

3-18-2021

An Improved Social Force Model for Crowd Simulation

Changhua Li

School of information and control engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

Yang Jing

School of information and control engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

Zhijie Li

School of information and control engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, 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.

An Improved Social Force Model for Crowd Simulation

Abstract

Abstract: In view of the traditional social force model, it is difficult to deal with the problems of single pedestrian trajectory and loose crowd in the process of crowd evacuation, and an improved social force model is proposed. *Based on the original social force model, the movement trajectory of the person is changed by considering the choice of the movement direction. The intensity of panic and attraction in the process of pedestrian evacuation is considered to reproduce the self-organizing behavior in the process of pedestrian evacuation, and the simulations are performed in individual and group mode. The authenticity of the population model is verified by the self-organizing population morphology in the real video.* The experimental results show that the improved pedestrian model can simulate the trajectory of pedestrians more realistically and reasonably.

Keywords

social force model, panic emotion, the direction of movement, group mode

Recommended Citation

Li Changhua, Yang Jing, Li Zhijie. An Improved Social Force Model for Crowd Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(3): 521-528.

一种应用于人群仿真的改进社会力模型

李昌华, 杨晶, 李智杰

(西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 针对传统社会力模型在人群疏散过程中, 难以处理行人轨迹单一、人群松散等问题, 提出了一种改进的社会力模型。在原有模型基础上, 通过考虑行人疏散过程中运动方向的选择, 改进行人疏散过程中的轨迹; 然后考虑行人疏散过程中恐慌情绪和吸引力的强度, 再现行人疏散运动过程中自组织行为, 并进行个人及群组模式下的模拟仿真; 引入真实视频中自组织群组形态进行对比, 验证群组形态的真实性。实验结果表明: 改进后的行人模型更能真实地模拟行人运动轨迹, 模型合理有效。

关键词: 社会力模型; 恐慌情绪; 运动方向; 群组模式

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 03-0521-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0553

An Improved Social Force Model for Crowd Simulation

Li Changhua, Yang Jing, Li Zhijie

(School of information and control engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In view of the traditional social force model, it is difficult to deal with the problems of single pedestrian trajectory and loose crowd in the process of crowd evacuation, and an improved social force model is proposed. Based on the original social force model, the movement trajectory of the person is changed by considering the choice of the movement direction. The intensity of panic and attraction in the process of pedestrian evacuation is considered to reproduce the self-organizing behavior in the process of pedestrian evacuation, and the simulations are performed in individual and group mode. The authenticity of the population model is verified by the self-organizing population morphology in the real video. The experimental results show that the improved pedestrian model can simulate the trajectory of pedestrians more realistically and reasonably.

Keywords: social force model; panic emotion; the direction of movement; group mode

引言

随着我国城市建设进程的加快, 大型公共场所人流量越来越大, 高密度人群所在公共场所存在严重的安全隐患。如若发生应急事件, 人员疏散不及时, 将会导致不可挽回的后果。真实场景下进行大规模的疏散演习花费成本较大, 也不易更改疏散场景的结构规划, 以至无法获得丰富的

数据来进行场景管理与规划。计算机仿真可实现大规模人群疏散模拟, 达到疏散演练效果的同时将成本最小化, 通过人群疏散仿真模型的仿真数据可以判断模拟场景中出口数量、位置是否合理, 是否满足人群疏散要求, 从而为制定科学合理的疏散方案提供决策支持^[1]。

现如今, 大量的中外学者们为研究紧急疏散过程中人群行为特征和运动规律做了大量的工

收稿日期: 2019-10-15 修回日期: 2019-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(61373112, 51878536), 西安建筑科技大学基础研究基金(RC1716)

第一作者: 李昌华(1963-), 男, 教授, 博导, 研究方向为模式识别、数字建筑等。E-mail: lch304502@126.com

通讯作者: 李智杰(1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为模式识别、数字建筑等。E-mail: lizhijie@xauat.edu.cn

作。根据模拟视角的不同,可将仿真模型分为宏观模型和微观模型^[2]。宏观模型如流体动力学模型和排队网络模型^[3],是将整个人群作为研究对象,通过分析人群的运动特征来描述整个层面的系统。微观模型主要包括元胞自动机模型^[4]、基于 Agent 的模型^[5]、社会力模型(Social Force Model, SFM)^[6-7]等。元胞自动机模型是一种基于网格的微观离散仿真模型,对于小规模的人群疏散能够提供良好的模拟结果。基于 Agent 的模型采用虚拟的 Agent 来模拟智能个体,捕捉紧急情况并提供系统的自然描述。Helbing 等^[6]所提出的社会力模型主要依据牛顿第二定律公式来描述疏散过程中行人的运动状态,社会力模型因其模型描述简单而更多地应用于紧急情况下人群疏散的相关领域。Yang 等^[8]通过改进的社会力模型对人群的运动状态进行导向分析。曲邵伟等^[9]利用行人的随机行为改进社会力模型。李天贝等^[10]通过在社会力模型的基础上引入恐慌因子和各向异性因子改进社会力模型。Liu 等^[11]利用改进社会力模型模拟恐怖袭击过程中人群的疏散运动。大多数人群疏散模拟运动过程中都将行人运动的方向与速度矢量保持一致,未能考虑行人实际运动方向的选择。

