

8-13-2020

## Method for Crowd Trampling and Crushing Simulation Based on Psychological Model

Tingting Liu

*Faculty of Electrical Engineering and Computer Science of Ningbo University, Ningbo 315211, China;*

Liu Zhen

*Faculty of Electrical Engineering and Computer Science of Ningbo University, Ningbo 315211, China;*

Yanjie Chai

*Faculty of Electrical Engineering and Computer Science of Ningbo University, Ningbo 315211, China;*

Cuijuan Liu

*Faculty of Electrical Engineering and Computer Science of Ningbo University, Ningbo 315211, 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.

---

# Method for Crowd Trampling and Crushing Simulation Based on Psychological Model

## Abstract

**Abstract:** With the accelerated development of urbanization, the number and the scale of cultural events have increased rapidly. In such crowded places, the risk of crowd trampling and crushing will be greatly increased. However, the current studies on crowd trampling and crushing simulation are relatively rare. *In order to deduce the crowd trampling and crushing scene, a crowd trampling and crushing simulation model based on the psychological principles was proposed.* The model considered emotional factors for the trampling and crushing in the dense crowd; simulated crowd trampling and crushing process and introduced the judgment criteria for the crowd trampling and crushing. The simulation experiment was about crows in the park. The three-dimensional scene simulation was realized for the phenomena of trampling. The result of this research helps relative departments to analyze and deploy the dense crowd. It also provides a new perspective for the further studies about the crowd trampling and crushing contingency plan.

## Keywords

crowd, trampling and crushing, emotional contagion, virtual simulation

## Authors

Tingting Liu, Liu Zhen, Yanjie Chai, Cuijuan Liu, and Jiaxin Chen

## Recommended Citation

Liu Tingting, Liu Zhen, Chai Yanjie, Liu Cuijuan, Chen Jiaxin. Method for Crowd Trampling and Crushing Simulation Based on Psychological Model[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(10): 2448-2454.

# 一种基于心理学模型的人群踩踏情景仿真方法

刘婷婷, 刘箴, 柴艳杰, 刘翠娟, 陈佳鑫

(宁波大学信息科学与工程学院, 宁波 315211)

**摘要:** 随着中国城镇化进程的推进, 举办大型文化活动的数量迅速增加, 规模日益增大。此类人员密集场所会大大增加人群拥挤踩踏的风险。但是, 目前关于人群踩踏的仿真研究比较少见。为了推演人群的踩踏情景, 提出了一种基于心理学原理的人群踩踏仿真模型。该模型考虑了密集踩踏人群中的情绪感染因素, 能够模拟人群的踩踏过程, 给出了人群踩踏的判决条件。仿真实验以在公园游览的人群为研究对象, 对人群的踩踏现象进行了三维情景仿真演示。研究成果有助于管理部门分析如何对密集人群进行管理和部署, 为进一步深入研究人群踩踏预案提供了一种新视角。

**关键词:** 跟随; 人群仿真; 个性; 社会力

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2016)10-2448-07

## Method for Crowd Trampling and Crushing Simulation Based on Psychological Model

Liu Tingting, Liu Zhen, Chai Yanjie, Liu Cuijuan, Chen Jiaxin

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

**Abstract:** With the accelerated development of urbanization, the number and the scale of cultural events have increased rapidly. In such crowded places, the risk of crowd trampling and crushing will be greatly increased. However, the current studies on crowd trampling and crushing simulation are relatively rare. In order to deduce the crowd trampling and crushing scene, a crowd trampling and crushing simulation model based on the psychological principles was proposed. The model considered emotional factors for the trampling and crushing in the dense crowd; simulated crowd trampling and crushing process and introduced the judgment criteria for the crowd trampling and crushing. The simulation experiment was about crows in the park. The three-dimensional scene simulation was realized for the phenomena of trampling. The result of this research helps relative departments to analyze and deploy the dense crowd. It also provides a new perspective for the further studies about the crowd trampling and crushing contingency plan.

