

# 非对称亲密度的同伴行为仿真方法

范紫璇<sup>1,2)</sup>, 何武<sup>1,2)\*</sup>, 毛艳<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(四川师范大学影视与传媒学院 成都 610068)

<sup>2)</sup>(四川师范大学可视化计算与虚拟现实四川省重点实验室 成都 610068)

<sup>3)</sup>(四川师范大学商学院 成都 610101)

(wuhe83@163.com)

**摘要:** 行为仿真在紧急疏散、智能控制等领域占据重要位置, 其中, 大多数侧重于单一的个体运动或者群体的聚集行为, 而对同伴之间的行为交互关注较少。为更真实地模拟同伴之间的交互行为, 从同伴的认知心理、社会关系强度和观点一致性出发, 研究同伴群体的动态形成以及疏散行为的多样性和高效性。首先, 构建一个基于非对称亲密度的同伴关系总体框架, 包含亲密关系建模和环境熟悉度的判定。然后, 通过非对称亲密度的计算方法, 处理同伴群体动态形成问题。结合环境熟悉度提出改进的领导者-跟随者模型, 模拟同伴疏散行为。最后, 在 Unity3D 引擎环境下对篮球场、超市、公园等场景中的同伴交互行为进行模拟, 并将提出方法与对称亲密度和群集系统方法实现同伴聚集进行效率对比。在分辨率为 80×80 的场景中对 200 个同伴个体的交互行为进行仿真, 平均帧速率为 46.8 帧/s, 平均同伴群组聚集效率为 87.3%, 平均同伴交互行为完成时间为 4.78 s。实验结果表明, 非对称亲密度的领导者-跟随者同伴行为仿真方法能将宏观的群体行为具体化, 对动态的同伴群组进行有效模拟, 仿真效果具有多样性和高效性。

**关键词:** 行为仿真; 非对称亲密度; 环境熟悉度; 领导者-跟随者模型; Unity3D

**中图分类号:** TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2020.17922

## Asymmetric-Intimacy-Based Peer Behavior Simulation Method

Fan Zixuan<sup>1,2)</sup>, He Wu<sup>1,2)\*</sup>, and Mao Yan<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(College of Movie and Media, Sichuan Normal University, Chengdu 610068)

<sup>2)</sup>(Visual Computing and Virtual Reality Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Normal University, Chengdu 610068)

<sup>3)</sup>(School of Business, Sichuan Normal University, Chengdu 610101)

**Abstract:** Behavioral simulation plays an important role in many scenarios, such as emergency evacuation and intelligent control. Most of these applications focus on single individual movements or group aggregation behaviors, while less attention is paid to behavioral interactions among peers. In order to more realistically simulate the interactions among peers, this paper studies the dynamic formation of peer groups, and the diversity and efficiency of evacuation behaviors from the cognitive psychology of peers, the strength of social relations and the consistency of viewpoints. First, a general framework of peer relationships is constructed based on asymmetric intimacy, including the relationship between intimacy relationship modeling and environmental familiarity. Then, the problem of dynamic formation of peer groups is studied by employing the calculation method of asymmetric intimacy. An improved leader-follower model is proposed in conjunction with environmental familiarity to simulate peer evacuation behaviors. Finally, the Unity3D engine is adopted to simulate the companion behaviors of the peers in several scenarios, e.g., basketball court, supermarket, park, etc., and the proposed method is compared with the symmetric intimacy method and the cluster system method to testify the efficiency of peer aggregation. The interaction behaviors of 200 peers were simulated in a scene with a resolution of 80×80. The average frame rate was 46.8 frames/s, the average peer group aggregation efficiency was 87.3%, and the average companion interaction time was 4.78 s. The experimental results show that the asymmetric-intimacy-based leader-follower behavior simulation method can concrete the macro group behavior and effectively simulate the dynamic peer group. The simulation effect is diverse and efficient.

**Key words:** behavioral simulation; asymmetric intimacy; environmental familiarity; leader-follower model; Unity3D

收稿日期: 2019-06-21; 修回日期: 2019-08-02. 基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(201810636032). 范紫璇(1998—), 女, 在校学生; 何武(1983—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 论文通讯作者, 主要研究方向为计算机图形学、群体动画; 毛艳(1985—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为管理学、心理学.

行为仿真技术<sup>[1]</sup>因其准确性、适应性和高效性的优势,逐渐成为计算机工作者在虚拟现实领域的研究重点。群体运动仿真控制的相关研究成果可以应用于传统的计算机游戏、影视特效制作以及新型虚拟现实交互仿真系统等<sup>[2]</sup>。此外,研究人员通过计算机技术模拟群体行为,并对现实生活中的各种行为进行安全性预测与评估。然而同伴行为的动态性及其交互方式的多样性是行为仿真中一个亟待探索和解决的问题。

大多数行为仿真是基于智能体模型<sup>[3]</sup>或群集系统方法<sup>[4-5]</sup>,从宏观的角度分析群体行为。目前,行为仿真主要从认知机制、双层关系机制、群体结构和情感传播等方面进行研究<sup>[6-9]</sup>。然而,现实生活中的群体通常由同伴组成,同伴的交互受到一定因素的影响,如亲密度、认知心理、社会关系强度、交往时间、交往联系强度等。