现实生活中,人与人之间存在着复杂的社会关系,大多数人群疏散仿真忽略了行人之间的相互联系,将每个行人视为孤立无援的个体,不能真实地模拟现实生活中人群自组织现象。原始社会力模型在一定程度上能够模拟大规模人群进行疏散,但该模型还存在部分不足。针对原社会力模型认为行人之间相互作用力相同、行人轨迹单一、人群疏散较为松散等问题,本文提出了一种改进的社会力模型(Improved Social Force Model, ISFM),在原始社会力模型基础上,通过考虑行人运动过程中运动方向的选择,改进行人运动轨迹,在符合实际运动轨迹的同时添加行人恐慌因子、群组凝聚力再现人群运动过程中的自组织现象。

1 社会力模型

社会力模型是由 Helbing 等^[6]提出的,是一种多因素驱动模型,每一个行人均被表示为具有一定质量和大小的粒子。社会力模型(SFM)是一种描述社会间互动的力来模拟行人运动,这些“力”不是由行人的个人环境直接施加的,而是个体在运动过程中内在动机的一种衡量。SFM 适用于在高密度场景中再现行人的个体运动以及行人之间发生的交互作用。

在典型 SFM 中,行人在运动过程中受到来自目的地的吸引力、人与人之间的相互作用力和周围环境对人的作用力,由牛顿第二定律可知,该模型的主要运动公式为

$$f_i = m_i \frac{dv_i(t)}{dt} = f_i^0 + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_w f_{iw}, \quad (1)$$

式中: m_i 为行人 i 的质量; $v_i(t)$ 为行人 i 当前的速度; f_i^0 为行人 i 的自驱力、 f_{ij} 为行人 i 和行人 j 之间的相互作用力,用来维持行人之间的安全距离,避免行人过度挤压; f_{iw} 为障碍物对行人 i 的作用力,用来维持行人和障碍物之间的安全距离,避免发生碰撞。计算公式分别为

行人的自驱力:

$$f_i^0 = m_i \frac{v_i^0(t)e_i^0 - v_i(t)}{\tau_i}, \quad (2)$$

式中: 表示质量为 m_i 的行人 i 在 t 时刻的期望速度为 v_i^0 , 方向为 e_i^0 ; v_i 为行人实际的运动速度; τ_i 是行人调整行走速度的特征时间。

行人之间的相互作用力为

$$f_{ij} = [A_i e^{(r_{ij}-d_{ij})/B_i} + kg(r_{ij}-d_{ij})]n_{ij} + \kappa g(r_{ij}-d_{ij})\Delta v_{ij}^{(t)}t_{ij}, \quad (3)$$

障碍物(如墙、门、建筑等)的排斥力为

$$f_{iw} = [A_w e^{(r_i-d_{iw})/B_w} + kg(r_i-d_{iw})]n_{iw} + \kappa g(r_i-d_{iw})\Delta v_{iw}^{(t)}t_{iw}, \quad (4)$$

式中: A_i , A_w 为行人之间、障碍物之间力的作用强度; B_i , B_w 为行人之间、障碍物之间力的作用范围; k , κ 为常量系数; $n_{ij} = (r_i - r_j) / \|r_i - r_j\| = [n_{ij}(1), n_{ij}(2)]^T$,

n_{iw} 分别为行人 j 和障碍物 w 指向行人 i 的方向单位向量, r_i, r_j 分别为行人 i 和行人 j 的各自位置; $t_{ij} = [-n_{ij}(2), n_{ij}(1)]^T$, t_{iw} 分别为与 n_{ij}, n_{iw} 正交的单位矢量; $\Delta v_{ij}^{(t)} = (v_j - v_i)' \cdot t_{ij}$ 为 2 个行人的切向速度差值; $g(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ x, & x \geq 0 \end{cases}$.

