

考虑行人相对速度的改进社会力模型的验证与评估

钟圳伟 纪庆革

中山大学数据科学与计算机学院 广州 510006

广东省大数据分析处理重点实验室 广州 510006

(zzw851831268@163.com)



摘要 在人群仿真的研究领域中,社会力模型是由 Helbing 提出的一种非常经典的微观仿真模型,能够模拟一些常见的人群自组织现象。但社会力模型仍然存在行人震荡、行人重叠等问题,因此许多学者在参数设置、受力范围、算法优化等方面对社会力模型进行了丰富和改进。目前,Gao 等提出的一种考虑行人相对速度的改进社会力模型依然是一些学者进行改进社会力模型研究以及各种仿真实验的基础和重要参考。由于 Gao 等仅通过两个实验就表明了他们的改进社会力模型的优势这一情况欠缺可靠性,以及没有进行更多的人群自组织实验来表明改进后的社会力模型仍然保留原始社会力模型能够模拟人群自组织现象这一能力,因此文中对 Gao 等提出的改进社会力模型进行了验证性和评估性实验。通过验证性实验验证了 Gao 等进行的两个实验,证实了该改进社会力模型的优势。文中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,发现并分析了 Gao 等的改进社会力模型所存在的行人重叠问题。

关键词: 人群仿真;社会力模型;人群自组织现象;相对速度

中图法分类号 TP391.9

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

ZHONG Zhen-wei and JI Qing-ge

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

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

Abstract In the field of crowd simulation, the social force model is a very classic micro-simulation model proposed by Helbing, which can simulate some self-organizing phenomenon. However, there are still some shortcomings in the social force model such as pedestrian oscillation and pedestrian overlapping. Therefore, many scholars have enriched and improved the social force model in terms of parameter setting, force range and algorithm optimization. Gao et al. proposed a modified social force model considering the relative velocity of pedestrians, which is still the basis and important reference for scholars to study the improved social force model and various simulation experiments. Since Gao et al. showed the advantages of their modified social force model through only two experiments, which is a little lack of reliability, and there is no more self-organizing experiments to show that their modified social force model still retains the original social force model's advantage that can simulate the self-organizing phenomenon, this paper did the confirmatory experiments and evaluation experiments for the modified social force model proposed by Gao et al. Two experiments conducted by Gao et al. were verified by confirmatory experiments, which confirm the advantages of Gao et al. 's modified social force model. Through the experimental results of the evaluation experiments, it is confirmed that the modified social force model of Gao et al. retains the ability to simulate the self-organizing phenomenon. This paper also discovered and analyzed the pedestrian overlap problem of the improved social force model of Gao et al.

Keywords Crowd simulation, Social force model, Self-organizing phenomenon, Relative velocity

1 引言

人群仿真是计算机图形学中一个利用计算机仿真技术对

人群进行建模与仿真的研究方向,是一项综合了应用心理学、人体动力学、人工智能、物理学等的跨领域研究。从仿真建模的角度,人群仿真模型可以分为宏观模型和微观模型。宏观

模型通过忽略行人个体之间的作用和差异,将人群整体作为建模对象来研究群体运动规律,常见的人群仿真宏观模型有流体力学模型^[1]、势能场模型^[2]等。微观模型则是通过行人个体之间的作用和差异来反映整个群体的运动规律,常见的人群仿真微观模型有多智能体模型^[3]、元胞自动机模型^[4]、格子气模型^[5]、RVO模型^[6]和视觉合成模型^[7]等。

社会力模型^[8]是人群仿真微观模型中的一个非常经典的模型,可以用来模拟多种人群自组织现象。许多国内外研究者对原始的社会力模型存在的问题(如行人重叠、震荡和时间复杂度等)进行了研究和分析,并对原始社会力模型进行了丰富和改进。Gao等结合行人相对速度对社会力模型进行了改进^[9]。本文主要对Gao等提出的改进社会力模型进行验证和评估,验证该改进模型的有效性,即验证其是否具有改进后的优势,评估该模型是否保留了原始社会力模型能够模拟人群自组织现象的能力,并研究该改进社会力模型存在的问题。

2 相关工作

2.1 社会力模型

Helbing于1995年提出了社会力模型。该模型将行人作为满足牛顿第二定律的质点,行人的加速度和速度是基于牛顿第二定律,通过行人自身意识作用产生的自驱力、行人间及行人与边界或障碍物间的排斥力、行人或物之间的吸引作用产生的吸引力以及扰动行为产生的、随机的扰动力的共同作用得到的。随后,Helbing于2000年对社会力模型进行了改进^[10],在原始的社会力模型的基础上,引入了行人质量以及行人之间或者行人与边界或障碍物之间的物理力,如反弹力和摩擦力。具体的社会力模型公式如下:

