

# 人群仿真模型综述

郑子泽, 郭江涛

杭州电子科技大学, 浙江 杭州

收稿日期: 2022年4月11日; 录用日期: 2022年5月14日; 发布日期: 2022年5月20日

## 摘要

随着计算机技术水平的飞跃发展和人们对动画特效的迫切需求, 人群建模引发了空前的研究热潮。人群运动建模和仿真已成为计算机图形学, 安全科学和人工智能的研究热点。本文从人群运动仿真的意义出发, 回顾了人群运动仿真的传统研究方法, 并对常用传统模型的基本原理、优缺点以及相关应用进行了介绍。讨论了现阶段人群运动仿真的研究热点, 包括现今极为火热的基于大数据驱动的新型仿真模型以及融入情绪传染的仿真方法。分析了人群运动仿真领域现阶段存在的不足, 重点指出了当今对于情绪研究只重视情绪的感染方式而忽略了情绪差异下行人行为异质性的问题。最后, 对人群仿真未来的研究方向进行了展望。

## 关键词

人群仿真, 社会力模型, 情绪传染, 元胞自动机模型, 人群疏散

# Overview of Crowd Simulation Models

Zize Zheng, Jiangtao Guo

Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang

Received: Apr. 11<sup>th</sup>, 2022; accepted: May 14<sup>th</sup>, 2022; published: May 20<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

With the rapid development of computer technology and the urgent need for animation effects, crowd modeling research has given rise to an unprecedented tide of research. Crowd motion modeling and simulation have become a hot research topic in computer graphics, security science and artificial intelligence. This paper reviews the traditional research methods of crowd motion simulation from the significance of crowd motion simulation and introduces the basic principles, advantages and disadvantages of commonly used traditional models and related applications. The current research hotspots of crowd motion simulation are discussed, including the new simulation

**models based on big data and simulation methods incorporating emotional contagion, which are extremely hot nowadays. The shortcomings in the field of crowd motion simulation are analyzed, highlighting the fact that today's research on emotion focuses only on emotional contagion and ignores the heterogeneity of pedestrian behavior in response to emotional differences. Finally, the future research directions of crowd simulation are prospected.**

## Keywords

**Crowd Simulation, Social Force Model, Emotional Diffusion, Cellular Automata Model, Crowd Evacuation**

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

进入新世纪以来, 各国经济水平快速提高, 大量的乡村人口涌向城市, 这些流动人群给城市带来了发展的同时, 同样也给城市里的公共区域带来了巨大的压力, 尤其是地铁、商场等场所常常人满为患。而大规模的人群聚集极易诱发躁动、不安等负面情绪。此时一旦发生突发事件, 恐慌情绪将迅速在人群中传播从而导致人群阻塞甚至出现踩踏, 对公共安全产生巨大的冲击, 产生严重的事故后果。

如何在事故发生时迅速采取应对措施或者通过预测来避免事故的发生变得极为重要。传统的疏散演习费时费力且不能真实反映出紧急情况下行人的迷茫和惊慌等情绪, 而利用计算机人群仿真技术可以在有效降低成本的同时提高安全性, 因此利用虚拟人群仿真技术研究人群疏散对预防安全事故发生、保障公共安全有着重大的现实意义。

人群仿真技术首次出现于 Reynolds [1]提出的一种用以模拟鸟群内部群体行为的“Boid”模型。在那之后, 人群模拟仿真得到了学者的持续研究并在各个领域大放异彩。尽管人群仿真领域现阶段已经取得了巨大的进展, 但是随着社会环境的复杂化、计算机水平的不断提高, 简单场景下的人群仿真模型已不能满足当前的研究需求。人群仿真技术也不再是单一的计算机仿真技术, 其往往需要与心理学、大数据等学科相互交叉。因此, 研究如何模拟出真实环境中行人的运动对提高城市规划合理性和人群应急疏散效率有着重大的现实意义。本文后续将对传统的人群仿真模型和现阶段主要的研究方法进行归纳和总结, 并指出现阶段研究尚存的部分问题, 最后对未来的研究方向和发展趋势进行展望。

