责性, E 表示外向性, A 表示宜人性, N 表示神经质。

表1 个性感染参数

个性类型	情绪感染接收能力
O	0.35
C	0.20
E	0.15
A	0.30
N	0.15

3 实验

与已有模型相比,在上述框架基础上提出的ECEM的优势是:(1)将个体看做具有感知能力的智能体,考虑个性差异对情绪感染的影响。(2)通过在感染半径范围内的智能体计算情绪感染强度。(3)结合计算机动画实现情绪感染模拟结果可视化。针对本文提出的ECEM,本节设计了5个情绪感染实验加以验证。下面分别介绍相关的实验设置、实验内容和实验探讨。

3.1 实验设置

场景1. 仿真场景建立一个宽度为40 m,长度为40 m的虚拟室内广场,出口门宽1 m,火源的位置在广场里面;其中智能体的半径0.4 m,高1.6 m。当发生火灾紧急事件时,智能体冲向唯一的出口。

智能体个性设置:为了体现不同个性的智能体,初始场景用不同的颜色代表不同个性的智能体,如表2所示。

智能体情绪设置:在整个疏散实验过程中,智能体的情绪是一个变化的过程,本文用不同的颜色代表不同的情绪,如表3所示。

场景2. 本实验选择教室环境,宽度为7.2 m,长度8.5 m,出口门宽0.8 m。实验展示地震时学生从教室快速疏散的场景。

表2 个性与相关颜色

个性类型	代表颜色
O	Cyan
C	Gray
E	Blue
A	Black
N	Purple

表3 情绪与相关颜色

情绪强度 p	状态	颜色
$0 < p < 0.45$	平静	Green
$0.45 \leq p < 0.50$	警觉	Yellow
$0.50 \leq p$	恐慌	Red

场景3. 本实验选择超市环境,宽度为60 m,长度120 m,货架长度10 m,宽度3 m。起火点在超市的左边墙体中部,火灾影响范围的速度0.1 m/s,火灾信息传递速度1 m/s;共有400个智能体在超市中随机分布运动。在起火点最近的智能体(假设距离小于0.5 m)的情绪变为恐慌情绪,并开始疏散。智能体半径0.4 m,初始速度平均1.5 m/s,最大速度3 m/s。恐慌情绪在人群中传播,引发人群的疏散行为,情绪感染半径为10 m。对不同的模型设置不同的情绪阈值(当情绪强度超过这个阈值,智能体开始疏散)。对本文模型,如果疏散人数占总人数比例不超过0.6,智能体情绪阈值为0.45;如果已经疏散的人数占总人数比例达到0.6,则智能体情绪阈值为0.05。而对其他模型,情绪阈值取0.50~0.75的随机数。本实验中在超市过道的纵横交叉处设置导航点,用于引导智能体的人群的运动方向(上、下、左、右)。假设智能体都熟悉疏散线路(知道门口的位置和导航点),智能体选择附近距离门口更近的导航点运动。初始状态下,不同智能体所占比例如下: O 型智能体15%, C 型智能体20%, E 型智能体20%, A 型智能体20%, N 型智能体25%。

3.2 实验结果和分析

实验1~3针对场景1,实验4针对场景2,实验5针对场景3。

(1) 实验1. 静态-动态。

本实验主要是仿真智能体处于静态和动态2种情况下的情绪感染情况,如图3所示。图3a是静态场景下智能体情绪感染现象,图3b是动态场景下智能体情绪感染现象。图4所示为2种情况下随时间增长被感染人数的变化趋势。