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

$$\vec{f}_{ij} = \vec{f}_{ij}^{\text{social}} + \vec{f}_{ij}^{\text{physic}}$$

$$\vec{f}_{iW} = \vec{f}_{iW}^{\text{social}} + \vec{f}_{iW}^{\text{physic}}$$

其中, $m_i \frac{\vec{v}_i^0(t)\vec{e}_i^0(t) - \vec{v}_i(t)}{\tau_i}$ 表示行人 i 的自驱力; $\vec{v}_i$ 表示行人 i 当前的速度; m_i 表示行人 i 的质量; $\vec{v}_i^0$ 表示行人 i 的期望速率; $\vec{e}_i^0$ 表示行人 i 的期望速度的方向; τ_i 表示行人 i 的松弛时间,即用于调整自身速度所需要的时间。 $\sum_{j \neq i} \vec{f}_{ij}$ 表示行人 i 受到来自其他行人的排斥力,其中行人间的排斥力包括行人间的心理排斥力 $\vec{f}_{ij}^{\text{social}}$ 和物理排斥力 $\vec{f}_{ij}^{\text{physic}}$ 。同理,行人与边界或障碍物间的排斥力 $\vec{f}_{iW}$ 包括心理排斥力 $\vec{f}_{iW}^{\text{social}}$ 和物理排斥力 $\vec{f}_{iW}^{\text{physic}}$ 。

行人间社会心理力和物理力的具体计算公式如下:

$$\vec{f}_{ij}^{\text{social}} = A_i \text{EXP}[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] \vec{n}_{ij}$$

$$\vec{f}_{ij}^{\text{physic}} = \vec{f}_{ij}^{\text{body}} + \vec{f}_{ij}^{\text{slide}}$$

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

$$\vec{f}_{ij}^{\text{slide}} = \kappa \cdot g(r_{ij} - d_{ij}) \cdot \Delta \vec{v}_{ji}^t \cdot \vec{t}_{ij}$$

$$\Delta \vec{v}_{ji} = (\vec{v}_j - \vec{v}_i) \cdot \vec{t}_{ij}$$

$$g(x) = \begin{cases} x, & r_{ij} > d_{ij} \\ 0, & r_{ij} \leq d_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

行人间的社会物理力包括身体反弹力 $\vec{f}_{ij}^{\text{body}}$ 和滑动摩擦力 $\vec{f}_{ij}^{\text{slide}}$, 其中, r_{ij} 表示行人 i 和 j 的半径之和, d_{ij} 表示行人 i 和 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, 参数 k 表示人体弹性系数, 参数 κ 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, $\Delta \vec{v}_{ji}^t$ 表示行人 i 和 j 在切向方向 $\vec{t}_{ij}$ 的速度差。

同理,行人与边界或障碍物之间的社会心理力和物理力的具体计算公式如式(3)所示:

$$\vec{f}_{iW}^{\text{social}} = A_i \text{EXP}[(r_i - d_{iW})/B_i] \vec{n}_{iW}$$

$$\vec{f}_{iW}^{\text{physic}} = k \cdot g(r_i - d_{iW}) \vec{n}_{iW} + \kappa \cdot g(r_i - d_{ij}) (\vec{v}_i - \vec{v}_{iW}) \vec{t}_{iW} \quad (3)$$

虽然 Helbing 对原始社会力模型进行了改进,但是其仍然存在许多不足。许多研究者在该改进的社会力模型的基础上,对社会力模型进行了进一步的丰富和改进。针对行人重叠的问题,Seyfried等提出了行人自动停止机制^[11],Parisi等提出了尊重因子从而实现了行人减速机制^[12]。Chen等^[13]和Gao等通过使用相对速度对社会力模型进行了改进,减少了行人震荡的问题。此外,许多研究者在参数选取^[14]、行人运动的各向异性^[14-15]、行人密度^[16]、需求空间分析^[17]、算法优化^[18]等方面对社会力模型进行了研究和改进。

2.2 Gao等提出的改进模型

Gao等结合相对速度对社会力模型中的心理排斥力进行了改进。他们认为每一个行人都能够根据当前的位置以及速度来预测其自身以及其他行人的下一步位置,因此社会力模型中的心理排斥力可根据行人预测的位置计算得出。具体的心理排斥力公式如下:

$$pos_i' = pos_i + \vec{v}_i t$$

$$\vec{f}_{ij}^{\text{social}} = A_i \text{EXP}[(r_{ij} - d'_{ij})/B_i] \vec{n}'_{ij} \quad (4)$$

$$\vec{f}_{iW}^{\text{social}} = A_i \text{EXP}[(r_i - d'_{iW})/B_i] \vec{n}'_{iW}$$

其中,第一个式子表示在相同的预测时间步长 t 的情况下,行人 i 的预测位置 pos_i' 由当前位置 pos_i 和当前速度 $\vec{v}_i$ 计算得出。在第二个和第三个式子中, d'_{ij} 表示行人 i 和 j 在预测位置之间的距离, $\vec{n}'_{ij}$ 表示行人 i 和 j 在预测位置上由行人 j 指向行人 i 的单位向量, d'_{iW} 表示行人 i 在预测位置上与边界或障碍物之间的距离, $\vec{n}'_{iW}$ 表示边界或障碍物指向行人 i 的预测位置的单位向量。

