

一种基于 SPH 方法的人员疏散混合模型及模拟

苗志宏¹ 李智慧²

摘要 为减少室内火灾环境下人员伤亡,研究了人员疏散计算机模拟问题.将人员运动视为一种流体运动,利用流体力学原理,构建一种新的人员疏散混合模型,并在其中引入了一种从众模式.同时,采用光滑粒子流体动力学方法对模型离散化,从而减少了计算量.不同工况下进行的疏散模拟实验表明,所提出的模型及算法能够较准确地模拟出实际疏散的现象.

关键词 人员疏散模型,光滑粒子流体动力学,计算机模拟,社会力模型,拉格朗日算法

引用格式 苗志宏,李智慧.一种基于 SPH 方法的人员疏散混合模型及模拟.自动化学报,2014,40(5):935–941

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.00935

A Hybrid Evacuation Model and Simulation Based on SPH Method

MIAO Zhi-Hong¹ LI Zhi-Hui²

Abstract Computer simulation of evacuation can be very helpful for reducing casualty in compartment fire. By introducing the principle of hydromechanics in this paper, a new hybrid evacuation model is composed, in which pedestrian movement is treated as fluid movement. In this new model, the characteristic features of escape panics are described by including mass behavior. By using the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method to discretize this continuous model, the computational complexity can be decreased. Evacuation simulation experiments under different working conditions show that the proposed model and algorithm have good effect on simulation of evacuation phenomenon.

Key words Evacuation model, smoothed particle hydrodynamics (SPH), computer simulation, social force model, Lagrange algorithm

Citation Miao Zhi-Hong, Li Zhi-Hui. A hybrid evacuation model and simulation based on SPH method. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(5): 935–941

室内火灾情况下的安全疏散研究具有极大的现实意义和社会安全价值,利用计算机对人员疏散进行仿真模拟研究是一种比较便捷而有效的手段.目前,常见的人员疏散模型分为宏观方法和微观方法^[1],微观方法中又包含连续型模型和离散型模型,Helbing 等的社会力模型^[2–3]是典型的连续型模型,而离散模型中常用的是元胞自动机模型和格子气模型^[4–9].

宏观方法将人员视为连续流动介质,利用流体力学控制方程来描述行人的运动过程,这方面的主要研究成果有:Henderson 首次提出用气体动力学模型描述行人行为的模型^[10];Hughes 研究了大量人群流动机理,获得了人群流动的运动方程^[11];以及 Hoogendoorn 等提出的一个更为复杂的气体动力学行人模型^[12].宏观方法可以利用现有的流体力学研

究成果,便于入手,但难以考虑疏散人群中个体的作用和个体间的差异性,计算量也较大.Helbing 等提出的社会力模型,将环境及人员之间的物理作用量和社会心理作用量转化为粒子之间的自驱动力、排斥力及摩擦力等.社会力模型是一种无网格模型,能够表现疏散过程中的一些动力学特征^[1],能够很好地模拟人员拥挤等过程,能精确描述人员恐慌状态下的疏散行为.但由于在计算每个粒子下一时刻的属性值时,要搜索所有粒子当前的属性值,计算量会随人数的增加而急剧增大,运算速度也同时下降.而元胞自动机模型和格子气模型的特点是规则简单,避开了用数值解法求解方程的繁琐过程,运算速度快.但这些模型对空间的划分是规则的,行人可选择的运动方向也有限.因此,描述行人运动方向的能力是有限的,并且由于它们是带网格的计算方式,每个网格单元只能容纳一个成员,因此难以表现人员之间的拥挤等现象.所以,结合宏观模型和微观模型各自的优势,建立一种新的模型和算法是值得研究的问题.

光滑粒子流体动力学 (Smoothed particle hydrodynamics, SPH) 是一种基于粒子的拉格朗日算法.为解决连续介质流体的模拟计算问题,1977 年 Lucy 和 Gingold 等提出了这种方法^[13–14].该方法最初应用于天体物理的计算中^[15].后来,Monaghan

收稿日期 2013-04-07 录用日期 2013-10-24
Manuscript received April 7, 2013; accepted October 24, 2013
武警学院重大预研课题 (WJXYDY003) 资助
Supported by Important Pre-research Program of Chinese People's Armed Police Forces Academy (WJXYDY003)
本文责任编辑 王飞跃
Recommended by Associate Editor WANG Fei-Yue
1. 中国人民武装警察部队学院消防工程系 廊坊 065000 2. 中国人民武装警察部队学院科研部 廊坊 065000
1. Fire Engineering Department, Chinese People's Armed Police Forces Academy, Langfang 065000 2. Scientific Research Department, Chinese People's Armed Police Forces Academy, Langfang 065000

将该方法应用于自由表面流体的模拟过程中^[16], 由于可以模拟出流体比较复杂的细节并具有较高的计算性能, 近年来成为流体模拟研究中的一个热点. 该方法还被广泛应用到其他领域^[17-18]. SPH 方法的基本思想是: 将流体物质离散成一系列任意分布的粒子集合, 每个粒子都有相应的物理属性, 通过搜寻邻近范围内的其他粒子, 用光滑核函数进行插值来计算出下一个时刻该粒子的属性值.

