

基于信息非对称性的小群组紧急疏散行为模拟

苟成秋<sup>1,2)</sup>, 余瀚游<sup>1,2)</sup>, 徐梓桢<sup>1,2)</sup>, 李晓峰<sup>1,2)</sup>, 张严辞<sup>1,2)\*</sup>

<sup>1)</sup>(四川大学计算机学院 成都 610065)  
<sup>2)</sup>(四川大学视觉合成图形图像技术国家重点学科实验室 成都 610065)  
(yczhang@scu.edu.cn)

**摘 要:** 为了更真实地模拟紧急疏散情况下个体、群组及其间的交互行为, 提出一种通用的人群模拟方法. 首先分析可能影响个体疏散行为的因素; 然后引入统一空间量化所有影响疏散行为的因素, 统一不同个体的倾向速度的求解过程; 最后根据个体所属的群组及其对环境的熟悉程度的差异性等不同情况对倾向速度进行求解. 实验结果表明, 该方法能够更真实地模拟个体、群组的疏散行为.

**关键词:** 紧急疏散; 人群模拟; 统一空间; 群组行为  
**中图分类号:** TP391.41     **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2018.16566

Simulation of Small Social Group Behaviors in Emergency Evacuation Based on Information Asymmetry

Gou Chengqiu<sup>1,2)</sup>, Yu Hanyou<sup>1,2)</sup>, Xu Zian<sup>1,2)</sup>, Li Xiaofeng<sup>1,2)</sup>, and Zhang Yanci<sup>1,2)\*</sup>

<sup>1)</sup>(College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065)  
<sup>2)</sup>(National Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision, Sichuan University, Chengdu 610065)

**Abstract:** In this paper, we propose a novel method to simulate the behaviors of individuals, social groups and the interactivities between them in emergency evacuation. Firstly, we analyze the factors which may affect individual's behaviors. Then, a unified space is proposed to quantify all these factors, in which the solution process of preferred velocity for different individuals can be executed. Finally, the preferred velocity is solved based on the social group that the individual belongs to and the familiarity of the surrounding environments. The experimental results indicate that the proposed method can simulate the evacuation behaviors of individuals and social groups more realistically.

**Key words:** emergency evacuation; crowd simulation; unified space; group behavior

公共场所(比如商场、地铁站、体育馆)往往人群十分密集, 如果没有合理地设计建筑、规划疏散通道、提前进行疏散演练, 当发生紧急情况(比如地震、火灾等)时, 会造成巨大的生命财产损失. 实际生活中进行紧急疏散演练存在许多难点. 比如,

需要耗费大量人力、物力资源; 无法保证演练人员的生命财产安全; 不能轻易更改实际演练场景的布局, 导致无法获得丰富的数据来进行场景的安全性评估与分析. 人群模拟技术利用计算机实现人群疏散仿真, 很好地解决了以上难题.

收稿日期: 2017-06-16; 修回日期: 2017-09-19. 基金项目: 国家自然科学基金(61472261); 国家“八六三”高技术研究发展计划(2015AA016405). 苟成秋(1992—), 女, 硕士研究生, CCF 会员, 主要研究方向为人群模拟、虚拟现实; 余瀚游(1993—), 男, 硕士研究生, CCF 会员, 主要研究方向为人群模拟、虚拟现实、实时渲染; 徐梓桢(1993—), 男, 硕士研究生, CCF 会员, 主要研究方向为人群模拟、虚拟现实; 李晓峰(1973—), 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为图形图像处理、视觉合成、人脸识别; 张严辞(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 论文通讯作者, 主要研究方向为实时渲染、人群模拟、虚拟现实、并行计算.

紧急疏散情况下,人的行为受诸多因素的影响。如人对周围环境的熟悉程度、集群倾向、从众倾向、出口位置等。对这些因素考虑得越多,越能模拟出更符合实际的人群疏散行为。例如,熟悉环境的个体往往不受附近人群运动的影响而迅速向出口方向移动;而不熟悉环境的个体可能更多地选择跟随周围人的运动来逃生。同时,在紧急状态下,个体行为更容易受到其所属的社会小群体的影响。例如,若  $A$  和朋友  $B$  在一起,而  $B$  熟悉周围环境,那么  $A$  将更倾向于跟随  $B$  进行移动,而较少受到周围陌生人群运动的影响。甚至在一些极端条件下,社会群体中的某些个体可能会在降低自己逃生率的情况下,去寻找丢失的其他群体成员。