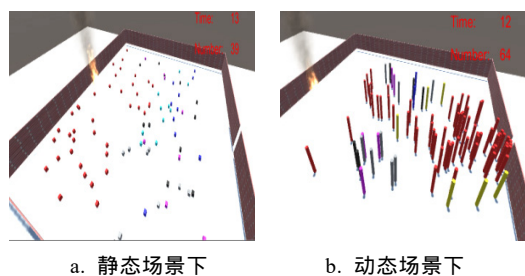


图 3 静态和动态情绪感染对比

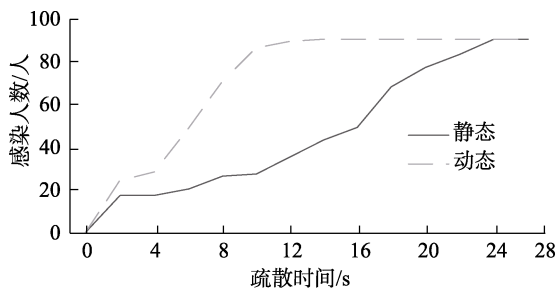


图 4 不同状态下对情绪感染的影响

对图4结果进行分析:虽然智能体的初始分布是随机的,但由于静态和动态情景的差异性,2种状态下情绪感染的速度是不一样的.从图4可以看出,开始时,2种场景下情绪感染速度差异不大.后来,在动态情景下,随着智能体向出口快速移动,缩短了智能体之间的距离,从而促进智能体之间的情绪感染,加速整个感染过程.静态感染总时间大约是26s,而动态感染总时间大约是14s.因此,动态情景下人群情绪感染现象更加明显,符合现实人群疏散引起的情绪感染规律.

(2) 实验 2. 不同个性.

为验证不同个性在情绪感染过程发挥作用的差异性,本实验以90人为例来开展实验.图5展示的是开放型(O)个性占总人数不同比例(20%, 40%, 60%, 80%)情况下的情绪感染情况.

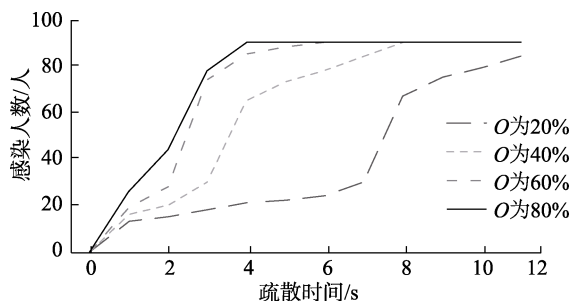


图 5 开放型 O 个性对情绪感染的影响

对图5结果进行分析:开放型个性的人具有很强的情绪感染能力,因此随着开放型人数量比例

的增加,感染的速度也在加快.例如,当开放型个性占总人数的20%时,需要10s以上才能实现大部分人群被感染;当开放型个性占总人数的80%时,仅需4s左右即可实现大部分人群被感染.由此可见,不同的个性对情绪感染的影响大不相同.

(3) 实验 3. 不同人数.

本实验将总人数分为60人、90人和120人3组,验证相同环境下不同的总人数对情绪感染的影响,如图6所示.

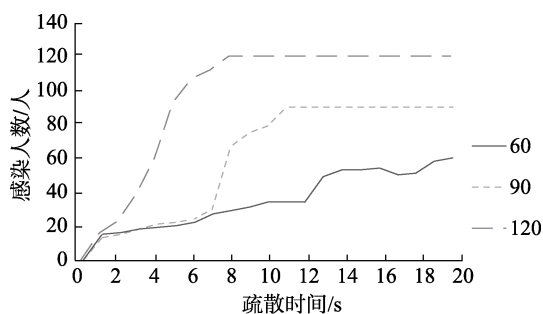


图 6 相同环境下不同人数对情绪感染的影响

对图6结果进行分析:不同的总人数对情绪感染的影响大不相同.从图6中可以看出,随着总人数的增加,感染时间反而降低.当总人数为60人时,大致需要20s才能实现整体感染;而当总人数为120人时,仅需8s即可实现整体感染.这与现实中人群密度增加,缩短人与人之间的距离,能更快实现情绪感知、感染相符合.

(4) 实验 4. 真实场景的对比实验.

本实验选取了图7所示一段发生在四川芦山7.0级地震的学校教室监控视频,通过该视频创建了图8所示教室的布局,视频中疏散学生的平均速度接近3m/s.通过对比发现,整体上仿真的疏散时间和真实的情况大致相同,如图9所示,从侧面印证了本文模型的有效性.