现有的领导者-跟随者模型较多集中于协调跟踪<sup>[10]</sup>和队形控制<sup>[11]</sup>,但是其缺少对环境熟悉度这一可变因素的考虑,导致群体在运动时缺乏真实性和高效性。如突发事件发生时,同伴倾向跟随环境熟悉的人运动,并且他/她能更快地带领其余同伴从危险区域撤离,以到达安全位置。

为更真实有效地模拟同伴交互行为,本文结合非对称亲密度和环境熟悉度,提出基于非对称亲密度的领导者-跟随者同伴行为仿真方法。通过非对称亲密度体现同伴交互的疏密程度,依靠环境熟悉度提高同伴疏散行为的效率。本文主要方法如下:

(1) 对非对称亲密度进行建模,将认知心理、社会关系强度、观点一致性等基于心理学和社会学的因素融入到非对称亲密度中,使得同伴交互行为具有多样性;

(2) 根据非对称的同伴亲密度关系,提出非对称亲密度的计算方法,以模拟现实生活中动态的同伴交互行为;

(3) 结合非对称亲密度和环境熟悉度,实现同伴之间的领导者-跟随者行为仿真,提高同伴交互行为的高效性。

## 1 相关工作

行为仿真模拟在计算机应用、图形学等领域已经进行了较长时间的探索,其中,研究者重点关注

群体运动行为模拟。例如,社会力模型<sup>[12]</sup>、群集系统方法<sup>[4-5]</sup>、粒子系统模型<sup>[13]</sup>等,它们大都用于模拟单一的群体运动,而忽视了群体心理、社会、环境等因素的影响。何高奇等<sup>[14]</sup>结合安全心理特征和运动速度特征,构建了基于速度的人群仿真框架。Xu 等<sup>[15]</sup>提出互信息和社会力模型(mutual information and social force model, miSFM),以提高人群行为的准确性和稳健性。Xu 等<sup>[16]</sup>通过视频提取计算各个公共区域的人群密度,实现了对群体运动的分析和对各种场景下异常行为的检测。此外,将心理因素加入仿真模拟中,通过赋予个体不同的人格特质<sup>[17]</sup>或使用不同的情绪模型<sup>[18-19]</sup>实现情绪传染<sup>[20-23]</sup>,从而使单一的人群运动模拟丰富化。Lv 等<sup>[24]</sup>通过 OCEAN(openness conscientiousness extroversion agreeableness neuroticism)模型和易感染恢复模型(susceptible infected recovered model, SIR),提出个体情绪传染的人群行为演化方法。Xue 等<sup>[25]</sup>研究人群排队行为中的情绪传染现象,发现降低消极情绪能更好地控制队列的有序性。

### 1.1 同伴群体与亲密度

大多数基于同伴群体的研究将同伴群体定义为同龄人群体,主要研究对象为青少年同伴群体。Lee 等<sup>[26]</sup>根据青少年的心理行为和关系特征研究社会关系和社会认知之间的联系和意义。Marshall-Denton 等<sup>[27]</sup>编制“同伴群体规范认知问卷”,该问卷可用于研究学校环境中正负规范认知对青少年行为的影响。Mulvey 等<sup>[28]</sup>揭示了心理理论对青少年挑战群体刻板印象的重要作用。Narr 等<sup>[29]</sup>证明在同伴关系中首先建立亲密友谊的青少年人际交往能力更强。Davies 等<sup>[30]</sup>调查了高中学生同伴情绪表达能力,扩展了同伴情绪的可预测性。Brenick 等<sup>[31]</sup>通过背景了解同伴群体的行为,发现同伴群体行为可以影响干预效果。但这些同伴群体缺乏普遍性,现实生活中的同伴群体也不是仅由青少年或同学组成。

亲密度通过关系的亲疏程度影响同伴的行为交互,是衡量同伴群体的重要因素。Szwedo 等<sup>[32]</sup>研究了处于青春期的个体从对同伴较强的依赖到独立的过程。Lin 等<sup>[33]</sup>通过调查 Twitter 用户体验环境意识和亲密度,研究交互历史和消息特征在同伴交流过程中的作用。亲密度也可以用来预测冲突解决方式,亲密度越高,处理冲突的方式越柔和,同伴之间的愤怒程度越低。在理想沟通的条件下,冲突解决的成功率越高<sup>[34-35]</sup>。Mastrocola<sup>[36]</sup>等探讨

了同伴情绪与自我感知效能之间的关系,发现退伍军人的同伴情感支持与自我效能感呈正相关。因此,亲密度对同伴关系有着显著的影响。

### 1.2 环境熟悉度与领导者-跟随者模型

环境熟悉度是影响个体运动行为的重要因素,对环境越熟悉,越能缩短到达目的地的时间,并提高定位的准确性和行动的效率。Piccardi 等<sup>[37]</sup>研究了环境熟悉度对地形定位的影响,发现对环境的熟悉程度越高,定位准确性表现就越好。Merriman 等<sup>[38-39]</sup>发现环境熟悉度与地标识别有关,且提高环境熟悉度对物体位置的空间记忆有重要的促进作用。

领导者-跟随者模型是行为仿真中常用的模型。Wang 等<sup>[11]</sup>基于视觉的领导者-跟随者模型对移动机器人形成控制问题进行研究,提出不依赖领导者和跟随者相对位置的机器人控制方法。Loria 等<sup>[40]</sup>解决了沿直线路径前进的多个移动机器人的跟踪控制问题。Liu 等<sup>[41]</sup>通过动态智能体模型,研究领导者与跟随者网络的可控性。Meng 等<sup>[42]</sup>提出了具有自适应耦合增益的连续协调追踪方法。Zhang 等<sup>[43]</sup>关注非周期采样间隔和切换拓扑的领导者-跟随者多智能体系统的分布式  $H_\infty$  共识;在采样周期取给定值的假设下,为跟踪误差系统提出了一种新的离