然而,现有的人群紧急疏散模拟的研究中,更多只是考虑某个单独因素对个体和人群行为的影响,如只考虑个体间的相互影响<sup>[1-4]</sup>,或只考虑群体内部的影响<sup>[5-7]</sup>,而缺少一种通用的、综合考虑各种因素的模拟方法。

为了综合考虑多种因素对人群运动的影响,更真实地模拟紧急疏散情况下个体、群组的行为,本文提出了一种通用的人群模拟方法。

## 1 相关工作

人群模拟的研究方法大致分为2大类:宏观研究方法和微观研究方法。宏观方法将人群看成多个简单个体的组合,不考虑个体的情绪、能力、动作等个体特征,因此宏观方法模拟的人群行为真实性不高<sup>[8]</sup>。Regression<sup>[9]</sup>和流体动态模型<sup>[10]</sup>属于宏观人群模拟范畴。微观方法更关注个体行为特征,其考虑个体的决策过程、行为特征、应急反应、与周围人的交互以及其他细微的特征。微观研究方法中,有3种主要的技术分类:元细胞模型<sup>[11]</sup>、社会力模型<sup>[12]</sup>和基于个体的智能体模型<sup>[13]</sup>。元细胞模型中,人根据网格状态来确定移动方向;社会力模型将群体看作一系列粒子的集合,这些粒子的运动受力的约束;基于个体的智能体模型假设每个人是具有意识和决策能力的智能体。

现有的很多方法对个体的意识行为进行研究。Hempe 等<sup>[14]</sup>提出了一个用于实时人群模拟的原型,该原型能够模拟人的很多能力,包括与周围人交互、寻找路径、规划路径、情绪等。紧急疏散情况下,个体运动受许多因素的影响。疏散标识(安全

出口、指示牌)对人的疏散过程有指导作用,人们为了快速寻找安全出口<sup>[15]</sup>,呈现出互相帮助的现象<sup>[16]</sup>。Jiang 等<sup>[17]</sup>研究了大规模复杂场景下的人群疏散过程。王兆其等<sup>[18]</sup>通过对群体仿真运动的研究,设计并实现了人群疏散虚拟现实系统。

对群组行为的研究大致分为2类<sup>[19]</sup>。第2类不考虑群组间的社会关系,模拟集合行为<sup>[20-21]</sup>。群组中的个体只是简单聚集,如一群鸟、一池鱼。但是现实生活中群体由于存在社会关系,群体内部需要交互。第2类将以上因素考虑在内。文献[15]结合社会力模型和基于视觉的碰撞避免方法,模拟了一系列包含个人和群组的场景;文献[5, 22-23]基于 Leader-Follower 模拟了人群紧急疏散行为;文献[7]模拟了小型社会群组在紧急人群疏散中的聚集与重组行为;文献[24]将群组目标和群组 Leader 考虑在内,构建了一个简单的群组模型。这些方法都忽略了组员对环境熟悉程度的差异性。人群模拟中信息非对称性<sup>[25-26]</sup>是一个影响模拟结果真实性的重要因素,环境熟悉程度的差异性对个人的行为决策有很大影响,这种影响同样适用于群组。

## 2 算法概述

本文中,  $A_i$  代表第  $i$  个人。紧急情况下,  $A_i$  的运动受多方面因素的影响,这些因素将影响倾向速度  $v_i^{\text{next}}$  的求解。  $A_i$  的倾向速度  $v_i^{\text{next}}$  表示  $A_i$  在某一时刻的运动趋势;倾向速度  $v_i^{\text{next}}$  的求解可分为大小  $v_i^{\text{next}}$  和方向  $e_i$  2 部分,如

$$v_i^{\text{next}} = v_i^{\text{next}} \cdot e_i \quad (1)$$

为了求解  $e_i$ , 为每个人构建一个统一空间,如

$$e_i = \alpha_i \cdot v_E + \beta_i \cdot v_G + \gamma_i \cdot v_T \quad (2)$$

统一空间由 3 部分组成,包括外部环境的影响力  $v_E$ 、群组的影响力  $v_G$ 、目标的吸引力  $v_T$ ; 其中,  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$  分别代表相应的权重因子,用于控制3种不同的作用力对倾向速度的贡献值。

影响倾向速度方向求解的因素主要有:

(1) 外部环境的影响力。根据人对环境熟悉程度的差异性,可将人分为有知人群和无知人群。其中,有知人群知道模拟场景的所有出口或部分出口,无知人群不知道模拟场景的任意出口。紧急情况下,有知人群由于知道出口,不考虑周围人的运动情况,径直向出口运动;无知人群则要受周围

人群运动的影响。

(2) 群组的影响力. 群组是一群具有社会关系的人的集合. 同组的人由于社会关系亲密, 在运动过程中保持相对较近的物理距离, 这反映了群组的内聚现象. 同组组员间的行为相互影响, 相比于陌生的有知人群, 组内无知的组员更倾向于相信同组内有知的组员. 但是当组内没有人知道出口时, 整个群组均要受到组外人运动的影响。

(3) 目标的吸引力. 在疏散过程中, 个人和群组若明确知道出口的位置, 则其运动方向明确; 若不知道出口的位置, 则需要观察周围人的运动来确定移动方向。

式(2)综合了影响人的倾向速度的关键因素, 如人是否熟悉环境, 人是否有明确的目标, 人是否属于群组. 对  $A_i$  倾向速度方向  $e_i$  的求解详见第 4 节。

### 3 本文方法框架初始化

本节描述使用本文提出的框架初始化模拟个体和群组的细节。

初始化需要的输入有总人数  $N$ , 不属于群组的人数  $N_1$ , 属于群组的人数  $N_2$ , 群组个数  $m$ , 每个组人数的上下限  $[l_1, l_2]$ 。

当  $N_2 > 0$  时, 需要确定群组的人数, 生成组员基本属性  $\{p_i, v_i, a(i)\}$ , 其中  $p_i$  表示  $A_i$  的当前位置;  $v_i$  表示  $A_i$  的当前速度;  $a(i)$  代表  $A_i$  是否有知,  $a(i)=1$ ,  $A_i$  为有知;  $a(i)=0$ ,  $A_i$  为无知。

同组组员满足亲密度关系的约束, 如

$$G = \{i | \exists j \in G \text{ s.t. } I_{ij} > 0\}.$$

其中,  $I_{ij}$  代表  $A_i$  对  $A_j$  的亲密度,  $I_{ij}$  越大, 意味着  $A_j$  对  $A_i$  越重要. 由于亲密度具有非对称性, 即  $I_{ij}$  和  $I_{ji}$  不一定相等. 本文使用静态群组的概念, 即一个组中各成员间的亲密度关系在模拟过程中始终保持不变. 本文中使用了非对称矩阵保存组员间的亲密关系。

所有人形成一个子组满足

$$S = \{i | \exists j \in S,$$

$$\text{s.t. } \|p_j - p_i\| < \varepsilon_p \wedge \|v_j - v_i\| < \varepsilon_v\}.$$

其中,  $\|\cdot\|$  代表向量的模;  $\varepsilon_p$  和  $\varepsilon_v$  是用户设定的参数, 分别代表满足子组位置和速度关系的变量。

群组在运动过程中, 组员间的位置、速度关系是变化的, 所以子组是一个动态的概念. 当  $i$  与子组  $S$  中的所有成员都不满足位置、速度约束时, 对

子组  $S$  来说,  $i$  是一个丢失的组员。

人的运动速度受许多因素的影响. 如健康状况、年龄、性别、心情等. 一般来说, 老人和小孩的运动速度明显小于成人; 女性行走速度普遍比男性慢; 一个人生病状态下的行走速度明显小于其健康状态下的行走速度; 人心情低落时总是喜欢漫无目的地散步. 本文在初始化人的速度时综合考虑了以上因素。

## 4 统一空间

### 4.1 求解倾向速度的大小

有知的人熟悉环境, 不用观察周围人群的运动, 故其始终以最大的速度运动; 无知的人综合周围人的情况而运动, 故其始终以平均速度移动. 接下来考虑群组中组员的运动速度. 若组员  $A_i$  为能力强的人, 考虑到群组中可能存在能力弱的人, 应该放慢速度; 若  $A_i$  是能力弱的人, 为了跟上群组的前进步伐,  $A_i$  以自己最大的速度运动. 确定倾向速度大小的方法为

$$v_i^{\text{next}} = \begin{cases} v_i^{\text{max}}, & \text{if } (a(i)=0 \wedge A_i \in G) \text{ or } (a(i)=1 \wedge A_i \notin G) \\ v_{iE}^{\text{avg}}, & \text{if } (a(i)=0 \wedge A_i \notin G) \\ v_{iG}^{\text{avg}}, & \text{if } (a(i)=1 \wedge A_i \in G) \end{cases}.$$