2.3 人群自组织现象

Helbing提出的社会力模型虽然简化了行人之间的相互作用,但是依然能够模拟出现实世界中一些行人的运动现象,尤其是人群自组织现象。社会力模型能够模拟的人群自组织现象有自动渠化现象、瓶颈拥堵现象、拱形拥塞现象和“快即是慢”现象^[19]。下面对上述人群自组织现象进行具体阐述。

2.3.1 自动渠化现象

自动渠化现象,即具有相同期望运动方向的行人最终会形成一条条行人流的现象。这些行人流是动态变化的,其数量取决于长廊的宽度、行人的密度以及受到的干扰程度。如图1所示,长廊两侧随机出现行人,并且行人会向另一侧运动(灰色粒子表示从左侧往右侧运动的行人,黑色粒子表示从右

侧往左侧运动的行人),一段时间后形成了稳定的渠化现象。

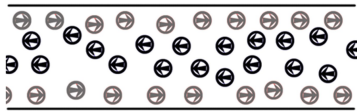


图1 自动渠化现象
Fig.1 Lane formation

2.3.2 瓶颈摆动现象

瓶颈摆动现象如图2所示,两侧行人都试图通过窄门向另一侧运动(灰色粒子表示从左侧向右侧运动的行人,黑色粒子表示从右侧向左侧运动的行人),一旦某个行人通过了窄门,与该行人同运动方向的行人也会很容易地紧跟着通过窄门。如此一来,该侧行人数量会减少,该侧的总压力也会相应地小于另一侧的总压力,而另一侧的行人将有机会获得该窄门的使用权,这样窄门的使用权在两侧行人中更替,直至两侧行人都通过完毕。

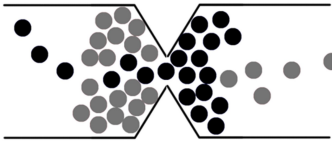


图2 瓶颈摆动现象
Fig.2 Oscillations at bottlenecks

2.3.3 拱形拥塞现象

当所有的行人都涌向同一个出口时,行人间的相互推搡、挤压变得更加频繁,出口处的人群会发生拥堵并形成拱形。当出口处行人的密度达到一定程度时,强大的挤压力会使行人通过出口,接着拱形消失,然后又继续拥塞,形成拱形,直至行人全部离开出口。图3给出了200个行人涌向出口时形成的拱形拥塞现象。

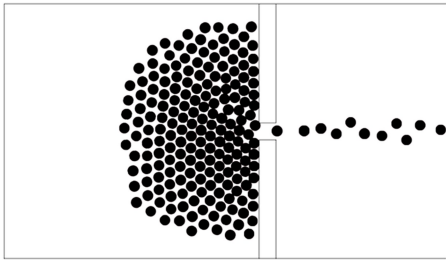


图3 拱形拥塞现象
Fig.3 Arching underlying clogging effect

2.3.4 “快即是慢”现象

在拱形拥塞实验中,Helbing 通过改变行人的期望速度来观察和分析行人期望速度的大小与行人疏散时间之间的关系。Helbing 得出的实验结果请参见文献[10]中的图1(b)。当行人的期望速度小于1.5m/s时,行人疏散比较有序,未形成较大规模的堵塞现象。当期速度大于1.5m/s时,随着期望速度的增加,更容易快速地发生拱形拥塞现象,导致行人疏散受阻。当行人试图以更快的速度离开时,就会导致人群平均疏散速度降低。这就是“快即是慢”现象。

“快即是慢”现象的重要表现就是“欲速则不达”。Helbing 在200个行人的拱形拥塞实验中,得出的行人期望速度与行人总疏散时间的关系请参见文献[10]中的图1(c)。在200个行人的拱形拥塞实验中,行人以1.5m/s的期望速度离开时,所需的疏散时间最短,当高于该期望速度时,行人的疏散时间随之延长。

2.4 仿真实验

本文中的所有仿真实验都是在 Windows 系统中进行模拟,以 DXUT 框架作为图形界面的渲染框架,借鉴并修改 Helbing 公开的社会力模型仿真实验源代码。在仿真实验过程中有一点值得注意,为了防止行人的速度变化率过大,在模拟过程中会相应减小行人的时间步长,但是这一点并没有体现在社会力模型公式中。具体的仿真编程过程详见 Helbing 的公开源代码¹⁾。本文仿真实验的各种参数设置如表1所列。

表1 仿真实验的参数设置

Table 1 Parameter setting of simulation experiments				
τ/s	A/N	B/m	$k/(kg/s^2)$	$\kappa/(kg/m \cdot s)$
0.5	2000	0.08	120000	240000