SPH 是一种无网格的方法, 其主要特征表现在计算函数的空间导数可转化成对光滑核函数的求导, 而光滑核函数微分解析式可事先求出, 这样就无需在空间网格上直接求函数导数了. 另外, 光滑核函数半径 h 是有限的, 粒子的属性值计算仅涉及邻近粒子, 计算量可大大减少, 在满足一定精度的情况下, 可有效提高计算效率^[19-20].

本文基于 SPH 方法, 结合宏观方法和微观方法(社会力模型), 给出一种新的人员疏散混合型模型. 该模型以 Navier-Stokes 控制方程为基本形式, 为表现出行人之间的排斥力和挤压力, 模型中采用两种形式的状态方程, 并引入从众模式实现行人之间运动的差异性. 用 SPH 方法对模型离散化, 该方法可方便地计算出排斥力和挤压力, 同时降低计算量.

1 SPH 的基本原理

SPH 方法主要涉及核函数逼近原理和粒子模拟技术. 核函数逼近原理可以用以下等式进行解释:

$$f(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} f(\mathbf{x}')\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}')d\mathbf{x}' \quad (1)$$

式中, f 是任一连续函数, Ω 是整个求解区域, δ 是如下形式的 Dirac delta 函数:

$$\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}') = \begin{cases} \infty, & \mathbf{x} = \mathbf{x}' \\ 0, & \mathbf{x} \neq \mathbf{x}' \end{cases} \quad (2)$$

如果式 (1) 中将 δ 函数替换为所谓的光滑核函数 $W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h)$, 则得到如下近似式:

$$f(\mathbf{x}) \approx \int_{\Omega} f(\mathbf{x}')W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h)d\mathbf{x}' \quad (3)$$

式中 h 为核半径, 光滑核函数 $W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h)$ 应满足如下条件:

$$\int_{\Omega} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h)d\mathbf{x}' = 1 \quad (4)$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \quad (5)$$

$$W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) = 0, \|\mathbf{x} - \mathbf{x}'\| > kh \quad (6)$$

k 为系数.

如果将所考虑的计算域离散化为由粒子构成的群体, 设第 i 个粒子的质量为 m_i , 密度为 ρ_i , 则该粒

子的体积为 $\frac{m_i}{\rho_i}$, 则近似式 (3) 的离散形式为:

$$f(\mathbf{x}_j) \approx \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\rho_i} f(\mathbf{x}_i)W(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i, h) \quad (7)$$

而在粒子 j 处的梯度形式可表示为:

$$\nabla f(\mathbf{x}_j) \approx \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\rho_i} f(\mathbf{x}_i)\nabla W(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i, h) \quad (8)$$

在式 (7) 两端取拉普拉斯算子 ∇^2 后:

$$\nabla^2 f(\mathbf{x}_j) \approx \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\rho_i} f(\mathbf{x}_i)\nabla^2 W(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i, h) \quad (9)$$

以上两式中将函数的空间导数问题转化成了对光滑核函数的求导问题, 这样只要事先对光滑核函数求导, 就无需在空间网格上直接求函数导数. 另一方面, 由于光滑核函数的作用半径 h 有限, 即粒子的属性值仅受邻近粒子的影响, 而远离它的粒子对其属性的影响忽略不计, 因此对每个粒子上面几个式中求和项仅涉及邻近粒子, 计算量大大减少.

2 模型提出

本节给出一种公共场所人员疏散混合型模型, 以及基于 SPH 方法的离散化过程.

假设人员的运动过程是一种特殊的流体运动过程, 流体中的每个质点表示一个个体, 则人员疏散运动过程可以用如下形式的动力学模型来描述:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} &= \mathbf{v}(t) \\ \rho \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} &= \rho \frac{v^0 \mathbf{e}^0(t) - \mathbf{v}(t)}{\tau} + \mathbf{F}^R + \mathbf{F}^B + \mathbf{F}^V \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{F}^R = -\nabla P_s$, $\mathbf{F}^B = -\nabla P_b$, $\mathbf{F}^V = \mu \nabla^2 \mathbf{v}(t)$. \mathbf{x} 表示质点某时刻的位置, \mathbf{v} 是运动速度, ρ 是密度. v^0 是质点运动期望速度, \mathbf{e}^0 是一确定运动方向. 上面模型右端第 1 项使质点速度经过时间 τ 将接近期望速度 v^0 , 模拟了人员个体自主运动趋势. 第 2、3、4 项模拟了个体运动受周围群体影响的过程. 其中第 2 项中的 P_s 表示受群体心理作用而体现出的个体之间的压强, 这种压强使个体之间能够保持一定的距离, 该项模拟了疏散人员个体之间的排斥力, 主要描述行人之间的避让、赶超以及对障碍物的绕行等行为.