其中,  $v_{iE}^{\text{avg}}$  代表  $A_i$  周围人的平均速度;  $v_{iG}^{\text{avg}}$  代表  $A_i$  所在子组的平均速度, 而非  $A_i$  所属组的平均速度. 这是因为, 当  $A_i$  与组互不可见时,  $A_i$  单独形成一个子组, 此时  $A_i$  无法知晓同组其他组员的运动情况, 其他组员对  $A_i$  的运动速度无影响。

### 4.2 求解倾向速度

#### 4.2.1 求解目标吸引力

综合视野范围内人群移动情况、道路可通行情况, 以及目标点的位置, 利用合适的寻路算法, 确定一条最佳的从当前位置到达目标点的疏散路径; 本文使用 A\* 寻路算法实现路径规划. 确定  $A_i$  受目标点的影响的过程如下:

Step1. 利用寻路算法, 从  $p_i$  到  $p_T$  计算一系列导航点  $\{p_N\}$ ,  $p_i$  表示  $A_i$  的当前位置,  $p_T$  表示  $A_i$  的目标,  $\{p_N\}$  表示从起点到终点应经过的一系列导航点位置的集合。

Step2.  $A_i$  每次向第 1 个导航点, 也就是离其最近的一个点  $p_{N_0}$  靠近。

Step3. 更新导航点集合. 每次检查是否到达第 1 个导航点, 若是, 删除第 1 个导航点; 否则, 导航点集合维持不变。

$A_i$  向第 1 个导航点  $p_{N_0}$  靠近的速度为

$$v_T = \text{Norm}(p_{N_0} - p_i) \quad (3)$$

其中,  $\text{Norm}(\cdot)$  表示向量单位化.

#### 4.2.2 求解环境影响力

有知的人由于熟悉环境, 无需停留观察周围人的运动情况, 不受外界干扰, 故此部分对倾向速度的求解无贡献; 无知的人受环境的影响力的求解详见文献[26].

#### 4.2.3 求解群组影响力

同组的人在运动过程中, 总是喜欢聚集在一起. 有 2 种方案可用于确定  $A_i$  受群组的影响力:

- $A_i$  所在子组的物理中心
- 受组内最亲密的人的影响

本文采用的是  $A_i$  所在子组的物理中心. 首先求出  $A_i$  所在的子组中心 Center, 然后根据式(3)确定方向.

注意: 是  $A_i$  所在子组的物理中心, 而并非  $A_i$  所在群组的物理中心. 这是因为同一子组的所有成员一定互相知道位置, 但同一群组中的所有成员并不一定互相知道位置关系.

#### 4.2.4 确定影响系数

当计算得到  $v_E$ ,  $v_G$ ,  $v_T$  后; 只需确定权重因子  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$  便可根据式(1)求解  $A_i$  的倾向速度方向  $e_i$ .  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$  的确定方法如下:

- 若  $A_i$  不属于群组, 则  $\beta_i = 0.0$ , 同时:  
若  $A_i$  为有知的人, 则  $\alpha_i = 0.0$ ,  $\gamma_i = 1.0$ ;  
若  $A_i$  为无知的人, 则  $\gamma_i = 0.0$ ,  $\alpha_i = 1.0$ ;
- 若  $A_i$  属于群组  $G$ , 则  $\beta_i = \zeta$ ,  $\zeta \in [0, 1]$ , 同时:  
若  $G$  中全为无知的人, 则  $\gamma_i = 0.0$ ,  $\alpha_i = 1.0 - \beta_i$ ;  
若  $G$  中存在有知的人, 则  $\alpha_i = 0.0$ ,  $\gamma_i = 1.0 - \beta_i$ .

接下来就可以根据式(2)确定倾向速度  $v_i^{\text{next}}$ . 求解出倾向速度  $v_i^{\text{next}}$  后,  $A_i$  要考虑人与人以及人与障碍物之间的碰撞避免. 本文使用 Reciprocal Velocity Obstacle<sup>[27]</sup>算法来实现从  $v_i^{\text{next}}$  到下一时刻运动速度  $v_i$  的计算.

