



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

考虑行人特征与领导者角色的改进社会力模型

林金城, 纪庆革, 钟圳伟

引用本文

林金城, 纪庆革, 钟圳伟. [考虑行人特征与领导者角色的改进社会力模型](#)[J]. 计算机科学, 2022, 49(5): 347-354.

LIN Jin-cheng, JI Qing-ge, ZHONG Zhen-wei. [Modified Social Force Model Considering Pedestrian Characteristics and Leaders](#)[J]. Computer Science, 2022, 49(5): 347-354.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[切换拓扑条件下的多无人机系统编队包含控制](#)

Formation Containment Control of Multi-UAV System Under Switching Topology

计算机科学, 2020, 47(6A): 577-582. <https://doi.org/10.11896/JsJkx.190700064>

[考虑行人相对速度的改进社会力模型的验证与评估](#)

Verification and Evaluation of Modified Social Force Model Considering Relative Velocity of Pedestrians

计算机科学, 2020, 47(2): 88-94. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.190500055>

[一种面向人群疏散的高效分组方法](#)

Efficient Grouping Method for Crowd Evacuation

计算机科学, 2019, 46(6): 231-238. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2019.06.035>

[面向人群疏散仿真的异构情绪感染模型](#)

Heterogeneous Emotional Contagion Model for Crowd Evacuation Simulation

计算机科学, 2019, 46(3): 287-297. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2019.03.043>

[密度场下的短程社会力模型](#)

Social Force Model for Crowd Simulation Using Density Field

计算机科学, 2015, 42(6): 12-17. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2015.06.003>

考虑行人特征与领导者角色的改进社会力模型

林金城 纪庆革 钟圳伟

中山大学计算机学院 广州 510006

广东省大数据分析处理重点实验室 广州 510006

(ljc_tee@163.com)

摘要 社会力模型是人群运动仿真中的经典模型,该模型将行人的主观意愿和行人之间的相互影响等都通过“力”的形式来表达,模型简洁且易于解释,但是影响行人运动的因素是多方面的,原始社会力模型中自驱力和心理力的计算存在不足。为了使模型能够仿真出真实的运动过程,研究者们对社会力模型进行了改进。文中主要研究了人群疏散过程中的主体:行人。从行人特征和行人角色两个方面对行人进行建模,其中行人特征包括行人之间的亲疏关系、行人性格以及个体情绪,不同亲密程度的行人之间的干扰程度不同,而行人情绪也会影响行人的判断;行人角色方面考虑了领导者和普通行人,分析了不同行人角色对疏散过程的影响,领导者可以帮助普通行人疏散。通过人群自组织仿真实验,验证了改进模型能够仿真出真实的人群疏散状况,保留原模型的优势。同时,统计了4种仿真模型下人群的疏散效率和出口利用率,对实验数据中的均值和分布情况进行了分析。实验结果表明,导致行人疏散时间过长的主要原因是寻找出口耗时过长以及出口利用率不平衡。一般情况下,行人特征和领导者角色对行人疏散效率有积极影响,行人特征可以加快行人聚集以及优化行人期望速度,而领导者角色在帮助行人寻找出口的基础上,平衡了行人对出口的利用,保证了各出口疏散人数基本相同。

关键词: 人群疏散;社会力模型;行人特征;领导者;疏散效率

中图分类号 TP391.9

Modified Social Force Model Considering Pedestrian Characteristics and Leaders

LIN Jin-cheng, JI Qing-ge and ZHONG Zhen-wei

School of Computer Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

Guangdong Key Laboratory of Big Data Analysis and Processing, Guangzhou 510006, China

Abstract Social force model is a classic model in crowd movement simulation. The model expresses the subjective wishes of pedestrians and the interaction between pedestrians in the form of “force”. The model is concise and easy to explain. However, there are many factors that affect pedestrian movement, and the calculation of self-driving force and social psychological force in the primitive social force model is insufficient. In order to enable the model to simulate the real movement process, many researchers have improved the social force model. This paper mainly studies the subject in the process of crowd evacuation, pedestrians. Pedestrians are modeled from two aspects: pedestrian characteristics and pedestrian roles. The characteristics of pedestrians include the social relationship between pedestrians, the personality of pedestrians and individual emotions. The degree of interference between pedestrians with different levels of intimacy is different, and pedestrian emotions will also affect the judgment of pedestrians. The role of pedestrians considers leaders and ordinary pedestrians, and analyzes the impact of different pedestrian roles on the evacuation process. Leaders can help ordinary pedestrians to evacuate. Crowd self-organization simulation experiments verifies that the improved model can simulate the real crowd evacuation situation and retain the advantages of the original model. At the same time, the evacuation efficiency and exit utilization rate of the crowd under four simulation models are counted, and the average value and distribution of the experimental data are analyzed. Experimental results show that the main reasons for the long evacuation time are the time-consuming search for exits and the unbalanced utilization rate of exits. Generally, pedestrian characteristics and leaders have a positive impact on pedestrian evacuation efficiency. Pedestrian characteristics can accelerate pedestrian aggregation and optimize pedestrian expectation speed. On the basis of helping pedestrians to find exits, leaders can balance pedestrian's use of exits, and ensure that the number of evacuees at each exit is basically the same.

Keywords Crowd evacuation, Social force model, Pedestrian characteristics, Leaders, Evacuation efficiency

到稿日期:2021-05-20 返修日期:2021-11-18

基金项目:广东省自然科学基金面上项目(2016A030313288)

This work was supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China(2016A030313288).

