

# 基于紧急状态下信息不对称性的人群模拟

付剑博, 蒋 菱, 张严辞

(四川大学计算机学院, 成都 610065)

**摘 要:** 人群模拟技术在模拟灾难发生时人群的疏散、预测突发事件等方面都有广泛的应用。本文基于智能体的人群模拟模型, 针对紧急状态下室内空间提出了一种新的模型。由于室内空间内的不同群体对其结构的熟悉程度存在差异, 这使得人群在选择疏散路径时存在多样性。基于该差异性本文提出了信息不对称性的概念。人群个体受到周围邻域内群体的影响而参考邻域内群体的运动趋势并结合自身属性形成倾向速度。倾向速度代表人群个体的运动趋势。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。邻域群体构成了客观影响因子, 而人群个体的属性则构成了主观影响因子。本文引入有限状态机逻辑来体现人群决策的改变。通过本文实验的模拟效果, 证明了考虑信息不对称性在紧急状态下人群模拟中的必要性。

**关键词:** 人群模拟; 信息不对称; 感知空间; 倾向速度

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 0490-6756(2015)03-0529-09

## Crowd simulation incorporating information asymmetry under emergency situations

FU Jian-Bo, JIANG Ling, ZHANG Yan-Ci

(College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Crowd simulation technology is widely used in many aspects such as simulating the crowd evacuation during disasters, predicting emergency and so on. In this paper, the authors present a new model based on agent-based model to simulate the crowd behavior under emergency situations in a confined space. Agents differ in aspect of whether having the knowledge of the topological structure of the confined space, which brings in the variance of evacuation routes. In this paper, authors proposed the conception of information asymmetry. Crowd combines the effect of the neighborhood and itself to generate the preferred velocity which indicates the motion trend. The solution process of preferred velocity is controlled by the neighborhood which is defined as the subjective factor, and the agent's attributes which is treated as the objective factor. At the same time, a finite state machine is employed to realize the decision changing. The information asymmetry is necessary in crowd simulation under emergency situations according to the experiments in this paper.

**Key words:** Crowd simulation; Information asymmetry; Perceived space; Preferred velocity

收稿日期: 2014-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(61103137); 国家"863"计划资助项目(2012AA011801)

作者简介: 付剑博(1989—), 男, 江西萍乡人, 硕士研究生, 研究方向为大规模人群模拟、虚拟现实。E-mail: fujianbo08@126.com

通讯作者: 张严辞。E-mail: yczhang@scu.edu.cn

## 1 引言

近年来人群模拟课题越来越受关注. 当发生诸如地震、火灾、暴力事件等突发事件时, 如何正确地疏散人群撤离现场并将生命财产损失控制到最小成为一个亟待解决的难题. 模拟规模巨大、模拟场景复杂、人群行为不可预测性等人群众模拟的特点使得紧急状态下的室内人群疏散模拟依然是一个开放性难题. 在人群模拟的主要研究方向和趋势方面<sup>[1-4]</sup>, 基于紧急状态的人群模拟研究是一个十分有价值的课题<sup>[5-7]</sup>.

人群模拟中信息不对称性是一个影响模拟真实效果的重要因素, 这点在现有的研究中往往被忽视. 例如, 在客流量较高的商场内, 不同人群对商场内部拓扑结构的熟悉程度各不相同, 在疏散过程中则体现为人群疏散路径的不同. 当未发生紧急事件时, 人群有充足的时间寻找通往出口的可能逃离路径; 如图一所示, 在紧急状态下人群处于紧张状态而更加倾向跟随周围人群而体现出行的一致性<sup>[8]</sup>. 现有的人群模拟研究未对模拟中存在的信息不对称性进行讨论, 而事实上人群中人与人在行为决策上存在相互作用<sup>[9]</sup>.

本文通过在邻域空间内引入感知空间, 将邻域对人群个体行为的影响进行量化; 通过综合人群个体的主观影响因子和客观影响因子, 将感知空间对人群个体决策的影响进行量化, 在考虑个体主观意愿的同时将邻域人群个体产生的影响纳入计算, 体现了在紧急状态下的疏散过程中人群的行为一致性以及相互之间的差异性.



图 1 跟随、聚集现象

Fig. 1 Follow behavior and collective behavior

## 2 相关工作

人群模拟技术运用广泛, 如建筑设计、疏散模拟、城市规划、等. 现有的人群模拟技术有强调个体的智能体模型<sup>[10]</sup>、社会力模型<sup>[11]</sup>以及元胞模型<sup>[6]</sup>等.