### 5 找人决策过程

初始状态下, 本文假设同一组  $G$  的所有成员均属于同一子组  $S$ , 组内成员间满足亲密度、位

置、速度等约束. 随着紧急疏散过程的进行, 组员由于障碍物、人群拥堵等原因, 使得有些组员丢失, 子组状态发生变化. 当子组  $S$  发现  $A_j$  丢失时, 根据

$$A_{ij} = \frac{f_i}{C_{ij}^{\text{search}}(t)} \cdot \frac{C_{ij}}{C_{is}},$$

考虑每个组员  $A_i$  去寻找  $A_j$  的意愿强烈程度, 从中挑选一个找人意愿程度最强的组员执行找人任务.

可见, 影响找人意愿强度的因素有:

- $f_i$  代表  $A_i$  找人能力的强弱. 能力越强, 去执行找人任务的可能性越大. 若  $A_i$  为有知的人, 因为其熟悉环境, 其找人能力越强; 无知的人由于不熟悉环境, 找人能力弱, 找到丢失组员的可能性低. 这意味着派有知人执行找人任务的可能性比无知人高.
- $C_{ij}$  代表  $A_i$  对  $A_j$  的担心程度.  $I_{ij}$  越大,  $A_j$  对  $A_i$  越重要,  $A_i$  去找  $A_j$  的可能性越大; 若  $A_j$  为无知的人, 出于安全考虑,  $A_i$  去找  $A_j$  的可能性越大.
- $C_{is}$  代表  $A_i$  对子组  $S$  剩余组员的担心程度. 子组  $S$  中有组员  $A_k$  与  $A_i$  的关系更亲密, 即  $I_{ik} > I_{ij}$ ,  $A_i$  去找  $A_j$  的可能性越小; 子组  $S$  剩余组员对环境越不熟悉,  $A_i$  去找  $A_j$  的可能性越小.
- $C_{ij}^{\text{search}}(t)$  代表找人任务难度. 找人任务越难,  $A_i$  放弃找人任务的可能性越大. 影响找人任务难度的因素为

$$C_{ij}^{\text{search}}(t) = \eta_i * \|p_i - p_j^{\text{last}}\| * \rho_i(t) * q_i(t).$$

其中,  $\eta_i$  代表  $A_i$  是否有知对找人难度的影响. 若  $A_i$  为无知, 则找人难度增加;  $p_j^{\text{last}}$  为  $A_j$  丢失的位置,  $\|p_i - p_j^{\text{last}}\|$  为  $A_i$  与  $A_j$  丢失位置的距离, 两者距离越大, 找人任务难度越大; 代表  $t$  时刻  $A_i$  周围的人群密度, 人群拥挤导致找人难度增加; 随着时间的推移, 人的体力、耐心下降, 找人难度增加, 容易放弃找人,  $q_i(t)$  衡量了这一因素.

### 6 实验结果

本实验代码实现平台为 Intel Core i3-4160 CPU @ 3.6GHz, 8GB 内存, 使用 Visual Studio 进行开发. 实验设计时主要考虑有知人群对周围人的

影响,包括有知人群对本组人的影响,有知人群对非本组人的影响.

人群可视化说明:不属于群组的人用圆圈表示,属于群组的人用矩形表示;有知人群用实心表示,无知人群用空心表示.

实验 1. 群组全为无知组员的疏散行为.

组员受同组内有知组员的引导作用大于陌生的有知人群的引导作用,但是当组内全为无知组员时,群组的运动将会如何?

为此,设计了如下实验.初始化一个包含 50 人的场景,其中包含一个组员数为 5 的群组,该组的 5 个组员全为无知,其他 45 个人全为有知人群.图 1a 所示.

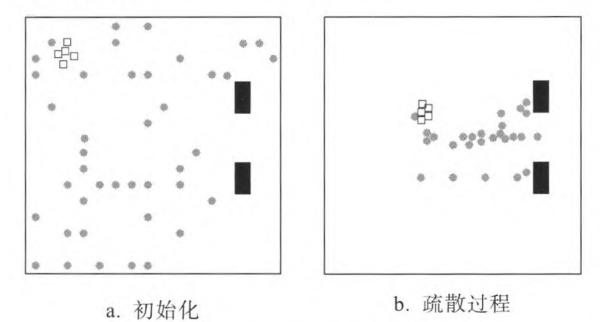


图 1 无知群组的疏散行为

图 1b 为一段时间后的疏散状态,由疏散过程 (Demo-1)可见,该组的运动体现了 2 个特征:

- (1) 群组内组员保持较近的物理距离,体现了群组的内聚行为.这说明群组的内聚行为是群组的基本行为,不受组内组员是否熟悉环境的影响;
- (2) 群组在周围人群的引导下,逐渐向出口靠拢.这说明当组内没有有知组员时,组员受周围陌生的有知人群的引导作用大于组内无知组员的引导作用.这种情况下,群组的运动主要受周围人群的运动方向的影响.这再次体现了个体和群组的交互行为.

