

# 紧急状态下基于邻域空间的人群模拟

付剑博,蒋菱

(四川大学计算机学院,成都 610064)

## 摘要:

人群的行为决策不仅由其自身特性决定,而且还受到邻域内人群的影响。当人群处于紧急状态下,诸如地震、火灾、爆炸、恐怖袭击等突发事件时,人群根据从外部环境中获取的知识选择符合自身情况的疏散方案紧急疏散。由于没有考虑人群行为的一致性,之前的方法无法真实地模拟处于紧急状态下的人群的运动特点。通过提出邻域空间和倾向速度的概念构建人群在紧急状态下的行为决策模型,并为紧急状态下的人群模拟提出新的模拟算法。

## 关键词:

紧急疏散;人群模拟;邻域空间;倾向速度

## 0 引言

人群模拟主要通过虚拟现实的方式对人群运动特点进行还原和模拟,并根据模拟结果进行诸如建筑物内部结构安全性评测、公共设施摆放位置合理性检测以及商场内部安全出口设置的科学性评估。如何真实地模拟紧急状态下的人群成为目前人群模拟技术的一个重要课题。

## 1 认识人群模拟技术

已经熟知的社会力模型<sup>[1]</sup>将人群个体当作质点并把人群之间的影响量化为相互作用力计算。但是这类方法由于缺乏对人群个体自身决策因素的考虑和分析,在实验结果中出现了较多的聚集现象而忽略了人群个体根据环境的改变动态改变决策的过程。

流体模型<sup>[2]</sup>则把人群看成流体并构建人群模拟模型进行仿真。该类方法在模拟大规模人群的群体性行为诸如聚集、行为趋同等方面具有高效、逼真的特点。但由于缺乏对行为决策过程的体现而无法体现个体行为的差异性特点。

本文基于邻域空间,从个体行为决策出发,综合考虑个体自身因素以及邻域对个体行为决策过程产生的影响,更加准确地描述了人群个体在紧急状态下疏散

时的行为决策特点。

## 2 算法实现

本文用  $Agent_i$  代表第  $i$  个人群个体,为方便模拟和计算,本文用圆柱体表示模拟中的人群个体。 $Agent_i$  携带的信息用集合  $\{r_i, \vec{p}_i, \vec{v}_i, \vec{v}_i^{pre}\}$  表示。其中  $r_i$  表示  $Agent_i$  对应的圆柱体的底面半径;  $\vec{p}_i$  表示  $Agent_i$  在模拟空间内的位置;  $\vec{v}_i$  表示  $Agent_i$  在模拟空间内的当前速度; 倾向速代表人群个体的运动趋势,并用  $\vec{v}_i^{pre}$  表示  $Agent_i$  的倾向速度。求解倾向速度的过程由主观影响因子和客观影响因子控制。 $r_{ij} = r_i + r_j$  表示  $Agent_i$  与  $Agent_j$  代表的圆柱体底面半径之和;  $\vec{p}_{ij} = \vec{p}_i - \vec{p}_j$  表示  $Agent_i$  与  $Agent_j$  位置向量之差;  $p_{ij}$  表示  $Agent_i$  与  $Agent_j$  之间的欧式距离;  $v_{ij} = v_i - v_j$  表示  $Agent_i$  与  $Agent_j$  的相对速度。 $Norm(\cdot)$  表示向量单位化;  $\|\vec{v}\|$  表示向量  $\vec{v}$  的模。本文算法将行为决策过程转化为求解倾向速度  $\vec{v}_i^{pre}$  的过程。

本文算法将影响人群个体倾向速度的因素分为两类:客观影响因子  $\vec{E}_i$  和主观影响因子  $\vec{I}_i$ 。主观影响因子为邻域空间对人群个体产生的影响。客观影响因子体

现为不同人群有不同的决策逻辑,同时在诸如是否熟悉建筑物内部构造等先验知识方面也存在诸多差异。人群根据是否掌握室内空间出口位置信息被分为两个集合:awareness group 和 ignorance group。其中 awareness group 代表考虑邻域作用的群体,而 ignorance group 代表不考虑邻域作用的群体。