Hebbling 提出的社会力模型<sup>[12]</sup>将人群个体当做质点. 人群行为决策被表达为心理模型和质点之间排斥力的综合作用. 考虑邻域的作用并计算周围个体对当前质点速度的影响达到了较为逼真的模拟效果. Van den Berg, Lin 和 Manocha 等人在计算社会力的同时结合局部空间的碰撞避免方法得到了较好的人群模拟效果<sup>[13]</sup>. 这类方法都将邻域作为重要影响因子纳入人群模拟模型<sup>[14]</sup>.

从流体模拟出发, 连续介质方法把人群看成流体<sup>[15]</sup>或者气体<sup>[16]</sup>构建人群模拟模型. 该方法在模拟大规模人群行为时具有高效、逼真的特点, 但是没有强调人群个体之间决策逻辑的差异性从而无法体现人群个体行为的特点.

基于智能体的人群模拟模型<sup>[17]</sup>在体现人群个体决策真实性方面具有适应多种发生紧急时间的场合的特点, 因而其作为一种有突出优势的模型被广泛应用于人群模拟<sup>[7]</sup>. 该类模型从个体决策出发, 综合考虑个体以及个体邻域因素, 更加准确地描述个体的行为决策特点. 基于场景中是否有障碍物, Wagner<sup>[9]</sup>讨论了在不同场景复杂度的条件下, 基于智能体的人群模拟模型如何真实模拟人群行为. 人群在紧急状态下将没有多余的时间交换彼此携带的环境信息, 形成了紧急状态下信息的不对称性<sup>[18]</sup>.

碰撞避免问题也是人群模拟技术的重要内容. 人群模拟中碰撞避免的研究在近几年获得了较快发展. 从智能机器人研究领域衍生的速度模型, 在由人群中个体速度集合  $\{\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_N\}$  构成的速度求解空间中求解满足碰撞避免条件的全局最优解  $\vec{v}_{opt}$ <sup>[13]</sup>.

## 3 算法概述

在模拟环境中, 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, 本文用  $\vec{v}_i^{pre}$  表示  $Agent_i$  的倾向速度;  $r_{ij} = r_i + r_j$  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;  $\vec{v}_{ij} = \vec{v}_i - \vec{v}_j$  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:

(1) 客观影响因子  $\vec{E}_i$ : 人群不断地从周围环境获取信息如邻域内的人群运动趋势、人流量以及人群密度等. 这些信息综合作用并对人群决策过程产生影响使决策结果趋同化而产生行为一致性. 这体现在当人群所处环境相似时, 人群将出现聚集、跟随的一致性行为特点.

(2) 主观影响因子  $\vec{I}_i$ : 在获取先验知识和获取引导指向性信息方面, 人群个体之间对该类信息的获取时间、数量均存在诸多差异. 针对这部分不对称的信息, 本文主要讨论了人群对室内空间出口位置信息的不对称性. 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.

如图 2 所示, 人群在紧急状态下的决策过程由含有五个转换状态的有限状态机控制. 关于有限状态机的内容以及状态之间的转换机制将在第 5 节详细介绍.

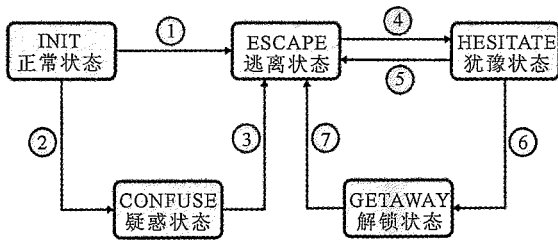


图 2 构建人群行为模型的有限状态机

Fig. 2 FSM to construct crowd behavior model

有限状态机的核心过程是求解不同状态转换条件下的倾向速度  $\vec{v}_i^{pre}$ .

$$\vec{v}_i^{pre} = \|\vec{v}_i^{pre}\| \cdot \vec{e}_i^0 \quad (1)$$

式(1)中计算最终速度  $\vec{e}_i^0$ , 本文引入感知空间  $\varphi_i$ . 在感知空间  $\varphi_i$  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, 如式(2)所示.

$$\varphi_i = [\alpha * \vec{E}_i, (1 - \alpha) * \vec{I}_i] \quad (2)$$

## 4 求解倾向速度

$Agent_i$  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 2 所示. 感知空间  $\varphi$  由一个  $3 * (N + 1)$  的矩阵表示. 如式(2)所示, 在  $\varphi_i$  表示的矩阵中,  $\alpha * \vec{E}_i$  子矩阵表示加权客观影响因子, 主要控制邻域对倾向速度产生的影响;  $(1 - \alpha) * \vec{I}_i$  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.