3 实验研究的必要性

2013年,Gao等提出了一个考虑行人相对速度的改进社会力模型。该改进社会力模型通过行人的预测时间步长来有效减少行人震荡问题。虽然改进社会力模型从提出已有几年时间,但是与目前使用视频数据进行社会力模型改进的研究情况^[20]相比仍然具有一定的优势,例如 Gao 等的改进社会力模型的适用范围较广,不会受到视频场景的局限。近年来,仍有学者在 Gao 等工作的基础上对社会力模型的深入研究。Ji 等于2017年将 Chen 等提出的基于行人相对速度的改进社会力模型与 Gao 等提出的基于行人相对速度的改进社会力模型的分析与结合,提出了一个基于速度场的改进社会力模型^[21]。此外,Gao 等将基于行人相对速度的改进社会力模型与其他模型、公式相结合,并进行了仿真实验^[22]。也有学者在仿真实验研究^[23]过程中借鉴了 Gao 等的改进社会力模型。可见,Gao 等的改进社会力模型是目前一些改进社会力模型和仿真实验的基础和重要参考。对该模型进行深入研究和分析所得到的验证性实验和评估性实验结果、结论,能够为今后对社会力模型的改进和各种仿真实验提供可靠性,具有重要的参考价值。因此,对该模型进行验证性实验和评估性实验是必要的。

4 验证性实验

本节的主要工作是对 Gao 等所进行的两个仿真实验(“人与墙”实验和拱形拥塞实验)进行验证。根据“人与墙”实验验证改进社会力模型能否有效减少行人震荡问题。根据拱形拥塞实验中行人预测时间步长与行人总疏散时间的关系,一方面验证改进社会力模型能否在行人疏散过程中有效减少行人间的碰撞,另一方面验证在一定的预测时间步长内,随着

¹⁾ <http://angel.elte.hu/~panic/>

预测时间步长的增加,行人总疏散时间随之减少,超过该预测时间步长后,随着预测时间步长的增加,行人总疏散时间也随之增加的结论是否正确。

4.1 “人与墙”实验

在“人与墙”实验中,一位半径为 0.3 m、体重为 80 kg 的行人与一面墙相距 10 m,该行人以期望速度 3 m/s 向墙走去,如图 4 所示。



图 4 行人走向墙
Fig. 4 Pedestrian walking towards wall

本文得到的“人与墙”实验结果如图 5、图 6 所示。该验证性实验结果表明,行人能够根据预测位置提前感知和墙发生碰撞的风险,做到提前减速,从而减少和墙发生碰撞、反弹的次数以及速度震荡的次数。随着预测时间步长的增加,行人和墙发生碰撞和反弹的次数以及行人速度震荡的次数减少,当预测时间步长达到 0.1 s 之后,行人几乎没有与墙发生碰撞和反弹,在速度上也没有产生震荡。该实验结果与 Gao 等得出的实验结果一致。

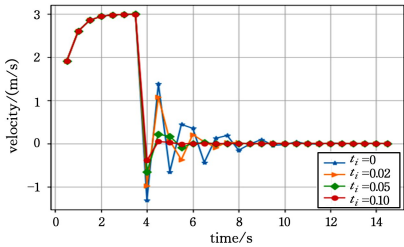


图 5 在不同预测时间步长下行人速度与时间的关系
Fig. 5 Pedestrian velocity vs time in different timesteps

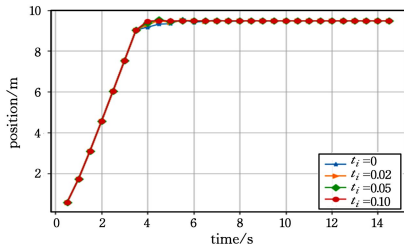


图 6 在不同预测时间步长下行人位置与时间的关系
Fig. 6 Pedestrian position vs time in different timesteps

根据上述的验证结果可以得出以下结论:Gao 等提出的改进社会力模型能够有效减少行人与墙之间发生碰撞和反弹的次数以及行人速度震荡的次数,实现了有效减少行人震荡。

4.2 拱形拥塞实验

如图 7 所示,200 个行人位于长宽皆为 15 m 的房间,房间出口宽 1 m。200 个行人的体重平均值为 80 kg,体重标准差为 0.1 kg,半径平均值为 0.3 m,半径标准差为 0.01 m。200 个行人以期望速度 1.5 m/s 从房间出口离开。为观察和分析不同的预测时间步长对行人总疏散时间的影响,对不同的预测时间步长分别进行 10 组模拟实验,计算出不同的预测时间步长下的平均总疏散时间。