图 7 视频监控真实画面

通过仿真实验发现,情绪感染虽然可以加快人群的疏散,但是由于人群迅速向出口疏散,会导

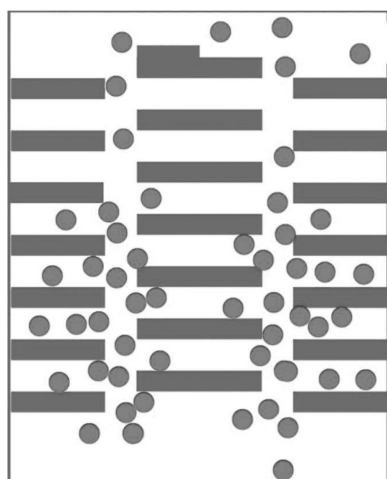


图 8 疏散场景仿真

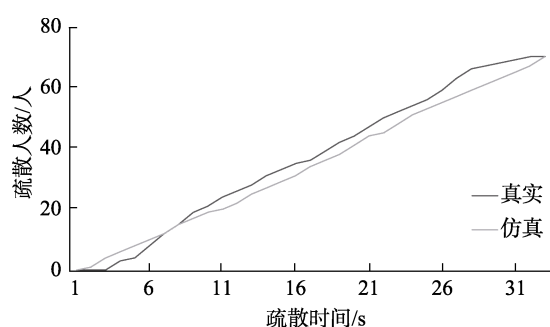


图 9 疏散时间对比

致出口人群拥挤的风险加大。

(5) 实验 5. 复杂场景的对比实验.

图 10 显示了智能体的导航点设置. 图中的圆点为导航点, 矩形为货架. 如果智能体感知到导航点(在其可视范围), 则选择距离出口较近的导航点作为移动的目标点.

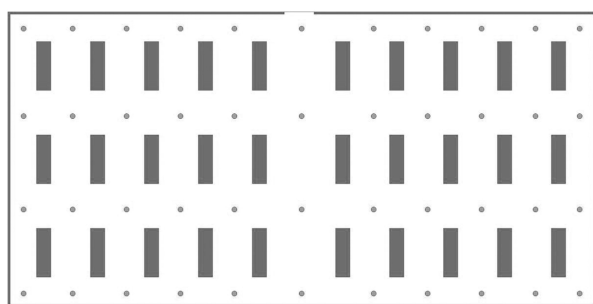


图 10 超市环境中设置的导航点示意图

在图 11 中, 左边的红色圆盘表示火焰在不断扩散, 浅黄色的圆盘表示火灾信息向外传播, 红色的智能体表示处在情绪感染状态的智能体, 黄色的表示智能体处于警觉状态. 图 12 反映了人群迅速涌向出口的情景.

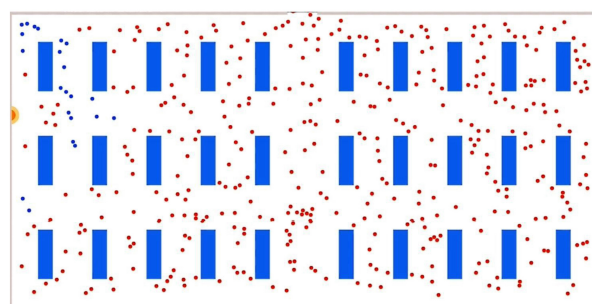


图 11 情绪开始在人群中扩散

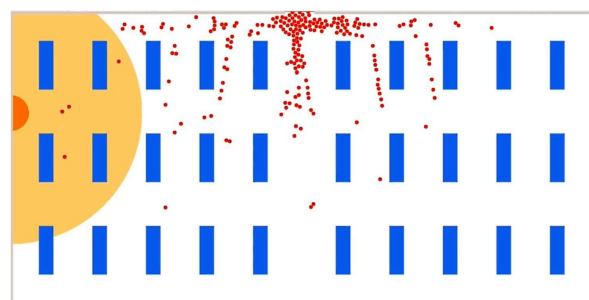


图 12 人群迅速涌向出口

本实验将本文模型与社会力模型、Durupinar 模型和 CA-SIRS 模型的人群疏散现象进行对比分析. 这里考虑左侧距离火灾点最近的智能体最早产生情绪强度变化, 然后通过不同的情绪感染算法来计算智能体的情绪变化. 对于社会力模型, 如果假设所有智能体同时启动疏散, 显然不合理. 最合理的假设是处于火灾信息传播范围内的智能体首先启动疏散.

图 13 反映了火灾过程中, 逃出人数和疏散时间的关系. 因为初始位置是相同的, 但是开始运动方向有随机性, 因此造成每次运行的疏散时间有一定的波动. 图 13 是 5 次实验的平均值. 从图 13 中可以看出, 社会力模型由于未能考虑智能体的感知和情绪感染, 采用社会力模型计算的疏散时

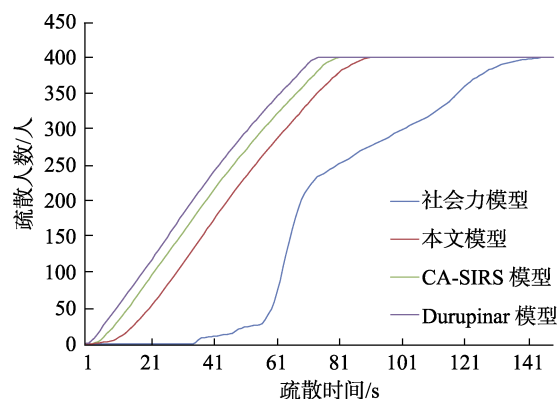


图 13 各种模型疏散时间的对比

间要更长. CA-SIRS 模型没有考虑智能体情绪感染的范围, 因此情绪感染速度较快. 本文感染模型由于考虑情绪感染范围(本次实验取情绪感染半径 10 m), 因此感染效果要慢于 CA-SIRS 模型.