## 2. 传统人群仿真模型

人群仿真模型根据仿真对象的规模可以分成两大类: 宏观模型和微观模型。其中, 宏观模型将所有行人看成一个整体, 更加关注人群的宏观数据(人流速率、人群密度)之间的联系, 忽略了个体行为方式和交互情况。因此宏观方法更适合模拟车站等空间范围大、人群密度高的场景。而微观模型则更侧重于行人的个体行为特征, 重点关注个体的运动方式、决策以及与周围个体之间的交互情况。

### 2.1. 宏观模型

宏观模型从全局出发, 重点关注人群整体的运动情况。下面以几个典型的宏观模型为例, 介绍了其工作原理、在人群仿真领域的具体应用以及各自的优缺点。

### 2.1.1. 连续介质模型

为了正确描述人群运动, Hughes [2]首次提出了连续介质理论用以描述人流。他通过对流体方程进行拓展并将之应用于人群建模仿真领域, 进一步提出了一种基于连续介质理论的人群运动仿真方法, 用以对大规模人群进行实时仿真模拟。这也是首次使用宏观模型对大规模人群场景进行仿真模拟。该模型忽略个体自身的运动特征, 将所有拥有相同目标方向的人群当成一个整体, 连续的人流通过动态势场表征。

利用该模型, 可以构造出许多特殊的移动模式如车道编队、漩涡编队等, 还可以对人群的大规模运动进行模拟。Jiang 等人[3]基于连续介质模型开发了一种复杂环境的人群仿真方法。他们提出一种环境结构离散化方案与密度转换技术, 并在障碍物附近生成额外的不适区域, 使得行人可以生成更平滑的运动轨迹。最终的实验结果证明了该方法可以在复杂的动态环境中获取到合理的人流。Sewall 等人[4]提出了一种对真实道路环境进行合成和可视化的新方法。通过该方法可以有效处理车道变更和合并, 同时可以模拟由限速等因素产生的特殊行为。Golas 等人[5]基于连续介质模型提出了一种湍流人群仿真模型。该模型通过结合行人间的压力以及加速度约束对人群湍流现象进行了仿真模拟, 实验结果表明该方法与人群事故中观测到的数据指标相符, 因此可以对湍流现象进行有效模拟。Oğuz 等人[6]在连续介质模型的基础上, 使用了一种离线遮挡剔除技术来进一步加速仿真。通过对火灾、爆炸等场景下的人群疏散场景进行探究后发现, 基于连续介质模型的方法比基于智能体的方法更有效。

可以看出, 连续介质模型完全忽略了个体异质性, 把所有运动方向相同的行人当成一个整体, 大大减轻了计算量, 因此在大规模人群仿真方面有着得天独厚的优势。但也正因为其仅考虑人群整体的运动趋势, 忽略了人群运动中极为常见的个体间碰撞、人群内部骚乱等局部特征, 使得其在应对现阶段更复杂的社会环境以及更高精确度的人群仿真需求时显得较为乏力。

### 2.1.2. 流体动力学模型

流体动力学起源于物理研究领域, 在人群运动仿真领域一般采用 N-S 方程[7]。仿真时把个体看成是流体中的粒子, 通过 bool 变量从各个梯度方向对行人的存在性进行判断, 用粒子的碰撞来表征个体间的受力情况, 如图 1 所示。在运动过程中, 整个系统需要遵循能量守恒、动量定理等, 因此在仿真过程中, 主要利用物理学相关公式进行求解, 这在一定程度上减轻了计算压力。

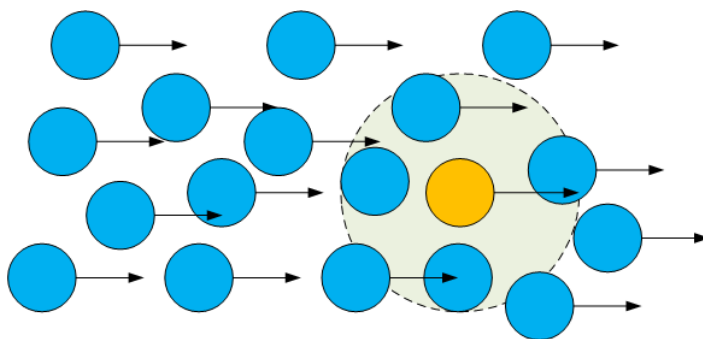


Figure 1. Schematic diagram of the fluid dynamics model  
图 1. 流体动力学模型示意图

Henderson 是最早使用流体动力学进行建模仿真的学者之一, 在他的研究基础上, Helbing 等人[8]提出了一种对中高密度行人运动的观察方法, 并将行人流和粒子流进行了对比。Hughes 等人[9]在流体动力学的基础上, 探究了人群密度对人流速度的影响。他们通过对不同密度的人流进行处理并使用 N-S 方程