2 改进的社会力模型

在人体动力学中表明, 一个人应该能够在任何时候向任何方向自由地移动。在大多数情况下, 行人倾向于向前移动, 速度矢量通常与他们的运动方向一致。而行人在运动过程中, 由于转向、躲避障碍物、心理因素等会产生实际运动方向与速度矢量不一致的情况。本文提出了一种改进的社会力模型 (ISFM), 通过在传统 SFM 中考虑行人运动过程中运动方向的选择, 来增强传统 SFM 运动中步行轨迹的真实性。本文根据文献[12]类似生成机器人轨迹的动态模型来描述每个个体的运动, 该系统能够通过适当的设计行人位置和航向动态的力和扭矩再现行人的运动过程。通过考虑行人运动过程中的社会属性, 引入恐慌因子、群组凝聚力来模拟行人运动过程中的心理因素、自组织情况, 真实再现行人的运动过程。

2.1 运动方向

许多国内外学者认为, 动物和人类的运动可以表述为满足微分方程形式的约束条件优化问题。人在运动过程中会存在一个运动方向的选择, 人在大部分的时间会向前行走, 只有在 f_i^e 力的影响下, 才会影响侧向运动。根据 SFM 中, 定义第 i 个行人被同化为质量 m_i 的粒子, 其位置和速度分别由 $r_i = [x_i \ y_i]^T$ 和 $v_i = [\dot{x}_i \ \dot{y}_i]^T$ 表示。根据文献[12]可了解到, 每个个体通常不在固定的坐标系中进行其运动, 而是在与身体相连的局部坐标系中表示其运动轨迹和加速度。

这种方法不需要更改任何参数模型, 在保留 SFM 所具有的良好特性的同时添加行人运动过程中方向的选择, 以便更贴合实际情况改进行人运动

中的步行轨迹。以行人的位置为中心, 局部坐标系中 x 轴与行人前进的方向对齐, 设 θ 为全局坐标系与局部坐标系之间的夹角, ω_i 为第 i 个行人的角速度 $\omega_i = \dot{\theta}_i$ 如图 1 所示。

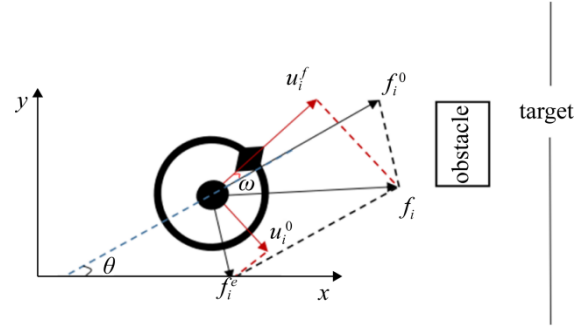


图 1 ISFM 力的分解

Fig. 1 Force decomposition in the ISFM

局部坐标系中的位置由公式(5)中旋转矩阵 $R(\theta_i)$ 表示。

$$R(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{bmatrix} = [r_i^f \ r_i^o] = r_i^B, \quad (5)$$

则 $v_i = R(\theta_i)v_i^B = [v_i^f, v_i^o]^T$, 其中, v_i^f 和 v_i^o 分别为速度矢量 v_i 在正向和正交方向的投影。在局部坐标系中 $u_i^B = [u_i^f \ u_i^o]^T$ 是行人前进方向 u_i^f 和正交方向 u_i^o 力的集合, u_i^o 表示驱动行人航向动态的扭矩, 局部坐标系中模型所表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = \cos \theta v_i^f - \sin \theta v_i^o \\ \dot{y} = \sin \theta v_i^f + \cos \theta v_i^o \\ \dot{\theta} = \omega_i + u_i^o / I_i \end{cases}, \quad (6)$$

式中: I_i 为行人的惯性矩阵。

则行人力的输入为

$$u_i^f = (f_i)^T r_i^f, \quad (7)$$

$$u_i^o = k^o (f_i^e)^T r_i^o - k^d v_i^o, \quad (8)$$

式中: u_i^f 和 u_i^o 的大小分别为原 SFM 中 f_i 和 f_i^e 的投影; $k^o > 0$ 和 $k^d > 0$ 为控制行人侧向运动, 当行人侧向运动 $v_i^o = 0$ 时, $u_i^o = 0$ 。

仿照公式(2)来表示驱动行人航向动态的扭矩:

$$u_i^o = -k^\theta (\theta_i - \theta_i^o) - k^\omega \omega_i, \quad (9)$$

式中: k^θ, k^ω 为相应的参数设计。设方向误差为 $\tilde{\theta}_i = \theta_i - \theta_i^o$, 结合式(6), 可将式(9)演化为

$$\ddot{\theta}_i + \frac{k^\omega}{I_i} \dot{\theta}_i + \frac{k^\theta}{I_i} \theta_i = -\frac{k^\omega}{I_i} \dot{\theta}_i^0 - \ddot{\theta}_i^0, \quad (10)$$

选用式(10)中实极值点来表示 k^θ 和 k^ω 的值。设 $\lambda_2 = \alpha\lambda_1 < 0$, $\alpha > 1$, 可得:

$$\lambda_1 = -\sqrt{\frac{k^\lambda f_i^o}{\alpha}}, \quad (11)$$

式中: $k^\lambda > 0$ 用于优化系统的主导时间常数, 则 k^θ 和 k^ω 相应表达为

$$k^\theta = I_i k^\lambda f_i^o, \quad (12)$$

$$k^\omega = I_i (1 + \alpha) \sqrt{\frac{k^\lambda f_i^o}{\alpha}}, \quad (13)$$