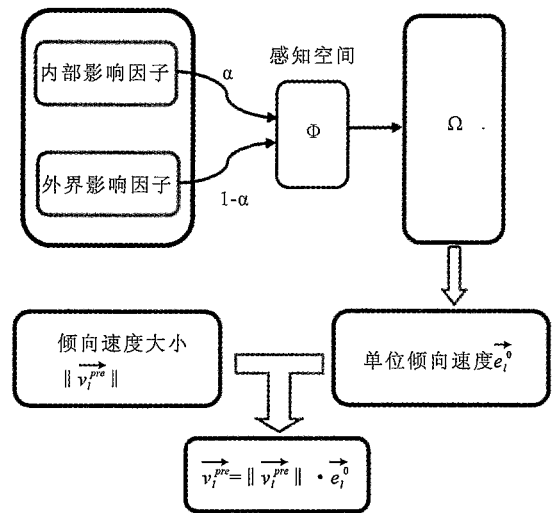


图 3 求解倾向速度的过程

Fig. 3 Calculating progress of preferred velocity

### 4.1 求解客观影响因子

现有研究<sup>[19]</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. Awareness group 群体与邻域内群体保持行为一致性. 处于人群中的个体根据邻域内其他人群个体的位置、位置倾向信息进行行为决策. 本文构建了  $Agent_i$  的邻域空间  $\phi_i$ , 且不同个体之间  $\phi_i$  不相同. 如式(3)所示,  $\phi_i$  包含邻域内人群个体的位置、速度信息. 这种基于  $\varphi_i$  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.

$$\phi_i = \{(\vec{p}_{i1}, \vec{v}_{i1}), (\vec{p}_{i2}, \vec{v}_{i2}), \dots, (\vec{p}_{iN}, \vec{v}_{iN})\} \quad (3)$$

$N$  表示  $\phi_i$  内的人群个体数目. 研究表明,  $N$  的大小设置为 6 或者 7 较为合适<sup>[1]</sup>.

对  $Agent_i$  而言,  $\vec{E}_i \in R^{3 \times N}$  表示  $\phi_i$  对其产生的客观影响的量化.  $\vec{E}_i$  采用式(4)计算:

$$\vec{E}_i = [\vec{y}_{i1}, \vec{y}_{i2}, \dots, \vec{y}_{iN}] \quad (4)$$

$\vec{y}_{ij}$  表示  $\phi_i$  内第  $j$  个个体  $Agent_{ij}$  的相对位置权重向量.  $\vec{y}_{ij}$  采用式(5)计算.

$$\vec{y}_{ij} = \vec{w}_{ij} \cdot \text{Norm}(\vec{p}_{ij}) \quad (5)$$

权重参数向量由  $\vec{w}_{D(i,j)}$ ,  $\vec{w}_{V(i,j)}$ ,  $\vec{w}_{P(i,j)}$  三个分量构成, 如式(6)所示.

$$\vec{w}_{ij} = (\vec{w}_{D(i,j)}, \vec{w}_{V(i,j)}, \vec{w}_{P(i,j)}) \quad (6)$$

$\vec{w}_{D(i,j)}$  表示  $\phi_i$  内  $Agent_i$  和  $Agent_{ij}$  之间的距离产生的权重参数;  $\vec{w}_{V(i,j)}$  表示  $\phi_i$  内整体平均速度与个体速度产生的权重参数;  $\vec{w}_{P(i,j)}$  表示  $\phi_i$  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.

$$\vec{w}_{D(i,j)} = \frac{A}{\|\vec{p}_{ij} - \vec{r}_{ij}\|} \quad (7)$$

$$\vec{w}_{V(i,j)} = \exp\left[-\frac{(\|\vec{v}_{ij} - \vec{v}\|)}{B}\right] \quad (8)$$

$$\vec{w}_{P(i,j)} = \exp\left[-\frac{\|\text{norm}(\vec{p}_{ij}) - \text{norm}(\vec{v})\|}{C}\right] \quad (9)$$

式(7)~(9)中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三个常量控制权重参数向量  $\vec{w}_{ij}$  的求解.  $\phi_i$  内  $Agent_{ij}$  对  $Agent_i$  产生的权重影响与距离  $\vec{p}_{ij}$  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>[13]</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.