推导出人群运动的控制方程, 并将原有的对单一类型人群的研究拓展至多类型, 增强了原有模型的鲁棒性。而在图形学领域, Chenney 等人[10]提出人群运动过程中的碰撞可以通过使用自由发散的流来进行处理, 使得人群运动特征更为丰富。Treuille 等人[11]基于流体动力学提出了一种实时人群运动模型, 该模型通过一个动态域将全局规划与运动的障碍物相结合, 从而有效减少了仿真过程中复杂的避碰计算, 进一步提高了大规模人群仿真的效率。

可以看出流体动力学模型在描述大规模人群时优势明显, 因为其仅仅考虑人群整体的运动状态。但也正由于流体动力学模型将所有的行人都按照相同的模式进行运动, 使其在描述个体的特性以及小团体行为上较为乏力。而显然, 个体之间的交互行为往往会在很大程度上影响人群的运动, 这也导致了流体动力学模型不适用于异质性人群以及人群内部互动模式的研究。

## 2.2. 微观模型

微观模型从局部出发, 重点关注行人个体的运动情况。下面以几个典型的微观模型为例, 介绍了各自的工作原理、在人群仿真领域的具体应用以及优缺点。

### 2.2.1. 社会力模型

传统的社会力模型是由 Helbing 等人[8]于 2000 年提出的一种人群运动仿真模型, 用以研究人群的动力学特征, 如图 2 所示。在应用时, 该模型将人群疏散过程中行人的运动通过力的形式表征。行人在疏散过程中所受合力由指向出口的驱动力、来自相邻行人的排斥力、来自障碍物的排斥力、不确定外力的构成。动力学方程为:

$$m_i \frac{d\vec{v}_i(t)}{dt} = \vec{f}_i^0 + \sum_{j(\neq i)} \vec{f}_{ij} + \sum_w \vec{f}_{iw} + \vec{\xi}(t) \tag{1}$$

其中,  $i$  表示环境中运动的行人,  $j$  表示行人  $i$  的相邻行人,  $w$  表示环境中的障碍物。  $m_i$  表示行人  $i$  的质量,  $\vec{v}_i(t)$  表示行人  $i$  当前时刻的速度矢量,  $\vec{f}_i^0$  表示行人  $i$  指向出口的驱动力,  $\vec{f}_{ij}$  表示行人  $i$  受到的周围行人  $j$  的排斥力,  $\vec{f}_{iw}$  表示来自障碍物的排斥力,  $\vec{\xi}$  表示行人  $i$  受到的环境中的随机力。

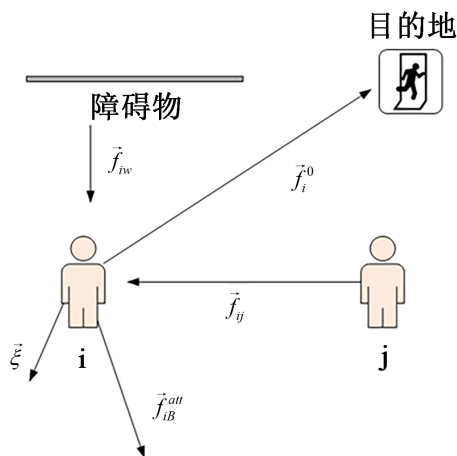


Figure 2. Schematic diagram of the social force model  
图 2. 社会力模型示意图

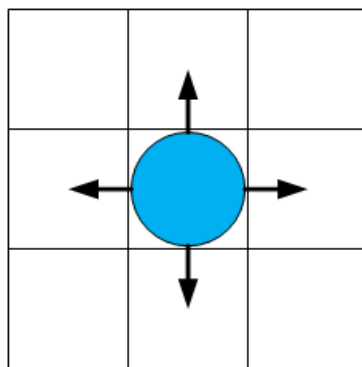
社会力模型是最早和最广泛使用的人体动力学仿真模型, 该模型首次从力学角度刻画人群运动行为, 之后的许多研究都深受影响。在 SIGGRAPH 2007 上, Pelechano 等人[12]基于社会力提出了一种高密度