2.2 恐慌情绪

在现实生活中, 面对非常规的突发事件, 正常人在疏散过程中能遵循大部分准则, 服从引导, 加快疏散, 而惊慌失措的人更易产生一系列非适应性行为, 如: 羊群行为、快即是慢等现象, 导致整体疏散时间增加。被疏散行人自身的恐慌感以及灾害环境造成的威胁是影响其能否安全疏散最为关键的因素^[13]。行人在突发情况下, 会产生恐慌情绪, 不同年龄段的行人, 在紧急状况下, 对周边事物的判断、反应时间及采取的逃离措施均不同, 一旦恐慌行为产生, 会引发恐慌情绪蔓延, 导致整体疏散时间下降^[14]。

本文在传统 SFM 中考虑行人自身的恐慌感的基础上, 同时考虑了危险源所在位置对行人的影响。以危险源所在点为中心, 设置一个恐慌半径 R , 半径为 R 构成的圆形区域作为恐慌阈值。在此范围内, 由于行人的恐慌强度超过恐慌阈值, 引发行人不适应性行为产生, 导致疏散时间增加。随着危险源距离的增大恐慌情绪降低, 行人逐渐恢复理智, 对逃离场景产生正确的逃生判断。

将行人对危险源所在位置产生的恐慌因子引入到传统 SFM 中, 将公式(2)改进后的表达式为:

$$f_i^{0'} = f_i^0 h(x) p_i e^{-dis_i} + f_i^0, \quad (14)$$

式中: dis_i 为行人 i 与恐慌源的距离; p_i 为行人 i 恐慌情绪强度, 取值为 0~1 之间随机数; $h(x)$ 为

调整数, $h(x) = \begin{cases} -1, R > dis_i \\ 1, others \end{cases}$, 在恐慌阈值 R 内,

行人随着恐慌源距离的接近, 恐慌程度越强, 对行人运动产生负向的力, 而在 R 范围外, 产生正向的力, 促使行人运动加快; $f_i^{0'}$ 为改进后的包含恐慌因子的自驱力, 当行人疏散场景范围内无恐慌源时, 此时行人所受的合力等于传统 SFM 的合力, 即 $f_i^{0'} = f_i^0$ 。

公式(7)改进后的力表达如下:

$$u_i^{f'} = (f_i^{0'})^T r_i^f = (f_i^{0'} + f_i^e)^T r_i^f, \quad (15)$$

2.3 群组力

群组是一群具有一定社会关系的人的集合, 行人在疏散过程中, 往往会自发地与周围人形成小团体, 产生自组织现象。原 SFM 中模拟行人疏散过程中存在人群松散问题, 本文引入了一个社会凝聚力以增强行人的社会属性。人是复杂的高等生物, 在疏散过程中, 行人更倾向于根据周围行人运动状态以及当前位置实时调整自己, 并且行人在运动过程中存在从众心理, 易与周围人形成小团体, 以便疏散场景信息的获取与更新。本文中行人在运动过程中, 根据行人之间的位置关系、吸引力强度与周围 2~5 人形成疏散小组, 来模拟行人疏散运动过程。由于在疏散过程中, 行人对环境熟悉程度存在差异性, 从而导致个体吸引力 $\delta_{ij} \in [0, 1]$ 存在差异性。熟知模拟场景所有出口或部分出口的人群会不受周围人影响, 始终以最大速度运动, 会引起其他不熟悉场景的人群跟随, 从而导致吸引力较大。

群组力表达式为:

$$f_g = \left[A_g \delta_{ij} e^{[(r_{ij} - d_{ij})/B_g]} + kg(r_{ij} - d_{ij}) \right] n_{ij}, \quad (16)$$

式中: δ_{ij} 为行人 i 和行人 j 之间的吸引力; A_g 为力的强度; B_g 为行人的安全距离。

3 仿真及其结果

为验证本文方法的有效性, 以 MATLAB 作为人群疏散建模仿真系统的实验平台, 通过各场景下对比分析实验, 判断模型的有效性。

仿真实验参数设置如表 1 所示。参考其他研究者对疏散中行人移动速度的统计研究结果得出, 行人的偏好速度为 0.7~1.3 m/s 之间的随机分布^[15]。参考国家标准^[16]可设置行人直径为 0.34~0.5 m 之间。

表 1 参数设置
Tab. 1 Parameter Settings

参数名称	参数大小	参数单位	参数名称	参数大小	参数单位
τ_i	0.5	s	κ	2.4×10^5	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$
$A_i=A_w=A_g$	2×10^3	N	k^0	1	—
$B_i=B_w=A_g$	0.08	m	k^d	500	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
B_g	0.05	m	k^i	0.3	$\text{N}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$
k	1.2×10^5	$\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$	α	3	—