实验 2. 组员对环境的熟悉程度影响群组的找人决策.

本实验用来验证组员对环境的熟悉程度对群组找人决策行为的影响.如图 2 所示,群组疏散过程描述如下 (Demo-2):

- (1) 如图 2a 所示. 本实验模拟了一个包含 6 个组员的群组,疏散到出口  $p$  的过程. 该组中包含有知组员和无知组员.
- (2) 如图 2b 所示. 某时刻组员  $A$  丢失. 群组中剩余的人通过权衡组员对环境熟悉程度以及亲密

度关系,做出是否找人的决定.

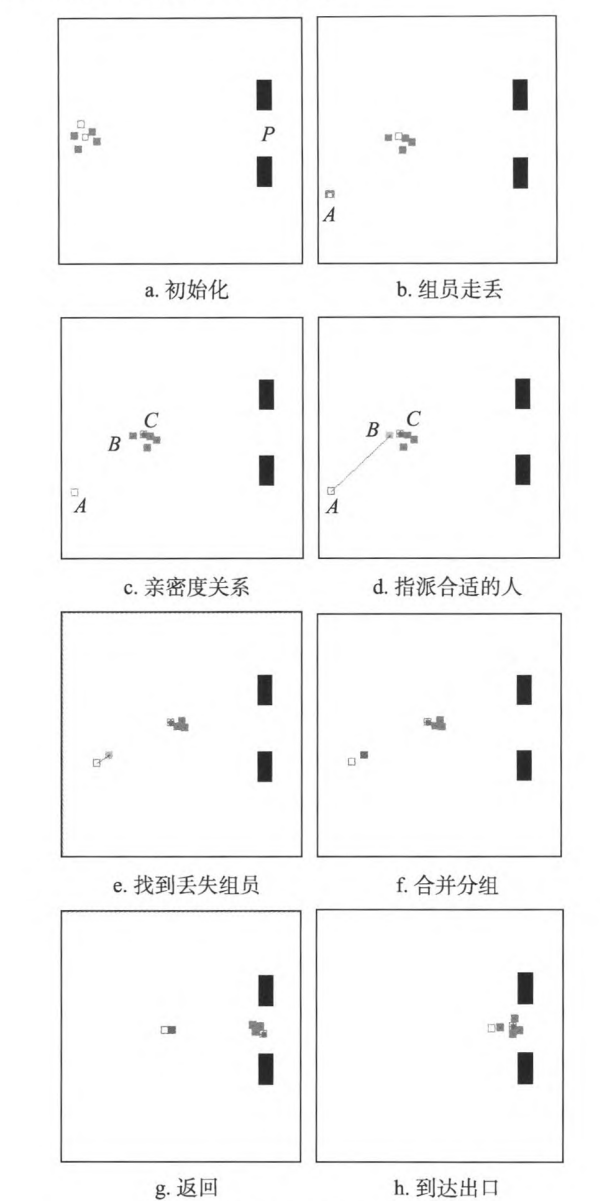


图 2 群组找人行为

- (3) 如图 2c 所示. 为了说明组员对环境的熟悉程度对群组找人决策的影响. 其中,红点标识了剩余组员对丢失组员的关心程度,即其他组员对丢失组员  $A$  的亲密度. 可见,  $C$  比  $B$  更关心丢失组员  $A$ .

- (4) 如图 2d 所示. 最终派  $B$  执行寻找  $A$  的任务.  $B$  熟悉环境,  $B$  单独出去找人自己不会丢失,并且找到丢失组员的可能性很大. 虽然  $C$  和  $A$  的关系更亲密,但是由于  $C$  不熟悉环境,  $C$  贸然出去找人不仅可能找不到人,而且自己也可能迷路. 综上所述,组员对环境的熟悉程度对制定是否找人决策有很大影响.

- (5) 如图 2e 和 2f 所示.  $C$  成功找到  $A$ , 会合.

(6) 如图 2g 和 2h 所示. 与其他组员会合, 到达出口.

**实验 3.** 群组内有知组员对其他组员的引导作用.

首先来看不考虑有知组员对无知组员的引导作用时群组的疏散行为. 如图 3 所示(Demo-3-1).