#### 4.2 求解主观影响因子

人群根据对出口信息的熟悉程度求解一条合理的逃离路线.  $\vec{I}_i$  代表的方向即是  $Agent_i$  当前的疏散速度方向.

Awareness group 个体通过从视野范围内获取的信息决策如何抵达目的地. 在此期间, 个体需要考虑如何规避疏散路径上的障碍物如拥挤的人群、损坏的室内设施等等. 本文通过引入 Navi-

gation Mesh Method<sup>[20]</sup> 和 Reciprocal Velocity Obstacles(RVO)<sup>[13]</sup>, 从所有的路径方案中选择最优路径方案实现路径规划. 设有  $M$  条通向出口的不同路径, 其长度分别为  $L_1, L_2, \dots, L_M$ ,  $P_k$  表示选择第  $k$  条路径的概率,  $P_k$  的计算公式如式(10)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  $\{R_1, R_2, \dots, R_M\}$  中选择最优路径  $R_{out_{opt}}$

$$P_k = \frac{f(k)}{\sum_{i=1}^M f(i)}, \text{ 其中, } f(k) = \frac{\sum_{i=1}^M L_i}{L_k} \quad (10)$$

$$R_{opt} = R_i, P_i = \max\{P_1, P_2, \dots, P_M\} \quad (11)$$

本文对 ignorance group 个体构建随机速度逻辑模拟紧急状态下的人群运动规律.

#### 4.3 求解权重因子

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  $\phi$  产生的影响. 本文 ignorance group 的  $\alpha$  值成 Gaussian 分布. 求解  $\alpha$  的逻辑并不适用于处于解锁(GETAWAY)状态下的人群个体, 这部分个体的  $\alpha$  计算方法将在第 5.5 节中给予具体说明.

#### 4.4 在领域中求解单位倾向速度

以本文构建的  $\phi_i$  为基准,  $\vec{e}_i^0$  的求解问题可以实例化为最大化目标函数的过程, 如式(12)所示.

$$\max \sum_{j=1}^N [(\vec{e}_i^0)^T \cdot \vec{\varphi}_{ij}]^2, \text{ s. t. } \|\vec{e}_i^0\| = 1 \quad (12)$$

其中,  $\vec{\varphi}_{ij}$  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  $\varphi_i \varphi_i^T$ , 因此有

$$\vec{e}_i^0 = \Omega(\varphi_i \varphi_i^T) \quad (13)$$

其中,  $\Omega$  表示  $\varphi_i \varphi_i^T$  的最大特征值对应的特征向量.

Awareness group 人群由于不会参考邻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  $\|\vec{v}_i^{pre}\|$  置为邻域  $\phi_i$  内人群的平均速度大小  $\|\vec{v}\|$ . 倾向速度  $\|\vec{v}_i^{pre}\|$  并没有经过碰撞避免逻辑的处理, 这在有障碍物的模拟场景中将会出现个体之间相互穿过的不实现象. 本文结合 RVO 方法, 模拟结果(如图 4)实现了人与人之间不会互相穿过的真实效果.

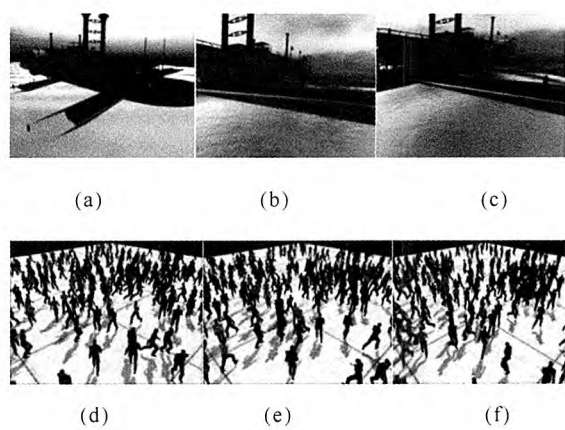


图 4 游艇和平地的 RVO 模拟效果

Fig. 4 The results of simulation on the yacht and the flat ground

游艇场景图 4(a)~(c)中有较为复杂的层级结构, 人群个体代表的三维模型在移动过程中将不会发生明显的穿插现象; 平面场景图 4(d)~(f)没有复杂的层级结构, 可直观地人群个体的三维模型之间不会发生明显的穿插现象。