自主人群模型, 通过心理学和几何规则, 控制个体在高密度动态环境中进行全局寻路。Saboia 等人[13]通过引入移动网络来改进社会力模型使得行人的运动轨迹更加柔和、连贯。Karamouzas 等人[14]通过在社会力中引入回避力来协助行人对未来可能发生的碰撞进行预测从而有效避让。Ji 等人[15]提出了一种基于速度感知的社会力模型, 他们认为行人自身的空间以及行人间的相对速度可以用来预测未来的运动并减少模型的震荡。此外, 部分学者通过对社会力模型的改进, 探讨了在人群运动中极为常见的小团体行为。Khamis 等人[16]将社会力模型与人工蜂群优化算法相结合来获得最高疏散效率。Zhang 等人[17]通过将社会力模型与 boid 模型相结合, 探讨了在不同社会关系下小组行为对人群疏散的影响。证明了小团体的存在可以减少人群疏散时间, 提高疏散效率。

社会力模型的特点在于物理意义明确, 将环境对行人的影响因素通过一个个明确的力进行表示, 首次对行人运动模式的内在原因做出来了解释。与流体动力学等宏观模型相比, 社会力模型更关注行人自身的运动情况, 在描述行人运动时更细腻。与其他的微观模型相比, 社会力模型把每一个行人都当成独立的个体, 行人间的运动方式和交互特征各不相同。且由于社会力模型是连续空间模型, 因此能够精确描述不同层次的作用力, 在刻画行人运动行为时更为精确。同时, 应用社会力模型仿真人群疏散时, 各个行人之间能够互相接触, 这是元胞自动机模型所不具备的。另外, 社会力模型还可以模拟出一些人群自组织行为如“快即是慢”、“瓶颈摆动”等, 还能很好地结合心理学, 具有较强的可拓展性, 使得最终的仿真结果更接近真实情况。但社会力模型的缺点在于需要耗费大量资源去计算每一个力, 不利于大规模人群疏散仿真, 但随着计算机的快速发展, 该缺陷正在逐渐被解决。

### 2.2.2. 元胞自动机模型

元胞自动机模型是在 1940 年提出的一种离散模型, 通过将时空信息离散化, 结合状态、元胞、规则等元素来描述元胞在各个时刻的分布情况[18]。在进行人群仿真时, 先将仿真场景离散化成一个网格空间, 并且设定行人只能在网格空间中进行活动。每个行人占据一个空间, 并且按照行人自身当前的状态和邻域的状态更新获取下一刻的状态, 每一个行人可以选择留在原地或者移动到状态为空闲的邻域内, 行人移动方式如图 3 所示。



**Figure 3.** The direction in which pedestrians may move in the model  
**图 3.** 模型中行人可能移动方向

可以看出, 元胞自动机模型通过设定一系列规则将复杂且连续的运动离散化, 从而简化了问题。在计算过程中只考虑邻域的状态, 通过一个个局部运动最终形成一个宏观的运动现象。因此, 元胞自动机模型常常用来模拟人群疏散的演化过程, 后续的许多研究也集中在对经典元胞自动机模型的改进上。Goldengorin [19]通过分析后指出, 传统的元胞自动机模型主要是通过障碍物的几何形状来描述疏散场景,



因此在人群行为与疏散场景的相关性上存在局限。Waq [20]对元胞自动机的一些改进方法进行了总结, 包括对空间离散规则的改进、划分更精细的网格和更丰富的邻域类型。此外还将人群的行为模式融入其中实现对更复杂场景的仿真模拟。吴凡等人[21]基于元胞自动机模型, 根据最小费用最大流和广度优先算法提出了一种新型的人群疏散仿真算法。该算法通过数值矩阵对行人状态和环境因素进行量化, 结合最小费用最大流思想建立一种逃离规则。仿真结果显示该算法下的人群拥有更高的疏散效率, 且由于在算法中考虑了心理因素, 因此更符合实际。

元胞自动机的优势在于建模快捷简单并且计算量小, 但也存在着较为明显的劣势。元胞自动机模型仅仅是抽象化了行人的运动规则, 且运动规则相对统一固定。另外, 每一个元胞空间内的行人不会发生碰撞、推挤等行为, 因此该模型无法完全体现个体之间的交互等微观行为。

