

突发事件中人群跟随现象的一种仿真模型

方昊, 刘箴, 陆涛, 刘良平, 刘婷婷, 刘翠娟

(宁波大学信息科学与工程学院, 宁波 315211)

摘要: 突发事件的群体行为研究对于应急管理具有重要的现实意义, 现有的群体模型大多侧重在碰撞检测、运动规划等方面。根据紧急事件的监控录像分析, 人群跟随行为十分明显, 建立跟随模型是群体仿真中的一个有趣话题。结合经典的社会力模型和 OCEAN 个性理论提出了跟随行为模型, 引入了恐慌度的概念, 给出了个体跟随的判定条件, 构造了个体的速度公式。实验结果表明, 所提出的跟随模型能够较好地模拟人群集体行为特征。

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 (2015) 10-2432-08

DOI:10.16182/j.cnki.joss.2015.10.031

Simulation Model of Crowd Following Phenomenon in Emergencies

Fang Hao, Liu Zhen, Lu Tao, Liu Liangping, Liu Tingting, Liu Cuijuan

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

Abstract: Researches on crowd behavior in emergent events are important practical significance for emergency management, most of the current crowd models are collision detection, motion plan and so on. According to the emergency scene analysis of surveillance video, following behaviors of crowd are obviously, modeling following behaviors is an interesting topic in crowd simulation. A following model was proposed based on classical social force model and OCEAN personlity theory, the concept of panic was introduced, and following conditions of individual was set up, the speed formulas of individual were constructed. Experimental results show that the following model can closely simulate the collective behavior of emergent crowd.

Keywords: following; crowd simulation; personality; social force

引言

近年来,我国城市公共场所遭遇重大突发事件频率有所增加。在这些场所人员通常很密集,一旦发生突发事件,将严重威胁到人民群众的生命财产安全。加强人员密集场所的安全管理具有十分重要

的现实意义,通过虚拟仿真的方法模拟人群的极端行为可以为人群的安全管理提供直观的参考。

已有的人群运动仿真模型中,大多侧重于研究群体之间的碰撞检测和运动显示等。在人群的仿真模型方面,元胞自动机^[1]是一个在时间和空间上都离散的模型,分散在规则网格中的每个元胞取有限的离散状态,它以概率规则驱动虚拟人运动。Anders 和 Helbing 等人提出了社会力模型^[2-3],通过不同类型力的叠加效果来描述行人的连续运动。王兆其^[4]等人提出了一种适用于复杂环境下的环境层次模型,对复杂环境的语义进行描述,建立语



收稿日期: 2015-06-14 修回日期: 2015-07-28;
基金项目: 国家自然科学基金(61373068); 宁波市科技计划项目(2015A610128; 2015C50053; 2013D10011; 2015D10011; 2014C50018); 高等学校博士学科点专项科研基金(20133305110004);
作者简介: 方昊(1991-), 男, 安徽, 硕士生, 研究方向为虚拟现实。

http: www.china-simulation.com

• 2432 •

义模型, 引导人群运动。任治国^[5]等提出一种根据真实视频中真实行人在场景中的分布动态调整虚拟人路径的方法, 更自然地模拟出了虚拟人融入真实人流的过程。在群体动画方面, 金小刚等人提出一种全局的导航方法^[6], 为虚拟人设置全局规划的主动变量和自身的运动变量, 全局运动变量来自用户指定的向量域, 它是通过基于径向基函数(RBF)插值计算得到。Pelechano^[7]等人以社会力模型为基础, 模拟了紧急情况下高密度人群疏散场景, 实现了人群的自动分流、排队、拥挤的场景。黄鹏^[8]等人以社会力模型为基础, 加入了人与人之间的转向力, 模拟了在正常情况和恐慌行为下的人群运动。近些年, 研究者们将人群的运动与心理学相结合。Durupinar^[9]将 OCEAN 个性模型与人群的行为建立映射关系。刘箴^[10]等人提出了人群在运动过程中的情绪感染模型, 结果表明控制消极情绪感染是人群管理的重要环节。

有关人群行为仿真的方法已经在文献^[11-12]做了总结。其中, 突发事件中人群行为的模拟仍是一个具有挑战性的课题。因此, 本文以突发事件下人员逃生为背景, 对突发事件的真实监控录像进行定性分析, 结合 OCEAN 个性模型、智能体理论, 以社会力模型为基础, 一方面, 对人群运动过程中的跟随行为进行建模, 建立了跟随条件, 制定跟随规则; 另一方面, 结合人群逃生中恐慌情绪, 对原社会力模型中的期望速度模型进行了修正。

