

# 一种结合导航点的社会力疏散仿真软件研究

倪仲锐<sup>1</sup> 刘箴<sup>1</sup> 刘婷婷<sup>2</sup> 陆静<sup>2</sup> 柴艳杰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(宁波大学信息科学与工程学院 浙江 宁波 315211)

<sup>2</sup>(宁波大学科学技术学院 浙江 宁波 315211)

**摘要** 社会力模型广泛应用于人群仿真。针对该模型在人群疏散仿真中存在抖动、穿透现象,分析产生该现象的原因,采用多线程优化的方法改进社会力模型。对于多障碍物场景中行人存在停滞和移动缓慢的现象采用增加导航点优化行人的疏散路径。采用优化的社会力模型研制一个人群疏散仿真软件,该软件可以定义多种人群仿真参数,实现人群仿真。通过该仿真软件对地震疏散情景进行仿真实验,对实验数据进行对比分析,验证了该仿真软件可以推演人群的疏散行为,可以为人群的疏散策略制定提供参考数据。

**关键词** 人群仿真 人群疏散 社会力模型 导航

中图分类号 TP391.41 文献标识码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2019.04.004

## A SOCIAL FORCE MODEL EVACUATION SIMULATION SOFTWARE COMBINING NAVIGATION POINTS

Ni Zhongrui<sup>1</sup> Liu Zhen<sup>1</sup> Liu Tingting<sup>2</sup> Lu Jing<sup>2</sup> Chai Yanjie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

<sup>2</sup>(College of Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

**Abstract** The social force model is widely used in crowd simulation. For this model, there are shiver and penetration phenomena in crowd evacuation simulation. After analyzing the cause of this phenomenon, the multi-thread optimization method was used to improve the social force model. As pedestrians were slow-moving in multi-obstacle scenes, the auxiliary navigation points were adopted to optimize the evacuation path of pedestrians. A simulated crowd evacuation simulation software was developed using an optimized social force model. The software can define a variety of crowd simulation parameters to achieve crowd simulation. The simulation experiment was carried out on the seismic evacuation scenario, and the experimental data was compared and analyzed. It is verified that the simulation software can deduct the evacuation behavior of the crowd and provide reference data for the evacuation strategy of the crowd.

**Keywords** Crowd simulation Crowd evacuation Social force model Navigation

## 0 引言

人群疏散仿真模型可以模拟人群疏散现象,通过人群疏散仿真模型的仿真数据可以判断场景中出口数量和位置是否合理,是否满足人群疏散的要求,从而为制定科学合理的疏散方案提供决策支持。目前常见的仿真模型主要有社会力模型 SFM(Social Force Model)<sup>[1-3]</sup>,

元胞自动机模型 CA(Cellular Automata)<sup>[4-6]</sup>,势能场模型 PF(Potential Field)<sup>[7-8]</sup>等。这些模型都可以实现人群的疏散仿真。

其中社会力模型是由 Helbing 等<sup>[1]</sup>1951 年提出,该模型采用牛顿动力学公式来描述行人的运动,将行人的受力分别表示为,行人指向目的地的驱动力、行人之间的作用力、行人与障碍物之间的作用力,这些力的合力作用于行人,使行人产生运动。

元胞自动机模型的概念最早是由冯诺依曼<sup>[9]</sup>提出,应用于模拟人工生命系统。1998年M Fukui等<sup>[10]</sup>将元胞自动机模型应用于人群的仿真,在该模型中行人的空间被划分为多个元胞空间,每个元胞空间具有一定的状态规则,行人依据当前的元胞空间和状态规则来进行移动。

势能场模型由Khatib等<sup>[7]</sup>在1986年提出应用于机器人避碰路径规划。在势能场模型中,行人位于空间中的某个位置中,行人会同时受到目的地、其他行人、障碍物的势能场影响。在这些势能场的相互作用下,行人就会在空间进行运动。

其中社会力模型应用最为广泛,该模型在人群疏散仿真中有广泛的研究,如Yang X等<sup>[11]</sup>通过改进的社会力模型对人群的运动进行向导。Liu Q等<sup>[12]</sup>利用社会力量模型仿真恐怖袭击中人群疏散。纪庆革等<sup>[13]</sup>提出密度场下的短程社会力模型。刘箴等<sup>[14]</sup>利用社会力模型研究人行桥上突发事件下的人群恐慌行为。张开冉等<sup>[15]</sup>基于社会力模型的车站负重人群疏散模拟研究。焦宇阳等<sup>[16]</sup>通过引入下降速度心理力,改进传统社会力模型,实现三维楼梯空间的社会力模型。曲昭伟等<sup>[17]</sup>利用行人的随机行为改进社会力模型。

虽然社会力模型已经有广泛的应用,但是也存在一些不足,本文在实现社会力模型的基础上,对不足之处进行了改进。例如在行人的期望速度过快或者场景中行人的数量过多时会出现行人的抖动或者穿透障碍物的现象,这些现象影响到仿真的效果,本文对产生的这种现象的原因进行了分析,采用多线程的方法进行了优化。在特殊场景下,仅依靠社会力的驱动时,行人在场景中无法到达目的地或者移动速度较慢,本文采用增加导航点的方式改进行人的疏散仿真。本文通过改进的社会力模型开发了一个疏散仿真软件,实现多种情景下的人群疏散仿真。

## 1 社会力模型

在实际的逃生过程中,人们总是会根据自身的目的地和所处的周围环境来确定逃生路线。在逃生过程中会与障碍物和其他人保持一定的距离,由于观察到这个现象,在1995年Helbing等采用牛顿的力学公式和行人的逃生行为提出了社会力模型。在该模型中行人用抽象的一个粒子来描述,该粒子受到目的地的吸