### 2.2.3. 磁场力模型

磁场力模型是由 Okazaki 和 Matsushita [22]提出的一种基于“同性相斥, 异性相吸”原理的人群仿真模型。磁场力模型将行人与环境中的障碍物设置成相同的磁极, 将出口设置成相反的磁极。因此行人与环境中的障碍物和其他行人之间存在排斥力, 行人与出口间存在引力, 斥力和引力的隔离共同驱使行人运动。但是由于磁场力中的相关参数无法用经验数据进行校正, 因此该模型没有得到较好的发展。

### 2.2.4. 基于智能体的模型

基于智能体的模型提供了个体感知、决策和行动能力, 因此智能体不仅能够主动感知环境并采取对应的行为方式, 还会影响其他智能体, 所以智能体技术在描述行人运动方面优势明显。在基于智能体的人群建模时, 一般将智能体分成主智能体、环境智能体、角色智能体和接口智能体。每个智能体都有详细的社会属性参数, 可以与运动中的主智能体进行交互。此外, 基于智能体的模型还可以与路径规划以及其他一些模型相结合, 从而模拟出更复杂的人群行为。Karamouzas 等人[23]提出一种积分器, 用以兼容多智能体系统非线性的力和基于物理系统的动画。Weiss 等人[24]根据拉格朗日定理开发了一种基于位置的动态系统。每个智能体的行为通过计算短期碰撞避免和长期碰撞避免得到。通过该模型可以产生如无缝穿梭、车道形成等人群行为。Guy [7]等人基于智能体模型构建一个高度并行的仿真系统, 用以解决人群仿真中出现的碰撞问题。可以看出, 基于智能体的模型在全局导航和局部避碰领域应用较广。

## 3. 现阶段主要的仿真模型

尽管传统的仿真模型已经颇为完善且可以较为准确地对简单的人群运动行为进行仿真模拟, 但随着计算机水平的进步、仿真场景的复杂化以及建模精度需求的提高, 传统的仿真模型已经不能满足人们的需求。因此, 结合新兴技术对更复杂的人群运动场景进行仿真模拟成为了当下的研究热点。

### 3.1. 基于大数据驱动的人群仿真模型

近几年由于大数据的兴起, 基于大数据驱动的人群仿真技术也得到了快速发展。该方法基于真实行人数据的分析, 提取相关特征信息, 最后通过这些信息来模拟人群的行为。基于大数据驱动的算法也可以根据研究对象的不同分为微观层数据驱动和宏观层数据驱动。其中微观层数据驱动以“状态-响应”来表示人群运动。Lerner 等人[25]在数据库中录入经过处理的真实场景中的行人数据, 在仿真模拟时将与实际场景最匹配的数据提取出来进行实验。之后, Lerner 等人[26]又通过为每一个行人设置不同的行为模式来对该方法进行优化。而对于宏观数据驱动方法而言, 人群的运动方式一般用场来表征。首先通过视频数据获取行人的速度场信息, 再比较搭建的仿真场景信息与真实场景信息, 最终通过从视频中获取的行人速度信息来驱动仿真场景中的行人。

与传统的人群运动仿真方法不同的是, 数据驱动的方法并非是从数学、物理等角度对行人运动行为

进行解释。该方法的优点在于其使用的数据源是真实世界中行人的运动数据, 因此仿真的结果更接近真实场景。但缺点也很明显, 这种方法对于数据的要求极为严格, 且对于疏散场景的适应性差, 必须对仿真场景内的人群运动数据进行预采集。此外, 为了得到更合理的数据, 需要不断提高算法精度甚至需要进行海量的人工标记, 部分研究人员试图通过人工合成数据对获取的真实数据进行补充修正, 用以解决真实数据难以获取、数据量少等缺点[27]。另外, 如何对获取的数据进行有效处理也成为一大难点。为了解决这些问题, 部分学者开始探索如何提高数据的可重用性从而增加模型的适应性。另外一种思路是将数据驱动与模型驱动相结合, 通过真实场景中的行人数据对模型驱动的场景进行修正, 从而减轻模型驱动方法中的调参压力。