1 社会力模型简述

社会力模型的主要思想是通过建立牛顿运动学方程, 计算合力、加速度、速度、位移等物理量来达到导航的目的。 m_i 是行人 i 的质量, 社会力模型的运动学方程可用公式(1)描述如下。

$$m_i \frac{dv}{dt} = f_{\text{driven}} + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_{w \neq i} f_{iw} \quad (1)$$

f_{driven} 称之为驱动力, 它决定行人朝着目标运动的力, 与期望速度有关。 e_i 是一个单位向量, 方

向为当前行人 i 的位置指向目标位置, $v_i^0(t)$ 为期望速度大小。 $v_i(t)$ 是当前行人的速度, τ_i 为时间变量。

$$f_{\text{driven}} = m_i \frac{v_i^0(t)e_i - v_i(t)}{\tau_i} \quad (2)$$

f_{ij} 是行人 i 与行人 j 之间的相互作用力, 如下公式(3)。这部分的力可以分为 f_{ij}^{psy} 排斥力和 f_{ij}^{touch} 接触力。根据智能体理论, 通常把行人的三维结构简化为一个圆柱体结构, 行人 i 和行人 j 的半径分别为 R_i 和 R_j , d_{ij} 是行人 i 到行人 j 的质心距离, 其中, k 、 κ 、 A_i 和 B_i 均为常数。 v_i 与 v_j 分别是行人 i 和行人 j 的速度。 $e_{ij} = (e_{ij}^1, e_{ij}^2)$ 是由行人 j 指向行人 i 的单位向量, 即行人 i 所受的排斥力方向。 $t_{ij} = (-e_{ij}^2, e_{ij}^1)$ 是单位向量, 与 e_{ij} 垂直。

$$\begin{cases} f_{ij} = f_{ij}^{\text{psy}} + f_{ij}^{\text{touch}} \\ f_{ij}^{\text{psy}} = A_i \text{Exp}[(\varepsilon_{ij}) / B_i] e_{ij} \\ f_{ij}^{\text{touch}} = G(\varepsilon_{ij}) \{ k e_{ij} + \kappa [(v_j - v_i) \cdot t_{ij}] t_{ij} \} \\ \varepsilon_{ij} = R_i + R_j - d_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

$$G(x) = \begin{cases} x, x > 0 \\ 0, x \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

f_{iw} 是行人 i 与障碍物(一般指墙体障碍物)之间的作用力。这个作用力类似于上述的行人之间的作用力, 也分为行人与障碍物之间的排斥力 f_{iw}^{psy} 和接触力 f_{iw}^{touch} , 如下公式(5)。 d_{iw} 是行人 i 到障碍物的最短距离, $e_{iw} = (e_{iw}^1, e_{iw}^2)$ 是沿着障碍物法线方向指向行人的单位向量。 $t_{iw} = (-e_{iw}^2, e_{iw}^1)$ 单位向量, 与 e_{iw} 垂直。

$$\begin{cases} f_{iw} = f_{iw}^{\text{psy}} + f_{iw}^{\text{touch}} \\ f_{iw}^{\text{psy}} = A_i \text{Exp}[(\varepsilon_{iw}) / B_i] e_{iw} \\ f_{iw}^{\text{touch}} = G(\varepsilon_{iw}) [k e_{iw} + \kappa (v_i \cdot t_{iw}) t_{iw}] \\ \varepsilon_{iw} = R_i - d_{iw} \end{cases} \quad (5)$$

2 人群行为仿真

2.1 OCEAN 个性模型

人群常常是由不同个性特征的人组成, 一旦发生突发事件, 不同个性的个体对事件的反应也各不相同。OCEAN 模型将人类个性特征分成了五大类,

O(开放性)、C(谨慎性)、E(外向性)、A(宜人性)和N(神经质)。本文以此来研究不同个性个体在突发事件下的逃生行为。O、E、A 个性的个体具有较为相似的特征,都有明显地开朗的个性。C 个性个体表现为严谨刻板,不易受周围环境或事物的影响。N 个性个体对外界刺激较为敏感,很容易受到环境的影响,并且对刺激的反应也较其他类型个体迅速。综上分析,将人群个体划分为三类:O、E、A 划分为一类,C 为单独一类、N 为单独一类。