通信作者:纪庆革(jissjg@mail.sysu.edu.cn)

1 引言

在公共场所中,聚集性事件存在严重的安全隐患,火灾、踩踏、游行示威等造成的伤亡事件频繁发生,引起了许多学者的关注。有关人群疏散过程的研究意义主要包括两个方面:1)研究人群在疏散时的特点,探究提高疏散效率的方法,以减少人员伤亡;2)对人群疏散过程的研究涉及行人分布、行人心理状态、建筑结构等内容,可以为交通、建筑、疾病防控等领域的研究提供理论支持。

根据描述行人行为的详细程度,可将基于规则模型分为两大类:宏观模型和微观模型。宏观模型将人群看作一个整体,而不具体描述人群中个体之间的相互影响,这类模型主要有流体模型^[1-2]、势能场模型^[3-4]等;微观模型则考虑了人群中的每一个个体,通过设定好的规则来体现个体之间的相互作用,这类模型主要有社会力模型^[5-6]、元胞自动机模型^[7-8]、RVO模型^[9]等。

社会力模型是一种经典的微观模型,学者们对原始社会力进行了大量的研究,以完善模型。针对仿真过程中的行人重叠问题,Parisi等^[10]提出了尊重因子的概念,利用尊重因子修正模型中自驱力的计算。Li等^[11]分析了行人的运动需求空间,将行人减速避让机制引入社会力模型。对于行人震荡问题,Gao等^[12]提出了另外一种改进方案,该方案考虑了人在运动过程中会预判自己和周围行人下一时刻的位置,并做出反应来减少震荡问题。Ji等^[13]提出了一种利用基于速度感知的社会力模型,该模型考虑了相对速度对相互作用力的影响,并利用了位置信息和速度信息。实验结果表明,该方法有效地缓解了振荡问题。Zhong等^[14]对Gao等提出的模型进行了验证和评估,通过实验验证了该改进社会力模型的优势,同时通过评估性实验证实了Gao等的改进社会力模型保留了能够模拟人群自组织现象的能力。

2 相关工作

2.1 社会力模型

1995年Helbing等首先提出了社会力的概念,并在2000年归纳了基于这一概念的人群疏散模型^[5-6]。社会力模型将促使人运动的因素分为两个方面:自身因素以及自身与外界交互的因素,通过力的方式来展示。自身因素通过自驱力来表示,它代表了个体主动向出口移动的意愿。自身与外界的交互因素用心理力和接触力来表示。心理力(或称作社会力)是一种非接触力,在真实的人群运动中,每个个体在潜意识上都需要一个安全距离,彼此之间保留一定的空隙,心理力代表了个体与周围保持距离的意愿。当人群密度过大时,人和人相互接触,不仅在心理上会有一种排斥力,在身体之间也会产生排斥力,这一部分力通过接触力来表示,具体包括垂直于接触面的排斥力和接触面切向方向的摩擦力。完整的社会力模型如式(1)所示:

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t)\vec{e}_i^0(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j \neq i} \vec{f}_{ij} + \sum_W \vec{f}_{iW} \quad (1)$$

社会力模型是一种基于牛顿第二定律的模型,式(1)左边部分是个体质量与加速度的乘积 ma ,式(1)右边部分是计算

个体所受合力 F 。其中 $m_i \frac{v_i^0(t)\vec{e}_i^0(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau_i}$ 代表自驱力, $\vec{v}_i(t)$ 代表行人当前的速度, $v_i^0(t)$ 表示行人期望速度的大小, $\vec{e}_i^0(t)$ 表示行人期望速度的方向, τ 表示松弛时间, \vec{f}_{ij} 表示行人 i 受到行人 j 的排斥力, \vec{f}_{iW} 表示行人 i 与障碍物 W 之间的排斥力。行人之间的排斥力 \vec{f}_{ij} 的计算式如下:

$$\vec{f}_{ij} = \vec{f}_{ij}^{\text{social}} + \vec{f}_{ij}^{\text{physic}} \quad (2)$$

$$\vec{f}_{ij}^{\text{social}} = A_i \text{EXP} \left[\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_i} \right] \vec{n}_{ij} \quad (3)$$

$$\vec{f}_{ij}^{\text{physic}} = \vec{f}_{ij}^{\text{body}} + \vec{f}_{ij}^{\text{slide}} \quad (4)$$

$$\vec{f}_{ij}^{\text{body}} = k \cdot g(r_{ij} - d_{ij}) \cdot \vec{n}_{ij} \quad (5)$$

$$\vec{f}_{ij}^{\text{slide}} = \kappa \cdot g(r_{ij} - d_{ij}) \cdot \Delta v'_{ji} \cdot \vec{t}_{ij} \quad (6)$$

$$\Delta v'_{ji} = (\vec{v}_j - \vec{v}_i) \cdot \vec{t}_{ij} \quad (7)$$

$$g(x) = \begin{cases} x, & r_{ij} > d_{ij} \\ 0, & r_{ij} \leq d_{ij} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\vec{f}_{ij}^{\text{social}}$ 表示行人 i 与行人 j 之间的社会力; $\vec{f}_{ij}^{\text{physic}}$ 表示行人 i 与行人 j 之间的接触力; $\vec{f}_{ij}^{\text{body}}$ 表示行人 i 与行人 j 垂直于接触面的反弹力; $\vec{f}_{ij}^{\text{slide}}$ 表示行人 i 与行人 j 在接触面切向方向的摩擦力; r_{ij} 表示行人 i 和行人 j 的半径和; d_{ij} 表示行人 i 到行人 j 的距离; \vec{n}_{ij} 为行人 j 指向行人 i 的单位向量;参数 k 表示行人身体的弹性系数;参数 K 表示滑动摩擦系数; \vec{t}_{ij} 表示与 \vec{n}_{ij} 垂直的切向单位向量; $\Delta v'_{ji}$ 表示行人 i 与行人 j 在 \vec{t}_{ij} 方向上的速度差。同理,行人与障碍物之间的排斥力 \vec{f}_{iW} 的计算式如下:

$$\vec{f}_{iW} = \vec{f}_{iW}^{\text{social}} + \vec{f}_{iW}^{\text{physic}} \quad (9)$$

$$\vec{f}_{iW}^{\text{social}} = A_i \exp \left[\frac{r_i - d_{iW}}{B_i} \right] \vec{n}_{iW} \quad (10)$$

$$\vec{f}_{iW}^{\text{physic}} = k \cdot g(r_i - d_{iW}) \cdot \vec{n}_{iW} + \kappa \cdot g(r_i - d_{iW}) (\vec{v}_i \cdot \vec{t}_{iW}) \vec{t}_{iW} \quad (11)$$