### 3.2. 融入情绪传播的人群仿真模型

近年来, 人们注意到在现实生活中紧急情况经常导致行人精神紧张。而这些负面情绪很容易在人群中散布开来, 最终导致大规模的人群骚动。因为情绪是个体的认知和意识共同作用的产物, 焦虑情绪不但会对行人自身的行为方式造成影响, 而且会通过情绪传染机制影响其他个体的判断能力和交互模式。因此, 如何对带有情绪因素的人群运动行为进行合理且有效的模拟仿真是当今的一个重难点。

Liu 等人[28]提出了一种新型的情绪模型, 他们认为人群管理的关键是控制负面情绪的传播从而防止整个人群陷入负面情绪状态。通过与传统的流行病学领域对比发现, 情绪传染过程与 SIR 模型相似。因此, Fu 等人[29]将 SIR 模型引入元胞自动机模型并开发了“CA-SIRS 模型”。该模型通过模拟人群在静止和运动时的情绪传染情况, 发现个体运动会增加情绪传染的速度, 并增加最终受感染行人的比例。Cao 等人[30]将 P-SIS 模型与社会力模型相结合, 发现新模型可以更真实地模拟人群疏散。通过类似的方式, Liu 等人[31]将心理形态特征引入人群踩踏事件仿真模型。Xu 等人[32]模拟了多种情况下恐慌情绪的产生和蔓延。Xu 等人[33]探究了密集人群中情绪传染过程的动力学, 研究了初始消极情绪行人的比例、情绪影响半径等因素对整个人群情绪转变的影响。Mao 等人[34]将个体情绪与小组行为相结合, 研究了紧急疏散过程中的小组行为。Tsai [35]在情绪传染的研究中借鉴了流行病学和热力学的研究方法, 发现热力学模型对模拟恐慌场景更为适用。

通过对研究现状的探究可以发现, 现阶段学者在研究情绪因素影响下的人群运动仿真时, 大多侧重于情绪的传染过程以及人群情绪的演变过程对疏散的影响, 而少有研究者关注个体在不同情绪状态下具体行为差异对疏散的影响, 传统的社会力模型也仅仅以速度大小的不同来简单表征个体差异。显然个体在不同情绪下的具体行为方式的差异同样会影响人群的疏散。例如车站或地铁中急着赶路的行人往往会以一个更快的速度, 更小的绕行弧度越过前方行人, 而非焦虑状态的行人往往会与周围的行人保持一个较为舒适的距离。

## 4. 未来研究趋势

计算机水平的不断发展、公共环境的复杂化以及对建模真实性需求的不断提高, 给当今的人群建模仿真领域带来了新的挑战。本文结合研究现状对人群仿真领域未来的研究方向进行了简单分析:

1) 大数据下的人群仿真。现阶段对于大规模场景下人群数据在仿真上的应用仍存在较大困难, 如何从海量的人群行为数据中获取关键信息并将其应用于人群仿真仍需要很长的一段路。在未来, 如何进一步对获取到的数据进行分析处理, 从中提取出能有效反映人群行为的关键特征变得极为重要。

2) 与人工智能相结合的人群仿真。近些年人工智能的兴起使得人群仿真与认知科学的结合产生了可能。如何搭建一个合适的神经网络对人群行为数据进行训练并将之应用到真实的疏散场景, 进而使行人社会心理与运动行为相结合成为了一个颇具前景的研究课题。

3) 基于高性能计算的人群仿真。人群仿真规模的扩大、行人数据的堆积, 势必会带来计算资源的分配问题。通过分布式对数据进行并行计算来解决相关问题是一种可行的方案。

4) 结合行人情绪表达的人群仿真。当前仿真领域对于情绪的研究仍停留在情绪的传染上, 且大部分研究主要针对焦虑、恐慌等情绪。如何体现个体行为对情绪的表达、进一步丰富情绪种类, 在未来仍需进一步探究。

## 5. 结束语

本文首先回顾了传统的人群仿真方法并针对各个研究方法指出了各自的优缺点。然后针对传统仿真模型的缺点, 结合现阶段研究环境的需求, 对当今人群仿真研究的热点进行了介绍。最后, 我们基于对人群模拟仿真技术发展进程的回顾, 对未来的研究发展的趋势进行了展望。