5 有限状态机的实现

不同状态下求解倾向速度  $\parallel \vec{v}_i^{pre} \parallel$  的方法各不相同。本章节将重点阐述如何在不同状态机状态下求解倾向速度  $\parallel \vec{v}_i^{pre} \parallel$ 。

5.1 正常状态

开始人群处于正常状态 (INIT STATE)。当人群处于正常状态时表现为在模拟场景中漫游。当人群抵达目的地后将生成下一个目的地的位置信息, 人群决策并向该位置移动。当发生紧急事态时, awareness group 个体直接进入逃离状态 (ESCAPE STATE) 而 ignorance group 个体则进入疑惑状态 (CONFUSE STATE)。

5.2 疑惑状态

只有 ignorance group 个体才进入疑惑状态。进入疑惑状态后, 人群个体在一定的时间段内将保持疑惑状态不改变, 本文将改时间段定义为 CONFUSETIME。在 CONFUSETIME 内  $\parallel \vec{v}_i^{pre} \parallel$  为 0, 这使得个体不会朝任何方向移动而模拟遇到紧急事态时人群停下并观察周围环境做出决策的过程。在疑惑状态结束时, 使用在第 4 节中提出的求解方法计算倾向速度  $\parallel \vec{v}_i^{pre} \parallel$ 。此时进入逃离状态 (ESCAPE STATE)。

5.3 逃离状态

在紧急状态下, 人群大部分时间处于逃离状态。为进一步提高模拟的真实性, 本文对邻域  $\psi$  作了细微处理: 将人群个体周围有限范围内不满足条件  $\vec{p}_{ij} \cdot \vec{v}_i > 0$  的个体剔除。这样处理过后使得  $\vec{v}_i^{pre}$  仅受到处于视野范围内的邻域影响。但是当处于非逃离状态时, 人群环顾四周并不断地获取所处位置周围的环境信息而做出决策。所以仅在逃离状态下才对邻域空间作  $\vec{p}_{ij} \cdot \vec{v}_i > 0$  的剔除处理。

在逃离过程中, 随着逃离时间的增加, 人群将逐渐对当前决策失去信心, 如前方行进道路过于拥挤、被拥挤人群卡住而行进速率缓慢等。针对这种现象, 本文提出了忍耐时间  $\Delta t$  和忍耐距离  $d_i^{\Delta}$  变量。  $d_i^{\Delta}$  表示在  $\Delta t$  时间内个体的移动距离,  $\epsilon$  是外部常量参数。当  $d_i^{\Delta} < \epsilon$  时, 人群个体将重新决策。通过设置不同的常量参数  $\epsilon$  (如表 1 所示) 模拟人群个体坚持 (如图 5)、改变原有的决策 (如图 6) 所需时间不同的现象,  $\epsilon$ 、 $d_i^{\Delta}$  的单位为单位距离,  $\Delta t$  的单位为 s。当人群个体对原有的决策失去信心时将进入犹豫状态 (HESITATE STATE) 而重新决策。 awareness group 个体比 ignorance group 个体对原来的决策拥有更强的信心。

表 1 不同  $\epsilon$  下的忍耐时间  $\Delta t$  和忍耐距离  $d_i^{\Delta}$

Tab. 1  $d_i^{\Delta}$  and  $\Delta t$  for different crowd scale and  $\epsilon$

$\epsilon$ (单位距离)	$\Delta t$ (s)	模拟规模 (人)	$d_i^{\Delta}$ (单位距离)
1.6	2.945	100	1.646
3.2	5.895	100	3.249
4.8	8.842	100	4.899
1.6	2.944	200	1.655
3.2	5.912	200	3.274
4.8	8.853	200	4.923
1.6	3.012	300	1.625
3.2	6.122	300	3.237
4.8	8.944	300	4.865



图 5 人群个体坚持原有的决策

Fig. 5 Agent sticks to the original decisions



图 6 人群个体改变原有的决策

Fig. 6 Agent changes the decision



### 5.4 犹豫状态(HESITATE STATE)

处于犹豫状态的个体重新决策其的结果可能产生新路径或者坚持原有路径. 在犹豫状态下, awareness group 和 ignorance group 的计算逻辑互不相同.