2.2 与领导者相关的改进模型

为了更好地模拟商场、车站等有工作人员协助疏散的场景,学者们提出了领导者的概念。领导者相当于公共场所中的工作人员,知道出口方向且能指导周围行人疏散。Ji等^[15]对舞厅中的人群疏散过程进行了仿真研究,提出了一种基于 A^* 算法的动态分组算法,用于模拟多个领导者的动态分组现象。Hou等^[16]于2014年在室内可视范围受限的人群疏散仿真研究中提出了一种结合领导者作用的社会力模型,研究了在出口数量不同的情况下,领导者数量和位置对人群疏散的影响。实验结果表明,在危险发生时,领导者应该尽可能出现在不同的出口位置。如果随机初始化领导者的位置,行人的疏散效率并不能达到最高。Yang等^[17]在2016年也使用了结合领导者的社会力模型,研究了在领导者引导下行人出现的聚集性,以及领导者的数量和位置对室内人群疏散的影响。Ma等^[18]研究了在有限的可视范围内,领导者对人群疏散的影响。该实验表明,当疏散人数较多时,只需要少量的领导者便可以有效地提高疏散效率,但当疏散人数较少时,反而需要较多的领导者才能达到较好的疏散效果。另外,领导者并不

总是起到积极作用,当人群密度足够高或者可视范围较大时,领导者的存在可能会减慢疏散效率。

2.3 考虑行人情绪的改进模型

在人群运动过程中,个体的情绪也是影响人群运动的重要因素,此前也有大量相关的研究。例如,Belhaj等^[19]认为,在紧急情形下,情绪对行人的行为和认知有重大影响,为此Belhaj等首先对灾难空间进行建模,利用OCC模型中的评价过程进行情绪生成计算,研究了紧急情况下情绪对个体行为和集体行为的影响。Bordas等^[20]重点研究了情绪在行人之间传染的问题,在情绪心理学研究和计算模型的基础上仿真情绪在人工环境中的传染。Liu等^[21]提出了一种以人行桥为背景的恐慌行为模型,描述了行人的结构及参数并做出假设,给出了在恐慌情绪作用下,个体的行为描述和感染过程。Liu等^[22]还提出了一种基于感知的情绪传染模型。在不同的紧急情况下,个体对事件的感知是不同的。例如在地震中,所有个体都会察觉到这一事件,但是火灾等场景可能只有部分人员会察觉到,然后进行信息的传播,个体的情绪和行为会随感知的信息发生变化。Xu等^[23]提出了一种多危险环境下的情绪传染模型,该方法考虑了场景中有多危险存在的情况,根据危险发生的位置建立危险场,当个体处于危险场内时,依据转换函数来计算个体的恐慌情绪,最后利用个体情绪值修正RVO模型并进行人群仿真。Wang等^[24]提出了异构的情绪传染模型,该模型根据人与人之间的距离将人群分为不同的小组,每个个体处于未感染状态(情绪值低于一定阈值)或者感染状态(情绪值等于或大于一定阈值),处于感染状态的个体可以向外界传播自身情绪,且情绪在组内传播和组间传播的影响不同。

3 改进模型与研究必要性

本节的主要工作是在前人的研究基础上,从行人特征和行人角色两个方面对行人建模,进而改进社会力模型,使仿真结果更接近真实场景。

3.1 行人关系建模

在原始社会力模型中,行人之间以及人与障碍物或墙壁之间都存在心理社会力,心理社会力用于表示行人之间未接触时彼此之间的心理排斥力,计算式如式(3)所示。从式(3)可以看出,影响行人之间心理社会力强度的因素只有彼此之间的距离,随着距离的增大,行人之间的社会力减小。在实际疏散过程中,行人之间存在不同程度的关系,关系亲密的行人之间会互相靠近,心理排斥力减小。为了更真实地表示行人之间的心理社会力大小,本节引入二维矩阵 γ 来表示行人之间的亲疏关系,并利用亲疏关系来修正心理社会力的计算,如式(12)所示。

$$\vec{f}_{ij}^{\text{social}} = (1 - \gamma_{ij}) A_i \exp\left[\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_i}\right] \vec{n}_{ij} \quad (12)$$

其中, γ_{ij} 表示行人*i*与行人*j*之间的亲疏关系, d_{ij} 表示行人*i*与行人*j*之间的距离, \vec{n}_{ij} 表示由行人*j*指向行人*i*的单位向量。

3.2 行人情绪建模

在疏散过程中,情绪对行人的运动状态具有重要影响,

因此本文模型中考虑了情绪因素。在恐慌环境中,行人的情绪来源于4个方面:行人情绪初值、情绪的传染、情绪衰减和积极情绪传染。

在疏散环境中,行人的情绪初值并不相同,本文设置行人的情绪初始值 E_i^0 服从高斯分布,并且行人情绪在高于阈值*m*时,该行人处于情绪感染状态,它会将情绪传染给周围一定范围内的其他行人。

在情绪感染过程中,不同的性格特点决定了一个人受影响的程度,每个行人都有不同的性格特点。本文通过行人的个性特征来定义情绪影响因子 α ,表示行人易受周围其他行人情绪影响的程度。

首先对行人的个性特征进行建模。OCEAN模型是人群仿真中最常用的个性模型。本文方法考虑了5种性格特点中的开放积极O(Openness)、随和友好A(Agreeableness)和脆弱敏感N(Neuroticism)对行人恐慌情绪的影响。利用这3种性格特征计算行人的情绪感染因子 α ,其计算式如式(13)所示:

$$\alpha = \omega_1 \cdot f_o + \omega_2 \cdot f_a + \omega_3 \cdot f_n \quad (13)$$

在情绪感染过程中,行人关系和距离是影响彼此情绪传染的另外两个重要因素。行人之间的距离越近,彼此的影响越明显,行人之间的关系越密切,彼此的影响也越明显,因此模型将前面定义的行人亲疏关系引入情绪传播过程中。行人彼此之间的情绪并不一定通过视觉来传染,在疏散过程中,行人的呐喊、呼救等可以通过声音进行传播,因此在情绪传染中将感染范围设定为*R*的圆形范围。个体*i*受到的情绪传播的积累量用 N_i 表示,则:

$$N_i = \sum_{j \in \text{neighbor}(i)} \alpha \cdot \gamma_{ij} \cdot \frac{dis_{ij}}{R} \cdot E_j \quad (14)$$

$$dis_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}R} \cdot e^{-\frac{d^2}{2R^2}}, & d < R \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