本文引入邻域空间  $\Phi_i$ 。在邻域空间  $\Phi_i$  中,  $Agent_i$  表示人群中的第  $i$  个个体。在以  $Agent_i$  作为中心且包含  $N$  个个体的邻域空间内,  $\vec{E}_i \in R^{3 \times N}$  表示外界客观影响因子;主观影响因子和客观影响因子分别用三维列向量  $\vec{I}_i$  和  $\vec{E}_i$  表示,并通过权重因子  $\alpha$  来控制  $\vec{I}_i$  和  $\vec{E}_i$  所占比重,如公式(1)所示。

$$\Phi_i = [\alpha \times \vec{E}_i, 1 - \alpha \times \vec{I}_i] \quad (1)$$

## 2.1 求解倾向速度( $\vec{v}_i^{pre}$ )

$Agent_i$  的倾向速度  $\vec{v}_i^{pre}$  表达了某一时刻个体  $Agent_i$  的运动趋势。求解该运动趋势的过程主要依赖于来自邻域的客观影响因子和来自于自身固有属性的主观影响因子。

求解  $\vec{v}_i^{pre}$  的思想如图 1 所示。邻域空间  $\Phi$  由一个  $3 \times (N+1)$  的矩阵表示。如公式(1)所示,在  $\Phi_i$  表示的矩阵中,  $\alpha \times \vec{E}_i$  子矩阵表示加权客观影响因子,这部分主要控制邻域对倾向速度产生的影响;  $(1-\alpha) \times \vec{I}_i$  作为加权主观影响因子控制不对称信息对倾向速度造成的影响。

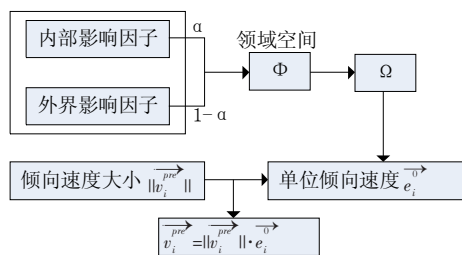


图1 求解倾向速度的过程

## 2.2 求解客观影响因子 $\vec{E}_i$

现有研究<sup>[3]</sup>表明,人群个体受到邻域内部有限范围内指定数目个体的行为影响。个体根据邻域内其他人群个体的位置、速度信息进行行为决策。本文构建了

$Agent_i$  的邻域空间  $\psi_i$  如公式(2)所示,  $\psi_i$  包含邻域内人群个体的位置、速度信息。这种基于  $\Phi$  构建的个体之间的拓扑结构对行为决策过程产生了重要影响。

$$\psi_i = \{(\vec{p}_{i1}, \vec{v}_{i1}), \dots, (\vec{p}_{iN}, \vec{v}_{iN})\} \quad (2)$$

$N$  表示  $\psi_i$  内的人群个体数目,  $N$  的大小设置为 6 或者 7 较为合适<sup>[3]</sup>。  $\vec{E}_i$  采用公式(3)计算:

$$\vec{E}_i = [\vec{y}_{i1}, \vec{y}_{i2}, \dots, \vec{y}_{iN}] \quad (3)$$

$\vec{y}_{ij}$  表示  $\psi_i$  内第  $j$  个个体  $Agent_{ij}$  的相对位置权重向量。  $\vec{y}_{ij}$  采用公式(4)计算。

$$\vec{y}_{ij} = \vec{w}_{ij} \cdot \text{Norm}(\vec{p}_{ij}) \quad (4)$$

权重参数向量由  $w_{D(i,j)}, w_{V(i,j)}, w_{P(i,j)}$  三个分量构成,如公式(5)所示。

$$\vec{w}_{ij} = (\vec{w}_{D(i,j)}, \vec{w}_{V(i,j)}, \vec{w}_{P(i,j)}) \quad (5)$$

$w_{D(i,j)}$  表示  $\psi_i$  内  $Agent_i$  和  $Agent_{ij}$  之间的距离产生的权重参数;  $w_{V(i,j)}$  表示  $\psi_i$  内整体平均速度与个体速度产生的权重参数;  $w_{P(i,j)}$  表示  $\psi_i$  内人群个体相对  $Agent_i$  的朝向与人群整体平均速度产生的权重参数。

$$\vec{w}_{D(i,j)} = \frac{A}{\|\vec{p}_{ij} - \vec{r}_{ij}\|} \quad (6)$$

$$\vec{w}_{V(i,j)} = \exp \left[ \frac{-(\|\vec{v}_{ij} - \vec{v}\|)}{B} \right] \quad (7)$$

$$\vec{w}_{P(i,j)} = \exp \left[ \frac{-\|\text{norm}(\vec{p}_{ij}) - \text{norm}(\vec{v})\|}{C} \right] \quad (8)$$