2.2 跟随行为仿真

在逃生过程中,人群流向也会对行人的路径规划产生影响。行人跟随人流的从众现象也很常见。行人在没有清楚地了解出口信息前,会观察附近行人的逃生方向,从而选取跟随对象,把这个对象称之为“领队”。

在跟随模型的研究中,目的就是要跟随者尽可能地靠近“领队”(被跟随者),但是又不能超越“领队”,当行人距离“领队”较远时,跟随行人会以较快的速度接近“领队”,但是当距离“领队”已经较近,行人需要放慢速度。本文通过以下两个过程描述跟随行为:

接近:朝向“领队”移动,随着靠近“领队”距离的缩短,速度相应的减小;

保持:跟随者与“领队”要保持一定距离。

从真实监控录像观察行人的跟随行为,本文提出的跟随模型,一方面,在每个仿真周期里,每个智能体需要检测跟随的条件,确定跟随的“领队”,确定跟随的目标位置;另外一方面,当跟随条件满足以后,需要实施相应的跟随规则。

2.2.1 跟随条件检测

个体跟随行为是否被激活,由周围环境和其自身的状态来决定。为简化起见,本文假设只有个性较积极的个体会有跟随行为发生。在每个仿真周期里,每个智能体都要检测是否激活跟随行为。当且仅当满足如下(6)式约束,智能体 A_i 激活跟随 B_j 行为。

$$\begin{cases} p_i \in \{O, E, A\} \\ \Delta v < \alpha_f \\ 0 < \Delta p_x < \alpha_x \\ \Delta p_y < R_i + R_j \end{cases} \quad (6)$$

其中, p_i 是个体 i 的个性, Δv 是 A_i 与 B_j 速度夹角, Δp_x (或者 Δp_y) 是他们沿着水平(或者垂直)方向的相对距离, R_i 和 R_j 分别是 A_i 与 B_j 的半径, α_f 、 α_x 是预先设置的阈值。注意,如图 1 所示,这里使用的是以智能体 A_i 为中心的相对坐标系,其水平轴定义为 $x = \frac{v_I}{|v_I|}$,用以计算与待定领队的水平距离 Δp_x 和垂直距离 Δp_y 。

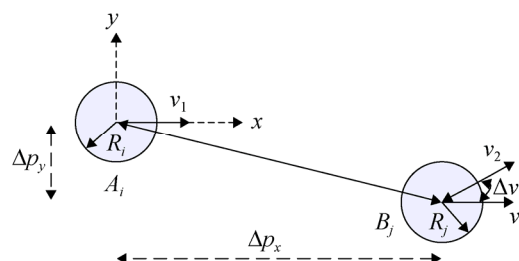


图 1 跟随模型示意图

跟随条件的第一项体现了跟随行为在个性上的差异,根据经验,个性较为开朗的行人容易产生“从众”心理,这也是本文的一个假设前提。第二项是为了确保两行人前行的方向保持基本一致。第三项避免了跟随者与“领队”在水平方向上的距离 Δp_x 过大,故在本文中预先设置一个阈值 α_x 。 $\Delta p_x > 0$, 则保证跟随者保持在“领队”的后方。第四项确保跟随者与“领队”在纵向距离足够小,这样可以约束 A_i 的运动。当有多个备选的“领队”满足以上四个条件,选择具有 Δp_x 最小的行人作为“领队”。

2.2.2 跟随规则

如图 2 所示,当跟随的条件满足后,智能体将应用跟随规则,即完成跟随者靠近“领队”(被跟随者)的过程。首先计算出跟随点 followPos, 即该点作为下一仿真周期智能体的目标点。该跟

随点的计算可以利用领队的速度 v 来确定, 因为他代表了“领队”的前进方向。定义:

$$\text{followPos} = \text{leaderPos} - \frac{v}{|v|} \text{BEHINDDIS} \quad (7)$$

式中: leaderPos 是“领队”当前的位置。 BEHINDDIS 是一个常数, 它可用于调整跟随点在领队后方的距离。计算出跟随点后, 应用社会力模型, 改变其期望速度方向, 即把下一个仿真周期的目标点赋值为跟随点 followPos 。