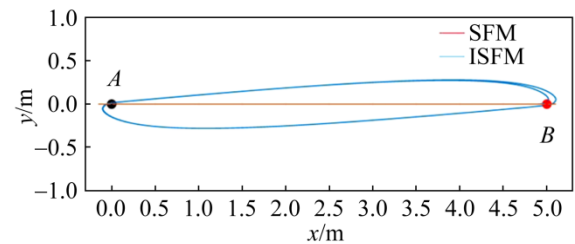
(1) 实验 1: 运动方向的选择对行人轨迹的影响

根据实际经验表明, 当行人在自由空间内移动时, 会根据实际情况不断调整运动方向。本次通过两个实验验证模型产生轨迹的真实性。图 2(a) 实验中使行人在 A 点和 B 点之间交替行走, 实践经验表明当行人在两点之间交替行走时, 更倾向于产生一个椭圆的运行轨迹。在这种情况下, SFM 由于忽略了行人运动过程中方向的改变使 SFM 产生的轨迹为一个自然段, 由实际经验可知是不自然的。而在 ISFM 中, 存在运动方向的改变使行人产生了一个类似实际运动轨迹的弧线步行轨迹, 更能符合实际情况。图 2(b) 实验中, 模拟行人在疏散过程中拐角发生的行为, 行人从 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 产生运动。原 SFM 所产生一个矩形框, 而 ISFM 产生一种近似圆滑的运动轨迹。由实践结果可知, 本文中 ISFM 能够产生一种更现实的行为, 使行人能够在预期的情况下, 产生更贴近实际的行为。

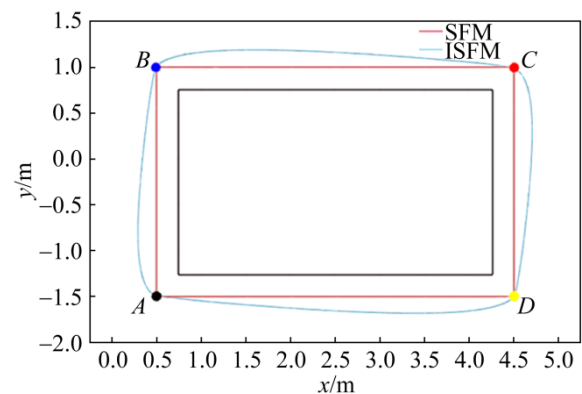
(2) 实验 2: 恐慌因子对疏散效率的影响

当个体处于恐慌或情绪激动状态时, 他们会加快步行速度向安全区移动, 在步行速度和恐慌心理双重作用下会使行人的疏散结果产生不同的效果。为了体现不同的恐慌情绪下对疏散效果的影响, 展现不同情境下的人群疏散, 以疏散时间作为评价标

准, 使恐慌因子在 0~1 之间, 密度间隔 0.025 的变化。通过建立在一个空旷的场景中随机分布 300 个行人进行疏散, 最终通过一个 6 m 宽的特定出口, 判断在相应大小的恐慌因子影响下, 行人在疏散场景中的移动速度、疏散人群所需时间及出口疏散人群流量来判断恐慌因子对疏散效率的影响。改变疏散场景中恐慌因子的大小分别进行 50 次实验, 取仿真结果平均值, 结果如图 3 所示。



(a) 模拟个体在 A, B 之间单周期运动



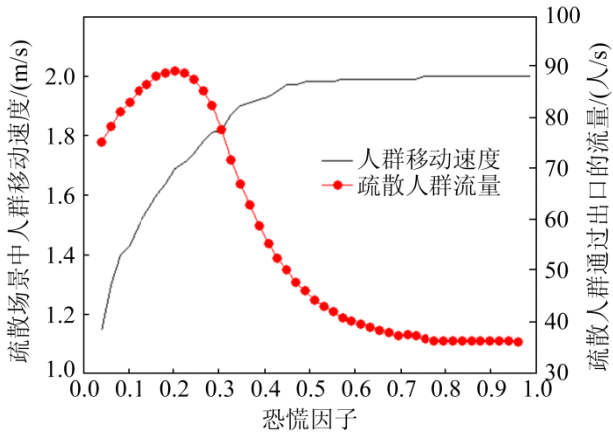
(b) 模拟个体在拐角处运动

图 2 运动方向的影响

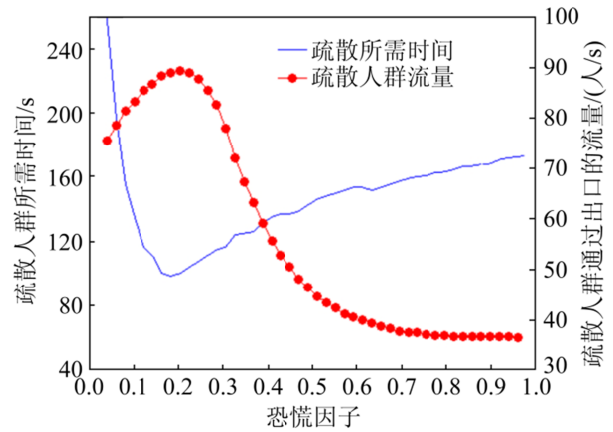
Fig. 2 Influence of the direction of movement