## 参考文献

- [1] Reynolds, C.W. (1987) Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model. *Proceedings of the 14th annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, Anaheim, 27-31 July 1987, 25-34. <https://doi.org/10.1145/37401.37406>
- [2] Hughes, R.L. (2002) A Continuum Theory for the Flow of Pedestrians. *Transportation Research Part B: Methodological*, **36**, 507-535. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(01\)00015-7](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(01)00015-7)
- [3] Jiang, H., Xu, W., Mao, T., Li, C., Xia, S. and Wang, Z. (2010) Continuum Crowd Simulation in Complex Environments. *Computers & Graphics*, **34**, 537-544. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2010.05.013>
- [4] Sewall, J., Wilkie, D., Merrell, P. and Lin, M.C. (2010) Continuum Traffic Simulation. *Computer Graphics Forum*, **29**, 439-448. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2009.01613.x>
- [5] Golas, A., Narain, R. and Lin, M.C. (2014) Continuum Modeling of Crowd Turbulence. *Physical Review E*, **90**, Article ID: 042816. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.90.042816>
- [6] Oğuz, O., Akaydın, A., Yılmaz, T. and Gündükbay, U. (2010) Emergency Crowd Simulation for Outdoor Environments. *Computers & Graphics*, **34**, 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2009.12.004>
- [7] Guy, S.J., Chhugani, J., Kim, C., Satish, N., Lin, M., Manocha, D., et al. (2009) Clearpath: Highly Parallel Collision Avoidance for multi-agent simulation. *Proceedings of the 2009 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, New Orleans, 1-2 August 2009, 177-187. <https://doi.org/10.1145/1599470.1599494>
- [8] Helbing, D., Farkas, I. and Vicsek, T. (2000) Simulating Dynamical Features of Escape Panic. *Nature*, **407**, 487-490. <https://doi.org/10.1038/35035023>
- [9] Hughes, R.L. (2000) The Flow of Large Crowds of Pedestrians. *Mathematics and Computers in Simulation*, **53**, 367-370. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00228-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00228-7)
- [10] Chenney, S. (2004) Flowtiles. *The 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, Grenoble, 27-29 August 2004, 233-242. <https://doi.org/10.1145/1028523.1028553>
- [11] Treuille, A., Cooper, S. and Popović, Z. (2006) Continuum Crowds. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, **25**, 1160-1168. <https://doi.org/10.1145/1141911.1142008>
- [12] Pelechano, N., Allbeck, J.M. and Badler, N.I. (2007) Controlling Individual Agents in High-Density Crowd Simulation. *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, San Diego, 2-4 August 2007, 99-108.
- [13] Saboia, P. and Goldenstein, S. (2012) Crowd Simulation: Applying Mobile Grids to the Social Force Model. *The Visual Computer*, **28**, 1039-1048. <https://doi.org/10.1007/s00371-012-0731-y>
- [14] Karamouzas, I., Heil, P., Beek, P. and Overmars, M.H. (2009) A Predictive Collision Avoidance Model for Pedestrian Simulation. *2nd International Workshop on Motion in Games*, Zeist, 21-24 November 2009, 41-52. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10347-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10347-6_4)
- [15] Ji, Q., Wang, F. and Zhu, T. (2016) VPBS: A Velocity-Perception-Based SFM Approach for Crowd Simulation. *2016 International Conference on Virtual Reality and Visualization (ICVRV)*, Hangzhou, 24-26 September 2016, 317-324. <https://doi.org/10.1109/ICVRV.2016.59>
- [16] Khamis, N., Selamat, H., Ismail, F.S., Lutfy, O.F., Haniff, M.F. and Nordin, I.N.A.M. (2020) Optimized Exit Door Locations for a Safer Emergency Evacuation Using Crowd Evacuation Model and Artificial Bee Colony Optimization. *Chaos, Solitons & Fractals*, **131**, Article ID: 109505. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2019.109505>