图 14 反映了火灾过程中聚集在出口区域的人数和逃生时间的关系, 其中智能体的初始运动方向是随机的, 图 14 所示为一次实验的结果, 从中可以看出, 每种模型在出口区域人数都有一个峰值. 由于社会力模型在有障碍物环境下很难提高速度, 人群需要较长时间聚集在出口. CA-SIRS 模型在计算感染速度和仿真效果上相似, 感染速度较快, 大量人群快速聚集在出口. 本文感染模型考虑距离对情绪感染的影响, 使人群逐步实现感染, 人群聚集在出口的峰值稍低, 在一定程度上减缓了出口拥堵. 这表明, 在类似火灾情景下, 情绪感染模型能驱使人群尽快逃离现场, 接近实际人群逃生情景.

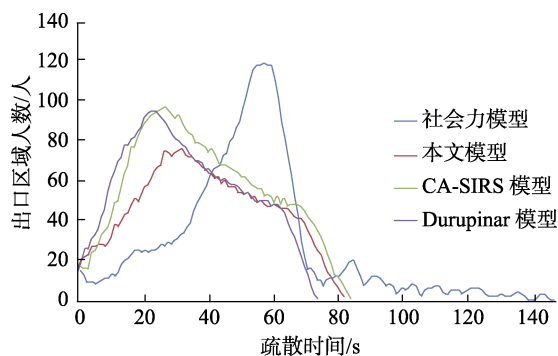


图 14 各种模型在出口区域人数的对比

另外, 通过对比发现, 情绪感染尽管能够加快人群疏散, 但也加快了人群在出口附近的快速聚集, 增加了人群聚集风险. 适度地控制情绪感染范围, 尽管可能延长了疏散时间, 但是会降低出口人群聚集风险.

3.3 实验探讨

个体之间的情绪感染特性与热传递很相似. 根据上述实验, 归纳总结出影响情绪感染的因素如下:

- (1) 动态. 动态情景下比静态情景下情绪感染耗时更少.
- (2) 个性. 不同个性感染的速度有差异, 开放型人群感染速度最快.
- (3) 密度. 感染时间随人群密度增加而减少.

此外, 距离也是不可忽视的因素之一. 例如, 智能体与危险源之间的距离越近, 则对感染强度

影响越大.

发生突发事件时, 人群快速向安全出口移动, 进而出现人群聚集现象. 智能体的情绪会影响智能体的移动速度; 通常情况下, 情绪强度越高, 速度越快. 因此有情绪感染的人群会以更快速度聚集, 这一现象符合现实规律. 在人群疏散实验中, 针对同一紧急事件, 人群疏散经历的周围环境是变化的. 人群密度经历从小到大的过程, 即自由疏散和拥堵疏散 2 种情况. 在自由疏散阶段, 智能体个性特征比较突出, 个体个性占主导, 影响情绪的感染. 在聚集疏散阶段, 智能体个性特征不明显, 群体特征占主导. 聚集时, 群体情绪对疏散的影响体现在智能体很难超越前方智能体, 主要是依次排队通过出口. 与 CA-SIRS 模型和 Durupinar 模型相似, 人群疏散行为比较吻合视频录像, 使人群仿真效果更加逼真. 通过实验发现, 感染半径越大, 情绪传播越快, 疏散速度越快.

从情绪的特征和维度看, 紧急情况下, 恐慌是主流情绪. 用恐慌强度来表征情绪是本文研究的重点, 有助于合理分析人群在灾难中的应急疏散过程. 恐慌是一种突如其来的恐惧感, 替代了正常的思考, 影响了人群的集体行动; 恐慌通常出现在灾难或暴力的场合, 影响了所有人的人身安全. 如火灾或地震等灾难带来的常见景象是, 人群在恐慌和失序中狂奔, 这是典型的群体性恐慌的心理表现. 因此人们把疏散行为与恐慌联系起来, 把伤亡的结果归结为恐慌. 过度的恐慌反应常常会导致比事件危害本身更为严重的消极后果.