在疏散过程中,不仅存在消极的情绪传播,也存在积极的情绪传染。当个体发现出口或者领导者时,行人的情绪会逐渐趋于稳定。领导者角色对普通行人的情绪有安抚作用,模型中将这种积极的情绪传染用 P_i 表示。另外,随着时间的增长,行人的情绪会稳定地衰减,其表达式为:

$$\Delta E_i = -k \cdot \Delta t \quad (16)$$

最终,行人情绪量的计算式如式(17)所示:

$$E_i = E_i^0 + N_i + P_i + \Delta E_i \quad (17)$$

3.3 行人角色建模

领导者代表的是公共场所中的工作人员或者负有责任感的行人,领导者的位置一般处于靠近出口的位置。与普通行人不同,领导者对环境更为熟悉,因此在疏散过程中,领导者知道出口位置,并且会带领周围的普通行人一起向出口移动。此时普通行人的期望速度方向满足以下4条规则:

(1)当个体在可视范围内未发现出口,并且在前进方向发现了墙壁时,行人会在合理的角度范围内随机选择期望速度方向。我们以水平向左方向为基准,顺时针旋转为正,逆时针旋转为负,则行人随机方向的选择范围如表1所列。由于行人的可视范围有限,而出口位置必然在墙壁上,因此我们分析

了行人在随机选择期望方向时会更多地考虑沿墙壁方向疏散的情形。

表 1 行人遇到墙壁后的期望方向选择

Table 1 Pedestrian's choice of desired direction after encountering wall

行人朝向的墙壁	期望方向范围
左边墙壁	$[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$
右边墙壁	$[\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}]$
上边墙壁	$[\pi, 2\pi]$
下边墙壁	$[0, \pi]$

(2)当个体在可视范围内未发现出口并且未遇到障碍物时,遵循从众心理。此时个体的期望速度方向计算式如式(18)所示:

$$\vec{e}_i^0 = \text{Norm}[(1-p_i)\vec{e}_i + p_i \langle \vec{e}_j^0 \rangle_i] \quad (18)$$

其中,恐慌因子由行人情绪等特征计算得到, \vec{e}_i^0 表示行人*i*的期望速度方向, \vec{e}_i 表示行人*i*当前的速度方向, $\langle \vec{e}_j^0 \rangle_i$ 表示行人*i*周围其他行人*j*的期望速度方向, $\text{Norm}(\mathbf{z}) = \mathbf{z} / \|\mathbf{z}\|$ 表示向量 \mathbf{z} 的单位向量。

(3)当个体在可视范围内未发现出口但发现领导者时,此时行人的期望速度大小设置为速度最大值。行人的期望速度方向会受到距离该行人最近的领导者的影响,计算式遵循Hou等^[16]提出的公式,如式(19)、式(20)所示:

$$\vec{e}_i^0 = \rho \vec{e}_j^0 + (1-\rho)\vec{n}_{ij} \quad (d_{ij} \leq \delta) \quad (19)$$

$$\rho = \exp\left(-\frac{d_{ij}}{2\delta}\right) \quad (20)$$

其中, \vec{e}_j^0 表示距离行人*i*最近的领导者*j*所指的出口方向, \vec{n}_{ij} 表示行人*i*指向领导者*j*的单位向量。 ρ 表示权重因子,是行人*i*和领导者*j*距离的函数。距离越大,权重因子 ρ 越小,普通行人更倾向于向领导者移动;距离越小,权重因子 ρ 越大,普通行人更倾向于向领导者所指的出口方向移动。

(4)当个体在可视范围内发现出口时,个体明确了逃生的位置,并且会加速逃离,因此设置个体的期望速度方向就是当前位置指向出口的方向,设置个体期望速度的大小为速度最大值。

在疏散过程中,领导者也会受到周围行人的影响而运动,领导者的运动规则如下:1)领导和普通行人一样,会受到社会力模型的约束,并在力的作用下逐渐运动,最终和行人一起离开房间;2)领导者知道出口位置,因此领导者的期望速度方向始终指向最近的出口方向;3)领导者在疏散时要帮助更多行人疏散,自己会运动较慢,模型中领导者的期望速度大小设置为普通行人的一半。

3.4 实验研究的必要性

(1)本文对每一类情形都进行了10次重复实验,并对实验数据进行了分布统计和分析。由于行人疏散时间存在较大的波动,因此对数据分布的分析很有必要。

(2)大多数研究仅考虑了领导者角色,并将改进的模型与原社会力模型进行对比,而忽略了行人特征对疏散过程的影响。本文比较了仅考虑了行人特征的模型和同时考虑行人特征和领导者的模型,得到的实验结果更为真实。

(3)大多数研究仅考虑了行人特征中的某一种因素或者部分因素。本文从行人关系、行人性格以及行人情绪3个方面对行人进行建模,同时,在情绪的感染与变化上考虑了4个方面的影响因素。

(4)本文通过实验对人群疏散情况和疏散过程进行了分析,同时分析了普通行人沿墙壁疏散过程对疏散效率的影响,对现实疏散场景具有指导意义。

4 人群自组织现象实验

为了验证改进的模型能否仿真一些特定的真实疏散状况,本节使用改进的社会力模型进行人群自组织实验。包括拱形堵塞实验、自动渠化实验、瓶颈抖动实验和羊群效应,并分析了实验现象和结果。

4.1 拱形堵塞

拱形堵塞现象的仿真实验环境如图1所示,房间的长、宽均为20m,考虑了200人分别在单出口和四出口的房间的疏散情形,对于每一种出口布局,设置与出口数量相同的领导者数量。

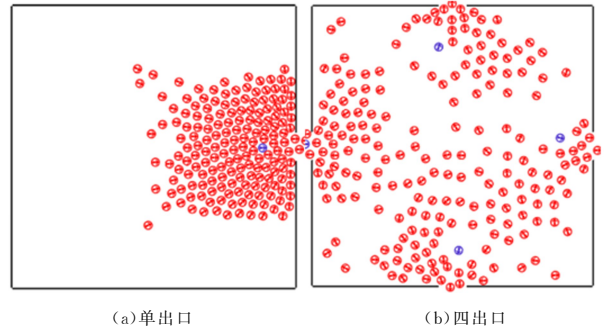


图 1 拱形堵塞

Fig. 1 Arched congestion

图1(a)给出了单出口情形下的拱形堵塞现象,由于领导者的角色期望速度比普通行人的期望速度慢,因此领导者和普通行人拥挤在一起;图1(b)给出了四出口情形下的疏散情况,此时疏散效率较高,200人在疏散时不易发生拱形堵塞现象。