第 3 项中的 P_b 表示个体之间由于物理(身体)上的接触而产生的压强, 该项模拟了个体之间挤压力, 描述疏散人员排队逃生时的拥挤行为. 第 4 项是流体的粘性力, 模拟个体之间相互接触而产生的切

向滑动摩擦力, 描述疏散行人之间产生的相互阻力, 其中 μ 表示粘性系数.

下面利用 SPH 方法对上面的运动模型离散化. 用活动粒子表示行人, 用固定粒子表示墙面 (或障碍物), 每个活动粒子代表一个行人, 而多个相连的固定粒子可代表墙面 (或障碍物).

粒子 a 的密度用 ρ_a 表示, 质量为 m_a , r_a 表示粒子半径, 墙面粒子的半径取为 0, 则上面的模型可转化为:

$$\frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} = \frac{v^0 \mathbf{e}^0(t) - \mathbf{v}(t)}{\tau} + \mathbf{a}^R + \mathbf{a}^B + \mathbf{a}^V \quad (11)$$

其中, $\mathbf{a}^R = -\frac{\nabla P_a}{\rho}$, $\mathbf{a}^B = -\frac{\nabla P_b}{\rho}$, $\mathbf{a}^V = \mu \frac{\nabla^2 \mathbf{v}}{\rho}$.

具体计算步骤如下:

1) 密度计算

在计算粒子 a 的密度时, 将式 (7) 中 $f(x)$ 替换为 ρ , 即:

$$\rho_a = \sum_b \rho_b \frac{m_b}{\rho_b} W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h_1) \quad (12)$$

式中光滑核函数 W 选择如下的 poly6 函数^[21]:

$$W_{\text{poly6}}(\mathbf{r}, h) = \begin{cases} K_{\text{poly6}}(h^2 - r^2)^3, & 0 \leq r \leq h \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中, $r = |\mathbf{r}|$, 由于计算区域是二维的, 因此系数为 $K_{\text{poly6}} = \frac{4}{\pi h^8}$.

2) 压强计算

由于是通过流体的压强来诱导粒子之间的排斥力和挤压力, 因此还要计算两种不同的压强 P^s 和 P^b . 由于这两种压强与粒子密度有关, 本文采用如下公式计算压强:

$$P^s = \frac{A}{1 + \exp(-\lambda p^2)}, \quad P^b = K \frac{p - p_0}{p_0} \quad (13)$$

其中, p_0 是单个粒子的平均密度, λ 是衰减系数, 而系数 A 与系数 K 均大于 0, 其值取决于粒子的属性, 可通过数值模拟来确定. 这里总结出系数选取的一般原则: a) 数值模拟中, 先取最大的行人粒子数和最大的期望速度, 逐渐增大系数 A 使行人粒子在运动中不能穿墙而过. b) 房间中仅置一个行人粒子, 而取最小的期望速度, 逐渐递增或逐渐递减系数 K , 使得当行人粒子直径小于出口宽度时, 行人粒子能够顺利通过出口; 当行人粒子直径大于出口宽度时, 又能受两端墙体的挤压力而不难前进.

3) 粒子加速度计算

在计算 $\frac{\nabla P_b}{\rho}$ 时, 不能简单地套用式 (8), 我们注意到:

$$\frac{\nabla P}{\rho} = \nabla \left(\frac{P}{\rho} \right) + \frac{\nabla P}{\rho^2} \nabla \rho \quad (14)$$

利用式 (8), 由上式可得到粒子 a 处的值:

$$\left(\frac{\nabla P}{\rho} \right)_a = \sum_b m_b \left(\frac{P_a}{\rho_a^2} + \frac{P_b}{\rho_b^2} \right) \nabla W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h)$$

这样处理后得到的公式是“平衡”的, 也就是说, 位于不同压强区的两个粒子之间的作用力相等.

因此, 在计算 \mathbf{a}^R 和 \mathbf{a}^B 时, 可采用如下形式:

$$(\mathbf{a}^R)_a = - \sum_b m_b \left(\frac{P_a^s}{\rho_a^2} + \frac{P_b^s}{\rho_b^2} \right) \nabla W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h_2)$$

$$(\mathbf{a}^B)_a = - \sum_b m_b \left(\frac{P_a^b}{\rho_a^2} + \frac{P_b^b}{\rho_b^2} \right) \nabla W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h_3)$$

上式中, 光滑核函数的选择至关重要, 由于此光滑核函数有梯度算子, 可以选择如下形式的核函数:

$$W_{\text{spiky}}(\mathbf{r}, h) = \begin{cases} K_{\text{spiky}}(h - r)^3, & 0 \leq r \leq h \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中, $r = |\mathbf{r}|$. 进而得:

$$\nabla W_{\text{spiky}}(\mathbf{r}, h) = -3K_{\text{spiky}}(h - r)^2 \frac{\mathbf{r}}{r}, \quad (0 \leq r \leq h)$$

由于该函数的梯度不会随 r 变小而变小, 因此选择这种形式的核函数是合适的. 此外, 由于通过粒子之间的两种压力来模拟个体之间的排斥力和挤压力, 因此在模拟排斥力时, 选择稍大一些的核函数半径, 这里取 $h_2 = w$ (w 将在第 4 节给定), 在模拟挤压力时仅涉及到和当前粒子接触的其他粒子, 于是我们选择这样的核函数半径 $h_3 = r_a + r_b$.