Awareness group 个体采用第 4.4 节中描述的方法重新选择路径. 由于当人群开始质疑当前决策结果并重新开始决策时, 对坚持原来决策的可能性将会降低. 所以当处于犹豫状态时, 当前选择的途径的可能性将随着处于犹豫状态的时间增加而减小. 当重新决策完成时返回逃离状态(ESCAPE STATE).

Ignorance group 个体处于犹豫状态时, 取与邻域内人群平均速度  $\vec{v}$  完全相反的速度  $-\vec{v}$  作为内部影响因子  $\vec{I}_i$  参考向量. 之后个体进入逃离状态(ESCAPE STATE).

### 5.5 解锁状态

仅 ignorance group 个体才进入该状态. 解锁状态用来辅助无法脱离拥挤人群的个体脱离. 该状态有一个时间常量来控制个体处于解锁状态的时间, 本文将其定义为  $GETAWAYTIME$ . 当处于解锁状态时, 权重因子  $\alpha$  为 0 且内部影响因子  $\vec{I}_i$  不会随外部条件改变而改变. 直到解锁状态结束, 返回逃离状态(ESCAPE STATE).

## 6 实验结果

为体现本文提出算法的正确性和高效性, 本文设计了实验 1~实验 4.

**实验 1 有无感知空间  $\varphi$  的对比实验.**

实验 1 场景为包含两个出口的方形迷宫, 如图 7 所示. 人群忽略受感知空间  $\varphi$  和考虑感知空间  $\varphi$  影响的两类.

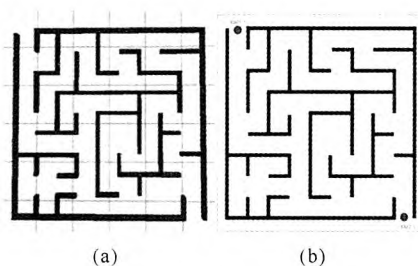


图 7 (a) 迷宫场景实景图; (b) 迷宫场景剖面图  
Fig. 7 (a) The realistic scene of the maze; (b) The profile map of the maze

实验 1 模拟时间为 120 s, 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. 忽略感知空间  $\varphi$  影响, 如图 8 所示, ignorance group 人群完全忽略邻域空间  $\varphi$  的作用而漫无目的地在迷宫中寻找出口位置; 考虑感知空间  $\varphi$  影响, 如图 9 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.



图 8 无感知空间  $\varphi$  时人群的运动  
Fig. 8 The motion of crowd without sense space  $\varphi$



图 9 有感知空间  $\varphi$  时人群的运动  
Fig. 9 The motion of crowd with sense space  $\varphi$

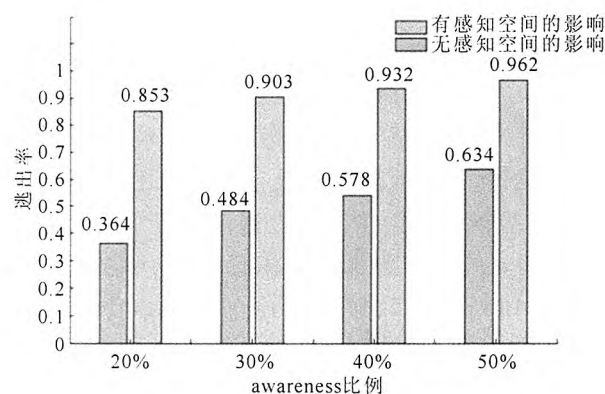


图 10 不同 awareness 比例下的逃出率  
Fig. 10 Escape rates under different awareness radio

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示出明显的行为趋同现象如聚集现象. 如图 10 所示, 当没有感知空间  $\varphi$  影响时, 个体之间没有交流而逃出率处于较低水平; 考虑感知空间  $\varphi$  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.

**实验 2 感知空间  $\varphi$  影响行为决策.**

在紧急状态下, awareness group 个体主要参考邻域内群体的运动趋势. 感知空间  $\varphi$  通过影响 awareness group 个体的倾向速度  $\vec{v}^{pre}$  对其运动趋势产生影响, 并逐渐缩小个体与邻域内群体运动趋势之间的差异.



图 11 Awareness group 个体在  $\varphi$  影响下的运  
Fig. 11 Awareness group's motion with  $\varphi$

如图 11(a) ~ (c) 所示, 处于 ESCAPE STATE 的 awareness group 个体受感知空间  $\varphi$  的影响, 跟随人群向楼梯口处的安全出口疏散并与邻域内群体保持行为一致性.