引产生一个自身的驱动力,同时该粒子受到与障碍物和其他粒子的斥力和摩擦力的影响,在这些力的合力作用于该粒子,使得其在一个二维的空间中连续运动,具体使用动力学公式来描述:

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

式中: $f_i$ 为行人指向目的地的驱动力, $f_{ij}$ 表示为行人间的作用力, $f_{iw}$ 表示行人与障碍物间的作用力。这些力的合力作用于行人,产生一个加速度,驱动行人在二维空间中连续运动。

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

式(2)为行人驱动力公式,式中 $m_i$ 为行人 $i$ 的质量, $v_i^0$ 、 $v_i(t)$ 为行人 $i$ 的期望速度和实际速度, $e_i^0(t)$ 为期望的运动方向, $\tau_i$ 为适应时间,取值为0.5。

$$f_{ij} = f_{ij}^{\text{reject}} + f_{ij}^{\text{friction}} \quad (3)$$

$$f_{ij}^{\text{reject}} = \{A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] + kg(r_{ij} - d_{ij})\} n_{ij} \quad (4)$$

$$f_{ij}^{\text{friction}} = kg(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t t_{ij} \quad (5)$$

式(3) - 式(5)为行人间作用力公式,行人间的作用力 $f_{ij}$ 由排斥力 $f_{ij}^{\text{reject}}$ 和摩擦力 $f_{ij}^{\text{friction}}$ 组成,其中式(4)中的 $A_i$ 、 $B_i$ 、 $k$ 为常数量, $A_i$ 为行人间排斥力的强度,取值为2 000 N, $B_i$ 为产生排斥力的最小距离,取值为0.08 m, $k$ 为 $1.2 \times 10^5 \text{ kgs}^{-2}$ 。 $r_{ij}$ 表示行人 $i$ 和行人 $j$ 的半径之和, $r_{ij} = r_i + r_j$ 。 $d_{ij}$ 表示行人 $i$ 和行人 $j$ 质心的距离, $d_{ij} = \|r_i - r_j\|$ 。 $n_{ij}$ 表示由行人 $j$ 到行人 $i$ 的标准化向量, $n_{ij} = (n_{ij}^1, n_{ij}^2) = (r_i - r_j)/d_{ij}$ 。 $g(x)$ 表示一个函数,当行人不能互相接触时, $(r_{ij} < d_{ij})$ 取值为0,否则为 $x$ 。

式(5)中的 $k$ 为常数量取值为 $2.4 \times 10^5 \text{ kgm}^{-1} \text{ s}^{-2}$ , $\Delta v_{ij}^t$ 表示行人 $i$ 与行人 $j$ 的切线方向的相对速率, $\Delta v_{ij}^t = (v_j - v_i) \cdot t_{ij}$ , $t_{ij}$ 表示行人 $i$ 与行人 $j$ 的切线方向, $t_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$ 。

$$f_{iw} = f_{iw}^{\text{reject}} + f_{iw}^{\text{friction}} \quad (6)$$

$$f_{iw}^{\text{reject}} = \{A_i \exp[(r_i - d_{iw})/B_i] + kg(r_i - d_{iw})\} n_{iw} \quad (7)$$

$$f_{iw}^{\text{friction}} = kg(r_i - d_{iw})(v_i \cdot t_{iw}) t_{iw} \quad (8)$$

式(6) - 式(8)为行人和障碍物间作用力公式,行人和障碍物间的作用 $f_{iw}$ 力由排斥力 $f_{iw}^{\text{reject}}$ 和摩擦力 $f_{iw}^{\text{friction}}$ 组成,其中式(7)的 $A_i$ 、 $B_i$ 、 $k$ 为常数量数值同上。 $r_i$ 表示行人 $i$ 的半径, $d_{iw}$ 表示行人 $i$ 和障碍物边缘的距离, $n_{iw}$ 表示由障碍物边缘到行人 $i$ 的标准化向量。式(8)中 $v_i$ 表示行人 $i$ 的实际速率, $t_{iw}$ 表示行人 $i$ 与障碍物边缘的切线方向。

通过社会力模型可以实现对人群疏散的仿真,在仿真的过程中行人可以避免相互碰撞,避开障碍物,本文采用该模型实现一个人群疏散仿真系统。

## 2 模型算法及优化

### 2.1 算法流程

本文基于社会力模型实现了疏散仿真,实现算法流程图如图 1 所示。通过该算法实现了社会力模型,可以驱动物群在场景中的疏散仿真,该算法在行人期望速度 1.5 m/s,行人数量不超过 200 个的情况下可以较为流畅地仿真,仿真效果较好。但是随着行人的期望速度和行人的数量增加,仿真过程中行人会出现抖动和穿透障碍物的现象,这种现象影响到了仿真的真实感。这个问题是需要通过一些优化方法来解决。