在计算 \mathbf{a}^V 时, 如果直接套用式 (9), 得到粒子 a 处的值:

$$(\mathbf{a}^V)_a = \left(\mu \frac{\nabla^2 \mathbf{v}}{\rho} \right)_a = \frac{\mu}{\rho_a} \sum_b m_b \frac{\mathbf{v}_b}{\rho_b} \nabla^2 W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h)$$

但这样得到的是一个非对称力, 不符合实际情况. 考虑到摩擦力仅依赖于两粒子的速度差, 不依赖于绝对速度, 一个自然的想法是使用两粒子的速度差来对称化上面的摩擦力^[21]. 因此在上式基础上做如下修正:

$$(\mathbf{a}^V)_a = \frac{\mu}{\rho_a} \sum_b m_b \frac{\mathbf{v}_b - \mathbf{v}_a}{\rho_b} \nabla^2 W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h_4) \quad (15)$$

经 SPH 方法处理后, 由于上面的式中要计算光滑核函数的二阶微分, 因此选择光滑核函数时, 要求在该函数上作用二阶微分算子后, r 接近 0 时, 其值不能变小, 否则模拟的摩擦力就会消失. 为此, 我们

专门设计了一个针对二维情况下的光滑核函数(文献 [21] 中给出了三维情况下的光滑核函数)如下:

$$W_{my}(\mathbf{r}, h) = \begin{cases} K_{my}(-\frac{4r^3}{5h^3} + \frac{9r^2}{5h^2} - \frac{6}{5} \ln \frac{r}{h} - 1), & 0 \leq r \leq h \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

式中 $K_{my} = \frac{50}{9\pi h^2}$. 不难验证这样设计的函数既可以满足光滑核函数的基本要求, 又可以满足上面提出的要求.

在该核函数上作用拉普拉斯算子后, 表达式为:

$$\nabla^2 W_{my}(\mathbf{r}, h) = \frac{36K_{my}}{5h^3}(h - r), \quad 0 \leq r \leq h$$

考虑到这样的摩擦力只有在个体之间有物理上的接触才会产生, 因此光滑核函数的半径应取小一些, 本文中我们取 $h_4 = r_a + r_b$.

利用上面的计算过程, 对连续模型进行 SPH 离散化后, 最终运动方程为:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{x}_a}{dt} = \mathbf{v}_a \\ \frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = \frac{v_a^0 \mathbf{e}_a^0(t) - \mathbf{v}_a(t)}{\tau_a} + (\mathbf{a}^R)_a + (\mathbf{a}^B)_a + (\mathbf{a}^V)_a \end{cases} \quad (16)$$

其中

$$(\mathbf{a}^R)_a = - \sum_b m_b \left(\frac{P_a^s}{\rho_a^2} + \frac{P_b^s}{\rho_b^2} \right) \nabla W_{spiky}(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h_2)$$

$$(\mathbf{a}^B)_a = - \sum_b m_b \left(\frac{P_a^b}{\rho_a^2} + \frac{P_b^b}{\rho_b^2} \right) \nabla W_{spiky}(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h_3)$$

$$(\mathbf{a}^V)_a = \mu \sum_b m_b \frac{v_b - v_a}{\rho_a \rho_b} \nabla^2 W_{my}(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h_4)$$

3 从众行为模式

如果行人 a 对逃生路线是熟知的, 则模型中的运动方向是明确的, 我们用 $\mathbf{e}_a(t)$ 来表示该行人正确的逃生方向. 如果行人 a 试图逃离一个烟雾弥漫的房间时或对逃生路线不熟悉时, 可能会随机选择一个方向, 这时我们用 $\mathbf{e}_a^R(t)$ 来表示. 对后一种情况, 如果附近有其他行人时, 也会跟随这些行人前进; 或者是前两者的综合^[3]. 前者体现了行人的一种惊慌行为, 而后者体现了行人的“从众行为”. 在模拟过程中, 两种方向通过参数 p_a 进行加权. 综合以上情况, 修改文献 [3] 中的从众模式, 用下式计算行人 a

的运动方向:

$$\mathbf{e}_a(t) = \begin{cases} \mathbf{e}_a(t), & a \in \Gamma \\ (1 - p_a)\mathbf{e}_a^R(t) + p_a \langle \mathbf{e}_b^0(t) \rangle_a, & a \notin \Gamma \end{cases}$$

$$\mathbf{e}_a^0(t) = \frac{\mathbf{e}_a(t)}{\|\mathbf{e}_a(t)\|} \quad (17)$$

Γ 表示熟悉逃生路线的那些粒子组成的集合, $\langle \mathbf{e}_b^0(t) \rangle_a$ 表示行人 a 附近其他行人运动方向的加权平均. $p_a \in [0, 1]$, 当 p_a 接近 1 时, 行人运动的从众行为要强, 当 p_a 接近 0 时, 行人运动的惊慌行为要强. 因此, 参数 p_a 的大小反映了行人的从众程度.