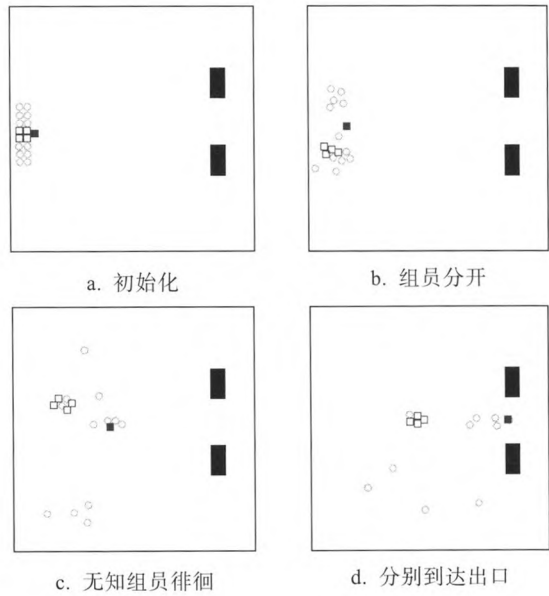


图 3 群组无引导作用

图 3a 为 12 个无组的人和 1 个包含 5 个组员的群组的初始化情况. 有知组员以最快的速度向出口运动, 无知组员运动速度慢, 导致有知组员和无知组员开始分离, 如图 3b 所示. 有知组员和其他组员由于速度差异分开后, 有知组员并未放慢运动速度去等待落后的组员或寻找丢失组员, 仍然快速向出口运动; 其他组员(剩余的 4 个无知组员)缺少有知组员的引导, 无法尽快确认出口的位置, 一直在场景中徘徊, 如图 3c 所示; 而此时的有知组员已接近出口, 并很快到达出口, 如图 3d 所示.

但是不考虑组内成员的相互作用, 尤其是不考虑组内有知组员对其他成员的引导作用与实际生活不符. 实际生活中, 组内成员之间具有亲密度关系, 并不会因为有知组员熟悉出口而“抛弃”其他成员. 同一个群组中的组员应该保持较近的物理距离, 有知组员放慢速度引导其他组员快速到达出口.

如图 4(Demo-3-2)所示, 在整个疏散过程中, 有知组员和无知组员互相协调运动速度, 同组的所有组员能够维持较近的物理距离. 无知组员在有知组员的带领下, 整个群组快速到达出口.

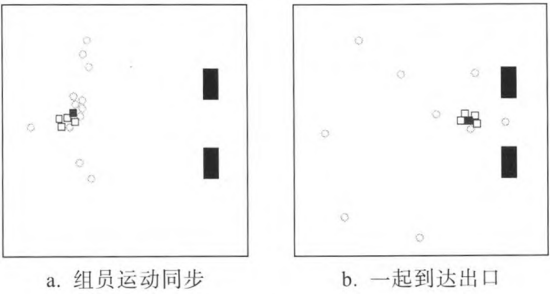


图 4 群组有引导作用

对比实验说明, 有知组员的引导作用能够减少整个群组的疏散时间, 有助于模拟更加真实的群组行为.

7 结 语

本文的贡献有:

- (1) 引入统一空间来量化可能影响人运动的多个因素: 出口对人的寻路过程的影响, 周围人群的运动对人的寻路过程的影响, 同组的人受组内其他成员的影响.
- (2) 提出了一个考虑组员对环境熟悉程度的差异性的群组行为动态模拟方法. 同组内的所有成员对环境的熟悉程度各不相同; 考虑能力强的人对能力弱的人的引导作用; 在制定寻找丢失组员的决策时, 将丢失组员以及剩余组员对环境的熟悉程度的差异性考虑在内.
- (3) 可以同时模拟个体、群组以及个体与群组的交互行为.