认知心理学认为, 恐慌心理是指人们在面对想象或现实的威胁时所产生的特定心理反应. 恐慌主要体现为过度紧张、焦虑不安、无安全感等. 恐慌一直作为一种导致群体灾难的原因而得到研究, 尤其是对社会应急管理过程的研究. 本文研究恐慌情绪的建模方法同样适用于其他情绪的分析, 具有一定的普适性.

4 结论与未来工作

随着我国经济社会的快速发展, 各种大型活动日趋增多, 人群高度密集, 极易引发拥挤事故. 人群应急疏散是公共安全管理中的一个重要环节. 开展人群应急疏散仿真研究可以推演人群在突发事件时的群体行为, 帮助人群管理者找到人群疏散的瓶颈, 从而及早做出有针对性的对策, 有助于

减少事件中的人员伤亡。

现有应急疏散研究大多基于力学模型,很少考虑个性和情绪对疏散行为的影响,对极端情况下的疏散行为考虑不够全面,很难真实反映紧急疏散的情景。实际上,人群中的情绪是客观存在的,情绪对人群疏散行为的影响不可忽略,群体情绪扮演着十分重要的角色,其作用不可低估。本文提出了一个考虑情绪感染应急疏散仿真框架,从情绪感染的机理出发,依据心理学和经验数据构造了情绪感染算法,最终通过可视化形象呈现人群疏散的群体景象,为制定人群应急管理提供了一种直观方法。

本文模型的仿真实验和其他模型相比,采用社会力模型来推演人群行为,仅仅考虑力的存在,忽视了人群个体之间的情绪感染,其结果低估了人群短时间在出口大量聚集的风险。如果出口过小,极易产生踩踏事件,社会力模型适合推演紧急疏散过程中障碍物比较少的简单场景。CA-SIRS模型和 Durupinar 模型采用的是传染病机制,其原理是由种子节点引发整个人群情绪感染,情绪感染范围是整个人群,适合推演人群情绪快速感染的情景。本文模型根据案例获取人群仿真参数,有助于分析人群争先恐后的疏散现象。考虑距离和个性对感染的影响,情绪从危险源向四周逐步扩散,感染过程更详细,适合推演应急疏散过程中人群逐步感染情绪的情景。仿真实验表明,情绪感染有益于人群及早感知危险源,但是也增加疏散出口的拥挤风险。因此突发事件来临时,急需加强人群疏散的管理,适度控制人群的情绪传播,加强对出口附近人群的指挥管理,能有效地降低人群安全隐患。

鉴于人群疏散情景多种多样,现有的研究工作还需要进一步完善,下一步的工作将加强突发事件案例的收集,考虑个体的多通道感知,开展针对复杂环境下的小群体导航模型研究,进一步推进现有工作。

参考文献(References):