随后越来越多的群体向楼梯口处的安全出口疏散, 导致该出口人群密度过大如图 12(a) 所示. 部分想通过挤过人群而逃离的个体观察到楼梯口处聚集了大量人群, 且可活动的空间越来越小, 导致其忍耐距离  $d_t^a$  减小. 当  $d_t^a < \epsilon$  时, 个体根据当前状态重新决策并朝楼梯出口的反方向疏散如图 12(a)~(c) 所示.



图 12 当忍耐距离  $d_t^a$  小于决策改变  
Fig. 12 The decision changes when  $d_t^a < \epsilon$

楼梯口作为出口, 随着模拟时间的增加, 越来越多的人聚集在楼梯口处导致该出口的人群密度增加. 黄色矩形框标记的个体尝试通过该处逃离如图 12(a); 由于已经察觉到出口处人群密度过大且短时间内不能逃离, 该个体进入解锁状态并重新决策如图 12(b); 最后该个体脱离拥挤在楼梯出口处的人群向相反方向逃离如图 12(c).

实验 3 不同人群规模影响逃出率.

实验 3 以迷宫为场景并设置模拟时间 135 s, 在迷宫大小不变的条件下得到了不同模拟规模对逃出率的影响. 表 2 中, 行数据表示在指定的 awareness 比例和模拟时间下, 不同的人群模拟规

模对应不同的逃出率数据. 综合分析数据发现, 逃出率随模拟规模增加而增加; 当模拟规模超过阈值时, 逃出率随人群模拟规模增加而减小. 邻域大小以及处于邻域内的人群个体数目是指定的<sup>[19]</sup>, 而邻域定义独立于人群模拟规模. 对于小规模人群, 随着人群模拟规模的增加群聚性行为将更加明显. 但当人群模拟规模达到阈值时, 此时室内空间的人群密度过大导致人群流通量超过该空间的最高容纳值, 将逐渐出现堵塞、拥挤等现象, 使得在一定时间内逃出率下降.

表 2 不同人群模拟规模下的逃出率  
Tab. 2 Escape rates with different crowd scale

awareness 比例(%)	模拟规模(人)	逃出率
20	100	0.686
30	100	0.703
40	100	0.751
50	100	0.757
20	200	0.745
30	200	0.802
40	200	0.819
50	200	0.822
20	300	0.797
30	300	0.847
40	300	0.881
50	300	0.916
20	400	0.856
30	400	0.877
40	400	0.881
50	400	0.916
20	500	0.903
30	500	0.924
40	500	0.947
50	500	0.952

实验 4 Awareness group 比例影响逃出时间

在规模为 800 人的前提下, 实验 4 设置不同的 awareness group 人群所占比例, 对比当逃出率达到阈值  $\sigma = 0.95$  时, 不同 awareness group 比例的人群所需要的最短时间. 由于决策的随机性, 在同一组参数下, 对每一组的 awareness group 比例数据执行 150 次重复试验得出结果. 如在所有的 150 次试验中, 共有 15 组试验在 120 s 至 125 s 内逃出率达到阈值  $\sigma = 0.95$ , 则有  $\text{Probability} = 15/150 = 10\%$  的概率在 120 s 至 125 s 时间内使逃出率达到阈值  $\sigma$ . 实验结果如图 13 所示.

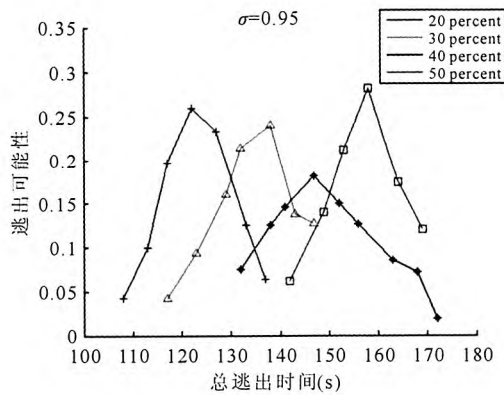


图 13 不同 awareness group 人群所占比例对应的达到  $\sigma = 0.95$  时的总逃出时间曲线

Fig. 13 The curve of total escape time under different awareness ratio when  $\sigma = 0.95$

## 7 结 语

在室内空间的人群模拟中, 由于包含许多不可控因素, 信息不对称性对紧急状态下的人群行为决策有重要影响, 而这点在之前的研究中被忽视. 本文基于信息不对称性的前提, 提出了一种构建紧急状态下人群行为模型方法, 而这种信息不对称性在本文中实例化为对室内有限空间出口信息的先验知识. 为了模拟人群个体找到通往出口的路径的行为, 本文构建了感知空间  $\varphi$  求解倾向速度  $\vec{v}_{pre}$ .