**Keywords:** crowd; trampling and crushing; emotional contagion; virtual simulation

## 引言

随着我国城市化进程的推进, 人群密集场所越

来越多, 为城市的公共安全管理带来了新挑战。疏于对人群密集场所的安全管理, 往往会导致大量的人群伤亡。2015 年在上海外滩陈毅广场发生的拥挤踩踏事件, 为人群安全管理敲响了警钟。事发当时, 外滩陈毅广场人行通道阶梯处有人失衡跌倒, 继而引发多人摔倒、叠压, 致使拥挤踩踏事件发生。因此, 制定人员密集场所的应急预案, 加强人群安全管理是一项十分重要的任务。



收稿日期: 2016-05-31 修回日期: 2016-07-09;  
基金项目: 国家自然科学基金(61373068); 宁波市科技计划项目(2015A610128, 2015C50053, 2015D10011); 高等学校博士学科点专项科研基金(20133305110004); 宁波大学学科开放基金(xkx11529)。  
作者简介: 刘婷婷(1980-), 女, 浙江建德, 硕士, 讲师, 研究方向为虚拟现实。

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

• 2448 •

通过对各类密集人群事件分析可以看出, 目前公众普遍缺少应对突发事件的训练, 逃生自救意识不强。而管理部门制定的人群应急预案太笼统, 缺乏对人群聚集的可能后果进行事先推演。传统的人群实地疏散演习, 限于演练场地、经费和时间等限制, 无法大面积推广。由于人群行为的多样性, 实地演习很难对各种突发事件进行演练。此外, 演习时不能体验紧张氛围, 演习者即使能在专业人士的指导下, 正确完成逃生演练, 他们在单次逃生演练中所学的技能也未必能转化为危机时刻的正确行动。随着计算机应用技术的不断发展, 采用虚拟现实技术来模拟人群行为正在成为一个新的研究方向。

在人群踩踏事件中, 人群往往处于一种非理智的情绪状态, 人群中的情绪相互感染。迄今有关人群踩踏的行为模拟方面的研究尚不多见, 目前已有的各种人群疏散模型中, 比较有代表性的有元胞自动机模型和社会力模型, 这些模型只是把人当成一个“粒子”看待, 没有充分考虑人的心理因素, 难以准确描述人群在紧急情况下的行为特征。

本文在总结人群虚拟仿真的相关研究成果, 归纳了人群踩踏的过程特点, 提出了踩踏的判定条件, 采用虚拟仿真再现了一个人行桥上的人群踩踏情景, 这种方式比以往采用数值仿真方法更为直观, 可以为应急预案的制定提供直观的启发, 也可以用于人群的逃生教育, 为人群管理提供一种新的方法。

## 1 相关研究综述

目前国内外与人群踩踏密切相关的文献较少, 现有的研究主要分析了踩踏事故的成因、影响因素、对策和相关理论模型。任常兴等提出了踩踏事故分析的一般方法步骤, 采用了群集指数来表征人群高度聚集这一特征。从公共场所的性能优化设计、人群素质和群集密度、人群管理控制以及信息交流等方面分析了踩踏事故的原因并提出相应对策<sup>[1]</sup>。白锐等通过分析 2001~2007 年发生的人群聚集场所拥

挤踩踏事故的统计数据, 认为单一原因促使的拥挤踩踏事故是不存在的。事故主要是人、物、环境、管理因素相互作用、相互影响的结果<sup>[2]</sup>。冉丽君等以人群聚集心理和运动规律为基础, 研究人群密度对聚集风险的影响, 根据 Hughes 提出的连续行人流模型对高密度人群的拥挤事故进行了分析<sup>[3]</sup>。卢春霞对高密度人群中的力进行了建模, 进行了运动分析, 挤压力分析和力的传播分析。通过模型展示了由于挤压力所导致的人体变形和压缩<sup>[4]</sup>。张青松等基于风险理论、事故突变等理论, 结合相关动力学模型, 针对特定区域(瓶颈之处如出口, 楼梯及通道狭窄之处等)的人群运动规律及拥挤踩踏事故, 提出了人群拥挤踩踏事故风险(四阶段)理论。对事故致因及形成、演变机理和预测方法进行了研究<sup>[5]</sup>。为探究人群踩踏事故的触发因素并定量评价事故风险, 佟瑞鹏等基于踩踏事故风险概率及损失严重程度的定量表达方式, 建立踩踏事故风险的定量评价模型。利用该模型分析人群高度聚集场所产生滞留人群的过程, 讨论了踩踏事故造成人员伤亡应具备的条件<sup>[6]</sup>。