在实验中, 将人群的移动速度初始值设为 1 m/s (人正常行走的速度), 在含有危险源的场景中进行疏散。由图 3 可知, 当只有少量恐慌因子存在时, 由于人的求生本能, 促使疏散场景中的人群加速移动, 以便尽快到达安全区域, 整体疏散人群所需时间逐渐减少, 通过出口流量逐渐增多, 促成良好的疏散效率, 这与著名的鲑鱼效应亦相同。然而, 随着恐慌因子的增加, 更多的恐慌人员增加, 人群中冲突急剧上升, 导致疏散出口人群流量减少, 总疏散时间单调增加, 疏散效率逐渐下降, 展现疏散过程“快即是慢”的现象, 在原 SFM 中也达到了此

种效果。因此，在疏散过程中，要及时引导疏散行人，避免行人过分恐慌，以便达到良好的疏散效率。



(a) 恐慌因子对移动速度和人群流量的影响



(b) 恐慌因子对所需疏散时间的影响

图3 恐慌因子的影响

Fig. 3 The influence of panic factors

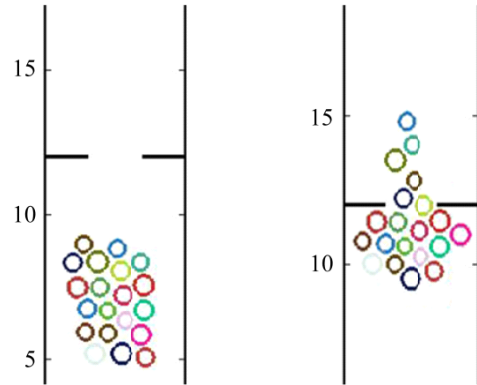
(3) 实验3: ISFM 与 SFM 对比

1) 模拟群组人员的逃生场景

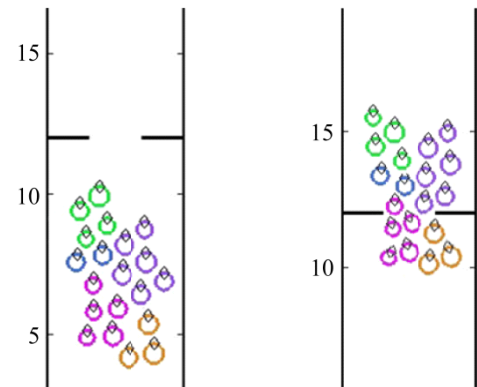
为了分析验证本模型的有效性，本文以北京某地区疏散演习视频为背景，截取疏散场景中人员的逃生行为作分析。将本文中 ISFM 与传统 SFM 分别模拟群组的疏散过程。实验场景为 20 人通过一个 5 m 宽的走廊，再穿过 2 m 宽的安全门到达安全地区的疏散场景。加入实验 1~2 中对于恐慌因子和运动方向的考虑。选用合适的恐慌因子，将 SFM 与 ISFM 进行分析比较，通过考虑行人运动轨迹及平均出口频率判断模型的真实有效性。仿真结果如图 4 所示。



(a) 真实疏散场景



(b) SFM 疏散模拟



(c) ISFM 模拟疏散

图4 社会力模型改进对比疏散模拟

Fig. 4 SFM and ISFM compared to evacuation simulation

图 4(a)显示，在真实疏散过程中，人群会自发形成小群组模式，避免单独行动，以便获得疏散过程中有用的疏散信息。在 SFM 仿真实验结果图 4(b)中可知，行人在运动过程中是以个人为单位进行疏散，在出口由于人群拥挤、堵塞会造成疏散过程中“快即是慢”现象，从而导致疏散结果不理想。而在 ISFM 仿真实验结果图 4(c)中，疏散过程中行人与附近周围的人组成一个 2~6 人小团体，以互帮互助的形式进行疏散模拟，在通过安全门时能够快速

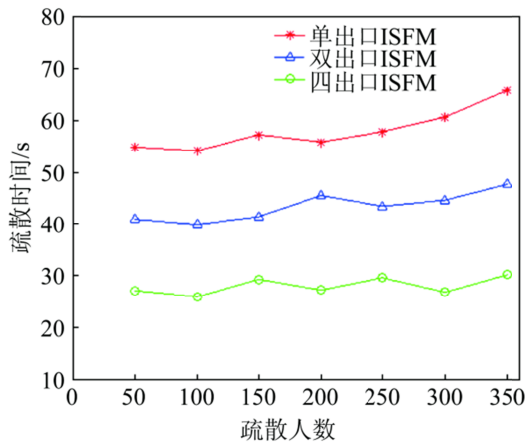
有序通过, 最大限度还原了真实的场景信息。实验结果表明, ISFM 较 SFM 更能符合行人的实际运动过程。从行人相同初始位置、随机方向开始, 分别对 ISFM 和 SFM 进行了 50 次模型, 判断行人平均出口频率, 统计可知 $\bar{F}_{\text{SFM}} = 2.64 \text{ s}^{-1}$, $\bar{F}_{\text{ISFM}} = 2.43 \text{ s}^{-1}$ 。在宏观行为下, ISFM 比 SFM 的疏散能力更强。