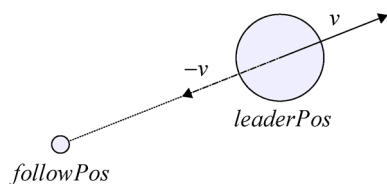


图 2 跟随点示意图

2.3 恐慌行为仿真

人群逃生中, 行人的恐慌行为不仅受到环境的影响, 同时也会受到其他行人的影响。其一, 是因为只有一部分的行人能直接感知到恐慌信息, 而其他智能体则只能间接地获取到恐慌信息。其二, 是因为行人在个性上的差异。恐慌行为的直接表现之一就是人群速度的变化, 这也是本文关注的重点, 本文结合 OCEAN 个性模型提出一个速度模型。

2.3.1 个性感知

基于前述的个性理论, 个性不同的个体对周围环境感知也会有所差异。在运动过程中, 不同个性个体的感知半径 r 不同, 积极向上的个性, 感知半径较大, 相反, 较为严谨刻板的个体感知半径受拘束, 相应的也较小, 而敏感性的人感知半径大小适中。

另一方面, 不同个性的个体对突发事件的反应, 很重要的方面体现在速度大小上的改变, 本文用了一个速度惩罚项 ω_v , 反映的是个性不同的个体对突发事件刺激的反应程度, 会影响到期望速度的大小, 在公式(8)中使用了该惩罚项。 ω_v 越大, 对速度调整的幅度也越多。本文根据经验, 设置个

性化参数如下表 1 所示。个性敏感的个体会表现出对环境的做出的行为更为活跃, 积极个性(O、E、A), 速度惩罚值适中, 而严谨性个体速度惩罚值较低, 神经质性个体速度惩罚值最高。

表 1 个性感知参数

个性	感知半径 r	速度惩罚项 ω_v
O	6.0 m	4.0
C	2.0 m	3.5
E	6.0 m	4.0
A	6.0 m	4.0
N	4.0 m	5.0

2.3.2 速度模型

在突发事件下, 个体恐慌行为受到情绪的影响。处在突发事件下的行人, 往往没有经过特殊的训练, 在此种环境下非常容易产生恐慌心理。从个体角度看, 个体会受到来自危险源的威胁, 它会影响自身的情绪从而产生恐慌。从群体角度来看, 这种恐慌情绪会传递给周围的其他个体, 这种群体效应的结果会引起个体期望速度的改变。两者同时存在, 个体影响群体, 群体则会影响个体速度的变化。用 E_i 表示个体的恐慌值, $E_i \in [0, 1]$, d_{is} 表示行人与危险源的距离, 距离越近, 恐慌度越高。在紧急状况下人群密度 ρ_i 也是影响速度的重要因素, 它的意义是以行人作为中心, 以感知半径 r_i 的圆形邻域空间内, 邻居行人面积之和占感知区域的比例, R_i 是智能体的半径, 一般地, $r_i > R_i > 0$, 本文中智能体半径 R_i 大小设置相同。人群密度越大, 人的恐慌值就越高。 v_{\max} 是最大速度, ω_v 是速度惩罚项, 用 $v_i^0(t)$ 表示修正后的期望速度大小, 其中 $\lambda \in [0, 1]$ 。

$$\begin{cases} E_i = \lambda \frac{\rho_i}{d_{is}} \\ \rho_i = N \left(\frac{R_i}{r_i} \right)^2 \\ v_i^0(t) = \omega_v (1 - E_i) v_{\max} + \frac{\sum_{j=1}^N E_j v_j}{N} \end{cases} \quad (8)$$

另一方面,在传统的社会力模型中,期望速度的方向始终由行人位置指向目标位置,这是不太符合实际情况的。在紧急情况下,一方面,一部分行人并没有明确的逃离目标点,盲目跟随其他人群,另外,行人的感知半径也有限,一开始出口位置信息并不是很明确。综合这样的原因,本文对期望速度的方向作如下修正。

$$\begin{cases} e = (1 - \rho_i)e_i + \rho_i \text{avg}V \\ e'_i = \frac{e}{|e|} \end{cases} \quad (9)$$