这些研究为人群管理提供了有效的理论依据, 有利于开展相应的社会管理, 进行风险防范。但是, 对于踩踏场景的展示和推演, 目前还缺乏研究。已有的仿真研究主要集中在人群的模拟方面。值得注意的是, 近几年的研究已经将单纯的力学模型与心理学模型进行结合, 展现了更真实的人群模拟效果。Sakuma 等参考了心理学行为模型, 在所提出的模型中用与周围人之间的位置关系来避免碰撞, 并将行人的行走速度与人群密度联系起来<sup>[7]</sup>。Fridman 等基于社会比较理论(SCT)提出了一个人群行为的仿真模型<sup>[8]</sup>。Durupinar 等对 HiDAC(高密度自主人群)系统做了拓展, 根据 OCEAN 个性模型, 为每个智能体加上了外向(extraversion)、神经质(neuroticism)、开放(openness)、随和(agreeableness)和尽责(conscientiousness)的不同个性。每个个性都设置了相应行为。用户不需要关注底层机制, 只需要选择相应的心理参数, 底层的参数就会自动根据

个性完成设置<sup>[9]</sup>。Rao 等模拟了实时的个体运动，将心理学和几何学的规则结合进社会力和物理力模型以避免单个智能体之间的局部碰撞，同时在全局路径规划算法中设置了移动障碍物<sup>[10]</sup>。迟妍提出了一种新的研究思路，将不完全信息条件下的演化博弈分析与基于 agent 的仿真方法相结合，进行公共突发事件中非友好人群行为演化机理研究<sup>[11]</sup>。Park 等提出了使用人类行为的心理学研究成果来避免碰撞。其中结合了凝视运动角度 (gaze movement angle)，回避 (side stepping)，步态移动 (gait motion) 和个人空间气泡 (personal reaction bubble) 的思想<sup>[12]</sup>。刘箴等描述了人群在恐慌情绪作用下个体的行为，构建一种恐慌情绪感染模型<sup>[13]</sup>。Karimaghalou 等提出了一种社会导航模型，用动态的兴趣函数来表现智能体对与不同群组交流的兴趣，并把这个作为群组选择的主要因素，生成组离开和组重访行为<sup>[14]</sup>。任治国等提出一种基于个体心理的实时路径规划方法。根据真实行人的认知模式建立以个体为中心的环境认知域，动态获取其周围环境的人群密度、危险强度等相关信息，为每个个体生成一条其主观认为“最优”的路径<sup>[15]</sup>。负面情绪感染会加速高密度人群中踩踏现象的发生，在进行仿真模拟时也需要借鉴一些情绪模型。黄鹏等构造了紧急情况下的智能体情绪模型，通过模拟火灾中的群体逃生，探讨了情绪的变化和传播对人群中智能体行为决策的影响<sup>[16]</sup>。黄鹏等根据马斯洛的动机理论，建立自主人群的行为模型，将刺激、动机和行为集成在一起，引入有限状态机来描述刺激和动机的关系<sup>[17]</sup>。刘箴等根据人群中是否存在管理人员，提出了一种人群情绪感染计算方法，指出控制人群的负面情绪是避免极端事件的一个重要手段，并提出了在无管理人员和有管理人员的情况下，人群情绪感染的计算方法<sup>[18]</sup>。