4.2 自动渠化

自动渠化实验在长40m、宽8m的长廊中进行,如图2所示,其中蓝色个体代表从左往右的行人,红色个体代表从右往左的行人,每间隔3s,长廊左右两边均随机产生5个行人。从图2(b)可以看出,一段时间后,长廊中行人的密度达到了一定程度,在相互作用下自动形成了人流。

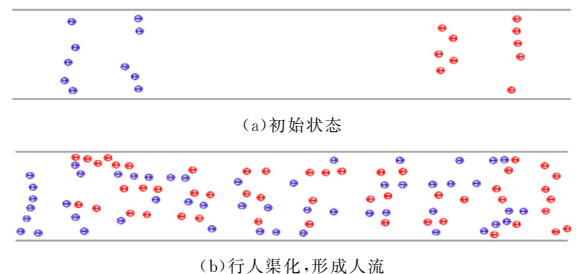


图 2 自动渠化实验(电子版为彩图)

Fig. 2 Lane formation experiment

4.3 瓶颈抖动

瓶颈抖动现象的仿真实验如图3所示。图3(b)给出了右边行人获得通道口的情形,图3(c)给出了左边行人获得通道口的情形。在瓶颈抖动现象中,两边行人产生的压力不同,使得两边交替获得通道口。在平静状态下,行人以较慢的速度聚集在出口处,容易形成稳定状态(即两边行人都无法通过)。在考虑行人情绪的情形下,行人期望速度更大,瓶颈抖动现象会更为明显。

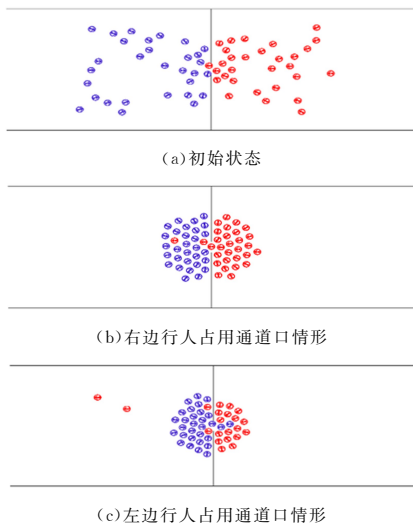


图3 瓶颈抖动

Fig. 3 Oscillations at bottlenecks

4.4 羊群效应

在可视范围有限的情况下,行人不能直接看到出口位置,因此会跟随周围的行人一起运动,随着恐慌情绪的加剧,这种从众心理会更加严重。图4给出了单出口情形下的羊群效应。

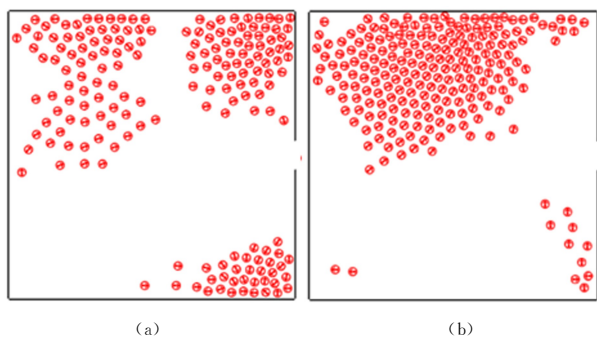


图4 羊群效应

Fig. 4 Herd effect

由图4(a)可以看出,在从众心理下,行人在空间内分成了3个小团体。由图4(b)可以看出,行人在从众心理下都涌向了上边界,由于恐慌情绪等因素跟随他人运动,当发现某处聚集非常多的人时,会误以为此处存在逃生出口,因此聚集的人越来越多,盲目拥堵在没有出口的位置,耗费疏散时间。

5 疏散效率对比实验

本节对模型的效果进行了对比实验,分析不同的因素对行人疏散过程的影响。实验中的对比模型包括原始社会力模型、仅考虑行人特征的改进社会力模型、考虑行人特征

和领导者的改进社会力模型以及行人遇到墙壁后沿墙壁寻找出口的改进模型。加入最后一种模型进行对比实验主要是为了验证在视线受阻的情况下,行人沿墙壁寻找出口是否有利于提高疏散效率。

5.1 原始社会力模型

利用原始社会力模型进行人群疏散仿真,模型的参数设置如表2所列。其他3种模型的相关参数设置与原始社会力模型相同。

表2 原始社会力模型的参数设置

Table 2 Parameter setting of original social force model

符号	符号意义	数值
m	行人质量	80 kg
r	行人半径	0.3 m
A	社会排斥力的强度	2000 N
B	社会排斥力的特征距离	0.08 m
k	身体反弹系数	120 000/(kg/s ²)
κ	滑动摩擦系数	240 000 kg/(m/s)
τ	行人反应时间	0.5 s

由于仿真场景是室内发生火灾的情形,行人的视线会受到烟雾的阻挡,因此定义行人的可视范围为2 m,即2 m范围内的行人才会进行交互。在遵循原始社会力模型的运动规则下,在单出口、双出口和四出口的室内分别进行100人、200人、300人的疏散仿真实验,每组实验进行10次。行人的平均总疏散时间如表3所列。

表3 原始社会力模型下行人平均总疏散时间

Table 3 Average total evacuation time in original social force model

	(单位:s)		
	单出口房间	双出口房间	四出口房间
100人	572.327	498.637	165.658
200人	588.784	457.639	198.538
300人	712.764	463.428	248.472

从表3可以看出,随着房间出口的增加,行人的疏散时间变短。在双出口环境下,200人和300人的疏散时间比100人疏散时更短,其原因可能是,当空间中人数较少时,不容易形成团体,且团体较小,不易发现出口;当人数在合理范围内且较多时,在从众心理作用下行人可以更快形成团体并且发现出口位置,在一定程度上缩短了疏散时间。