模拟中利用 SPH 方法来计算平均运动方向 $\langle \mathbf{e}_b^0(t) \rangle_a$, 即:

$$\langle \mathbf{e}_b^0(t) \rangle_a = \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} \mathbf{e}_b^0(t) W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h) \quad (18)$$

这样处理更为符合实际情况, 并能提高运算效率, 这是因为上式是邻近粒子运动方向的加权平均, 是以当前粒子为中心以由近及远的方式对邻近粒子配置权值的, 即近处粒子的权值要大于远处粒子的权值. 此外, 式中仅涉及邻近的部分粒子, 这样计算量大大降低.

4 算法实现

1) 模拟过程中, 由于 Leap frog 积分方法是具有二阶精度, 因此本文选用这种数值方法来计算方程, 求出粒子的轨迹, 即:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}(t + \Delta t/2) &= \mathbf{v}(t - \Delta t/2) + \mathbf{a}(t)\Delta t \\ \mathbf{x}(t + \Delta t) &= \mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t + \Delta t/2)\Delta t \end{aligned}$$

2) 粒子系统参数设置

粒子设置: 首先设置粒子个数, 在疏散模拟过程中, 除人员外, 场景中的墙面或障碍物也由粒子构成, 因此, 粒子个数 $N = N_{pedestrian} + N_{walls}$, 其中 $N_{pedestrian}$ 是人员个数, N_{walls} 是墙面或障碍物所需粒子个数. 每个粒子具有位置、速度、加速度、半径、质量等属性, 当粒子表示的是墙面或障碍物时, 其位置初始化后, 速度和加速度都将设定为 0, 即上面的积分算法只作用到活动粒子(人员)上.

计算区域设置: 在人员疏散模拟中, 由于我们仅考虑二维区域场景, 因此 SPH 的计算区域设定为一个矩形区域. 模拟中用参数 ($Zone_Left, Zone_Bottom$) 表示区域左下角的坐标, 用 $Zone_Width, Zone_Height$ 来表示区域的宽和高. 由于 SPH 方法中每一步都要搜寻与当前粒子相邻的各个粒子, 实现这一过程的一种方法是将计算区域分割为一系列细胞, 全体细胞构成一个网格. 我们将矩形区域划分为 $MaxRow \times MaxCol$

个小正方形区域, 每个小正方形区域就是一个细胞, 其边长为 w , 这样 $MaxRow = (Zone_Height/w)$, $MaxCol = (Zone_Width/w)$.

这样, 要搜寻某粒子 a 的所有相邻粒子, 先要找到粒子 a 所在细胞的各个相邻细胞. 图 1 给出了粒子 a 所在细胞的 8 个相邻细胞的位置, 其中 h 就是光滑核函数所选的核半径. 在模拟过程中, 光滑核函数的核半径不超过正方形细胞的边长 w , 这样只要最多搜寻当前细胞的 8 个相邻细胞即可. 因此, 在计算粒子 a 的属性时, 只要考虑这 8 个相邻细胞中与粒子 a 相距小于 h 的粒子 (图 1 中虚线圆内的粒子) 即可.

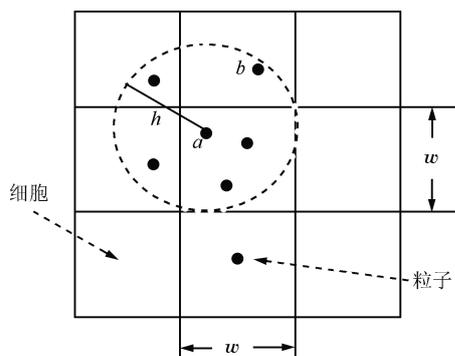


图 1 某粒子相邻细胞及核半径

Fig. 1 The neighboring grid cells and the smoothing length of a particle

3) 程序设计

本文给出算法, 最终在 Visual C++ 6.0 软件环境下, 利用 OpenGL 的实用工具包 GLUT 实现算法. 在算法实现过程中, 利用了面向对象程序设计思想组织程序. 主要类型有: 粒子类 (CParticle)、行人类 (CPedestrians)、墙类 (CWalls)、房间类 (CRoom)、SPH 方法类 (CSPHSystem).