参考文献(References):

[1] Guy S J, Chhugani J, Curtis S, et al. PLEdetrans: a least-effort approach to crowd simulation[C] //Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2010: 119-128

[2] Guy S J, Lin M C, Manocha D. Modeling collision avoidance behavior for virtual humans[C] //Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Richland: International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems Press, 2010: 575-582

[3] Pluchino A, Garofalo C, Inturri G, et al. Agent-based simulation of pedestrian behaviour in closed spaces: a museum case study[J]. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2014, 17(1): 16-29

[4] Patric J, Mouaddib A I, Gatepaille S. Detection of primitive collective behaviours in a crowd panic simulation based on multiagent approach[J]. International Journal of Swarm Intelli-

- gence Research, 2012, 3(3): 50-65
- [5] Jaklin N, Kremyzas A, Geraerts R. Adding sociality to virtual pedestrian groups[C] //Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. New York: ACM Press, 2015: 163-172
  - [6] He L, Pan J, Narang S, *et al.* Dynamic group behaviors for interactive crowd simulation[C] //Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2016: 139-147
  - [7] Xie R L, Yang Z C, Niu Y, *et al.* Simulation of small social group behaviors in emergency evacuation[C] //Proceedings of the 29th International Conference on Computer Animation and Social Agents. New York: ACM Press, 2016: 71-77
  - [8] Beltaief O, El Hadouaj S, Ghedira K. Multi-agent simulation model of pedestrians crowd based on psychological theories[C] //Proceedings of the International Conference on Logistics. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2011: 150-156
  - [9] Milazzo J, Roupail N, Hummer J, *et al.* Effect of pedestrians on capacity of signalized intersections[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1998, 1646(1): 37-46
  - [10] Helbing D. A fluid dynamic model for the movement of pedestrians[J]. Complex Systems, 1998, 6(5): 391-415
  - [11] Sirakoulis G C. Cellular automata for crowd dynamics[M] //Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer, 2014, 8587: 58-69
  - [12] Helbing D, Molnár P. Social force model for pedestrian dynamics[J]. Physical Review E, Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics, 1995, 51(5): 4282-4286
  - [13] Reynolds C W. Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model[C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1987: 25-34
  - [14] Rossmann J, Hempe N, Tietjen P. A flexible model for real-time crowd simulation[C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2009: 2085-2090
  - [15] Giitsidis T, Sirakoulis G C. Simulation of aircraft disembarking and emergency evacuation[C] //Proceedings of the 16th Euro-micro Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2014: 372-379
  - [16] Sivers I V, Templeton A, Künzner F, *et al.* Modelling social identification and helping in evacuation simulation[J]. Safety Science, 2016, 89: 288-300
  - [17] Jiang H, Xu W, Mao T, *et al.* Continuum crowd simulation in complex environments[J]. Computers & Graphics, 2010, 34(5): 537-544
  - [18] Wang zhaoqi, Mao Tianlu, Jiang Hao, *et al.* Guarder: Virtual drilling system for crowd evacuation under emergency scheme[J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 46(6): 969-978(in Chinese)  
(王兆其, 毛天露, 蒋 浩, 等. 人群疏散虚拟现实模拟系统——Guarder[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(6): 969-978)
  - [19] Thalmann D, Musse S R. Crowd simulation[M]. 2nd ed. Heidelberg: Springer, 2013
  - [20] Girard M, Amkraut S. Eurhythmy: Concept and process[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2011, 1(1): 15-17
  - [21] Tu X Y, Terzopoulos D. Artificial fishes: physics, locomotion, perception, behavior[C] //Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 1994: 43-50
  - [22] Fridman N, Kaminka G A. Towards a cognitive model of crowd behavior based on social comparison theory[C] //Proceedings of the 22nd National Conference on Artificial Intelligence. Palo Alto: AAAI Press, 2007: 731-737
  - [23] Ji Q G, Gao C. Simulating crowd evacuation with a leader-follower model[J]. Computer Sciences and Engineering Systems, 2007, 1(4): 249-252
  - [24] Wei X G, Song W G, Xu X, *et al.* Effect of group behavior on crowd dynamics[M] //Lecture Notes in Computer Science. Heidelberg: Springer, 2014, 8751: 453-461
  - [25] Fu Jianbo, Jiang Ling, Zhang Yanci. Crowd simulation based on information asymmetry in emergency situation[J]. Journal of Sichuan University: Natural Science Edition, 2015, 52(3): 529-537(in Chinese)  
(付剑博, 蒋 菱, 张严辞. 基于紧急状态下信息不对称性的人群模拟[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2015, 52(3): 529-537)
  - [26] Che X D, Niu Y, Shui B, *et al.* A novel simulation framework based on information asymmetry to evaluate evacuation plan[J]. The Visual Computer, 2015, 31(6-8): 853-861
  - [27] van den Berg J, Guy S J, Lin M, *et al.* Reciprocal n-body collision avoidance[M] //Springer Tracts in Advanced Robotics. Heidelberg: Springer, 2011, 70: 3-19