$\text{avg}V$ 是指该行人 i 周围邻居行人的平均速度方向,是单位向量。根据公式(9), e'_i 是修正后的期望速度方向。

3 仿真实验与结果

针对本文提出的跟随模型,设计了两个实验加以验证。实验一,对上述跟随模型进行仿真实验。实验二,构建了一个虚拟室内环境,以社会力模型作为导航基础,进行人群疏散实验。

仿真流程如图 3 所示,在每个仿真周期里,对于每个智能体,更新其邻居智能体信息,判断跟随条件,一旦满足条件,则应用跟随规则,计算出跟随点,应用社会力模型进行人群运动导航。

3.1 实验一

设计人群跟随行为仿真实验。建立一个 $80.0 \text{ m} \times 60.0 \text{ m}$ 的虚拟室内场景,门宽 5.0 m ,智能体的半径 0.6 m 。图 5(a)是本文方法,模拟了 200 个智能体应用跟随模型后的结果。图中红色射线起始于跟随智能体位置,射线所指方向是从跟随者指向领队智能体(被跟随者)。图中可以看到,红色区域里,多数行人检测到跟随条件,确定领队者,并应用跟随规则,形成了小团体。图 4(c)是某俱乐部火灾人员疏散录像截图,可以观察到人群的跟随行为。图 4(b)为智能体聚集到出口处,形成拱形状,模拟出了人群逃生时堵塞在出口处的结果。其一,本文考虑对智能体的个性进行设定,不同个性的智

能体对速度有着不同程度的调整;其二,对人群中跟随行为建立跟随条件,制定跟随规则,影响到个体行为的决策。综上所述,该结果有别于传统社会力模型形成的对称拱形,从图中可以看到本文模拟的结果,成拱并非完全对称分布于出口的两侧。

3.2 实验二

如图 5 所示,设计了一个虚拟室内场景,包含 6 个逃生出口,7 个半径大小不同的圆柱体静态障碍物,设置了爆炸发生源的位置。为了区分智能体的个性差别,在仿真中,用五种不同颜色的球体置于智能体上方代表不同个性智能体。用黄色、蓝色、青色、绿色和红色分别代表开放性、严谨性、外向性、宜人性和神经质性的智能体。

图 5(a)和 5(b)分别是两种方法的初始阶段。初始化信息包括:读入场景数据,智能体的位置、智能体半径、设置智能体的个性、感知半径、目标点等信息。智能体的初始位置和智能体的个性是随机设置。

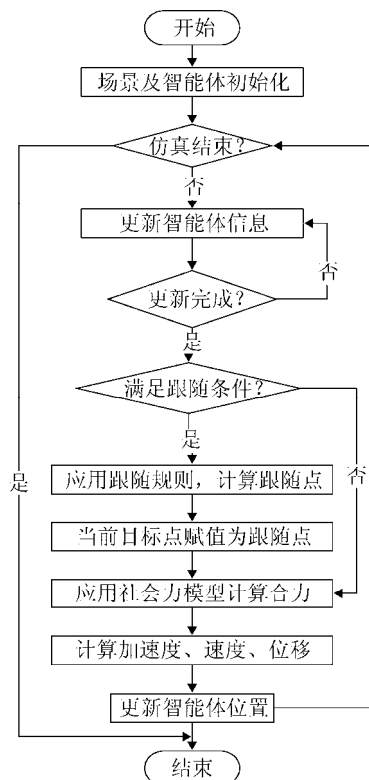
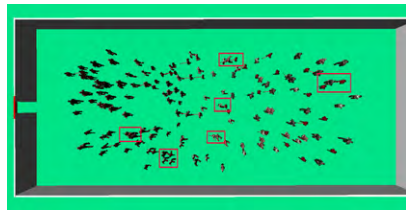
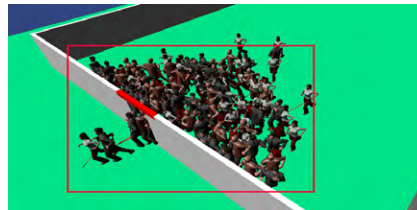