散时间模型。

因此,本文将在非对称亲密度的基础上,针对行为仿真模拟中同伴群体行为交互的动态性,提出基于非对称亲密度的领导者-跟随者同伴行为仿真方法,实现多种场景中同伴交互行为的高度模拟;并结合环境熟悉度提高领导者-跟随者模型的运算效率,通过仿真实验进一步证明了该仿真方法的真实性和有效性。

## 2 本文方法概述

行为仿真通常分为群体行为仿真和个体行为仿真,其中研究群体仿真的方法常将群体分为不同规模的群组,这些群组进行组内和组间的交互。为实现群组中同伴群体的交互行为,本文提出一种基于非对称亲密度的领导者-跟随者仿真方法。首先,根据同伴的认知心理、社会关系强度和观点一致性对非对称亲密度建模;然后,结合非对称亲密度与环境熟悉度,增强同伴群组中领导者-跟随者模型的真实感和高效性。而部分领导者-跟随者模型忽视了环境熟悉度因素,针对这一问题,本文通过空间认知和方向感,提出环境熟悉度因素的表示方法。其总体框架如图 1 所示。

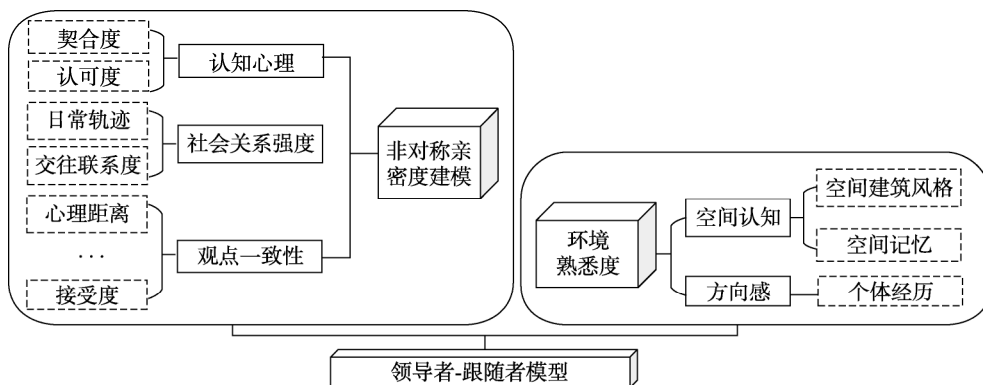


图 1 本文总体框架图

本文模拟了动态的同伴交互行为,引入环境熟悉度因素,提高领导者-跟随者模型的真实性和合理性。提出非对称亲密度的建模方法,将其与环境熟悉度结合,用于对多样的同伴交互行为进行仿真。

## 3 非对称亲密度建模

现实生活中,同伴关系的疏远和紧密是由亲密度决定的。亲密度低的同伴关系较疏远,亲密度高的同伴关系较紧密。而亲密度通常是不对称的。

例如,个体  $A$  将  $B$  视为最好的朋友,但  $B$  却没有将  $A$  视为最好的朋友,即  $I_{AB} \neq I_{BA}$  ( $I$  为非对称亲密度,  $I_{AB}$  为  $A$  对  $B$  的亲密度程度,  $I_{BA}$  为  $B$  对  $A$  的亲密度程度)。本文将这种现象称为亲密度的非对称性。本文对非对称亲密度进行建模。其中,认知心理、社会关系强度和观点一致性作为影响亲密度的主要因素。

### 3.1 认知心理

认知心理是基于认知心理学的一种同伴行为交互心理,主要研究人的高级心理过程。本文通过

同伴的认知过程, 如注意、知觉、表象、记忆、思维和言语等来判断同伴之间的契合度和认可度. 契合度和认可度与认知心理的关系如图2所示.

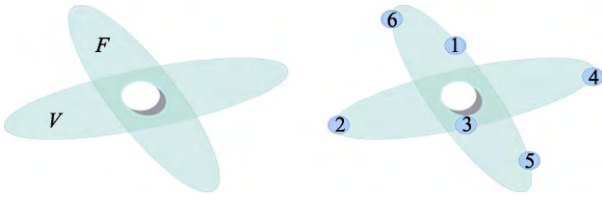


图2 认知心理模型

当契合度和认可度高时, 便认为该同伴与自己的亲密度高, 计算公式为

$$C_{ij} = F_{ij} \cdot V_{ij} \quad (1)$$

其中,  $C_{ij}$ ,  $F_{ij}$ ,  $V_{ij}$  分别为个体  $A_i$  和  $A_j$  的认知心理强度、契合度和认可度.

图2中, 球体为亲密度因素, 2个椭圆形分别代表了契合度和认可度. 元素1~6分别代表注意、知觉、表象、记忆、思维和言语. 它们总体构成了认知心理的关系网.