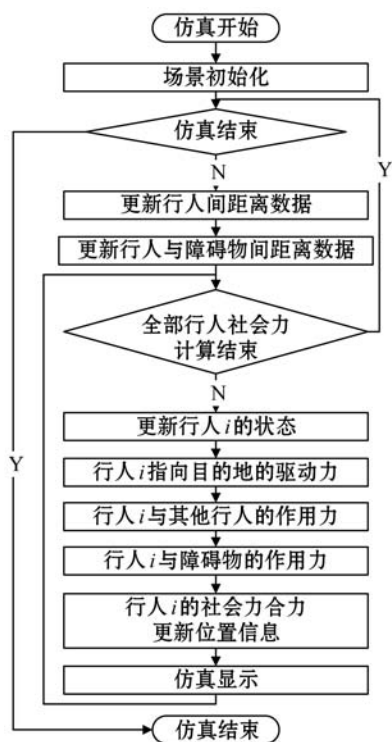


图 1 社会力模型算法流程图

### 2.2 行人抖动和穿透问题分析

对行人抖动和穿透现象对比分析,发现产生这个现象的原因是由两个因素产生的,期望速度和仿真时两帧间隔时间,在仿真过程要实时计算每个行人的下一帧位置,可以通过下式来表示获得下一帧的位置。

$$p_n = p_c + v_i \cdot \Delta t \quad (9)$$

式中: $p_n$  为下一帧的位置向量, $p_c$  为当前帧的位置向量, $v_i$  为根据社会力模型计算出的当前帧速度向量, $\Delta t$  为下一帧同当前帧的时间间隔。其中  $v_i$  与行人的期

望速度成正比关系, $\Delta t$  与计算机的性能和算法的时间复杂度有关系。本算法的时间复杂度为  $n^2$ ,其中  $n$  为仿真的人数。当仿真人数较少时, $\Delta t$  每帧的计算量较少,的数值较小,计算出来的  $p_n$  的偏移量就会较少,仿真就会平滑。但如果人数较多, $\Delta t$  就会增大,那么计算出的  $p_n$  就会过度地偏离  $p_c$ ,这样在仿真中就会产生抖动,由于偏离较大就可能越过障碍物的边缘位置而产生穿透现象。同样如果  $v_i$  过大也会产生这种现象。为了解决这个问题,就要减小  $p_n$  相对于  $p_c$  的偏移,这样才能使行人的运动轨迹趋向平滑。最直接的办法就是降低  $v_i$ ,但是考虑到仿真逃生的要求,行人必须以一定的速度逃生才接近真实情况, $v_i$  不能太小,必须符合实际的逃生期望速度,因此只能降低  $\Delta t$ 。只要当  $\Delta t$  足够小,那么计算出来的  $p_n$  就不会过度地偏离  $p_c$ ,从而解决问题。

### 2.3 算法优化

经过分析社会力模型的算法,发现在计算每个行人的社会力时,行人之间是相互独立的,因此这部分可以采用多线程并行计算来进行优化。本文把行人平均分割成若干个组,每个组内的行人通过一个线程来计算社会力,这样就可以并行计算社会力,提高效率降低帧间隔时间。同时也可以把仿真显示这部分通过一个线程运行,以此提高效率。优化后的算法流程图如图 2 所示。

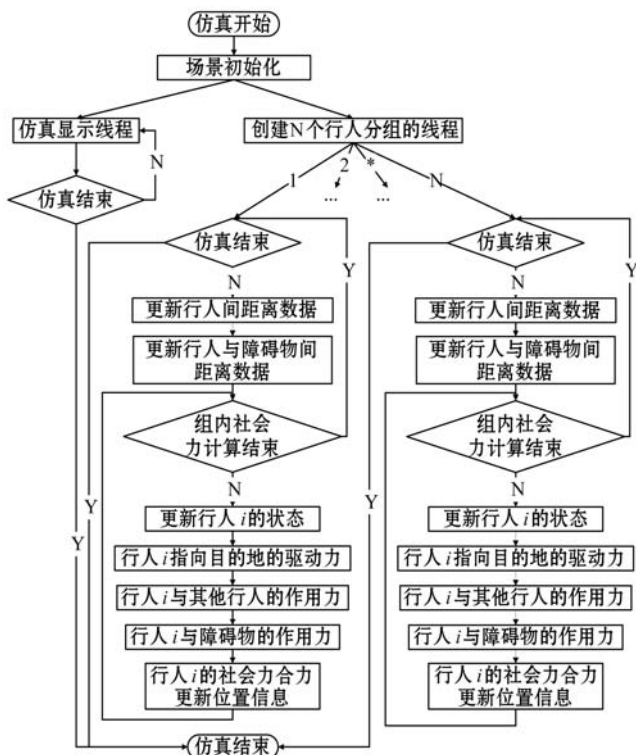


图 2 采用多线程优化社会力模型算法流程图

社会力模型采用多线程的算法优化后,仿真的效果流畅,行人的抖动现象和穿透现象有了较大的改善。对优化前后的帧间隔时间进行了统计,对比数据如表 1 所示,其中行人的期望速度为 1.5 m/s,采用不同的仿真人数进行对比,优化采用 8 个线程数。

表 1 优化前后的帧间隔对比

人数/个	100	200	400	800
优化前帧间隔/ms	36	46	82	231
优化后帧间隔/ms	1.4	5	18.7	81

从表 1 中可以看出,采用了多线程优化的算法后,帧间隔时间大幅降低,仿真的效果提高,可见采用多线程优化社会力模型可以有效提升仿真的速度和数量。

为了对比线程数量对仿真效果的影响,在表 2 采用不同线程数统计的帧间隔时间。其中行人的期望速度为 1.5 m/s,行人的数量为 400 个。

表 2 不同线程数量的对比

线程数量/个	1	2	4	8	16
帧间隔/ms	53.6	32.2	22.9	18.7	14.6

从表 2 中可以看出,随着线程数量的增加,帧间隔时间也在减少,但是并不是线程数量越多,时间会减少得越多,因为这个和实际的 CPU 核心数量有关系。当线程的数量超过实际核心数量时,就会存在部分线程串行执行的情况。当线程过多时,系统还要处理线程的切换,这时就不一定能够降低时间。