综上所述，在人群拥挤踩踏方面，虽然人们已经开展过踩踏机理的数值模拟，但是采用虚拟仿真方法呈现踩踏的研究尚不多见。在人群仿真领域，人们已经开始关注如何将心理学的原理和方法引

入到人群行为建模，但是这方面的研究仍有很多值得深入研究的问题，如何从心理学的角度研究人群踩踏过程就是其中一个重要问题。

## 2 基于心理学的人群踩踏模型

人群的踩踏过程主要包括人群的密集阶段、拥挤阶段和踩踏阶段，如图 1 所示。如果在踩踏过程中能及早管理人群，就能避免人群拥挤的发生，从而预防人群踩踏事件。在踩踏发展过程中，人群的情绪能够极大影响事件的进程，以往这方面的研究尚不多见。从心理学的角度来看，在人群聚集过程中，人群的情绪容易相互影响，容易导致人群的情绪感染。人群个体一旦处在情绪状态，其行为特征将不同于平时的状态，人群更容易进入混乱的状态，人群的拥挤程度加重，容易导致踩踏事件的发生。

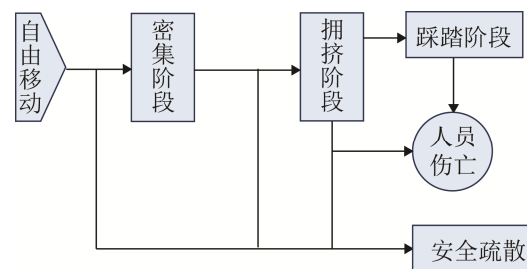


图 1 人群踩踏流程图

基于文献[13]，人群个体受力状态可以概括为如下的方程：

$$F_{total} = F_{aim} + \sum F_{ij} + \sum F_{ib} + F_{leader} \quad (1)$$

其中： $F_{total}$  是合力； $F_{aim}$  目标驱动力； $F_{ij}$  是两个个体之间作用力； $F_{ib}$  是个体对边界的心理排斥力； $F_{leader}$  是情绪感染引发的跟随力。为了简化个体受力的计算，需要对上述公式进行简化。这里我们更关注人群个体之间的作用力， $F_{ij}$  可以表示如下：

$$F_{ij} = A_i \exp\left[\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_i}\right] n_{ij} + Kg(r_{ij} - d_{ij}) n_{ij} + kg(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t t_{ij} \quad (2)$$

式中： $n_{ij}$  是两个个体之间的单位向量，由施力者指向受力者； $r_{ij}$  是两个体的半径和， $d_{ij}$  是两个体的距离； $t_{ij}$  是两个体的切线方向； $v_{ji}^t$  是两个体在切向上的速

度差。在人群密度很高的时候, 个体之间几乎没有空隙, 按照上面的公式,  $r_{ij}$  和  $d_{ij}$  已经很接近, 这样  $F_{ij}$  主要取决  $A_i$  的大小, 这是预先根据经验设定的参数。随着人群密度的增高, 人群个体的情绪也在增加, 对于某个个体, 假设其情绪值为  $EI_i$ , 为了将情绪因素考虑到人群的拥挤过程中, 在人群拥挤阶段, 忽略边界的受力, 可以将人群个体的受力修改成如下的近似公式:

$$F_{\text{total}} = F_{\text{aim}} + F_{\text{push}} \quad (3)$$

$F_{\text{push}}$  代表个体之间的拥挤力, 它与个体的情绪密切相关, 公式如下:

$$F_{\text{push}} = \sum KE_i (1 + EI_i) F_{ij} \quad (4)$$

上述公式表明, 人群的拥挤力与情绪值大小有直接关系, 情绪越大, 人群的拥挤力也越大。心理学的研究表明, 个体在情绪的状态下, 能释放更多的能量, 因此情绪会增加人群的拥挤力。这里  $KE_i$  可以表示如代表情绪调节系数, 与不同的个体相关。可以设定一个拥挤力的阈值  $F_{\text{max}}$ , 用来判定踩踏的触发条件, 可以表示为如下的公式:

$$F_{\text{push}} > F_{\text{max}} \quad (5)$$

为了模拟人群个体情绪的变化, 需要结合人群密度和情绪感染来计算个体的情绪值。随着人群密度的增加, 个体情绪也在增加, 同时个体之间的情绪还存在情绪感染<sup>[16]</sup>。可以为个体情绪设定一个初始值, 该初始值随着人群密度的增高逐渐增加。假设个体的情绪初始值为  $EO_i$ ,  $D_i$  代表该个体所在的人群密度值,  $D_{\text{max}}$  最大人群密度(一般选择 9 人/平方米), 由于人群密度的增高, 个体的情绪变化为:

$$EI_i = \min \left[ 1, EO_i + \frac{D_i}{D_{\text{max}}} \right] \quad (6)$$

为了计算个体情绪感染, 设计一种简便的计算方法, 设定个体的感知半径, 计算感知半径内所有个体的情绪平均值  $EI_{\text{avg}}$ ,  $N$  是感知半径内人群人数, 则个体的情绪值增加量按照如下公式计算:

$$\Delta EI_i = \left| \frac{EI_{\text{avg}} - EI_i}{N} \right| \quad (7)$$

综上公式, 当人群密度增高, 人群情绪值增加, 人群的拥挤力变大。如果人群处在一个水平面上, 个体的拥挤力能被前方个体所平衡。但是在有坡度或者台阶等特殊的地方, 个体的拥挤力不一定被前方的个体所平衡, 一旦拥挤力过大, 个体在这些特殊地方容易被拥挤倒地, 从而引发连锁跌倒现象, 即容易导致踩踏。在实际仿真中, 可以结合不同的情景, 重点对这些容易出现踩踏的位置进行仿真, 只要拥挤力超过阈值, 就可以认为个体出现倒地现象, 虽然后面个体会会有连锁跌倒, 但可以假设当前方倒地的人群达到一定数量时, 即判定人群拥挤力再次平衡, 踩踏现象终止, 而此时人群情绪会出现恐慌, 逃离现场的行为。

在现场有管理人群的前提下, 可以借鉴文献[18]提出的方法, 管理员可以将附近人群的负面情绪控制在一个合理的范围, 避免人群情绪值的增加, 从而降低人群的拥挤力, 对于预防踩踏起到关键的作用。

### 3 人群踩踏情景的仿真案例

设计一个公园人行桥上人群发生踩踏的情景, 来验证上述的模型。假设人行桥上人群从桥两端向桥中间聚集慢慢聚集, 中间有坡度, 如果不进行人群管理, 将会导致人群密度增高, 容易在有坡度处或者台阶处发生人群踩踏。根据已有踩踏案例的分析统计, 本案例中, 假设拥挤力阈值 4 000 N,  $A_i$  设定 2 000 N,  $K$  取 120 000 N/s<sup>-2</sup>,  $k_j$  取 240 000 N/m/s,  $B_i$  取 0.08 m。在人群密度为 1~3 个/m<sup>2</sup> 的条件下,  $r_{ij}$  取 0.4 m,  $d_{ij}$  取 0.45 m; 在人群密度为 4~6 个/m<sup>2</sup> 的条件下,  $r_{ij}$  取 0.36 m,  $d_{ij}$  取 0.35 m; 在人群密度为 7~9 个/m<sup>2</sup> 的条件下,  $r_{ij}$  取 0.3 m,  $d_{ij}$  取 0.3 m。一旦拥挤力超过 4000 N, 则判定个体倒地。在桥上的倒地者, 由于靠近边缘可能跌落桥下。人群密度和拥挤力之间的关系见图 2。