### 3.2 社会关系强度

社会关系强度通过日常轨迹和交往联系度进行计算. 以互动频率、联系次数和亲密程度为关系强度测量标准, 分为弱关系和强关系<sup>[44]</sup>. 本文中社会关系强度的计算由日常轨迹和交往联系度2个因素共同组成, 其中日常轨迹基于空间距离, 交往联系度基于最近一段时间内交往和联系的频繁程度. 社会关系强度的计算公式在文献[44]的基础上进行了改进, 如

$$R_{ij} = \sum_{a,b} S(a,b) \frac{D_{ij}(N_{i,a}, N_{j,b})}{H_{i,a}} \cdot G_{ij}^m \quad (2)$$

若  $a=b$ , 则  $S(a,b)=1$ ; 否则,  $S(a,b)=0$ . 其中,  $R_{ij}$  为个体  $A_i$  与  $A_j$  的社会关系度;  $D_{ij}$  为个体  $A_i$  到  $A_j$  的空间距离;  $N_{i,a}$  表示个体  $A_i$  在最近时间长度为  $a$  的时间段内的日常轨迹数据;  $N_{j,b}$  表示个体  $A_j$  在最近时间长度为  $b$  的时间段内的日常轨迹数据;  $H_{i,a}$  表示个体  $A_i$  在  $a$  时间段内的日常轨迹序列熵值, 即日常轨迹序列的离散程度;  $G_{ij}^m$  表示个体  $A_i$  和  $A_j$  在  $m$  时间段内的交往联系度且  $m \in a$ .

### 3.3 观点一致性

观点一致性通过心理距离、交往时间、共同兴趣爱好数、共同好友数和平均接受度进行计算. 对

于同伴群体而言, 心理距离、交往时间和共同好友都是影响亲密度关系的因素. 将这些因素进行整合, 得到计算观点一致性的公式

$$P_{ij} = T_k \cdot t_{ij} \frac{S_{habits} \cap S_{friends}}{d_{ij}} \quad (3)$$

其中,  $P_{ij}$  为个体  $A_i$  和  $A_j$  的观点一致性;  $T_k$  为个体平均接受度;  $t_{ij}$  为个体  $A_i$  和  $A_j$  的交往时间;  $S_{habits}$  为个体  $A_i$  和  $A_j$  的共同兴趣爱好数;  $S_{friends}$  为个体  $A_i$  和  $A_j$  的共同好友数;  $d_{ij}$  为个体  $A_i$  和  $A_j$  的心理距离, 且  $T_k$ ,  $t_{ij}$ ,  $S_{habits}$ ,  $S_{friends}$  和  $d_{ij}$  均不小于0.

### 3.4 非对称亲密度

因此, 非对称亲密度的计算公式为

$$I_{ij} = C_{ij} \cdot (R_{ij} \cap P_{ij}) \quad (4)$$

其中,  $I_{ij}$  为个体  $A_i$  和  $A_j$  的非对称亲密度.

同伴之间的亲密度具有动态变化性, 定义动态同伴群组  $E$ , 当认知心理  $C$ , 社会联系度  $R$  和观点一致性  $P$  强度高时, 亲密度会增加, 反之降低. 设同伴群组满足

$$E = \{A_i, A_j, A_{j_1}, A_{j_2}, A_{j_3}, \dots, A_{j_n}\} \quad (5)$$

其中,  $A_i, A_j, A_{j_1}, A_{j_2}, A_{j_3}, \dots, A_{j_n}$  为同伴个体, 他们中至少有一个共同好友.

非对称亲密度线性加权和计算公式为

$$\tau = I_{ij_1} \cdot \rho_{j_1} + I_{ij_2} \cdot \rho_{j_2} + I_{ij_3} \cdot \rho_{j_3} + \dots + I_{ij_n} \cdot \rho_{j_n} = \sum (I_{ij_n} \cdot \rho_{j_n}) \quad (6)$$

其中,  $\tau$  为亲密度线性加权和;  $\rho$  为和  $A_i$  有联系的不同的同伴个体与  $A_i$  的平均交往吸引力;  $n$  为与  $A_i$  是同伴关系的个体, 且  $n > 0$ .

本文中非对称亲密度计算公式适用于4人及以下同伴群体.

## 4 领导者-跟随者模型

领导者-跟随者模型是群体行为仿真中常使用的模型. 传统的领导者-跟随者模型是将领导能力强或情绪不易受影响的个体作为领导者, 但这些模型忽略了群组中拥有特殊社会关系和亲密度关系的同伴群体. 本文在原有的领导者-跟随者模型中加入非对称亲密度和环境熟悉度影响因素, 将领导者-跟随者模型进一步完善.

环境熟悉度  $M$ , 即外部环境对同伴交互行为

的影响力,由空间认知和方向感组成,环境熟悉度的计算公式为

$$M = [\varphi, \xi] \quad (7)$$

其中,  $M$  为环境熟悉度;  $\varphi$  为空间认知因素;  $\xi$  为方向感因素;  $[]$  为向量加权值。

空间认知  $\varphi$  包含空间建筑风格和空间记忆,其计算公式为

$$\varphi = |\lambda\alpha + \eta\beta| \quad (8)$$

其中,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为空间建筑风格和空间记忆;  $\lambda$  和  $\eta$  为当前位置与个体生活环境的差值系数,由空间环境动态组成。且当  $\lambda > 0$ ,  $\eta > 0$  时,表明当前位置与个体生活环境相似,空间建筑风格与空间记忆对个体产生积极影响;当  $\lambda < 0$ ,  $\eta < 0$  时,表明当前位置与个体生活环境相差较大,空间建筑风格与空间记忆对个体产生消极影响。