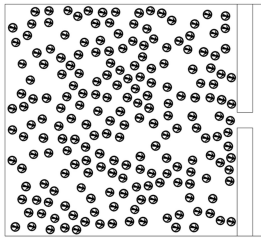


图 7 拱形拥塞实验
Fig. 7 Arched congestion experiment

在拱形拥塞实验过程中发现,随着预测时间步长的增加,行人之间的碰撞随之减少,尤其在出口处的行人碰撞次数大大减少。这一实验结果与 Gao 等的实验结果一致。

此外,该实验得出的行人总疏散时间与预测时间步长的关系如图 8 所示。在预测时间步长小于 1.5 s 的情况下,随着预测时间步长的增加,行人的平均总疏散时间相应缩短;在预测时间步长大于 1.5 s 的情况下,随着预测时间步长的增加,行人的平均总疏散时间也随之延长。该验证性实验结果与 Gao 等得出的实验结果并不一致。Gao 等得出的实验结果请见文献[9]中的图 8。

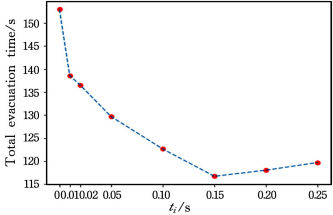


图 8 不同时间步长下的平均总疏散时间
Fig. 8 Average total evacuation time under different timesteps

本文对 Gao 等的改进社会力模型进行修改,在行人间的社会心理排斥力的计算公式中,将受力方向从原来行人 j 的预测位置指向行人 i 的预测位置的单位向量,改为从行人 j 的当前位置指向行人 i 的当前位置的单位向量。行人与边界或障碍物间的社会心理排斥力的计算公式的修改内容与之类似,修改后的具体公式如式(5)所示:

$$\begin{aligned} \vec{f}_{ij}^{\text{social}} &= A_i \text{EXP}[(r_{ij} - d'_{ij})/B_i] \vec{n}_{ij} \\ \vec{f}_{iW}^{\text{social}} &= A_i \text{EXP}[(r_i - d'_{iW})/B_i] \vec{n}_{iW} \end{aligned} \tag{5}$$

根据修改后的公式模拟得到的实验结果与 Gao 等的实验结果大体一致。在预测时间步长为 0.01 s 的情况下,行人的平均总疏散时间最短;在预测时间步长大于 0.01 s 的情况下,随着预测时间步长的延长,行人的平均总疏散时间也逐渐延长,如图 9 所示。

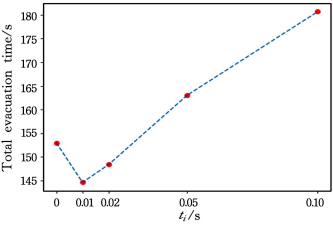


图 9 修改后不同时间步长下的平均总疏散时间
Fig. 9 Average total evacuation time under different timesteps after modification

根据上述验证性实验得出的各种结果,本文得出以下的

结论:在拱形拥塞实验中,Gao 等的改进社会力模型能够有效减少行人之间的碰撞次数。虽然在行人总疏散时间与预测时间步长关系的结果上,本文的实验结果在具体数值上与 Gao 等的实验结果不一致,但在曲线的趋势上是大体一致的,即在一定的预测时间步长内,行人总疏散时间随着时间步长的增加而缩短,超过该预测时间步长后,随着预测时间步长的增加而延长。

5 评估性实验

本节主要对 Gao 等的改进社会力模型进行评估性实验。首先,使用该改进社会力模型进行“人与人”实验,以进一步评估该模型在减少“碰撞和反弹”次数的行人间震荡问题上的有效性。然后,使用该模型模拟人群自组织实验,通过观察和研究,分析评估该模型是否仍然保留原始社会力模型能够模拟人群自组织现象的能力。最后,在实验过程中,观察、发现该改进社会力模型所存在的问题。

5.1 “人与人”实验

“人与人”实验的模拟仿真如图 10 所示。两个行人相距 10 m,左侧行人以期速度 5 m/s 向右行走,而右侧行人以期速度 2 m/s 向右行走。两个行人的直径皆为 0.6 m,重量皆为 80 kg。



图 10 两行人同向行走

Fig. 10 Two pedestrians walking in same direction

实验结果如图 11、图 12 所示。在原始的社会力模型情况下,即预测时间步长 t_i 从 0 开始时,由于左侧行人的期望速度大于右侧行人的期望速度,因此左侧行人追上了右侧行人并且发生了碰撞;在社会力的影响下,左侧行人瞬间减速,右侧行人瞬间加速;之后又在期望速度的影响下,左侧行人未达到期望速度大小而加速,右侧行人超过期望速度大小而减速,两个行人又产生碰撞,如此反复多次直到两个行人的速度逐渐稳定。