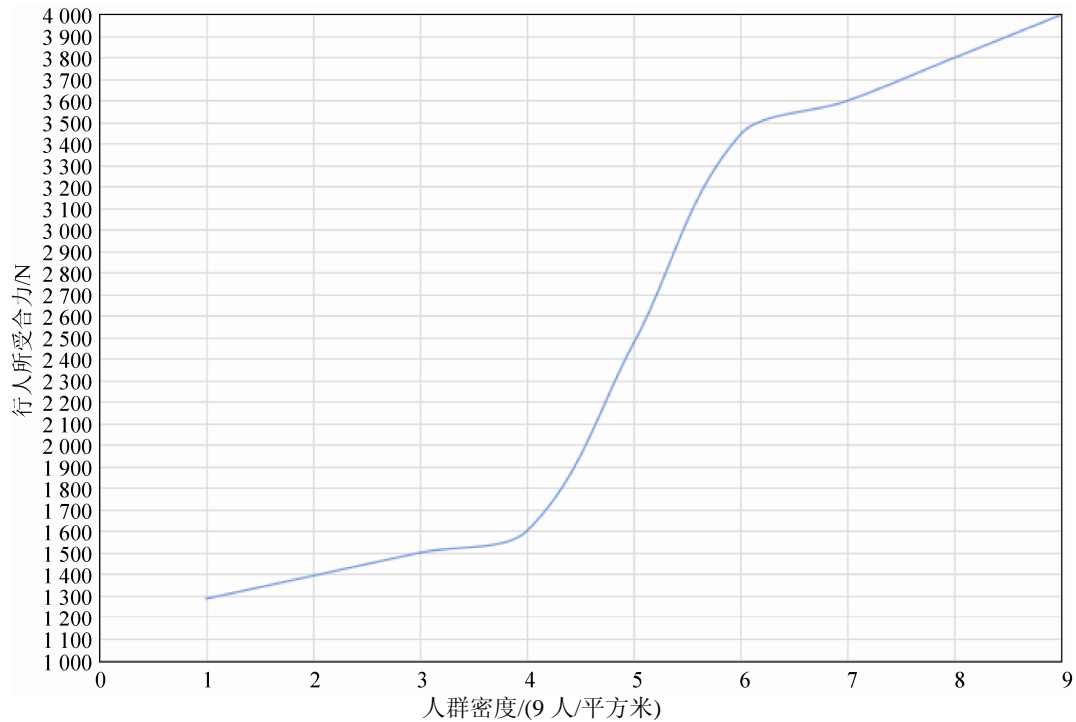


图 2 人群密度与拥挤力的关系

为了测试人群数量和通行时间的关系,分别设置不同的人数按照一定速度走过拱桥,并统计全部成员通过的时间,如图 3 所示。发现人数越多,通过拱桥的时间也越长。

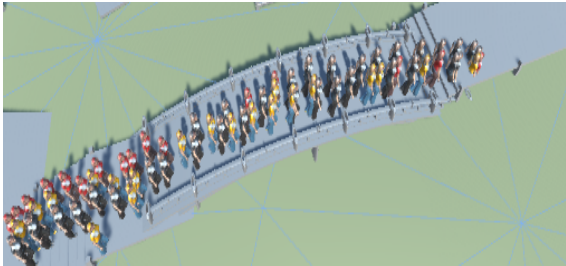


图 3 人群通过拱桥示意图

仿真实验采用 Unity3d 编程实现,采用 Unity3d 自带的 AnimationState 实现动画播放。对于人群个体的不同动作,设计相应的动作(每个动作以 bip 文件存储),并通过 Animator controller 实现动画的切换。通过设定个体的行为状态,采用不同的动画序列展现行为状态,从而可以将踩踏发生过程呈现出来。