可见通过采用多线程优化的方法,可以解决社会力模型仿真中的抖动和穿透现象,提高仿真的效果。

### 3 社会力模型结合导航点方法

在社会力模型中,行人会在目的地驱动力的作用下,向出口方向逃生,在一般的场景中社会力可以较好地完成行人的疏散仿真,但在特定的场景中,疏散的过程就会存在问题。如行人不能够沿着正确的路径疏散,行人在疏散过程中移动速度过慢,这些问题会影响仿真的效果。

#### 3.1 行人无法疏散问题

社会力模型是通过行人的目的地驱动力,行人间作用力和障碍物作用力三者累加的合力来使行人移动,但是如果场景中的某个位置产生的合力互相抵消,那么行人就无法移动,不能完成疏散。如图 3 所示。

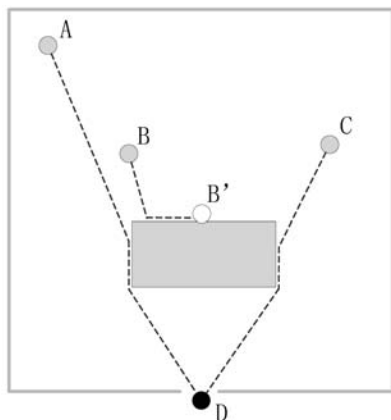


图 3 行人无法疏散示意图

在该场景中,小球 A、B、C 表示行人的初始位置,小球 D 表示目的地,矩形表示障碍物。小球 A 和 C 可以沿着虚线的轨迹移动到目的地,但是小球 B 移动到小球 B' 的位置后就静止,因为在该位置的合力互相抵消,就无法移动。因此仅通过社会力模型,在特殊的场景中就无法完成疏散仿真。

#### 3.2 行人移动过慢问题

社会力模型中的目的地驱动力始终是指向目的地,当遇到障碍物时,就会使行人的速度变慢,随着行人运动方向与目的地方向夹角的增大,行人的速度会更加缓慢,如图 4 所示。

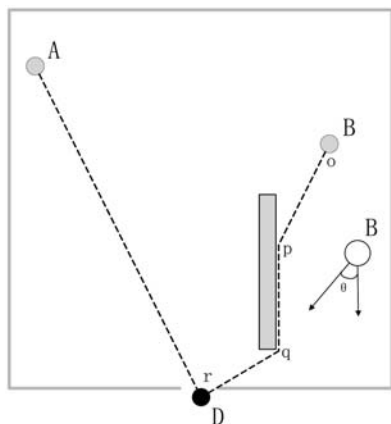


图 4 行人移动过慢示意图

在图中行人 A 全程以期望速度进行疏散,但是行人 B 只是在虚线段 op 和 qr 之间是以期望速度运行,而在 pq 之间由于受到障碍物的阻挡速度变慢,并且在从 p 到 q 的过程中由于夹角  $\theta$  的变大而导致速度是越来越慢。实际上行人 A 距离目的地比行人 B 还要远,但是仿真的结果却是 A 先抵达目的地,仿真效果不符合实际情况。

#### 3.3 采用导航点方法

上述两种问题产生的原因是行人的目的地设置的不合理,为了解决这些问题,可以在场景增加一些导航点,帮助行人在疏散过程中合理选择路径。这些导航

点可以依据场景的布局合理选择,每个导航点赋予一个导航因子,该因子表明该导航点距离目的地的远近程度。该因子采用导航点与目的地的曼哈顿距离的倒数来表示,计算公式如下:

$$f = \frac{1}{|na_x - e_x| + |na_y - e_y|} \quad (10)$$

式中: $na_x$ 、 $na_y$  是导航点的坐标,  $e_x$ 、 $e_y$  是目的地的坐标,行人在场景中选择导航点的规则是选择满足一定距离内导航因子最大的导航点作为目的地,这样行人就可以在场景中按照合理的路径完成疏散,避免了上述问题。在上述场景中增加导航点如图5所示,增加导航点后行人就不会出现无法移动和移动过慢的问题。

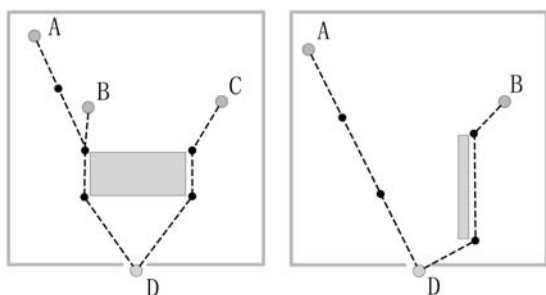


图5 增加导航点示意图

在场景中增加了黑色的导航点后,行人的疏散轨迹会沿着导航点行进,不会出现移动过慢的问题,通过这种方法可以有效改善仿真的合理性。

## 4 社会力模型结合行人个体因素

社会力模型主要考虑行人在运动过程中所受到的各种力的因素,而没有考虑行人在心理、生理上的因素。人群在疏散过程中,由于行人个体因素的差异,每个行人的期望速度是不一致的,主要和每个行人的心理行为和健康状况有关系,这些因素会影响人群的整体逃生时间。因此将行人的心理、生理因素增加到社会力模型中可以使仿真更加完善。