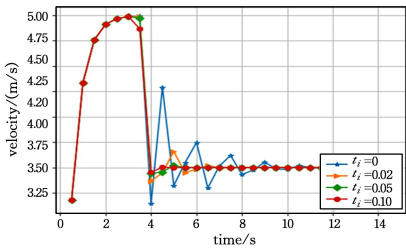


图 11 不同预测时间步长下左侧行人速度与时间的关系

Fig. 11 Left size pedestrian velocity vs time in different timestep

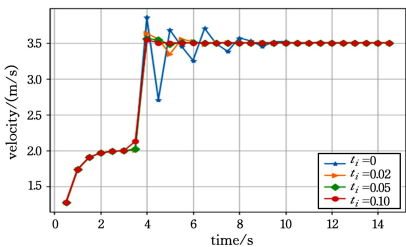


图 12 不同时间步长下右侧行人速度与时间的关系

Fig. 12 Right size pedestrian velocity vs time in different timestep

上述实验过程中表现出的行人速度震荡现象和行人间的“碰撞和反弹”的震荡现象与现实状况不符,这也反映了原始社会力模型所存在的震荡问题。反观 Gao 等提出的改进社会力模型的模拟仿真实验结果,随着预测时间步长 t_i 的增加,行人间的“碰撞和反弹”的次数逐渐减少,行人速度的震荡也随之减少。

上述实验结果和验证性实验中得到的“人与墙”实验结果,进一步证实了 Gao 等提出的改进社会力模型的有效性,即该模型能够有效缓解行人震荡问题。

5.2 自动渠化实验

在长度为 50 m、宽度为 10 m 的长廊中,有两组对流人群,灰色人群从左边向右行走,黑色人群从右边向左边行走。两侧的人群随机生成并且保证行人的初始位置不会发生重叠。行人的数目上限是 120,行人的直径在 $[0.58\text{ m}, 0.62\text{ m}]$ 区间中随机生成,重量在 $[79\text{ kg}, 81\text{ kg}]$ 区间中随机生成,期望速度为 1.5 m/s,行人的预测时间步长为 0.1 s。整个模拟仿真实验过程如图 13 所示。首先,在长廊两侧开始随机生成不重叠的行人,如图 13(a)所示。然后,随着时间的增加,行人数目不断增加,并且达到了行人数目的最大上限,如图 13(b)所示。最后,两股行人流产生了渠道,渠道稳定,形成了自动渠化现象,如图 13(c)所示。

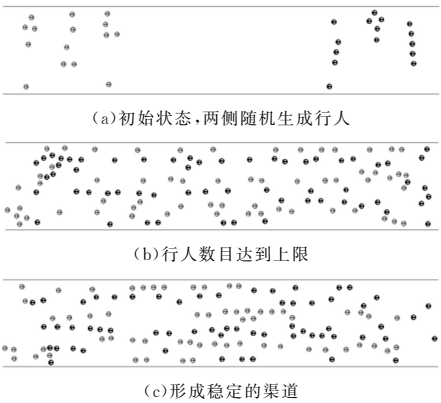


图 13 自动渠化实验

Fig. 13 Lane formation experiment

分析上述实验过程可知,两股行人流在社会力的影响下,经过一段时间出现了渠道分层现象,形成了稳定的渠道。这一实验结果与 Helbing 的实验结果一致,即在长 50 m、宽 10 m 的长廊中形成了 4~5 条渠道。这表明 Gao 等提出的改进社会力模型能够模拟出自动渠化现象。

5.3 瓶颈摆动实验

在长 32 m、宽 12 m 的长廊中间有一面墙,墙的中间有一面宽 1.5 m 的门供两侧的行人通过。灰色人群从左侧向右行走,黑色人群从右侧向左行走。两侧的人群随机生成并且保证行人的初始位置不会发生重叠。行人的直径为 0.6 m,重量为 80 kg,期望速度大小为 1.5 m/s,行人的预测时间步长为 0.1 s。整个模拟仿真实验过程如图 14 所示。首先,在墙的两侧随机生成不重叠的行人,如图 14(a)所示。然后,两侧行人向中间的门走去,在墙的两侧形成了两个拱形的人群,如图 14(b)所示。若左侧的灰色人群中的行人从门通过,则后面的灰色行人也会紧随其后,如图 14(c)所示。由于这一过程导致了左侧人群的压力小于右侧人群的压力,因此右侧的黑色