**剧情 1:** 踩踏过程的仿真演示,开始过程截图如图 4。



图 4 行人向桥上聚集

由于场景设计在溪水之上,而且拱形桥的高度很低,人群密度超过临界值时,在巨大的拥挤力的推动下,行人会有落水现象。落水和踩踏现象如图 5 和图 6 所示。

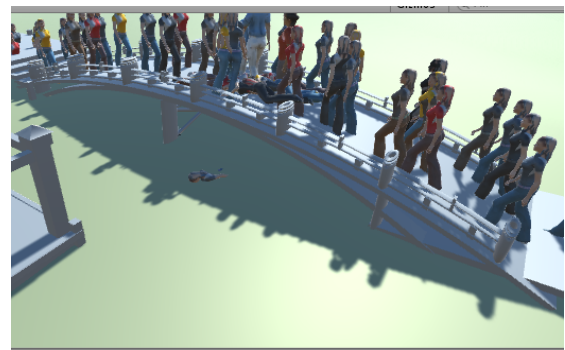


图 5 行人落水

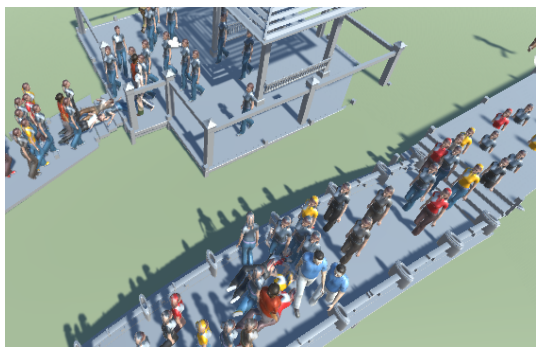


图 6 行人拥挤后方行人踩踏在摔倒者身上

当发生踩踏事件时, 离事发点近的行人开始出现恐慌行为, 行为表现在开始出现转向行为, 朝向相反的方向行走, 出现逃离现场的举动, 见图 7。



图 7 离事发点近的行人出现恐慌情绪转向

**剧情二:** (对比试验) 由于拱形桥比较窄小, 当高密度人群无序拥挤地移动时, 容易在移动过程中使拥挤力增大。如果在桥上设置一个管理员(警察), 无序的人群行为就可以被约束, 从而变得有序。当人群密集度及拥挤力超过临界值时, 人群间的碰撞会引发恐慌情绪值的升高。当有管理员进行制约时, 情绪值就会受到控制。本例中假设有管理员的加入, 从而使得在桥上的个体情绪不再随着人群密度增高而加大, 使人与人之间的拥挤力不再增加, 人群开始有序地通过拱形桥。

警察用手势指引行人行走的路径, 将拱形桥的路径分为左右通行的道路。人数较少时, 行人按照平稳的速度通过两边朝前的方向行走, 见图 8。

在警察的管理作用下, 人群移动路径分为两条, 有序地向前行走, 人群中不会出现走错方向的行人, 因此不存在与对面行人发生碰撞或者拥挤现

象, 人与人左右两边保持一定的距离, 使无序的行走状态进入有序的状态, 见图 9。

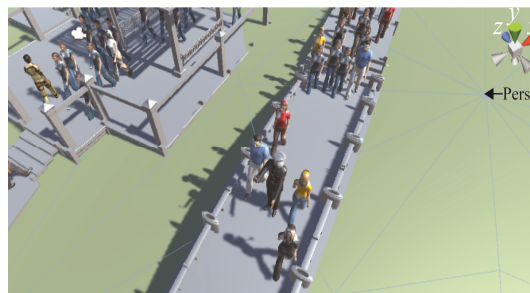


图 8 人数较少时通行状况效果图



图 9 警察控制人群情绪, 人群处在有序状态

当人群密集度很大时, 由于警察的约束作用, 人群情绪得到有效控制, 人群也不会发生拥挤, 人群进入排队等候, 按照有序队列向前行进, 依次通过窄桥, 这样人群的行为变得有序可控, 人群间不会发生碰撞, 人与人之间的拥挤力也不会增加, 人群密度一直保持在恒定状态。即使达到很高时, 因为人群的行为是有序地向前, 所以不会导致踩踏事件的发生。

## 4 结论

预防人群拥挤踩踏是人群管理的一个重要课题, 以往的人群踩踏研究大多从力学和管理的角度开展, 对踩踏过程中人群心理活动的定量描述不够。人群踩踏是由于大量人群的聚集造成的后果, 在人群聚集过程中, 人群中容易出现愤怒、惊慌等负面情绪, 人群的从众心理导致个体之间的情绪感染现象严重, 而人群负面情绪的迅速升高, 又会加剧人群的拥挤混乱。