根据同伴个体对环境熟悉程度的差异性,将同伴分为“领导者”和“跟随者”,对环境熟悉的个体为领导者,不熟悉的个体为跟随者。图 3 所示为本文所使用的领导者-跟随者模型框架,其在文献[43]的基础上加入非对称亲密度和环境熟悉度因素对领导者-跟随者模型的影响。

## 5 实验过程与仿真模拟

采用本文方法,结合环境熟悉度的影响因素,

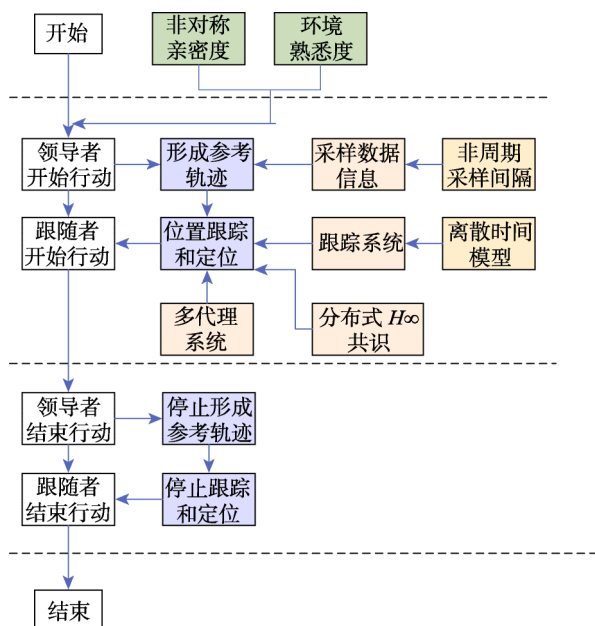


图 3 领导者-跟随者模型

在 Unity3D 引擎中对多种情景的同伴交互行为进行模拟。其过程主要分为 3 个阶段: 同伴个体的非对称亲密度建模、环境熟悉度设定和同伴群体的领导者-跟随者行为仿真。

### 5.1 实验过程

#### 5.1.1 非对称亲密度建模

首先,初始化模拟个体并将其转化为具有非对称亲密度基本要素的同伴个体;然后,判定影响同伴个体非对称亲密度的各个因素,分别将带有不同因素值的各个同伴个体存入实验队列;最后,根据非对称亲密度建模对该队列中的各个同伴个体进行加权和计算,形成完整的同伴个体。

#### 5.1.2 环境熟悉度设定

根据计算得到的非对称亲密度加权和,形成同伴群体,并比较同伴群体中各个个体的不同方向感强度;基于空间建筑风格和空间记忆构建空间认知,将空间抽象转化为对环境熟悉度具有认知影响的条件;结合方向感和空间认知形成参考轨迹,若同伴群体中出现不同的参考轨迹,则依靠非对称亲密度加权和进行选择。非对称亲密度加权和越高,参考轨迹的参考价值越高。

#### 5.1.3 同伴群体的领导者-跟随者行为

根据非对称亲密度和环境熟悉度确定领导者和跟随者。若非对称亲密度加权和较高者与环境熟悉度较高者非同一人,将非对称亲密度加权和较高者设定为领导者。当领导者参考轨迹形成后,跟随者对领导者的位置进行跟踪和定位,执行领导者-跟随者行为。

### 5.2 同伴聚集场景模拟

为验证本文方法在复杂场景下的仿真效果,本节将进行同伴聚集行为的模拟,其中包含同伴群组的动态形成、非对称亲密度因素和环境熟悉度影响。并且,对比本文方法、对称亲密度方法<sup>[45]</sup>以及群集系统方法<sup>[5]</sup>的聚集效率,证明结合非对称亲密度和环境熟悉度的领导者-跟随者模型具有较好的仿真效果。

#### 5.2.1 同伴群组形成

为探讨非对称亲密度对同伴交互行为的影响,根据非对称亲密度对同伴个体进行赋值。场景为室内平面图,其中黑线代表墙面,个体不可直接穿越,只能通过黑线外的非连接处进行室内行为活动。最初,场景中各个个体随机分布,如图 4a 所示。



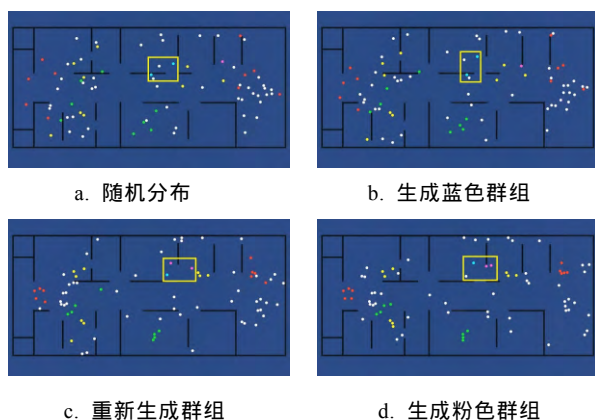


图4 同伴群组形成

随着同伴个体的不断运动,逐渐形成不同的同伴群体。属于同一同伴群体的个体用相同的颜色表示。其中,同伴群体个数是随机生成的,分别用粉色、蓝色、黄色、绿色和红色表示研究的个体。图4所示为模拟动态组的形成,2个蓝色个体先组成了蓝色的同伴群组;当粉色个体出现后,因为粉色个体与其中1个蓝色个体的非对称亲密密度值大于2个蓝色个体的非对称亲密密度值,因此将组成新的粉色同伴群体。