行人能够从门通过,后面的黑色行人也紧随其后,如图 14(d)所示。如此反复更替,形成了瓶颈摆动现象。

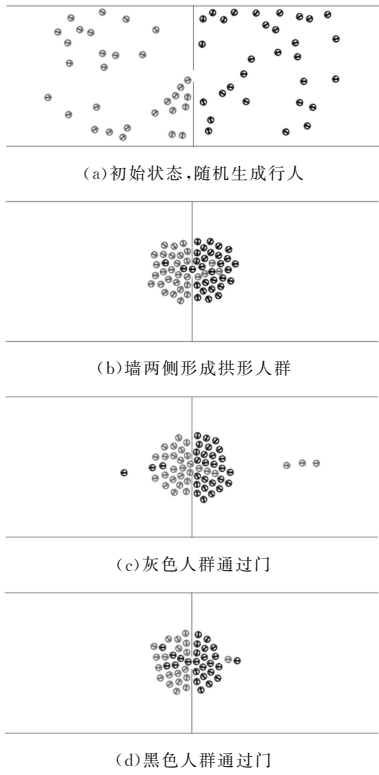


图 14 瓶颈摆动实验

Fig. 14 Oscillations at bottlenecks experiment

上述的实验结果表明,Gao 等提出的改进社会力模型能够像原始社会力模型一样模拟出瓶颈摆动现象。

5.4 “快即是慢”实验

“快即是慢”实验的仿真场景和拱形拥塞实验的仿真场景一致。200 个行人位于长宽皆为 15 m 的房间中,房间出口宽 1 m。200 个行人的体重平均值为 80kg,体重标准差为 0.1 kg,半径平均值为 0.3 m,半径标准差为 0.01 m。行人的预测时间步长为 0.1 s。通过改变期望速度的大小,来观察和分析行人期望速度和行人总疏散时间的关系。在该模拟仿真实验中,对每一个期望速度分别进行 5 组模拟仿真实验,并求出每个期望速度所对应的平均总疏散时间,实验结果如图 15 所示。

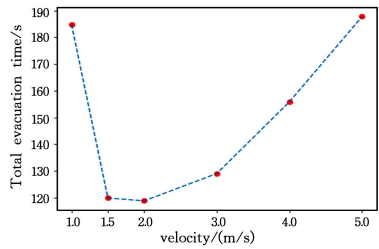


图 15 行人期望速率与平均总疏散时间的关系

Fig. 15 Pedestrians velocity vs average total evacuation time

在行人预测时间步长为 0.1 s 的情况下,行人在期望速度为 2 m/s 时的疏散效率最高,疏散所需时间最短。当期速度大于 2 m/s 时,期望速度越大,行人疏散所需时间越长。这一实验过程表明了“快即是慢”现象中的一个重要表现——“欲速则不达”。

上述实验结果表明了 Gao 等提出的改进社会力模型能

够像原始社会力模型一样模拟出“快即是慢”现象。

5.5 存在的问题

虽然 Gao 等提出的改进社会力模型能够在相同预测时间步长的情况下根据当前位置和速度计算出预测位置,并使用预测位置来计算行人的社会力,使得行人能够提前感知并避免碰撞,但是在预测时间步长过长时,容易产生行人重叠问题。如图 16 所示,在拱形拥塞实验中,实验参数与之前一致,只有预测时间步长变为了 0.3 s。此时在形成拱形的一段时间后,出口处的行人发生了重叠,与真实情况不符,导致模拟实验失败。在瓶颈摆动实验中,将预测时间步长修改为 0.3 s,其他实验参数保持一致,此时在门口右侧的黑色人群中同样发生了行人重叠问题,如图 17 所示。

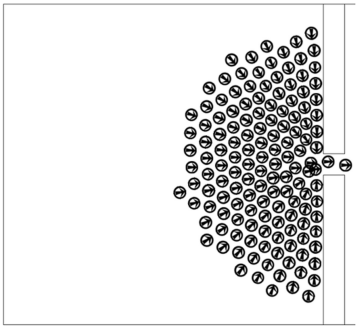


图 16 拱形拥塞实验中的行人重叠问题

Fig. 16 Pedestrian overlap problem in arched congestion experiment

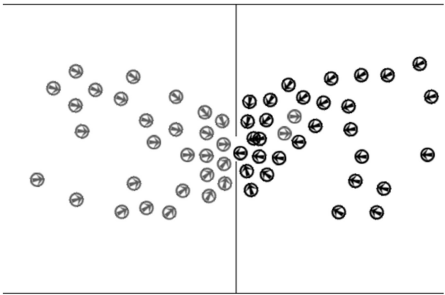


图 17 瓶颈摆动实验中的行人重叠问题

Fig. 17 Pedestrian overlap problem in oscillations at bottlenecks experiment

通过对发生行人重叠问题的实验进行观察和分析,本文认为此问题的可能原因是:在原始的社会力模型中,Helbing 通过使用较大的人体弹性系数和滑动摩擦系数来防止发生行人重叠。但是在 Gao 等的改进社会力模型中,过长的预测时间步长将导致行人在预测位置上计算得到的受到的社会力的方向与行人在当前位置上计算得到的受到的社会力的方向差距较大,从而发生了行人重叠,使得整个模拟实验失败。例如,在极端情况下,行人在当前位置受到的总体社会力方向是水平向右,但是在预测位置上受到的总体社会力方向是水平向左,由于受力方向发生较大的差距,因此容易发生行人重叠问题。

结束语 Gao 等提出的考虑相对速度的改进社会力模型目前仍然是研究改进社会力模型和进行各种仿真实验的基础和重要参考,因此对 Gao 等提出的改进社会力模型进行深入的实验研究和分析具有必要性。于是,本文对 Gao 等提出的考虑相对速度的改进社会力模型进行了研究和分析,针对该