2) 实际场景对比实验

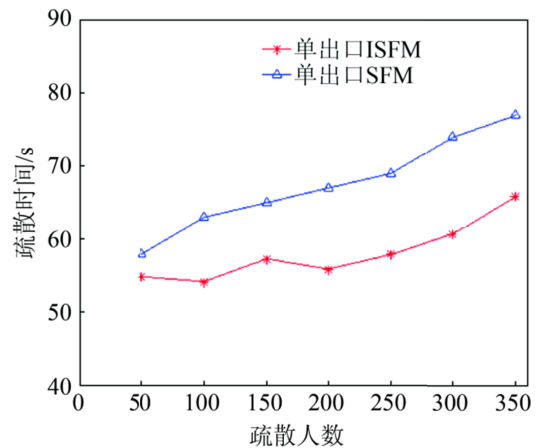
为了更充分验证模型的有效性, 建立了一个实际场景的对比分析实验, 分析出口总宽度对行人疏散的影响。将行人的恐慌因子设置为 0.2, 行人的初始速度设为 1.2 m/s。通过建立一个 80 m × 80 m 的体育场疏散模拟。每次实验中, 将疏散行人的数量以 50 人为初始人数, 50 人为递增进行实

验仿真模拟。每次模拟过程中行人的初始位置随机, 分别多次实验, 结果取其平均值。实验结果如图 5 所示。

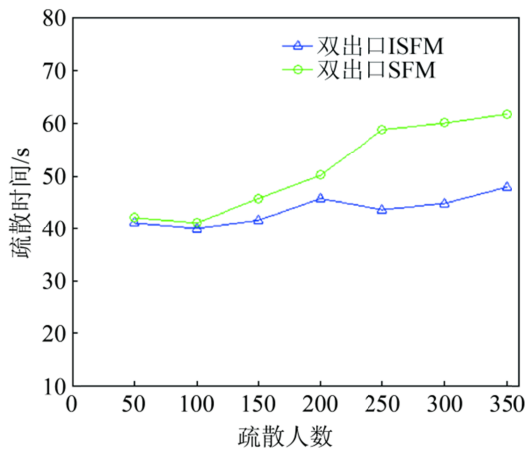
由图 5(a)可知, 出口总宽度(出口数量×出口宽度)对疏散时间有很大的影响, 在同一规模人群下, 在一定范围内, 随着出口总宽度的增加, 疏散时间明显减少。比较图 5(b)~(d)可知, 在 3 种场景下, 同一规模的人群中, ISFM 疏散时间均比 SFM 的疏散时间短。在单出口图 5(b)场景下, 随着这人群规模逐渐增加, 疏散时间相比双出口图 5(c)和四出口图 5(d)的增长趋势增长稍显劣势, ISFM 相比 SFM 线性变化不大, 而双出口图 5(c)和四出口图 5(d)随着人数增加, 疏散时间优势越来越明显, 且表明出口总宽度越大, 疏散效果越好。



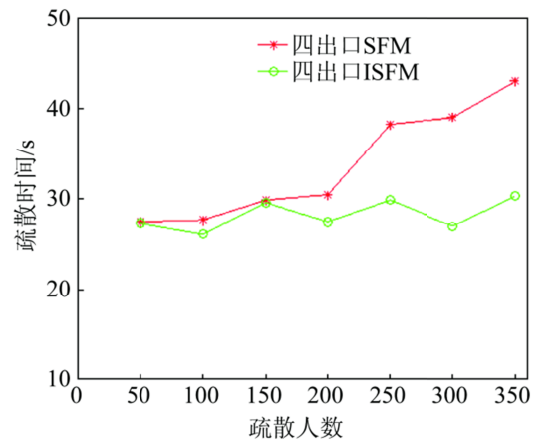
(a) 多场景下 ISFM 疏散效果对比



(b) 单出口场景下 ISFM 与 SFM 对比



(c) 双出口场景下 ISFM 与 SFM 对比



(d) 四出口场景下 ISFM 与 SFM 对比

图 5 多场景对比实验

Fig. 5 Multi-scene comparative experiment

4 结论

本文在原始社会力模型上,通过运动方向的选择、恐慌因子的引入、群组力的添加,完成模型结构的调整从而改进传统社会力模型,将疏散过程中行人的社会属性逐渐增强,再现行疏散过程中的自组织现象。仿真实验从个体到群组分别模拟了各场景下行人的运动过程,通过仿真数据与真实视频中自组织群组形态对比,检验了改进后的社会力模型在模拟紧急疏散过程中群组形态的真实性,仿真模拟的结果表明模型在人群疏散过程中能较完整的模拟疏散情景对建筑设计和疏散管理有一定的参考价值。在本文所提出的模型基础上,还有许多因素可能会对人群疏散的结果产生影响,如有障碍物的场景复杂度、疏散过程中信息的获取等,下一步工作将针对这几个方面进行研究。