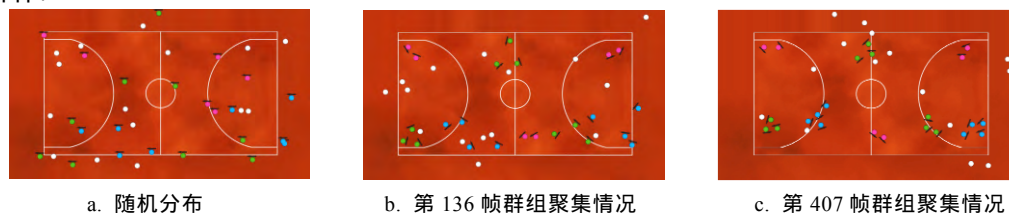


图5 同伴聚集

表1 不同因素对非对称亲密度的影响 %

同伴群组	认知心理	社会关系强度	观点一致性	非对称亲密密度
2人组	68	57	78	72.44
3人组	72	49	71	68.93
4人组	53	62	48	55.28

表2 不同方法实现同伴聚集行为的效率比较

仿真方法	平均模拟效率/%	平均行为完成时间/s
本文	86.3	5.28
对称亲密密度 <sup>[45]</sup>	82.2	6.03
群集 <sup>[5]</sup>	81.5	6.74

### 5.3 同伴购物场景模拟

为了证明本文方法能有效地模拟同伴友谊的建立,构建了超市购物场景,并对其进行了性能测试,测试结果如表3所示。其中,同伴群体用蓝色标注,非对称亲密密度较低的群组用红色标注,非对称亲密密度中等和较高的群组用绿色标注。同伴群组行走行为依靠领导者-跟随者模型。当非对

### 5.2.2 同伴聚集

同伴聚集影响非对称亲密度和环境熟悉度的各个因素,仿真效果如图5所示。最初,篮球场上的个体进行初始赋值,并进行如图5a所示的随机分布和运动轨迹生成,箭头指向下一步的行动方向。图5b和图5c分别为在第136帧和第407帧处不同同伴群组的聚集情况。当同伴群组形成后,根据非对称亲密度和环境熟悉度进行领导者-跟随者行为。

本文分别对2人组(紫色),3人组(绿色)和4人组(蓝色)进行讨论;表1所示为各因素对非对称亲密度的影响。通过仿真模拟可知,同伴领导者-跟随者模型中,在影响非对称亲密度和环境熟悉度的各个因素作用下,同伴群体会进行不同的选择;认知心理、社会关系强度和观点一致性强的同伴个体能更快地聚集。表2所示为不同方法实现同伴聚集的效率比较,结果表明,本文方法在环境熟悉度因素的影响下能较为高效地实现同伴聚集。

称亲密密度加权和较低( $\tau < 0.3$ )时,不易建立友谊,购物欲望不会因为他人改变;当非对称亲密密度加权和中等( $0.3 \leq \tau < 0.6$ )或较高( $\tau \geq 0.6$ )时,易建立友谊,购物欲望会根据同伴的购物欲望而改变,一起购买或不购买。

表3 超市购物场景性能测试结果

个体数	平均模拟效率/%	平均行为完成时间/s
100	89.5	4.37
300	86.1	5.33
500	83.3	5.61

图6a和图6b分别为2组随机实验,实验证明本文方法能合理地反映现实生活中的同伴关系,增强了同伴行为模拟的真实性和高效性。

### 5.4 同伴疏散场景模拟

为论证本文改进的领导者-跟随者模型能高效地进行同伴行为仿真模拟,对200个同伴个体的公园场景进行人群疏散仿真实验,并将其与不同的领导者-跟随者模型进行比较,本文方法仿真模拟

如图 7 所示.



a. 第 1 组



b. 第 2 组

图 6 同伴友谊建立场景随机实验情况模拟



a. 本文



b. 文献[43]



c. 文献[8]

图 7 不同方法公园疏散场景实验情况模拟

公园是一个广阔的开放性场所,实验开始时环形喷泉周围的人群陆续进入所设环境,随着人群逐渐增加,同伴群体通过领导者-跟随者模型进行运动,在环境熟悉度和非对称亲密度的影响下,同伴群体能在较短时间内得到有效疏散.

在疏散时,人群最普遍的抉择是选择距离自己最近的出口,因此常会发生拥堵现象,导致出口人群疏散效率低的情况.本实验将本文方法与动态领导者-跟随者模型<sup>[43]</sup>、领导者-跟随者模型<sup>[8]</sup>进行仿真,仿真效果如图 7 所示;其中选取相同帧数的情况进行比较.比较得出,基于非对称亲密度的领导者-跟随者模型对人群疏散具有优势性和可行性,能在较短时间内寻找到最佳疏散出口位置.

本文所有实验均运行在配置 Windows10(64 位)的 PC 上运行(Intel(R) Core(TM) i7-4200H CPU 2.80 GHz 8 GB 内存).表 4 所示为本文方法与动态领导者-跟随者模型<sup>[43]</sup>、领导者-跟随者模型<sup>[8]</sup>的各

项指标比较.虽然文献[8]可以实现领导者-跟随者行为,但是模拟效率以及运动速度都相对较低;文献[43]在传统的领导者-跟随者模型的基础上通过非周期采样间隔和切换拓扑,模拟领导者的动态变化,增加了群体运动的不确定性和高效性,但没有关注环境熟悉度对领导者-跟随者模型的影响.