心理行为采用行人对当前状况的恐慌程度来表示,恐慌程度越大,行人的期望速度就会越快,反之就会越慢。行人的恐慌程度与距离出口的远近有关系,当行人距离出口较远时恐慌程度较高,反之恐慌程度较低。采用恐慌值  $P$  来表示行人的恐慌程度,  $P$  的取值范围为  $[0,1]$ ,计算方法如下:

$$P = \frac{D_{\text{exit}}}{D_{\text{max}}} \quad (11)$$

式中: $D_{\text{exit}}$  为当前行人位置距离出口点的曼哈顿距离,  $D_{\text{max}}$  为当场景中距离出口点的最远曼哈顿距离。

健康状况采用健康值  $H$  来表示,  $H$  的取值范围为  $[0.5, 1.5]$ ,健康值越高,行人的期望速度越高,反之

期望速度越低。健康值为1的行人表示体力正常,大于1的行人表示体力较好,小于1的行人表示体力较差。采用不同的健康值分布来仿真不同健康值构成的人群逃生。

行人的期望速度和恐慌值和健康值相关,期望速度计算方法如下:

$$V_E = (V_S + V_S \times P) \times H \quad (12)$$

式中: $V_E$  为当前行人的期望速度,  $V_S$  为标准的期望速度,取值为  $3 \text{ m/s}$ 。通过该公式可以使行人的个体因素对期望速度产生影响,使仿真效果趋于合理。

## 5 软件实现

软件开发环境采用 Microsoft Visual Studio 2017,开发语言采用 C#,项目类型为 Windows 窗体应用,图形设备接口采用双缓冲技术的 GDI 接口。

### 5.1 主界面

软件主界面如图6所示。

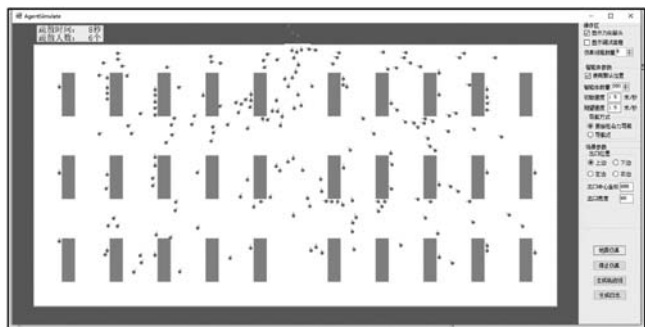


图6 仿真实验界面

该界面左侧为仿真区域,其中矩形框表示障碍物,圆形表示行人。界面的右侧为操作界面,主要功能有参数设置、地震仿真、生成日志、生成轨迹线等,其中参数设置包括有行人数量、期望速度、导航方式,场景出口方向、位置及宽度、并行线程数量等。在仿真结束后可以生成每个行人的疏散数据,包括每个行人的疏散时间,每个时间疏散的行人数量,绘制疏散轨迹线,还可以使用这些数据用于仿真分析统计。

### 5.2 核心功能类

为了保持良好的软件结构,本软件的核心功能采用类来进行编写,主要类的描述如表3-表5所示。

表3 社会力模型类

类名	描述
Agent	实现社会力相关功能
成员变量	描述
Position	行人位置向量
Navigation	行人目的地向量

续表 3

类名	描述
ActualSpeed	当前速度向量
DesiredSpeed	期望速度向量
DesireForce	目的地驱动力向量
RackForce	障碍物作用力向量
SumOfAgentForce	其他行人作用力向量
Panic	行人的恐慌值
Health	行人的健康值
成员函数	描述
CalAgentAndGoal	计算目的地驱动力
CalForceBetweenAgents	计算其他行人作用力
CalForceBetweenAgentAndObstacle	计算障碍物作用力
UpdatePosition	计算社会力合力

表 4 向量计算类

类名	描述
Vector	实现向量计算功能
成员变量	描述
X	向量 x 轴坐标
Y	向量 y 轴坐标
成员函数	描述
magnitude	计算向量长度
normal	计算单位向量
dist	计算向量距离
limit	限制向量长度

表 5 行人仿真类

类名	描述
AgentSimulate	实现行人仿真功能
成员变量	描述
Agents	行人集合
RackPosition	障碍物集合
NavigationPort	导航点集合
成员函数	描述
setupScenario	初始化场景
StartSimulator	开始仿真
DrawScean	绘制场景
CreateLog	生成仿真数据
DrawTrace	绘制轨迹线

### 5.3 多边形障碍物避碰算法

在由复杂的多边形障碍物构成的场景中,实现行

人对障碍物避碰算法,算法如下:

输入:

行人集合  $A$

多边形顶点集合  $O$

步骤:

**Step 1** 循环行人集合  $A$

**Step 2** 循环多边形顶点集合  $O$

**Step 3** 计算  $A_i$  当前位置分别与  $O_j$  中相邻两个顶点组成边  $E$  的最短距离  $D$

**Step 4** 计算出该最短距离  $D$  在边  $E$  上的相交点  $C$

**Step 5** 找出最短距离  $D$  中的最小值,将对应的相交点  $C$  作为计算社会力的避碰点

**Step 6** 根据该避碰点计算社会力

## 6 仿真实验

仿真实验环境是操作系统 Windows 10,主频为 2.3 GHz,内存容量为 8 GB。在仿真实验中,仿真场景中的 1 个像素表示实际场景中的 0.1 m,商场场景区域为 120 × 60 m,行人的半径为 0.4 m,在场景中随机均匀分布。行人未疏散状态时的期望速度为 1.5 m/s,疏散状态时标准期望速度为 3 m/s,出口的宽度为 6 m。