模型进行了验证性实验和评估性实验。本文综合“人与墙”实验和“人与人”实验的结果,证实了该改进社会力模型能够有效减少行人震荡问题。拱形拥塞实验的结果,证实了在一定预测时间步长内,行人总疏散时间会随之缩短,超过该预测时间步长后,行人总疏散时间会随之延长的结论。此外,该改进社会力模型能够模拟出自动渠化、瓶颈摆动和“快即是慢”的人群自组织现象,证实了该改进社会力模型保留了原始社会力模型能够模拟人群自组织现象的能力。虽然该改进社会力模型保留了原始社会力模型的优势,能够有效缓解行人震荡问题,并能在一定预测时间步长内加快行人疏散的效率,但同时也存在着预测时间步长过长而导致行人重叠的问题。未来的工作将针对该问题进行深入研究,提出改进方法,使 Gao 等提出的考虑相对速度的改进社会力模型更具有鲁棒性。

参 考 文 献

[1] HENDERSON L F. The statistics of crowd fluids[J]. Nature, 1971,229(5284):381-383.

[2] PRESTES E,IDIART M A P,NEDEL L P. Simulating pedestrian behavior with potential fields[C]// International Conference on Advances in Computer Graphics, 2006:324-335.

[3] BELTAIEF O,HADOUAJ S E,GHEDIRA K. Multi-agent simulation model of pedestrians crowd based on psychological theories[C]// Interantional Conference on Logistics, Hammamet, IEEE,2011:150-156.

[4] WOLFRAM S. Theory and Applications of Cellular Automata [M]//Theory and applications of cellular automata:World Scientific,1986.

[5] TAJIMA Y,NAGATANI T. Scaling behavior of crowd flow outside a hall[J]. Physica A,2001,292(1/2/3/4):545-554.

[6] VAN DEN BERG J,LIN M,MANOCHA D. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008 (ICRA2008). IEEE,2008:1928-1935.

[7] ONDREJ J,PETTRE J,OLIVIER A H,et al. A synthetic-vision based steering approach for crowd simulation[J]. ACM Transactions on Graphics,2010,29(4):1.

[8] HELBING D,MOLNAR P. Social force model for pedestrian dynamics[J]. Physical Review E,1995,51(5):4282.

[9] GAO Y,LUH P B,ZHANG H,et al. A modified social force model considering relative velocity of pedestrians[C]//IEEE International Conference on Automation Science & Engineering. IEEE,2013.

[10] HELBING D,FRAKAS I J,MOLNAR P,et al. Simulating dynamical features of escape panic[J]. Nature,2000,407(6803):487-490.

[11] SEYFRIED A,STEFFEN B,LIPPERT T. Basics of modelling the pedestrian flow[J]. Physica A,2006,368(1):232-238.

[12] 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,2009,388(17):3600-3608.

[13] CHEN T,YING Z G,SHEN S F,et al. Evacuation simulation and analysis of the relative velocity under social force model[J]. Progress in Natural Science,2006,16(12):1606-1612.

[14] LAKOBA T I,KAUP D J,FINKELSTEIN N M. Modifications of the Helbing-Molnar-Farkas-Vicsek social force model for pedestrian evolution[J]. Simulation,2005,81(5):399-352.

[15] APEL M. Simulation of Pedestrian Flows Based on the Social Force Model Using the Verlet Link Cell Algorithm[D]. Poznan: Poznan University of Technology,2004.

[16] JI Q G,HE H,WANG F C. Short-range social force model under density field[J]. Computer Science,2015,42(6):12-17.

[17] LI S S,QIAN D L,WANG J Z. An improved social force model considering pedestrians slowing down[J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition),2012,42(3):623-628.

[18] QUINN M J,METOYER R A,HUNTER-ZAWORSKI K. Parallel implementation of the social forces model[C]// Proceedings of the Second International Conference in Pedestrian and Evacuation Dynamics. London:CMS Press,2003:63-74.

[19] HELBING D,FARKAS I,VICSEK T. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations[J]. Pedestrian and Evacuation Dynamics,2002,21:21-58.

[20] LIU B,LIU H,ZHANG H,et al. A social force evacuation model driven by video data[J]. Simulation Modelling Practice and Theory,2018,84:190-203.

[21] JI Q G,WANG F C,ZHU T. VPBS: A Velocity-Perception-Based SFM Approach for Crowd Simulation[C]// International Conference on Virtual Reality & Visualization, IEEE,2017.

[22] YUAN G,TAO C,LUH P B,et al. Simulation of Building Evacuation Considering Information Flow[M]// Traffic and Granular Flow'13. 2015.

[23] HAO Y,XU Z,LIU Y,et al. A Graphical Simulator for Modeling Complex Crowd Behaviors[C]// 2018 22nd International Conference Information Visualisation (IV). IEEE Computer Society,2018.



ZHONG Zhen-wei, born in 1996, post-graduate. His main research interests include Computer graphic,crowd simulation and virtual reality.



Ji Qing-ge, born in 1966, Ph.D, associate professor, is member of China Computer Federation (CCF). His main research interests include Computer graphic, crowd simulation, virtual reality and computer vision.