参考文献:

- [1] Tan L, Hu M, Lin H. Agent-based Simulation of Building Evacuation: Combining Human Behavior with Predictable Spatial Accessibility in a Fire Emergency[J]. Information Sciences (S0020-0255), 2015, 295: 53-66.
- [2] Wang L, Cai Y, Xu Q. Modifications to Social Force Model[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (S1005-9830), 2011, 35(1): 144-149.
- [3] Li L, Yu Z H, Chen Y. Evacuation Dynamic and Exit Optimization of a Supermarket based on Particle Swarm Optimization[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications (S0378-4371), 2014, 416: 157-172.
- [4] Pereira L A, Burgarelli D, Duczmal L H, et al. Emergency Evacuation Models Based on Cellular Automata with Route Changes and Group Fields[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications (S0378-4371), 2017, 473(Complete): 97-110.
- [5] Shafie-Khah M, Catalao J P S. A Stochastic Multi-Layer Agent-Based Model to Study Electricity Market Participants Behavior[J]. IEEE Transactions on Power Systems (S0885-8950), 2015, 30(2): 867-881.
- [6] Helbing D, Molnar P. Social Force Model for Pedestrian Dynamics[J]. Physical Review. E, Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics (S1063-651X), 1998, 51(5): 4282.
- [7] Shafie-khah M, Catalão J P S. A Stochastic Multi-Layer Agent-Based Model to Study Electricity Market Participants Behavior[J]. IEEE Transactions on Power Systems: A Publication of the Power Engineering Society (S0885-8950), 2015, 30(2): 867-881.
- [8] Yang X, Dong H, Wang Q, et al. Guided Crowd Dynamics Via Modified Social Force Model[J]. Physica A Statistical Mechanics & its Applications (S0378-4371), 411: 63-73.
- [9] 曲昭伟, 曹宁博, 陈永恒, 等. 考虑行人随机行为波动的改进社会力模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(5): 192-197.
Qu Zhaowei, Cao Ningbo, Chen Yongheng, et al. An Improved Social Force Model Considering Random Behavior Fluctuation of Pedestrians[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information, 2016, 16(5): 192-197.
- [10] 李天贝, 肖梅玲, 徐子祺, 等. 基于社会力模型的教室内地震疏散仿真[J]. 科学技术与工程, 19(3): 286-291.
Li Tianbei, Xiao Meiling, Xu Ziqi, et al. Simulation of Earthquake Evacuation in Classroom based on Social Force Model[J]. Science, Technology and Engineering, 2019, 19(3): 286-291
- [11] Liu Q. A Social Force Model for the Crowd Evacuation in a Terrorist Attack[J]. Physica, A. Statistical mechanics and its applications (S0378-4371), 2018, 502: 315-330.
- [12] Mombaur K, Truong A, Laumond J P. From Human to Humanoid Locomotion-an Inverse Optimal Control Approach[J]. Autonomous Robots (S0929-5593), 2010, 28(3): 369-383.
- [13] Zhang Y L, Zhou X B. The Occurrence Laws of Campus Stampede Accidents in China and its Prevention and Control Measures[J]. Natural Hazards (S0921-030X), 2017, 87(2): 659-673.
- [14] Richardson O, Jalba A, Muntean A. Effects of Environment Knowledge in Evacuation Scenarios Involving Fire and Smoke: A Multiscale Modelling and Simulation Approach[J]. Fire Technology (S0015-2684), 2019, 55(2): 415-436.
- [15] 颜雯钰, 王静虹, 徐寒, 等. 基于实测数据的南京地铁换乘楼梯流量系统动力学分析[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(2): 630-635.
Yan Wenyu, Wang Jinghong, Xu Han, et al. Dynamic Analysis of Transfer Stair Flow System in Nanjing Subway based on Measured Data[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(2): 630-635.
- [16] 呼慧敏, 晁储芝, 赵朝义, 等. 中国成年人人体尺寸数据相关性研究[J]. 人类工效学, 2014, 20(3): 49-53.
Hu Huimin, Chao Chuzhi, Zhao Chaoyi, et al. Correlation Study of Human Body Size Data in Chinese Adults[J]. Ergonomics, 2014, 20(3): 49-53.