- [17] Zhang, X. and Zhu, Y. (2021) Simulation of Crowd Motion Based on Boids Flocking Behavior and Social Force Model. *Instrumentation*, **8**, 29-42.
- [18] Crociani, L. and Lämmel, G. (2016) Multidestination Pedestrian Flows in Equilibrium: A Cellular Automaton-Based Approach. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **31**, 432-448. <https://doi.org/10.1111/mice.12209>
- [19] Goldengorin, B., Makarenko, A. and Smelyanec, N. (2006) Some Applications and Prospects of Cellular Automata in Traffic Problems. *7th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry*, Perpignan, 20-23 September 2006, 532-537. [https://doi.org/10.1007/11861201\\_61](https://doi.org/10.1007/11861201_61)
- [20] Wąs, J., Porzycki, J., Lubaś, R., Miller, J. and Bazior, G. (2016) Agent-based Approach and Cellular Automata—A Promising Perspective in Crowd Dynamics Modeling. *Acta Physica Polonica B: Proceedings Supplement*, **9**, 133-144. <https://doi.org/10.5506/APhysPolBSupp.9.133>
- [21] 吴凡, 李春忠, 林丽芳, 朱家明. 一种基于元胞自动机的人群疏散仿真算法研究[J]. 延边大学学报: 自然科学版, 2019, 45(4): 329-334.
- [22] Okazaki, S. and Matsushita, S. (1993) A Study of Simulation Model for Pedestrian Movement with Evacuation and Queuing. *Proceedings of the International Conference on Engineering for Crowd Safety*, London, 17-18 March 1993, 271.
- [23] Karamouzas, I., Sohre, N., Narain, R. and Guy, S.J. (2017) Implicit Crowds: Optimization Integrator for Robust Crowd Simulation. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, **36**, Article No. 136. <https://doi.org/10.1145/3072959.3073705>
- [24] Weiss, T., Litteneker, A., Jiang, C. and Terzopoulos, D. (2017) Position-Based Multi-Agent Dynamics for Real-Time Crowd Simulation. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, Los Angeles, 28-30 July 2017, Article No. 27. <https://doi.org/10.1145/3099564.3108160>
- [25] Lerner, A., Chrysanthou, Y. and Lischinski, D. (2007) Crowds by Example. *Computer Graphics Forum*, **26**, 655-664. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2007.01089.x>
- [26] Lerner, A., Fitusi, E., Chrysanthou, Y. and Cohen-Or, D. (2009) Fitting Behaviors to Pedestrian Simulations. *Proceedings of the 2009 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, New Orleans, 1-2 August 2009, 199-208. <https://doi.org/10.1145/1599470.1599496>
- [27] Zhang, W., Wang, K., Qu, H., Zhao, J. and Wang, F.-Y. (2017) Scene-Specific Pedestrian Detection Based on Parallel Vision. arXiv preprint arXiv:1712.08745.
- [28] Liu, Z., Jin, W., Huang, P. and Chai, Y. (2013) An Emotion Contagion Simulation Model for Crowd Events. *Journal of Computer Research and Development*, **50**, 2578.
- [29] Fu, L., Song, W., Lv, W. and Lo, S. (2014) Simulation of Emotional Contagion Using Modified SIR Model: A Cellular Automaton Approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **405**, 380-391. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.03.043>
- [30] Cao, M., Zhang, G., Wang, M., Lu, D. and Liu, H. (2017) A Method of Emotion Contagion for Crowd Evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **483**, 250-258. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.04.137>
- [31] Liu, T., Liu, Z. and Chai, Y. (2016) Method for Crowd Trampling and Crushing Simulation Based on Psychological Model. *Journal of System Simulation*, **28**, 2448-2454.
- [32] Xu, M., Xie, X., Lyu, P., Niu, J., Wang, H., Li, C., et al. (2019) Crowd Behavior Simulation with Emotional Contagion in Unexpected Multihazard Situations. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, **51**, 1567-1581. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2899047>
- [33] Xu, T., Shi, D., Chen, J., Li, T., Lin, P. and Ma, J. (2020) Dynamics of Emotional Contagion in Dense Pedestrian Crowds. *Physics Letters A*, **384**, Article ID: 126080. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2019.126080>
- [34] Mao, Y., Fan, Z., Zhao, J., Zhang, Q. and He, W. (2019) An Emotional Contagion Based Simulation for Emergency Evacuation Peer Behavior Decision. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **96**, Article ID: 101936. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.101936>
- [35] Tsai, J., Bowring, E., Marsella, S. and Tambe, M. (2013) Empirical Evaluation of Computational Fear Contagion Models in Crowd Dispersions. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, **27**, 200-217. <https://doi.org/10.1007/s10458-013-9220-6>