4) 算法复杂性分析

Helbing 等的社会力模型是采用基于粒子的传统拉格朗日算法实现的. 这就意味着计算每个粒子属性, 需要遍历计算区域内的所有粒子. 如果问题

的规模是 N 个粒子, 则其算法的时间复杂度就是 $O(N^2)$.

基于本文给出的模型及算法, 在同等问题规模下, 计算每个粒子属性时, 仅需涉及在其核半径范围内的少量粒子. 如果某核半径内粒子数为 k , 则算法的时间复杂度应为 $O(kN)$. 通常 k 远远小于 N , 特别是在核半径很小时, k 不会超过某一常数, 此时算法的时间复杂度变为 $O(N)$, 时间运算效率大大提高. 这样, 在模拟场景大、粒子数量多、采用小的核半径时, 就能凸显出本方法的优势.

应该指出, 在时间运算效率提高的同时, 也需要付出一定的空间复杂度. 这是由于在计算每个粒子属性时, 要为每个粒子存储其所在的网格细胞和邻近细胞信息, 这样空间复杂度为 $O(N)$. 而相对于时间运算效率来说, 这点空间开销也是值得的.

5 模拟示例

例 1. 选定一个大小为 $15\text{ m} \times 15\text{ m}$, 有一个出口的房间, 如图 2 所示. 图中每个小方块代表一个行人. 初始状态房间内随机分布 100 人, 行人的半径在区间 $[0.25, 0.35]$ 上随机选取, 每个行人的期望速度大小均一致, 即 $v_i^0 = v_0$. 设置不同的出口宽度来考察疏散情况.

模拟中, 我们取行人粒子数 $N_{pedestrian} = 100$, 墙面粒子数 $N_{walls} = 414$, 每个行人粒子的质量为 80 kg , 墙面粒子的质量为 500 kg , 计算压强的参数 $A = 125$, $\lambda = 0.001$, $\rho_0 = 20$, $K = 1000$. 行人的期望速度 $v_i^0 = 1.0\text{ m/s}$ 时, 经过几个时间节点的状态如图 2 所示.

图 2 中设置出口宽度为 1.0 m , 初始时刻, 行人随机分布在房间内. 经过一段时间后, 出口处开始出现拥堵现象 (图 2 (b)), 并呈现出“拱形分布”. 图 3 给出了不同出口宽度情况下, 人员疏散所需时间 (Required safe egress time, RSET) 图, 图中曲线说明, 随出口宽度的增大, 疏散所需时间减少. 因此, 本例实验结果符合实际的疏散效果.

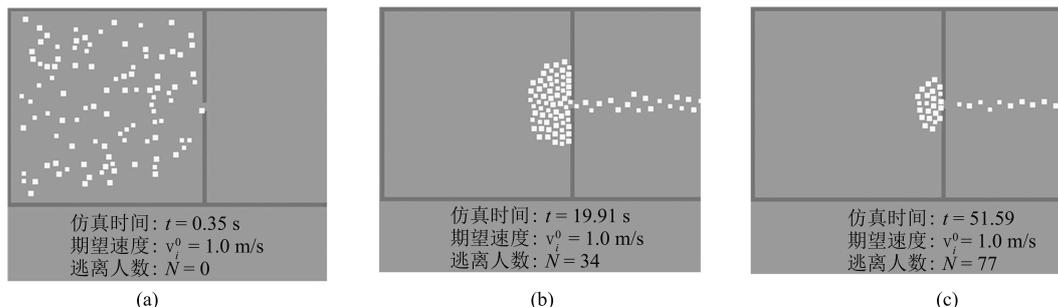


图 2 单出口疏散模拟效果的三个截图

Fig. 2 Three snapshots of the evacuation simulation with single exit

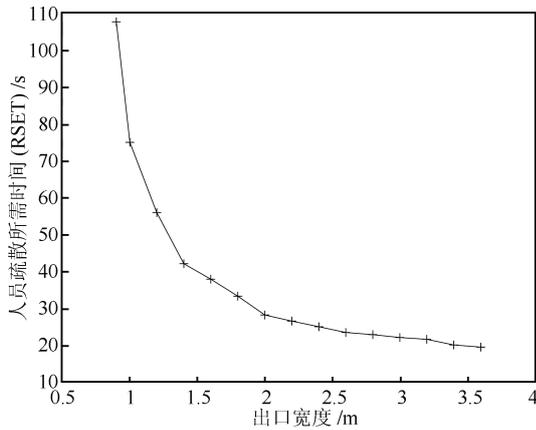


图 3 不同出口宽度下 100 人疏散时间图

Fig. 3 Leaving times of 100 pedestrians for various exit conditions

例 2. 如图 4 所示, 选定一个大小为 $15\text{ m} \times 15\text{ m}$ 的房间, 带有左右两个出口, 初始状态房间内随机分布 100 人, 模拟人员逃生时的从众行为. 模拟过程, 按不同比例设置熟悉逃生路线的人数.