表 4 不同领导者-跟随者模型性能测试结果

方法	平均模拟 帧率/(帧·s <sup>-1</sup> )	平均行走 速度/(m·s <sup>-1</sup> )	平均相隔 距离/m
本文	46.8	1.27	1.61
文献[8]	34.7	0.67	3.14
文献[43]	42.3	0.99	2.39

在影响非对称亲密度和环境熟悉度的各个因素作用下,同伴群体进行不同的选择.通过仿真模拟比较,证明本文方法能较为完整地模拟动态的同伴交互行为,在提高仿真效率的同时,增强合理性和可视性.

## 6 总结与展望

本文从非对称亲密度和环境熟悉度出发,提出基于非对称亲密度的同伴行为仿真方法.使用Unity3D引擎对同伴群组的动态形成与聚集、购物欲望的影响、友谊的建立和人群疏散进行模拟,并将本文方法与对称亲密度假真方法以及群集方法实现同伴聚集的效率进行对比.

结合非对称亲密度和环境熟悉度的领导者-跟随者模型,能更真实高效地模拟同伴交互行为.但该方法适用于模拟人数较多的群体,模拟的人群基数越大,越能体现其仿真优势;而且,影响同伴交互的因素是复杂的,还包括个体的性格特质和行事风格等;同时,同伴群组规模和群组间的关系也是影响同伴交互的重要因素.在未来的研究中,将通过粒子群方法提高小基数人群的模拟效率,并且根据 OCEAN 模型深入研究同伴个体性格特质,根据行为习惯探究行事风格对交互行为的影响,通过分类讨论同伴群组中群组规模、群组间个体和群组内个体的关系,对同伴交互模型展开进一步的研究和扩充.

## 参考文献(References):

- [1] Yang Shanwen, He Wu, Rao Yunbo. Group behavior simulation based on group dynamics[J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(12): 1769-1778(in Chinese)  
(杨善雯, 何武, 饶云波. 群体动力学的群组行为仿真[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(12): 1769-1778)
- [2] Li Zuning, He Wu. Deformable guiding mesh-based simulation of group formation[J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(7): 969-977(in Chinese)  
(李祖宁, 何武. 可变形网格引导的群体队形仿真[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(7): 969-977)
- [3] Lu G H, Chen L T, Luo W P. Real-time crowd simulation integrating potential fields and agent method[J]. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, 2016, 26(4): 1-16
- [4] Reynolds C W. Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model[C] //Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 1987, 21(4): 25-34
- [5] Lemerrier S, Auberlet J M. Towards more behaviours in crowd simulation[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2016, 27(1): 24-34
- [6] Wang W L, Lo S M, Liu S B. A cognitive pedestrian behavior model for exploratory navigation: visibility graph based heuristics approach[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2017, 77: 350-366
- [7] Qin X, Liu H, Zhang H, et al. A collective motion model based on two-layer relationship mechanism for bi-direction pedestrian flow simulation[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2018, 84: 268-285
- [8] Qiu F S, Hu X L. Modeling group structures in pedestrian crowd simulation[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, 18(2): 190-205
- [9] Fu L B, Song W G, Lv W, et al. Multi-grid simulation of counter flow pedestrian dynamics with emotion propagation[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2016, 60: 1-14
- [10] Meng Z Y, Dimarogonas D V, Johansson K H. Leader-follower coordinated tracking of multiple heterogeneous Lagrange systems using continuous control[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(3): 739-745
- [11] Wang H S, Guo D J, Liang X W, et al. Adaptive vision-based leader-follower formation control of mobile robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4): 2893-2902
- [12] Helbing D, Molnár P. Social force model for pedestrian dynamics[J]. Physical Review E, 1995, 51(5): 4282-4286
- [13] Bouvier E, Cohen E, Najman L. From crowd simulation to air-bag deployment: particle systems, a new paradigm of simulation[J]. Journal of Electronic Imaging, 1997, 6(1): 94-107
- [14] He Gaoqi, Jiang Dongxu, Jin Yi, et al. Crowd behavior simulation based on shadow obstacle and ORCA models[J]. Scientia Sinica Informationis, 2018, 48(3): 233-247(in Chinese)  
(何高奇, 江东旭, 金祎, 等. 结合影子障碍物和ORCA模型的人群仿真方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(3): 233-247)
- [15] Xu M L, Wu Y P, Lv P, et al. miSFM: on combination of mutual information and social force model towards simulating crowd evacuation[J]. Neurocomputing, 2015, 168: 529-537
- [16] Xu M L, Li C X, Lv P, et al. An efficient method of crowd aggregation computation in public areas[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2018, 28(10): 2814-2825
- [17] Digman J M. Personality structure: emergence of the five-factor model[J]. Annual Review of Psychology, 1990, 41(1): 417-440
- [18] Mehrabian A. Pleasure-arousal-dominance: a general framework for describing and measuring individual differences in temperament[J]. Current Psychology, 1996, 14(4): 261-292
- [19] Ben-Ze'ev A. Describing the emotions: a review of the cognitive structure of emotions by Ortony, Clore & Collins[J]. Philosophical Psychology, 1990, 3(2/3): 305-317
- [20] Mao Y, Li Z N, Li Y J, et al. Emotion-based diversity crowd behavior simulation in public emergency[J/OL]. The Visual Computer, 2018, <https://doi.org/10.1007/s00371-018-1568-9>
- [21] Mao Y, Yang S W, Li Z N, et al. Personality trait and group emotion contagion based crowd simulation for emergency evacuation[J/OL]. Multimedia Tools and Applications, 2018, <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6069-3>
- [22] Durupinar F, Gudubay U, Aman A, et al. Psychological parameters for crowd simulation: from audiences to mobs[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2016, 22(9): 2145-2159
- [23] Fu L B, Song W G, Lv W, et al. Simulation of emotional contagion using modified SIR model: a cellular automaton approach[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications



- tions, 2014, 405: 380-391
- [24] Lv P, Zhang Z J, Li C C, *et al.* Crowd behavior evolution with emotional contagion in political rallies[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2019, 6(2): 377-386
- [25] Xue J X, Yin H, Lv P, *et al.* Crowd queuing simulation with an improved emotional contagion model[J]. Science China: Information Sciences, 2019, 62(4): Article No.044101
- [26] Lee S, Foote J, Wittrock Z, *et al.* Adolescents' perception of peer groups: psychological, behavioral, and relational determinants[J]. Social Science Research, 2017, 65: 181-194
- [27] Marshall-Denton R, Véronneau M H, Dishion T J. Brief report: a confirmatory approach to the validation of the peer group norm questionnaire[J]. Journal of Adolescence, 2016, 50: 16-21
- [28] Mulvey K L, Rizzo M T, Killen M. Challenging gender stereotypes: theory of mind and peer group dynamics[J]. Developmental Science, 2016, 19(6): 999-1010
- [29] Narr R K, Allen J P, Tan J S, *et al.* Close friendship strength and broader peer group desirability as differential predictors of adult mental health[J]. Child Development, 2019, 90(1): 298-313
- [30] Davies S H, Overholt S E, Hoffman N D. Ethics, emotional quotient, and interpersonal connection: peer identified characteristics for urban high school-based peer navigators[J]. Journal of Adolescent Health, 2018, 62(2): S127
- [31] Brenick A, Romano K. Perceived peer and parent out-group norms, cultural identity, and adolescents' reasoning about peer intergroup exclusion[J]. Child Development, 2016, 87(5): 1392-1408
- [32] Szwedo D E, Hessel E T, Loeb E L, *et al.* Adolescent support seeking as a path to adult functional independence[J]. Developmental Psychology, 2017, 53(5): 949-961
- [33] Lin R Y, Levordashka A, Utz S. Ambient intimacy on Twitter[J]. Cyberpsychology: Journal of Psychosocial Research on Cyberspace, 2016, 10(1): Article No.6
- [34] Dijkstra P, Barelds Dick P H, Ronner S, *et al.* Intimate relationships of the intellectually gifted: attachment style, conflict style, and relationship satisfaction among members of the Mensa society[J]. Marriage & Family Review, 2017, 53(3): 262-280
- [35] Prager K J. Intimacy status and couple conflict resolution[J]. Journal of Social and Personal Relationships, 1991, 8(4): 505-526
- [36] Mastrocola S S, Flynn D P. Peer emotional support, perceived self-efficacy, and mental health morbidities among student-veterans at a public university[J]. The Journal of Continuing Higher Education, 2017, 65(3): 187-198
- [37] Piccardi L, Riseti M, Nori R. Familiarity and environmental representations of a city: a self-report study[J]. Psychological Reports, 2011, 109(1): 309-326
- [38] Merriman N A, Ondřej J, Roudaia E, *et al.* Familiar environments enhance object and spatial memory in both younger and older adults[J]. Experimental Brain Research, 2016, 234(6): 1555-1574
- [39] Merriman N, Ondrej J, O'Sullivan C, *et al.* The role of environment familiarity on spatial memory for novel objects: an ageing study[J]. Perception, 2013, 42(S1): 140
- [40] Loria A, Dasdemir J, Jarquin N A. Leader-follower formation and tracking control of mobile robots along straight paths[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(2): 727-732
- [41] Liu B, Chu T G, Wang L, *et al.* Controllability of a leader-follower dynamic network with switching topology[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(4): 1009-1013
- [42] Meng Z Y, Dimarogonas D V, Johansson K H. Leader-follower coordinated tracking of multiple heterogeneous Lagrange systems using continuous control[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(3): 739-745
- [43] Zhang D, Xu Z H, Wang Q G, *et al.* Leader-follower  $H$  consensus of linear multi-agent systems with aperiodic sampling and switching connected topologies[J]. ISA Transactions, 2017, 68: 150-159
- [44] Shi Dianxi, Yang Ruosong, Mo Xiaoyun, *et al.* Measuring method for friend relationship strength in daily communication[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(3): 77-84(in Chinese)  
(史殿习, 杨若松, 莫晓贇, 等. 日常交互中朋友关系强度度量方法[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(3): 77-84)
- [45] Gou Chengqiu, Yu Hanyou, Xu Zi'an, *et al.* Simulation of small social group behaviors in emergency evacuation based on information asymmetry[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018, 30(3): 524-530(in Chinese)  
(苟成秋, 余瀚游, 徐梓桢, 等. 基于信息非对称性的小群组紧急疏散行为模拟[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(3): 524-530)