5.2 引入行人特征的改进模型

在考虑行人特征的模型中,会增加与行人特征相关的参数设定。行人的情绪可以通过视觉、听觉等方式传染,因此将情绪感染范围设置为5 m。行人的初始情绪值服从高斯分布 $N(0.5, 1.0)$,同时情绪阈值设定为0.6,情绪值高于0.6的个体为感染个体,情绪值低于或等于0.6的个体为未感染个体,处于感染状态的个体可以向周围未感染状态的个体传染情绪。未感染个体的易感程度与该个体的性格有关,本文设置行人的每一个性格特征都服从均匀分布 $U(0.0, 1.0)$,为了体现3种性格对行人情绪的影响,我们将每一个行人的3种性格标准化到0~1。行人之间的亲疏关系服从均匀分布 $U(0.0, 1.0)$ 。

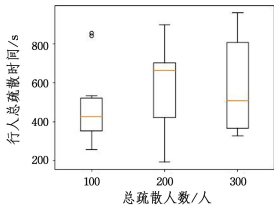
在引入人群特征的情况下,在3种不同出口的室内分别进行100人、200人、300人的疏散仿真实验,并计算了行人的平均总疏散时间,如表4所列。

表 4 引入行人特征情形下行人的平均总疏散时间

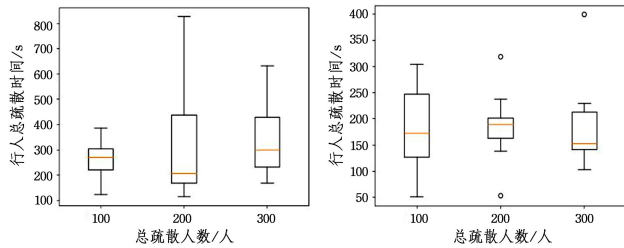
Table 4 Average total evacuation time with pedestrian characteristics

	(单位:s)		
	单出口房间	双出口房间	四出口房间
100 人	487.512	264.845	175.352
200 人	567.935	318.500	186.450
300 人	576.913	342.493	184.290

在统计实验数据的过程中,我们发现数据存在一定的波动,甚至出现一些极端情况。为了更好地体现数据的分布情况,实验将每种情形下的 10 次实验数据以箱线图的方式进行展示,如图 5 所示。



(a) 单出口情形下行人总疏散时间



(b) 双出口情形下行人总疏散时间 (c) 四出口情形下行人总疏散时间

图 5 引入行人特征情形下行人的平均总疏散时间

Fig. 5 Average total evacuation time with pedestrian characteristics

从表 4 和图 5 可以看出,当 200 人和 300 人在疏散时,总疏散时间的均值相近,但是中位数以及分布的区别很大,当 200 人进行疏散时,数据具有很大波动性;当 100 人进行疏散时,偶尔会出现极端情况。通过对实验过程的观察发现,造成疏散时间过长的原因主要包括两个方面:1)空间中大多数行人离开后,剩下的一两个行人容易迷失方向,会消耗大量疏散时间;当疏散人数较少时,行人分布稀疏,个体更容易迷失方向,导致极端情况的出现;2)引入行人特征后,行人的心理社会力更大,彼此间的吸引力也更大,但是行人聚集之后可能都没有发现出口,在寻找出口时消耗了较长时间。

5.3 同时引入行人特征和领导者的改进模型

在考虑领导者的模型中,领导者的数量与出口数量一致,设置房间的长、宽均为 20 m,出口宽度为 2 m,领导者距离出口位置 5 m。仿真环境如图 6 所示,其中蓝色的个体代表领导者。

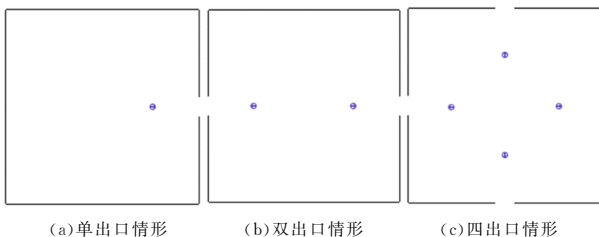


图 6 领导者仿真环境示意图(电子版为彩图)

Fig. 6 Schematic diagram of leader model simulation environment

在引入人群特征和领导者的情况下,分别在 3 种不同出口的室内进行 100 人、200 人、300 人的疏散仿真实验,计算了行人平均总的疏散时间,结果如表 5 所列。

表 5 引入行人特征和领导者情形下行人平均总疏散时间

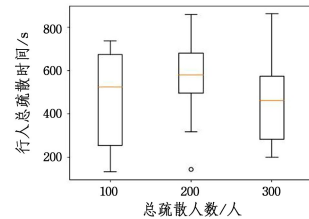
Table 5 Average total evacuation time with pedestrian characteristics and leaders

	(单位:s)		
	单出口房间	双出口房间	四出口房间
100 人	463.549	249.104	196.918
200 人	555.200	267.917	168.356
300 人	467.637	294.457	185.970

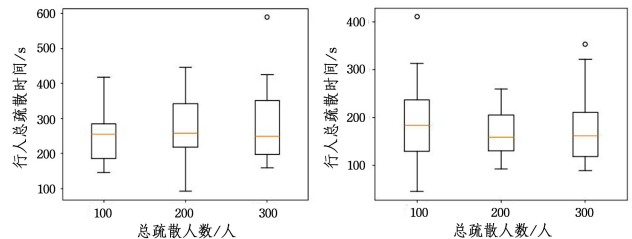
由表 5 可知,房间中人数的不同对平均总疏散效率的影响不大,在单出口的房间内,300 人疏散时的平均总疏散时间为 467.637s,比 200 人疏散时的平均值 555.200s 更短。在双出口和四出口的房间内,行人的疏散效率明显高于单出口房间。

实验结果表明,领导者角色在疏散前期可以有效提高疏散效率。其主要原因是,在领导者附近的行人可以在较短时间内受到正确方向的指引,并且在从众心理作用下,可以引导未发现领导者的行人也向正确的方向运动。