代表行人的粒子总数 $N_{pedestrian} = 100$, 墙面粒子数 $N_{walls} = 470$, 行人期望速度 $v_i^0 = 4.5\text{ m/s}$, 人的运动方向采用从众行为模式, 其他参数与上例一致. 图 4 给出了 2 种不同工况下人员逃生时从众行为的效果图.

工况 1 (图 4(a)): 设置从众程度为 $p = 0.7$, 熟悉逃生路线行人的比例为 20%. 这种情况下, 不熟悉逃生路线的行人较多, 从众程度较高, 因此大部分行人拥挤在其中一个出口处, 而另一出口行人较少, 模拟过程中部分行人还出现了“集结现象”.

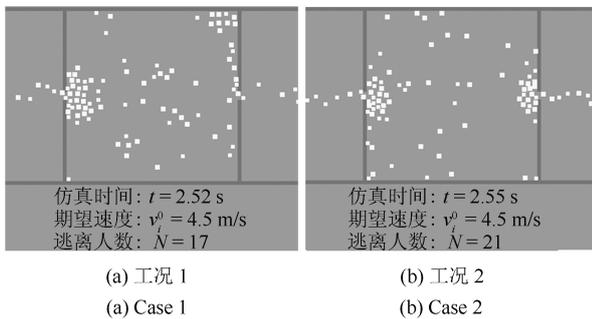


图 4 双出口情况下的疏散效果图

Fig. 4 Evacuation simulation with double exits

工况 2 (图 4(b)): 设置从众程度为 $p = 0.2$, 熟悉逃生路线行人的比例为 50%. 这种情况下, 不熟悉逃生路线行人从众程度低, 因此大部分行人能够比较均等的利用左右两个出口, 有利于提高逃生率.

为进一步观察从众程度对行人疏散的影响, 设 N_1 、 N_2 分别表示一定时间后从左右出口疏散的人数. 因此, 如果 $|N_1 - N_2|$ 较小, 说明左右两出口能够

被均等的利用. 图 5 给出了从众程度 p_i 对 $|N_1 - N_2|$ 的影响效果. 在 20% 的行人熟悉逃生路线的情况下 (图 5 中实线), 当 $p_i > 0.5$ 后, $|N_1 - N_2|$ 递增明显, 说明从众程度高时, 不能均等地利用两个出口. 而当有 80% 的行人熟悉逃生路线时, 从众程度高时, 能够比较均等地利用两个出口, 有利于逃生.

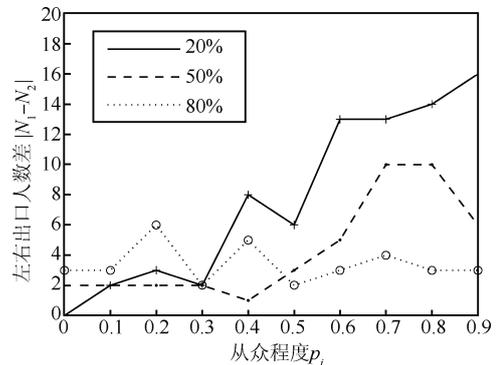


图 5 从众程度 p_i 对 $|N_1 - N_2|$ 的影响

Fig. 5 The influence of mass behaviour parameter p_i upon $|N_1 - N_2|$

6 结论

基于 SPH 方法, 以 Navier-Stokes 控制方程为基本形式, 提出一种新的人员疏散混合型模型. 该模型中将行人的运动看作是流体中的质点运动, 引入排斥力和挤压力来实现疏散过程中的避障、绕行以及推挤等行为, 提出一种从众模式来模拟疏散过程中的人员从众行为和惊慌行为. 为了减少连续模型的计算量, 采用了光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法对模型离散化, 每个行人用一个具有属性粒子来表示, 而墙面 (或障碍) 用一系列固定不动的粒子组成, 这样简化了行人粒子避障行为的规则. 模拟中, 针对不同的物理量, 采用不同的光滑核函数和核半径, 针对挤压力的计算, 推导出了一个二维情况下的光滑核函数. 然后利用面向对象程序设计方法组织程序, 用 OpenGL 实现结果的可视化. 从模拟效果看, 提出的模型和方法能够较准确地模拟出实际疏散中的一些现象, 如出口处的拥堵现象呈现出“拱形分布”、出口宽度的改变对疏散效果的影响以及疏散过程中的从众现象等.

在本文工作的基础上, 今后的研究将不断改进模型和算法, 例如进一步将火灾环境影响因素考虑到混合模型中, 以及空间运动模拟中的运动方向问题等. 希望能模拟出更多的实际疏散现象, 并将其应用到一些实际的疏散场景中.