仿真过程中默认的导航方式采用目的地点的方式,本文称这种方式为原始社会力导航,为了对比疏散效果,部分场景导航方式为导航点的方式。该商场场景布局如图 7 所示,其中矩形框为障碍物,圆形为导航点,这样分布的导航点可以使行人在场景中完成疏散,避免行人紧贴障碍物移动。本文设计多种不同的情景模式来仿真人群的疏散实验,每种情景实验重复 5 次,对仿真结果进行分析对比。

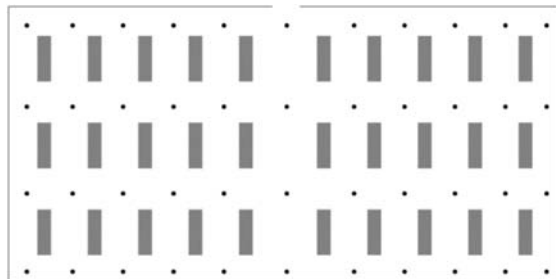


图 7 商场场景布局图

### 6.1 线程数量不同的商场场景地震疏散实验

为对比不同线程数量仿真时间的真实性,在场景、行人位置相同的情况下,进行实时仿真和数值仿真的对比,导航方式为原始社会力导航,出口的宽度为 6 m。数值仿真是直接设定固定的每次计算社会力的间隔时间,设置间隔时间为 0.005 s,计算出来的仿真时间作为基准时间。进行了 4 组的数值仿真,并与实时仿真

进行对比,对比结果如表6-表9所示。

表6 行人200人的仿真对比

数值仿真	疏散时间	38 s		
实时仿真				
线程数量	1	2	4	8
疏散时间	39 s	38 s	38 s	38 s
仿真效果	正常	正常	正常	正常

表7 行人320人的仿真对比

数值仿真	疏散时间	40 s		
实时仿真				
线程数量	1	2	4	8
疏散时间	41 s	40 s	40 s	40 s
仿真效果	轻度抖动	正常	正常	正常

表8 行人400人的仿真对比

数值仿真	疏散时间	40 s		
实时仿真				
线程数量	1	2	4	8
疏散时间	43 s	41 s	40 s	40 s
仿真效果	中度抖动	轻度抖动	正常	正常

表9 行人480人的仿真对比

数值仿真	疏散时间	41 s		
实时仿真				
线程数量	1	2	4	8
疏散时间	54 s	46 s	43 s	41 s
仿真效果	重度抖动穿透	中度抖动	轻度抖动	正常

通过实验数据可以看出,在200人和320人的仿真情况下,实时仿真和数值仿真的疏散时间基本相同,在实时仿真中采用不同线程数量的仿真时间也基本一致。在400人和480人的仿真情况下,单线程的实时仿真的疏散时间就会偏离数值仿真的时间,而且人数越多偏离越大,且仿真效果也不佳。但随着仿真的线程数量的增多,仿真疏散时间会接近数值仿真的时间,且仿真效果较好。

单线程在仿真时,当人数较少时,计算量会较少,同时每帧的间隔时间较短,行人没有抖动现象,这时的疏散时间同数值仿真时间基本一致。当人数较多时,计算量会加大,每帧的间隔时间较长,会导致行人产生抖动现象,这增加了行人疏散的距离,也对行人的疏散有很大的阻挡作用,从而增加总体的疏散时间。采用单线程时会发生行人穿透障碍物的现象,使仿真效果不合理。从轨迹线图中可以看出,图8(a)的轨迹线相

对于图8(b)的轨迹线清晰,而图8(b)的轨迹线由于行人的抖动而产生了较多的噪声。

通过该组实验,可以看出采用多线程可以弥补单线程的不足,可以提高实时仿真的效果,使疏散时间更具有可信性。

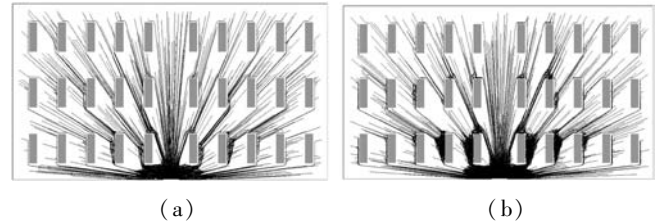


图8 不同线程数量不同对比

## 6.2 导航方式不同的商场场景地震疏散实验

仿真人数为300人,线程数量为8个,导航方式分别为原始社会力导航和导航点。

通过对比疏散时间数据,其中原始社会力导航平均疏散时间为39.2 s,导航点的为35.6 s,使用导航点仿真行人的疏散时间会降低3.6 s,原因从图9(a)中可以看出是使用导航点导航时行人避免行走在障碍物的边缘位置,这样在疏散过程中是以期望速度疏散,不会出现移动缓慢现象,更加接近真实情况。而在图9(b)中,行人在疏散过程中存在贴近障碍物边缘行走的情况,这样就会出现移动缓慢,导致疏散时间变长。

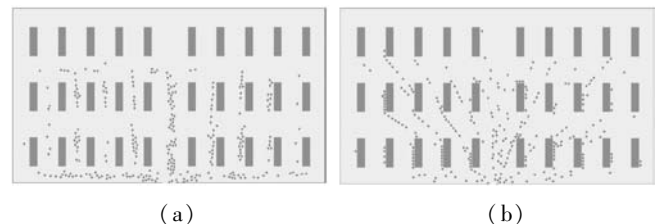


图9 导航方式不同的仿真

图10的轨迹线也可以看出图10(a)的疏散轨迹尽量避开障碍物的边缘。而图10(b)中由于行人是直接指向出口点进行疏散的,必然会贴近障碍物移动。可见采用合理的导航点方式进行疏散仿真可以使行人的疏散轨迹更加趋于合理,完善疏散仿真效果。