公式(6)~(8)中,  $A, B, C$  三个常量控制权重参数向量  $\vec{w}_{ij}$  的求解。  $\psi_i$  内  $Agent_{ij}$  对  $Agent_i$  产生的权重影响与距离  $p_{ij}$  成反比例关系;  $Agent_i$  的运动方向上与  $Agent_{ij}$  的运动方向越趋同,  $Agent_{ij}$  对  $Agent_i$  倾向速度产生的权重影响就越大; 由于人群个体对视线范围内邻域个体表现出的行为有更强的确信度<sup>[4]</sup>, 相对位置向量  $\vec{p}_{ij}$  与邻域人群的平均运动趋势偏差越大,  $Agent_{ij}$  对  $Agent_i$  倾向速度产生的影响就越小。

## 2.3 求解主观影响因子 $\vec{I}_i$

人群个体需要规避障碍物如拥挤的人群、损坏的室内设施等。本文引入 Navigation Mesh Method<sup>[5]</sup> 和 Reciprocal Velocity Obstacles(RVO)<sup>[6]</sup>, 选择最优路径方案实现路径规划。有  $M$  条通向出口的不同路径, 长度分

别为  $L_1, L_2, \dots, L_M, P_k$  表示选择第  $k$  条路径的概率,  $P_k$  的计算公式如公式(9)所示。在所有备选路径方案中, 路径长度越小则被选择的可能性越大。 $Agent_i$  从备选路径集合  $\{Route_1, Route_2, \dots, Route_M\}$  中选择最优路径  $Route_{opt}$ 。

$$P_k = \frac{f(k)}{\sum_{i=1}^M f(i)}, \text{ 其中 } f(k) = \frac{\sum_{i=1}^M L_i}{L_k}, Route_{opt} = Route_i, \text{ 且}$$

$$P_i = \max\{P_1, P_2, \dots, P_M\} \quad (9)$$

## 2.4 求解权重因子 $\alpha$

权重因子  $\alpha$  控制  $\vec{E}_i$  和  $\vec{I}_i$  在  $\Phi_i$  中所占的比例。awareness group 中个体的  $\alpha$  值为 0, 表明人群在紧急状态下倾向于坚持自身的决策而忽略邻域  $\psi$  产生的影响。本文 ignorance group 的  $\alpha$  值成 Gaussian 分布。

## 2.5 在 $\Phi_i$ 中求解单位倾向速度 $\vec{e}_i$

$\vec{e}_i$  的求解问题可以实例化为最大化目标函数的过程, 如公式(10)所示:

$$\max \sum_{j=1}^N \left[ \left( \vec{e}_i^T \cdot \vec{\Phi}_{ij} \right)^2 \right], \text{ s.t. } \|\vec{e}_i\| = 1 \quad (10)$$

其中  $\vec{\Phi}_{ij}$  是  $\Phi_i$  的第  $j$  个元素。而求解最大化目标函数的问题等同于求解最大化矩阵  $\Phi_i \Phi_i^T$ , 因此有:

$$\vec{e}_i = \vec{\Omega}(\Phi_i \Phi_i^T) \quad (11)$$

其中  $\Omega$  表示  $\Phi_i \Phi_i^T$  的最大特征值对应的特征向量。

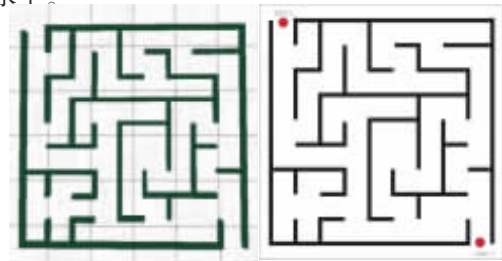
awareness group 人群由于不会参考领域内人群的运动特征, 其倾向速度大小  $\|\vec{v}_i^{pre}\|$  为最大速度大小  $v_{max}$ ; 而 ignorance group 中的人群个体的倾向速度大小  $\|\vec{v}_i^{pre}\|$  置为  $\psi_i$  内人群的平均速度大小  $\|\vec{v}\|$ 。