同样将实验数据以箱线图的方式进行展示,如图 7 所示。



(a) 单出口情形下行人总疏散时间



(b) 双出口情形下行人总疏散时间 (c) 四出口情形下行人总疏散时间

图 7 领导者情形下行人平均总疏散时间

Fig. 7 Average total evacuation time with leaders

从图 7 可以看出,在 3 种不同出口的情形下,100 人、200 人和 300 人的平均总疏散时间的中位数与分布十分相似,说明在此情形下,空间可容纳的人数不低于 300 人。但在箱线图中仍然存在异常值,原因是,普通行人在离开出口时可能会簇拥领导者一起离开房间,此时房间内又处于无领导者情形,因此行人疏散变得盲目。

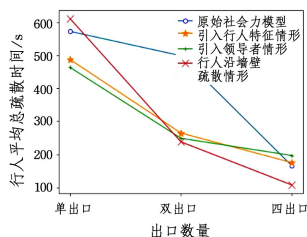
通过对实验过程的观察发现,由于领导者角色的移动速度比普通入慢,且出口较狭窄,领导者角色会阻碍普通行人的疏散。

5.4 对比分析

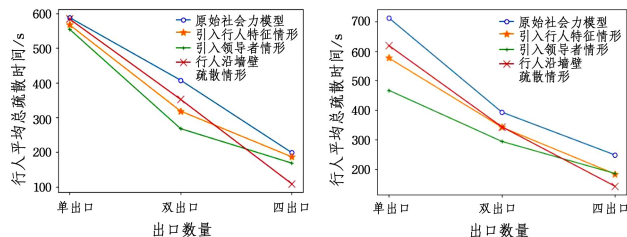
在视线受阻的情况下,远离出口的行人无法发现出口的

具体位置,但是出口位置一定在墙壁上,为了验证行人在遇到墙壁后,沿墙壁行走寻找出口是否比随机游走可以更快地疏散,本文考虑了行人遇到障碍物后沿墙壁疏散的情形。

为了更好地比较不同模型下的疏散效果,将4种模型下行人的平均总疏散时间用折线图的方式进行展示,如图8所示。



(a) 100 人情形下行人平均总疏散时间



(b) 200 人情形下行人平均总疏散时间 (c) 300 人情形下行人平均总疏散时间

图 8 不同模型下行人平均总疏散时间

Fig. 8 Average total evacuation time with different models

由图8可知,考虑行人特征可以提高行人疏散效率,原因有以下两点:1)当行人恐慌情绪较强时,行人的期望速度变大,在一定程度上可以提高疏散效率;2)行人的亲疏关系会增加行人之间的心理社会力,行人会更快构成小团体并一起疏散,小团体比个人发现出口的可能性更大。领导者角色对于提高行人疏散效率有比较明显的效果,尤其是在疏散人数较多且出口数量较少的情况下。当100人在单出口房间和四出口房间内疏散时,行人平均疏散效率并不高,这是由于单出口房间中即便有领导者,依然会出现拥塞;而四出口房间中,在无领导者情形下行人也可以较快逃生。

从图8中还可以看出,行人沿墙壁疏散对效率提升并不明显,原因有以下两点。1)在单出口或双出口的环境下,行人沿墙壁疏散可能选择了远离出口的方向,从而消耗了较长时间;而在四出口环境下,每一面墙壁都有出口,行人沿墙壁疏散时可以较快地找到逃生位置,从而缩短了疏散时间。2)当疏散时间超过1000s时,判定行人疏散失败,并且不对失败的数据进行统计。在考虑有领导者时行人疏散失败的实验有7次,而在本节实验中行人疏散失败的实验只有3次。可见沿墙壁疏散虽然在某些情形下更耗时,但所有人全部顺利疏散的可能性更大。

5.5 出口利用率对比实验

为了分析各种因素对空间出口利用率的影响,本节对4种模型在双出口和四出口的室内分别进行100人、200人、300人的疏散仿真实验,并统计不同出口的疏散人数。如表6—表9所列。

表 6 原始社会力模型下各出口平均疏散人数

Table 6 Average evacuation number of exits with original social force model

	双出口房间	四出口房间
100 人	左:54 右:46	上:22 下:23 左:19 右:36
200 人	左:110 右:90	上:62 下:45 左:51 右:42
300 人	左:163 右:137	上:95 下:63 左:64 右:78

表 7 引入行人特征情形下各出口平均疏散人数

Table 7 Average evacuation number of exits with pedestrian characteristics

	双出口房间	四出口房间
100 人	左:56 右:44	上:24 下:30 左:18 右:28
200 人	左:120 右:80	上:87 下:44 左:38 右:31
300 人	左:190 右:110	上:72 下:48 左:97 右:83

表 8 引入行人特征和领导者情形下各出口平均疏散人数

Table 8 Average evacuation number of exits with pedestrian characteristics and leaders

	双出口房间	四出口房间
100 人	左:50 右:50	上:23 下:32 左:23 右:22
200 人	左:101 右:99	上:54 下:55 左:45 右:46
300 人	左:143 右:157	上:82 下:77 左:65 右:76

表 9 考虑行人沿墙壁疏散情形下各出口平均疏散人数

Table 9 Average evacuation number of exits considering pedestrian evacuation along wall

	双出口房间	四出口房间
100 人	左:58 右:42	上:23 下:26 左:24 右:27
200 人	左:125 右:75	上:49 下:51 左:53 右:47
300 人	左:164 右:136	上:85 下:81 左:74 右:60

从表6—表9的数据可以看出,在原始社会力模型下,行人的出口利用率比较平均。在仅考虑行人特征的模型中,出口利用率出现了较大的偏差,其中在四出口的房间进行200人的疏散时,上出口疏散人数几乎是下出口的两倍;在两出口的房间进行300人的疏散时,左出口疏散人数也比右出口多80人。实验过程中甚至存在出口疏散人数的偏差超过200的情形,可见引入行人特征会加剧羊群效应,更多行人会在从众心理的作用下集中在部分出口,导致其他出口利用率低。引入领导者角色后,出口利用率得到了很大的提升,在各种情形下各个出口的疏散人数基本相同。其原因主要是领导者在不同的出口处可以引导附近的行人选择距离最近的出口疏散,在一定程度上分散了行人。在考虑行人沿墙壁疏散的模型中,不同出口利用率的差异略微增大,但整体比较平衡。