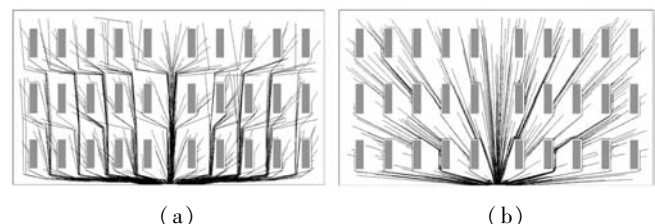


图10 导航方式不同的轨迹线

## 6.3 多种障碍物场景的地震疏散实验

为了使仿真软件适应不同障碍物场景,在场景中实现了可以任意增加多边形作为障碍物,如矩形、三角形、菱形、五边形、六边形等,可以灵活地布局障碍物,

满足不同场景疏散仿真的要求。本节实验设计一个游戏场馆的场景,用不同多边形表示游戏区域,选择一些关键的节点作为导航点进行疏散仿真实验,游戏场馆场景的布局图如图 11 所示,其中多边形为障碍物,圆形为导航点。

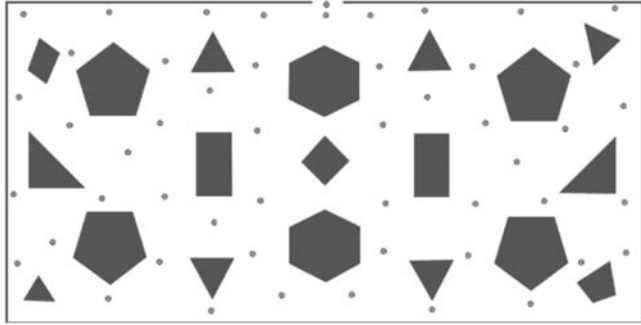
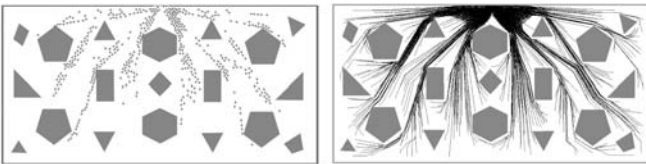


图 11 游戏场馆场景布局图

在场景中随机分布行人,行人的期望速度为 3 m/s,出口的宽度为 6 m,采用 8 线程分布进行了 200 人、320 人、400 人和 480 人的疏散仿真,图 12(a)是仿真效果,图 12(b)是疏散轨迹线。不同行人数量的疏散仿真时间对比如表 10 所示。通过不同的多边形组合可以创建出不同的场景类型,满足对多种场景仿真实验的要求。



(a) (b)

图 12 游戏场馆场景仿真

表 10 疏散仿真时间对比

行人数量/人	200	320	400	480
疏散时间/s	30.2	36.8	47.4	59.8

#### 6.4 结合恐慌值和健康值的地震疏散实验

上述实验中行人的逃生速度就是期望速度,但在疏散过程中由于行人的恐慌程度和健康程度区别,逃生速度存在较大的差异。本节实验采用商场场景,400 个行人,线程数量 8 个,导航方式采用导航点方式,结合行人的恐慌值和健康值。考虑到仿真的总体疏散时间由最后逃生的行人决定,而行人的健康值是随机分布,这样导致整体的疏散时间有一定的随机性,为了减少随机性的影响,采用场景中 90% 的行人完成疏散的时间作为比较依据,疏散时间对比如表 11 所示。

实验中恐慌值和健康值依照如下设置:

实验 1 不采用恐慌值和健康值;

实验 2、实验 3、实验 4 采用恐慌值和健康值;

实验 2 健康值在  $[0.5, 1.5]$  均匀分布;

实验 3 健康值在  $[0.5, 1]$  占 40%, 在  $(1, 1.5]$  占 60%;

实验 4 健康值在  $[0.5, 1]$  占 60%, 在  $(1, 1.5]$  占 40%。

表 11 疏散仿真时间对比

实验	实验 1	实验 2	实验 3	实验 4
疏散时间/s	31	31.8	31.4	32.2

表 11 中采用恐慌值和健康值的实验 2、3、4 相比较实验 1 的疏散时间较长,实验 3 的平均健康值较高,因此疏散时间较短,而实验 4 的平均健康值较低,因此疏散时间较长,实验结果符合预期。在仿真过程中实验 2 - 实验 4 的行人呈现出不同逃生速度,可见采用合理的恐慌值和健康值可以疏散仿真的结果趋于合理。

## 7 结 语

本文采用多线程优化、增加导航点、结合恐慌值和健康值的社会力模型建立人群疏散仿真软件,利用该软件实时仿真商场及游戏场馆的人群疏散。对不同导航模式、不同行人数量等进行仿真实验,分析了仿真实验的数据,得出相应结论。通过该软件可以对场景的疏散功能进行仿真,为定制疏散策略提供依据。

然而,本文的方法仍有不足之处。采用多线程可以优化仿真效果,但是当人数达到一定数量时,还是会出现系统瓶颈,还需要进一步优化,可以考虑优化算法步骤或者采用 GPU 加速来实现。本文的导航点采用人工标记的方式,存在一定的主观性和不确定性,需要提出一种可以根据场景信息自动生成导航点的方法。人群的疏散过程中存在多种因素,还应考虑与人群的群体性、情绪性等相结合,才能人群疏散仿真更加真实。这些也是本文需要进一步研究的方向。

## 参 考 文 献

- [1] Helbing D, Moln T. Social Force Model for Pedestrian Dynamics[J]. Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics, 1995, 51(5): 4282.
- [2] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating Dynamical Features of Escape Panic[J]. Nature, 2000, 407(6803): 487-490.
- [3] Helbing D, Buzna L, Johansson A, et al. Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulations, and Design Solutions[J]. Transportation Science, 2005, 39(1): 1-24.