## 3 实验结果

实验场景为包含两个出口的方形迷宫, 如图 2 所示。实验模拟时间为 120s, awareness 比例定义为 awareness group 个体数占总模拟规模的比例。其中逃出为固定时间内最终成功逃离迷宫人数所占总人群模

拟规模的比例。ignorance group 人群完全忽略邻域空间  $\Phi$  的作用而漫无目的地在迷宫中寻找出口位置, 如图 3 所示; 考虑邻域空间  $\Phi$  影响如图 4 所示, 人群个体参考邻域内人群运动趋势并与邻域保持行为一致性。

紧急状态下人群更加倾向于参考邻域内群体的运动趋势而表现出明显的行为一致性如聚集现象。如图 5 所示, 当没有邻域空间  $\Phi$  影响时, 个体之间没有交流而逃出率处于较低水平; 考虑邻域空间  $\Phi$  的影响时, 个体之间相互交换信息并保持行为一致性而逃出率处于较高水平。



(a) 迷宫场景实景图 (b) 迷宫场景剖面图

图 2



图 3 无邻域空间  $\Phi$  时人群的运动



图 4 有邻域空间  $\Phi$  时人群的运动

## 4 结语

本文基于邻域空间提出了一种构建紧急状态下人群行为模型方法。为模拟人群个体找到通往出口的路径的行为, 本文构建了邻域空间  $\Phi$  求解倾向速度  $\vec{v}_i^{pre}$ 。

对于控制内部影响因子  $\vec{I}_i$  和外界影响因子  $\vec{E}_i$  的参数  $\alpha$ , 动态平衡内部影响因子和外界影响因子比重,

进一步改善模拟效果。另外由于多层室内空间在内部结构上存在复杂性的特点, 如何将这些因素与本文算法的邻域空间结合形成更好的人群模拟效果是下一步

#### 参考文献:

- [1] Sean Curtis, Basim Zafar, Dinesh Manocha. Right of Way-Asymmetric Agent Interactions in Crowds[J]. The Visual Computer, 2013, 29(12): 1277~1292
- [2] Mao Tian-lu, Jiang Hao, Li Jian, et al. Parallelizing Continuum Crowds[C]. Virtual Reality Software and Technology: Proceedings of the 17th ACM Symposium, 2010, 4: 231~234
- [3] S J Guy, M Lin, D Manocha, et al. PLEde-Srians: A Least-Effort Approach to Crowd Simulation[C]. Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, 2010: 119~128
- [4] A Johansson, D Helbing and P K Shukla. Specification of the Social Force Pedestrian Model by Evolutionary Adjustment to Video Tracking Data [J]. Advances in Complex Systems, 2007, 10(101): 271~288
- [5] Van Toll, Wouter G., Cook, et al. A Navigation Mesh for Dynamic Environments[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2012, 23(6): 535~546
- [6] Van den Berg, M Lin, D Manocha, et al. Reciprocal N-body Collision Avoidance[J]. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2011, 70: 3~19

#### 作者简介:

付剑博(1989-), 男, 江西萍乡人, 硕士研究生, 研究方向为视觉合成与图形图像处理

蒋菱(1989-), 女, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向为视觉合成与图形图像处理

收稿日期: 2014-11-20

修稿日期: 2014-12-05

## Crowd Simulation Based on Neighbor Space under Emergency Situations

FU Jian-bo, JIANG Ling

(Department of Computer Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064)

#### Abstract:

Crowd's decision-making process is not only based on the attributes of the agent, but also the effects produced by the neighborhood. Agents evacuate according to the cognitive knowledge obtained from the environment. Recent researches are not capable of simulating characteristics of the crowd's motion realistically for the lack of consideration of behavioral collectiveness between agents. Proposes the novel conception of the neighbor space and the preferred velocity in order to create a new decision-making model for the crowd under emergency situations. And introduces a new algorithm of crowd simulation which plays an important role in decision-making process.

#### Keywords:

Evacuation; Crowd Simulation; Neighbor Space; Preferred Velocity