References

1 Weng Wen-Guo, Yuan Hong-Yong, Fan Wei-Cheng. An evacuation cellular automation model based on mobile robot behavior. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(23):

- 2818–2822
(翁文国, 袁宏永, 范维澄. 一种基于移动机器人行为的人员疏散的元胞自动机模型. 科学通报, 2006, **51**(23): 2818–2822)
- 2 Helbing D, Molnár P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 1995, **51**(5): 4282–4286
 - 3 Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 2000, **407**(6803): 487–490
 - 4 Yong Gui, Huang Hai-Jun, Xu Yan. A cellular automata model of pedestrian evacuation in rooms with squared rhombus cells. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(1): 010506
(永贵, 黄海军, 许岩, 菱形网格的行人疏散元胞自动机模型, 物理学报, 2013, **62**(1): 010506)
 - 5 Song Wei-Guo, Zhang Jun, Xu Xuan, Liu Xuan, Yu Yan-Fei. An evacuation lattice gas model considering people distribution characteristics. *Progress in Nature Science*, 2008, **18**(5): 552–558
(宋卫国, 张俊, 胥旋, 刘轩, 于彦飞. 一种考虑人数分布特性的人员疏散格子气模型. 自然科学进展, 2008, **18**(5): 552–558)
 - 6 Ji Feng, An Ling-Ling, Deng Cheng, Gao Xin-Bo. Encryption for image watermarking based on multiple cellular automata. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(11): 1824–1830
(冀峰, 安玲玲, 邓成, 高新波. 基于多重元胞自动机的图像水印加密算法. 自动化学报, 2012, **38**(11): 1824–1830)
 - 7 Helbing D, Isobe M, Nagatani T, Takimoto K. Lattice gas simulation of experimentally studied evacuation dynamics. *Physical Review E*, 2003, **67**(Pt 2): 067101
 - 8 Rao Ping, Zhou Xiao-Dong, Zhu Kong-Jin, Yang Li-Zhong. Cellular automation simulation of pedestrian evacuation under complex building structure. *China Safety Science Journal*, 2011, **21**(12): 34–39
(饶平, 周晓冬, 朱孔金, 杨立中. 复杂建筑结构人员疏散的元胞自动机模拟研究. 中国安全科学学报, 2011, **21**(12): 34–39)
 - 9 Iclănzan D, Gog A, Chira C. Cell state change dynamics in cellular automata. *Memetic Computing*, 2013, **5**(2): 131–139
 - 10 Henderson L F. The statistics of crowd fluids. *Nature*, 1971, **229**(5284): 381–383
 - 11 Hughes R L. A continuum theory for the flow of pedestrians. *Transportation Research, Part B*, 2002, **36**(6): 507–535
 - 12 Hoogendoorn S, Bovy P H L. Gas-kinetic modeling and simulation of pedestrian flows. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2000, **1710**(1): 28–36
 - 13 Lucy L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astronomical Journal*, 1977, **82**: 1013–1020
 - 14 Gingold R A, Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1977, **181**: 375–389
 - 15 Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1992, **30**(1): 543–574
 - 16 Monaghan J J. Simulating free surface flows with SPH. *Journal of Computational Physics*, 1994, **110**(2): 399–406
 - 17 Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics and its Diverse applications. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2012, **44**(1): 323–346
 - 18 Wang An-Wen, Xu Fei, Zhang Yue-Qing. SPH method in numerical simulation of liquid-solid impact. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2012, **29**(4): 525–533
(王安文, 徐绯, 张岳青. SPH 方法在液固撞击数值模拟中的应用. 计算物理, 2012, **29**(4): 525–533)
 - 19 Adami S, Hu X Y, Adams N A. A transport-velocity formulation for smoothed particle hydrodynamics. *Journal of Computational Physics*, 2013, **241**(15): 292–307
 - 20 Wu Jian-Song, Bao Kai, Zhang Hui, Yang Rui. Numerical model of staircase flow based on the SPH method. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2011, **51**(6): 802–808
(吴建松, 鲍凯, 张辉, 杨锐. 基于 SPH 方法的阶梯流数值模型. 清华大学学报 (自然科学版), 2011, **51**(6): 802–808)
 - 21 Müller M, Charypar D, Gross M. Particle-based fluid simulation for interactive applications. In: *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation* (2003). Switzerland: Eurographics Association Aire-la-Ville, 2003, 154–159



苗志宏 中国人民武装警察部队学院消防工程系教授。2001 年获得北京师范大学数学系理学博士学位。主要研究方向为模糊控制, 火灾预防与控制。本文通信作者。E-mail: miaozhh@21cn.com

(**MIAO Zhi-Hong** Professor at Chinese People's Armed Police Forces Academy. He received his Ph.D. degree in science from Beijing Normal University in 2001. His research interest covers fuzzy control, fire prevention and control. Corresponding author of this paper.)



李智慧 中国人民武装警察部队学院讲师。2013 年获得北京大学地球与空间科学学院博士学位。主要研究方向为火灾数值模拟和灭火救援仿真。

E-mail: lizhihui@163.com
(**LI Zhi-Hui** Lecturer at Chinese People's Armed Police Forces Academy. She received her Ph.D. degree from Peking University in 2013. Her research interest covers fire numerical simulation and fire fighting simulation training.)