- [4] Nagatani T. Jamming transition in the traffic-flow model with two-level crossings[J]. *Physical Review E*, 1993, 48(5): 3290–3294.
- [5] Tajima Y, Nagatani T. Clogging transition of pedestrian flow in T-shaped channel[J]. *Physica A*, 2002, 303(1/2): 239–250.
- [6] Takimoto K, Nagatani T. Spatio-temporal distribution of escape time in evacuation process[J]. *Physica A*, 2003, 320: 611–621.
- [7] Khatib O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1986, 5(1): 90–98.
- [8] Khatib O. The Potential Field Approach and Operational Space Formulation in Robot Control [C]//Proc. 4th Yale Workshop on Applications of Adaptive Systems Theory, 1985: 208–214.
- [9] Wolfram S. *Theory and Application of Cellular Automata* [M]. World Scientific, 1986.
- [10] Fukui M, Ishibashi Y. Self-Organized Phase Transitions in Cellular Automaton Models for Pedestrians[J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1999, 68(8): 2861–2863.
- [11] Yang X, Dong H, Wang Q, et al. Guided crowd dynamics via modified social force model[J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2014, 411(10): 63–73.
- [12] Liu Q. A social force model for the crowd evacuation in a terrorist attack[J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2018, 502: 315–330.
- [13] 纪庆革, 何浩, 王福川. 密度场下的短程社会力模型[J]. *计算机科学*, 2015, 42(6): 12–17, 53.
- [14] 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.
- [15] 张开冉, 杨树鹏, 何琳希, 等. 基于社会力模型的车站负重大人群疏散模拟研究[J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(1): 30–35.
- [16] 焦宇阳, 马鸿雁. 基于改进社会力模型的楼梯疏散研究[J]. *消防科学与技术*, 2018(5): 40–44.
- [17] 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.
- ~~~~~
- (上接第9页)
- [38] Sarwinda D, Bustamam A. Detection of Alzheimer's disease using advanced local binary pattern from hippocampus and whole brain of MR images [C]//International Joint Conference on Neural Networks. IEEE, 2016: 5051–5056.
- [39] Rendon-Gonzalez E, Ponomaryov V. Automatic Lung nodule segmentation and classification in CT images based on SVM [C]//International Kharkiv Symposium on Physics & Engineering of Microwaves. IEEE, 2016.
- [40] Khalaf A F, Yassine I A. Spectral correlation analysis for microcalcification detection in digital mammogram images [C]//IEEE International Symposium on Biomedical Imaging. IEEE, 2015.
- [41] Liang D C, Xu Z S, Liu D. Three-way decisions based on decision-theoretic rough sets with dual hesitant fuzzy information[J]. *Information Sciences*, 2017, 396: 127–143.
- [42] Ngan R T, Le H S, Cuong B C, et al. H-max distance measure of intuitionistic fuzzy sets in decision making[J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 69: 393–425.
- [43] Wang Z Q, Zhang X F, Yang W Y. Rule induction of breast cancer medical diagnose based on combination of rough sets, artificial neural network and genetic algorithm [C]//2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2016: 5707–5711.
- [44] Guo Q, Qu Y P, Deng A S, et al. A new fuzzy-rough feature selection algorithm for mammographic risk analysis [C]//2016 12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD), 2016: 934–939.
- [45] Dubey Y K, Mushrif M M. Intuitionistic fuzzy roughness measure for segmentation of brain MR images [C]//2015 8th International Conference on Advances in Pattern Recognition (ICAPR), 2015: 1–6.
- [46] 于杰杰, 王赞基. 适应值共享拥挤遗传算法[J]. *控制与决策*, 2001(6): 926–929.
- [47] 王聪, 柯玉琦, 胡燕海. 改进的小生境混合遗传算法在函数优化上的应用[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(5): 1–4.
- [48] 陈果, 邓堰. 遗传算法特征选取中的几种适应度函数构造新方法及其应用[J]. *机械科学与技术*, 2011, 30(1): 124–128, 132.
- [49] 李乃成, 陈白丽, 高岫. 一个具有对偶适应度函数的遗传算法[J]. *西安交通大学学报*, 2004(8): 811–814.
- [50] 杨水清, 杨加明, 孙超. 改进的乘幂适应度函数在遗传算法中的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2014, 50(17): 40–43, 154.
- [51] 杨新武, 刘椿年. 遗传算法中自适应的比例选择策略[J]. *计算机工程与应用*, 2007(20): 25–27, 158.
- [52] 李书全, 孙雪, 孙德辉, 等. 遗传算法中的交叉算子的述评[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(1): 36–39.
- [53] Nagarajan G, Minu R I, Muthukumar B, et al. Hybrid Genetic Algorithm for Medical Image Feature Extraction and Selection [J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 85: 455–462.
- [54] Nematzadeh H, Enayatifar R, Motameni H, et al. Medical image encryption using a hybrid model of modified genetic algorithm and coupled map lattices [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 110: 24–32.
- [55] 姚旭, 王晓丹, 张玉玺, 等. 特征选择方法综述[J]. *控制与决策*, 2012, 27(2): 161–192.
- [56] 陈岩, 来海锋, 王清, 等. 基于 filter-wrapper 的两步特征变量提取方法[J]. *机电工程*, 2010, 27(4): 67–71.