- [1] Xu M L, Jiang H, Jin X G, *et al.* Crowd simulation and its applications: recent advances[J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2014, 29(5): 799-811
- [2] Georgoudas I G, Kyriakos P, Sirakoulis G C, *et al.* An FPGA implemented cellular automaton crowd evacuation model inspired by the electrostatic-induced potential fields[J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2010, 34(7/8): 285-300
- [3] Gutierrez-Milla A, Borges F, Suppi R, *et al.* Crowd evacuations SaaS: an ABM approach[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 51: 473-482
- [4] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. *Nature*, 2000, 407(6803): 487-490
- [5] Chao Q W, Jin X G, Huang H W, *et al.* Force-based heterogeneous traffic simulation for autonomous vehicle testing[C] // *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2019: 8298-8304
- [6] Han Y B, Liu H. Modified social force model based on information transmission toward crowd evacuation simulation[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2017, 469: 499-509
- [7] Bosse T, Duell R, Memon Z A, *et al.* Agent-based modeling of emotion contagion in groups[J]. *Cognitive Computation*, 2015, 7(1): 111-136
- [8] Bosse T, Duell R, Memon Z A, *et al.* A multi-agent model for mutual absorption of emotions[OL]. [2019-06-24]. https://www.researchgate.net/publication/228955105_A_Multi-Agent_Model_For_Mutual_Absorption_Of_Emotions
- [9] Tsai J, Fridman N, Bowring E, *et al.* ESCAPES: evacuation simulation with children, authorities, parents, emotions, and social comparison[C] // *Proceedings of the 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. New York: ACM Press, 2011: 457-464
- [10] Tsai J, Bowring E, Marsella S, *et al.* Empirical evaluation of computational fear contagion models in crowd dispersions[J]. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2013, 27(2): 200-217
- [11] Xiang Nan, Zhu Lingyun, Zhang Mingmin. Pedestrian dynamic aggregation simulation model with emotional affection[J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(10): 2395-2400+2408(in Chinese)
(向南, 朱凌云, 张明敏. 情感影响下的行人动态聚集过程仿真模型[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(10): 2395-2400+2408)
- [12] Durupinar F, Gudubay U, Aman A, *et al.* Psychological parameters for crowd simulation: from audiences to mobs[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2016, 22(9): 2145-2159
- [13] Fu L B, Song W G, Lv W, *et al.* Simulation of emotional contagion using modified SIR model: a cellular automaton approach[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2014, 405: 380-391
- [14] Cao Mengxiao, Zhang Guijuan, Huang Lijun, *et al.* Crowd animation generation method based on personalized emotional contagion[J]. *Computer Science*, 2017, 44(6): 306-311+316(in Chinese)
(曹梦晓, 张桂娟, 黄丽君, 等. 基于个性化情绪感染的人群动画生成方法[J]. *计算机科学*, 2017, 44(6): 306-311+316)
- [15] Mao Y, Li Z N, Li Y J, *et al.* Emotion-based diversity crowd behavior simulation in public emergency[J]. *The Visual Computer*, 2019, 35(12): 1725-1739
- [16] Aydt H, Lees M, Luo L B, *et al.* A computational model of emotions for agent-based crowds in serious games[C] // *Proceedings of IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*. Los Alamitos:

- IEEE Computer Society Press, 2011: 72-80
- [17] Liu Zhen, Jin Wei, Huang Peng, *et al.* An emotion contagion simulation model for crowd events[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2013, 50(12): 2578-2589(in Chinese)
(刘箴, 金伟, 黄鹏, 等. 人群拥挤事件中的一种情绪感染仿真模型研究[J]. *计算机研究与发展*, 2013, 50(12): 2578-2589)
- [18] Liu Z, Liu T T, Ma M H, *et al.* A perception-based emotion contagion model in crowd emergent evacuation simulation[J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2018, 29(3-4): Article No.e1817
- [19] Wu Yunpeng, Du Yuanze, Ye Yangdong. Real-time emotion-integrated crowd path planning[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2015, 20(9): 1262-1274(in Chinese)
(吴云鹏, 杜沅泽, 叶阳东. 融入情绪模型的人群实时路径规划[J]. *中国图象图形学报*, 2015, 20(9): 1262-1274)
- [20] Li B, Sun D Y, Lin Z H, *et al.* Agent-based simulation research on group emotion evolution of public emergency[C] // *Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2014: 497-502
- [21] Wang Chunxue, Lyu Shuran, Yang Kai. Research on probability of fear contagion in emergency[J]. *China Safety Science Journal*, 2015, 25(9): 14-19(in Chinese)
(王春雪, 吕淑然, 杨凯. 突发事件中恐惧情绪感染概率研究[J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(9): 14-19)
- [22] Saifi L, Boubetra A, Nouioua F. An approach for emotions and behavior modeling in a crowd in the presence of rare events[J]. *Adaptive Behavior*, 2016, 24(6): 428-445
- [23] Ntika M, Sakellariou I, Kefalas P, *et al.* Experiments with emotion contagion in emergency evacuation simulation[C] // *Proceedings of the 4th International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics*. New York: ACM Press, 2014: Article No.49
- [24] Başak A E, Gündükbay U, Durupınar F. Using real life incidents for creating realistic virtual crowds with data-driven emotion contagion[J]. *Computers & Graphics*, 2018, 72: 70-81
- [25] Bernardini G, Quagliarini E, D'Orazio M. Towards creating a combined database for earthquake pedestrians' evacuation models[J]. *Safety Science*, 2016, 82: 77-94
- [26] Goldberg L R. An alternative "description of personality": the big-five factor structure[J]. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1990, 59(6): 1216-1229
- [27] Durupınar F, Pelechano N, Allbeck J M, *et al.* How the ocean personality model affects the perception of crowds[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2011, 31(3): 22-31
- [28] Lhommet M, Lourdeaux D, Barthès J P. Never alone in the crowd: a microscopic crowd model based on emotional contagion[C] // *Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2011: 89-92