图 3 仿真流程图



(a) 跟随行为仿真

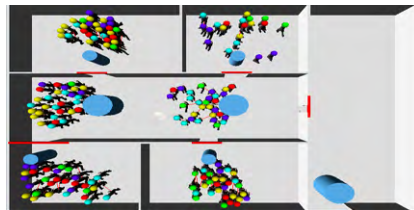


(b) 拥堵现象

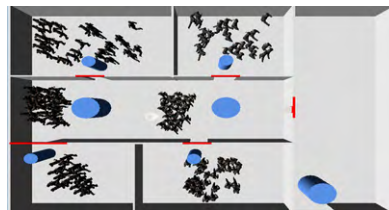


(c) 某俱乐部火灾逃生

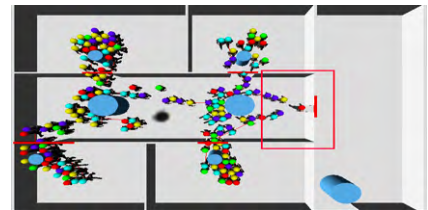
图 4 跟随行为仿真



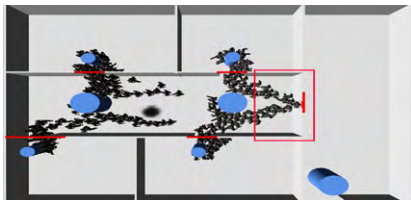
(a) 本文方法的初始阶段



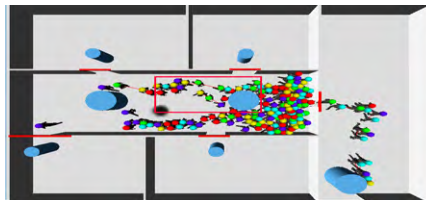
(b) 社会力方法的初始阶段



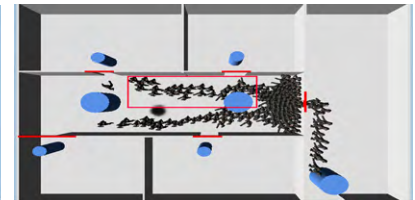
(c) 本文方法模拟逃生阶段



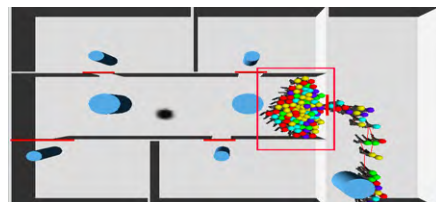
(d) 社会力模型模拟逃生阶段



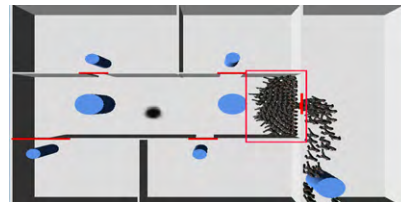
(e) 本文方法模拟的堵塞阶段



(f) 社会力模型的堵塞阶段



(g) 本文方法模拟的堵塞成拱阶段



(h) 社会力模型模拟的堵塞成拱阶段



(i) 尼泊尔地震人员逃生监控视频

图 5 人群疏散仿真实验

图 5(c)为本文方法的逃生阶段,图 5(d)为社会力模型模拟的逃生阶段。在图 5(c)中,智能体纷纷向出口处逃离。一方面,逃离过程中,智能体检测跟随条件,确定领队者,图中结果模拟出人群跟随行为,形成人群中的小团体。另一方面,本文添加速度惩罚项,对神经质性的智能体速度调整最大。图中神经质性的智能体首先到达出口处,表明神经质性的智能体对突发事件的反应最敏感,其行为表现为逃跑速度最快。紧跟其后的是若干个严谨性智能体,和性格较温和的智能体。在图 5(d)中人群速度大体一致,多数智能体同时涌向出口,没有体现

出个性差异。

图 5(e)和图 5(f)分别是本文方法模拟的堵塞阶段和用社会力模型模拟出的堵塞阶段。图 5(e)中红框区域,本文方法模拟出在障碍物处人群分流现象,在图(f)中没有体现。

图 5(g)和图 5(h)分别是本文方法模拟的堵塞成拱阶段和用社会力模型模拟出的堵塞成拱阶段。红色区域出口处聚集大量智能体,出现成拱现象,堵塞在出口处。相比图 5(h),在图 5(g)中的出口处拥堵更为密集,与现实生活中拥堵时人群挤压摩擦的拥挤场面相符。两种方法都模拟出了人群在出口处