本文在总结已有人群踩踏研究的基础上,从人群情绪的角度,提出了人群踩踏的判断方法,该模型通过人行桥上的人群踩踏情景仿真实验进行验证,可以为人群拥挤踩踏仿真提供一种新的方法。通过仿真实验发现,在人群通过的瓶颈位置,设置必要的管理员,可以有效预防人群的拥挤踩踏,控制人群的情绪,从而降低拥挤踩踏的风险。

人群拥挤踩踏建模是一个很复杂的问题,本文仅是从情绪的角度来分析踩踏的条件,所提出的模型需要进一步完善,演示效果仍需进一步加强。下一步拟结合人体物理模型,增强人群踩踏动画显示效果,考虑将个性模型融入到本文的模型中,通过收集人群踩踏数据,进一步完善踩踏的仿真参数。

### 参考文献:

- [1] 任常兴, 吴宗之, 刘茂. 城市公共场所人群拥挤踩踏事故分析 [J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(12): 102-106.
- [2] 白锐, 梁力达, 田宏. 人群聚集场所拥挤踩踏事故原因分析与对策 [J]. 工业安全与环保, 2009, 35(2): 47-49.
- [3] 冉丽君, 刘茂. 人群密度对人群拥挤事故的影响 [J]. 安全与环境学报, 2007, 7(4): 135-138.
- [4] 卢春霞. 拥挤人群中的挤压分析 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(2): 98-103.
- [5] 张青松, 刘金兰, 赵国敏. 大型公共场所人群拥挤踩踏事故机理初探 [J]. 自然灾害学报, 2009, 18(6): 81-86.
- [6] 佟瑞鹏, 李春旭, 郑毛景, 等. 拥挤踩踏事故风险定量评价模型及其优化分析 [J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(12): 90.
- [7] Sakuma T, Mukai T, Kuriyama S. Psychological model for animating crowded pedestrians [J]. Computer Animation and Virtual Worlds (S1546-427X), 2005, 16(3/4): 343-351.
- [8] Fridman N, Kaminka G. Modeling pedestrian crowd behavior based on a cognitive model of social comparison theory [J]. Computational and Mathematical Organization Theory (S1381-298X), 2010, 16(4): 348-372.
- [9] Durupinar F, G'ud'ukbay U, Aman A, et al. How the ocean personality model affects the perception of crowds [J]. IEEE Computer Graphics and Applications (S0272-1716), 2011, 31(3): 22-31.
- [10] Rao Y, Chen L, Liu Q, et al. Real-time control of individual agents for crowd simulation [J]. Multimedia Tools and Applications (S1380-7501), 2011, 54(2): 397-414.
- [11] 迟妍. 公共突发事件中非友好人群行为研究 [J]. 中国公共安全(学术版), 2012 (02): 1-4.
- [12] Park J H, Rojas F A, Yang H S. A collision avoidance behavior model for crowd simulation based on psychological findings [J]. Computer Animation and Virtual World (S1546-427X), 2013, 24(3/4): 173-183.
- [13] 刘箴, 黄鹏. 人行桥上突发事件下的人群恐慌行为模型研究 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24(9): 1950-1953.
- [14] Karimaghalou N, Bernardet U, Di Paola S. A model for social spatial behavior in virtual characters [J]. Computer Animation and Virtual Worlds (S1546-427X), 2014, 25(3/4): 505-517.
- [15] 任治国, 盖文静, 彭群生. 疏散仿真中关注个体心理的路径规划 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(9): 1775-1785.
- [16] 黄鹏, 刘箴. 一种剧场火灾逃生人群情绪行为模型 [J]. 科技通报, 2012, 28(7): 71-74, 101.
- [17] 黄鹏, 刘箴. 一种基于动机理论的人群行为模型 [J]. 计算机工程, 2013, 39 (12): 290-293.
- [18] 刘箴, 金炜, 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.