结束语 本文重点分析了疏散行人自身的特性,从行人特征(包括行人间亲疏关系、行人情绪、行人性格)和行人角色(包括领导者和普通行人)等方面对行人建模。利用行人特征修正了行人情绪的计算和社会力模型中社会心理力的计算;情绪的计算考虑了情绪的传染、消极情绪和积极情绪对行人疏散的影响,利用行人情绪修正了期望速度的大小和方向;领导者角色一方面可以引导行人疏散,另一方面可以平复行人的恐慌情绪。

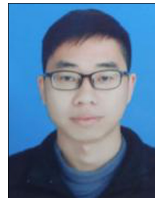
通过人群自组织实验,验证了模型可重现拱形堵塞、渠化现象、瓶颈摆动和羊群效应等现象。同时统计了在考虑行人特征、存在领导者角色以及行人沿墙壁寻找逃生出口等不同情形下,行人的总疏散时间以及多出口环境下各出口的疏散人数。由于数据波动较大,以箱线图的方式给出了数据的分布情况。通过对疏散过程的观察发现,导致行人疏散时间

过长的主要原因是寻找出口耗时以及出口利用率不平衡。借助实验数据分析了各因素对疏散过程的影响,其中行人特征可以加快行人聚集以及优化行人期望速度,而领导者角色在帮助行人寻找出口的基础上,平衡了行人对出口的利用,保证各出口疏散人数基本相同。同时,分析了行人沿墙壁疏散的情形,通过对比分析发现,当出口分布合理时,行人沿墙壁疏散可以提高行人疏散效率。

在仿真过程中,如果行人的情绪值设置不当,或者情绪感染值公式定义不当,两个行人可能会不断地互相改变对方的前进方向,在无外力情况下一直在当前位置僵持,仿真失真。另外,在疏散过程中,随着时间的延长,个体在生理和心理上都会发生变化。本文考虑了时间的变化对行人的情绪和运动产生的影响,而在实际环境中,这种变化可能更为复杂。

参 考 文 献

- [1] HENDERSON L F. On the fluid mechanics of human crowd motion[J]. *Transportation Research*, 1974, 8(6): 509-515.
- [2] TREUILLE A, COOPER S, POPOVIC Z. Continuum crowds [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 1160-1168.
- [3] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1986, 5(1): 90-98.
- [4] LI D, YUAN L, HU Y S, et al. Simulation of large-scale crowd movement based on potential energy field[J]. *Journal of Huazhong University of science and technology(Natural Science Edition)*, 2016, 44(6): 117-122.
- [5] HELBING D, MOLNAR P. Social force model for pedestrian dynamics[J]. *Physical Review. E, Statistical physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, 1995, 51(5): 4282-4286.
- [6] HELBING D, FARKAS I, VICSEK T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. *Nature*, 2000, 407: 487-490.
- [7] KIRCHNER A, SCHADSCHNEIDER A. Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automation model for pedestrian dynamics[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2002, 312(1/2): 260-276.
- [8] JIANG G M, JI Q G. Force-based crowd evacuation simulation model[J]. *Computer Engineering and Design*, 2010, 31(13): 3070-3073, 3080.
- [9] BERG J V D, LIN M, MANOCHA D. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation[C]// 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2008: 1928-1935.
- [10] PARISI D R, GILMAN M, MOLDOVAN H. A modification of the social force model can reproduce experimental data of pedestrian flows in normal conditions[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2009, 388(17): 3600-3608.
- [11] LI S S, QIAN D L, WANG J Z. An improved social force model-considering pedestrian deceleration and avoidance[J]. *Journal of Jilin University (Engineering Edition)*, 2012, 42(3): 623-628.
- [12] GAO Y, LUH P B, ZHANG H, et al. A modified social force model considering relative velocity of pedestrians[C]// 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering(CASE). 2013: 747-751.
- [13] JI Q, WANG F, ZHU T. VPBS: A Velocity-Perception-Based SFM Approach for Crowd Simulation[C]// 2016 International Conference on Virtual Reality and Visualization. ICVRV, 2016: 317-324.
- [14] ZHONG Z W, JI Q G. Verification and Evaluation of Modified Social Force Model Considering Relative Velocity of Pedestrians [J]. *Computer Science*, 2020, 47(2): 94-100.
- [15] JI Q, GAO C. Simulating Crowd Evacuation with a Leader-Follower Model[J]. *International Journal of Computer Sciences and Engineering Systems (IJCSSES)*, 2007, 1(4): 249-252.
- [16] HOU L, LIU J G, PAN X, et al. A social force evacuation model with the leadership effect[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2014, 400: 93-99.
- [17] YANG X, DONG H, YAO X, et al. Necessity of guides in pedestrian emergency evacuation[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2016, 442: 397-408.
- [18] MA Y, YUEN R, LEE E. Effective leadership for crowd evacuation[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2016, 450: 333-341.
- [19] BELHAJ M, KEBAIR F, SAID L B. A computational model of emotions for the simulation of human emotional dynamics in emergency situations [J]. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 2014, 6: 227-233.
- [20] BORDAS J. Omnemotion: the propagation of emotions [C]// Proceedings of the 2014 Virtual Reality International Conference. 2014: 1-4.
- [21] LIU Z, HUANG P. Research on Crowd Panic Behavior Model under Emergency Events on Pedestrian Bridges[J]. *Journal of System Simulation*, 2012(9): 1950-1953.
- [22] LIU Z, LIU T, MA M, et al. A perception-based emotion contagion model in crowd emergent evacuation simulation[J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2018, 29(3/4): e1817. 1-e1817. 14.
- [23] XU M, XIE X, LV P, et al. Crowd behavior simulation with emotional contagion in unexpected multi-hazard situations[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51: 1567-158.
- [24] WANG M S, ZHANG G J, LIU H. Heterogeneous emotional infection model for crowd evacuation simulation [J]. *Computer Science*, 2019, 46(3): 287-297.



LIN Jin-cheng, born in 1997, postgraduate. His main research interests include computer graphic, computer simulation and virtual reality.



JI Qing-ge, born in 1966, Ph.D, associate professor, is a senior member of China Computer Federation. His main research interests include computer graphics, virtual reality, computer simulation and computer vision.