成拱现象,但二者的成拱的形状有所区别,本文方法模拟的人群拥堵并非完全对称分布在出口两侧,这与图 5(i)地震中人员逃生景象相符(人群在门口拥挤成不对称的拱形)。社会力模型模拟出的结果相对较对称。原因总结如下,其一,在公式(8)中提出了恐慌值的概念,考虑到人群密度对个体速度的影响,同时考虑到个体之间的恐慌值的传染。其二,公式(9)对期望速度方向进行了修正,把邻居智能体的速度考虑到当前智能体的期望速度。

本文方法很好地模拟了突发事件下人群跟随行为。与传统社会力模型不同,本文考虑到个体个性特征的差异和人群运动过程的恐慌情绪,仿真结果出现人群中的小团体,模拟了人群分流行为和出口处拥挤成非对称拱现象,实验结果较好地证明了本文模型的有效性。

4 结论

突发事件下人群行为的研究具有重要的现实意义,采用仿真技术最大优点是能够推演各种可能的人群景象,从而为人群管理找到相应的解决方案。本文总结了已有的研究成果,从定性地分析真实监控录像出发,分析了探索突发事件下人群行为的紧迫性和重要性,针对已有工作的不足,从人群行为特征角度提出了跟随模型,取得如下研究成果。

(1) 结合突发事件的视频监控分析,对人群运动过程中的跟随现象建立模型,结合个体的个性差异,提出了跟随条件,并且对跟随者设计了跟随规则。

(2) 把人群的个体当做智能体来处理,具有个性、感知和行为能力。智能体的感知能力与其个性相关,其行为也因个性差异,表现出不同行为。

(3) 建立虚拟场景,以人群火灾逃生为情节,通过计算机编制仿真程序。从群体行为的特征角度,很好地模拟了人群中的跟随现象、小团体现象、人群的分流现象、出口处拥堵现象。这些现象的出现,与跟随行为密切相关,同时本文考虑到个体逃生中的人群密度和恐慌心理。

突发事件下人群行为的模拟是一项具有挑战

性的课题,研究内容也涉及到很多学科的知识。本文的工作仍有待进一步深入。下一步打算从真实视频入手,提取更多真实人群运动数据,考虑人群运动的环境作用(如地震的水平晃动等),进一步完善人群行为仿真实验。

参考文献:

- [1] Blue V J, Adler J L. Cellular Automata Microsimulation of Bidirectional Pedestrian Flows [J]. Transportation Research Record (S0361-1918), 1999, 1678(1): 135-141.
- [2] Helbing D, Molnár P. Social force model for pedestrian dynamics [J]. Physical Review E (S1539-3755), 1995, 51(5): 4282-4286.
- [3] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating Dynamical Features of Escape Panic [J]. Nature (S0028-0836), 2000, 407(28): 487-490.
- [4] 王兆其, 毛田露, 蒋浩, 等. 人群疏散虚拟现实模拟系统-Guarder[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(6): 969-978.
- [5] 任治国, 盖文静, 金嘉磊, 等. 面向动态场景视频的虚拟行人路径规划[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(4): 433-441.
- [6] Jin X, Xu J, Wang C C, Huang S, Zhang J. Interactive Control of Large-Crowd Navigation in Virtual Environments Using Vector Fields [J]. IEEE Computer Graphics & Applications (S0272-1716), 2008, 28(6): 37-46.
- [7] Pelechano N, Badler N I. Modeling Crowd and Trained Leader Behavior during Building Evacuation [J]. IEEE Computer Graphics and Applications (S0272-1716), 2006, 26(6): 80-86.
- [8] 黄鹏, 刘箴. 一种面向人群仿真的改进社会力模型研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(9): 1916-1919.
- [9] Durupinar F, Pelechano N, Allbeck J M, Gdkbay U, Badler N. The Impact of the OCEAN Personality Model on the Perception of Crowds[J]. IEEE Computer Graphics and Applications (S0272-1716), 2011, 31(3): 22-31.
- [10] 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.
- [11] Xu M L, Jiang H, Jin X G, Deng Z G. Crowd Simulation and Its Applications: Recent Advances [J]. Journal of Computer Science & Technology (S1666-6038), 2014, 29(5): 799-811.
- [12] Gaoqi He, Yang Y, Chen Zh, Chunhua Gu, Pan Z G. A Review of Behavior Mechanisms and Crowd Evacuation Animation in Emergency Exercises [J]. Journal of Zhejiang University Science C (S1869-1951), 2013, 14(7): 477-485.