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感知空间结合形成更好的人群模拟效果是本文下一步的研究内容.

### 参考文献:

- [1] Guy S J, Lin M, Manocha D, *et al.* PLEde-strians: A least-effort approach to crowd simulation [C]// Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. Madrid, Spain: [s. n.], 2010.
- [2] Guy S J, Lin M C, Manocha D, *et al.* Modeling collision avoidance behavior for virtual humans [C]// International Foundation for Autonomous Agents and Multi-agent Systems. [s. l.]: [s. n.], 2010.
- [3] Kim S, Manocha D, Lin M C, *et al.* Interactive simulation of dynamic crowd behaviors using general adaptation syndrome theory [C]// Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. New York, USA: ACM Press, 2012: 55.
- [4] Moussaid M, Helbing D, Theraulaz G, *et al.* The walking behavior of pedestrian social groups and its impact on crowd dynamics [J]. PloS ONE, 2010, 5 (4): e10047.
- [5] Erick M, Anawat S, Fumihiko I, *et al.* Agent-based simulation of the 2011 great east japan earthquake/tsunami evacuation: An integrated model of tsunami inundation and evacuation [J]. J Natural Disaster Sci, 2012, 34(1): 41.
- [6] Pelechano N, Malkawi A. Evacuation simulation models: Challenges in modeling highrise building evacuation with cellular automata approaches [J]. Automat Constr, 2008, 17(4): 377.
- [7] Shendarkar A, Lee S, Son Y J, *et al.* Crowdsimulation for emergency response using BDIagents based immersive virtual reality [J]. Sim Model Pract Theory, 2008, 16(9): 1415.
- [8] Patricx, Jeremy, Mouaddib, *et al.* Detection of primitive collective behaviours in a crowd panic simulation based on multi-agent approach [J]. Int J Swarm Intell Res, 2012, 3(3): 50.
- [9] Wagner, Neal, Agrawal, *et al.* ISI [M]. 2012, 186.
- [10] Ben X Y, Huang X F, Zhuang Z Y, *et al.* Agent-based approach for crowded pedestrian evacuation simulation [J]. IET Int Trans Sys, 2013, 7(1): 55.
- [11] Curtis S, Zafar B, Manocha D. Right of way-Asymmetric agent interactions in crowds [J]. Visual Comput, 2013, 29(12): 1277.
- [12] Johansson A, Helbing D, Shukla P K. Specification of the social force pedestrian model by evolutionary adjustment to video tracking data [J]. Adv Compl Sys, 2007, 10(101): 271.
- [13] Berg V, Lin M, Manocha D, *et al.* Reciprocal n-body collision avoidance [J]. Springer Tracts Adv Robotics, 2011, 70: 3.
- [14] Chraibi M, Kemloh U, Seyfried A. Force-based models of pedestrian dynamics [J]. Netw Heterogeneous Media, 2011, 6(3): 425.
- [15] Mao T L, Jiang H, Li J, *et al.* Parallelizing continuum crowds [C]// Proceedings of the 17th ACM Symposium on Virtual Reality software and Technology. New York, NY: ACM Press, 2010, 4: 231.



- [16] Narain R, Golas A, Lin M, *et al.* ACM SIGGRAPH Asia 2009 Papers [M]. Yokohama, Japan: ACM, 2009.
- [17] Pan X, Han C S, Dauber K, *et al.* A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations [J]. *Ai & Society*, 2007, 22(2): 113.
- [18] Tetsuya K, Tetsuro O. Proceedings of the 2010 International Conference on Computational Science and Its Applications -Volume Part IV[C]. Fukuoka, Japan: Springer-Verlag, 2010.
- [19] Ballerini M, Cabibbo N, Candelier R, *et al.* Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: Evidence from a field study [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(4): 1232.
- [20] Pettre J, Laumond J P, Thalmann D. A navigation graph for real-time crowd simulation on multilayered and uneven terrain[C]// First International Workshop on CrowdSimulation. NY, USA: Computers and Graphics, Pergamon Press, Inc. Elmstord, 2005.