**密级： 保密期限：**

xm 拷贝

**硕士学位论文**



**题目：多情境下动态人群模拟技术研究**

**学 号： 2017111599**

**姓 名： 苏腾辉**

**专 业： 电子科学与技术**

**导 师： 苑金辉**

**学 院： 信息光子学与光通信研究院**

**年 月 日**



**Thesis for Master Degree**

**Topic: Research on The Technology of Dynamic Crowd Simulation in Multiple Situation**

**Student No.: 2017111599**

**Candidate： Tenghui Su**

**Subject: Electronic Science and technology**

**Supervisor: Jinhui Yuan**

**Institute: Institute of Information Photonics and Optical Communications**

**March 21th, 2020**

独创性(或创新性)声明

本人声明所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京邮电大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名：日期：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

关于论文使用授权的说明

学位论文作者完全了解北京邮电大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属北京邮电大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。(保密的学位论文在解密后遵守此规定)

保密论文注释：本学位论文属于保密在年解密后适用本授权书。

非保密论文注释：本学位论文不属于保密范围，适用本授权书。

本人签名：日期：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

导师签名：日期：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_

**多情境下动态人群模拟技术研究**

**摘 要**

动态人群模拟是计算机图形学的重要研究领域之一，在公共安全、疏散模拟、影视制作、游戏动画等领域都有非常广泛的应用。但是现有的群体算法大多不能适用于多种情境下的人群模拟，而且大多算法没有考虑到行人的心理因素，模拟仿真出来的效果不佳。所以目前人群模拟技术的热点和难点是快速构建合适的模型用来满足多种情境下的仿真需求，而且能够达到良好的计算效率，甚至可以满足实时性的要求。针对这些问题，本文提出了适用于多情境下的人群模拟算法，本算法通过结合智能体模型和经典社会力模型，能够很好地保留原模型的优势，而且可以更灵活地应对复杂多样的场景。本文的主要研究内容和成果如下：

1. 本文提出了个性感知范围，即不同属性的行人在不同情境下拥有不同的感知范围，从而可以表现个体的差异性，并且结合心理学引入了动态分群的概念，将个体的行为与群体的行为有机地结合在一起。

2. 在仿真系统的设计与实现中，本文分别根据仿真效率和仿真效果两个方面对提出的模型进行优化。对于前者，提出基于均匀网格的密度估算方法来优化计算环境因素的问题。对于后者，使用人物模型和动画，并且考虑真实情境下的情况，在动画中引入了侧身躲避效果，经测试后表明本文提出的方法能够适应多种情境下的仿真需求。

本文的研究工作充分考虑了现实因素，提出的模型在多种情境下都符合预期效果，拥有较高的适用性和可扩展性。为多角色、个性化人群的仿真等相关研究提供参考和应用价值。与此同时，在计算性能上也做了相应优化，能够满足千人级别实时仿真任务的需求。

**关键词：**人群模拟 社会力模型 多情境 动态分群 碰撞避免

**RESEARCH ON THE TECHNOLOGY OF DYNAMIC CROWD SIMULATION IN MULTIPLE SITUATION**

**ABSTRACT**

Dynamic crowd simulation is an important research field of computer graphics, which is widely used in public security, evacuation simulation, film and television production, game animation, etc. However, most of the existing algorithms can not be applied to crowd simulation in various situations, and many of them do not take into account the psychological factors of pedestrians, so the simulation results are not good enough. It is the hot and difficult point of dynamic crowd simulation technology to build a pedestrian simulation model quickly to meet the simulation requirements in various situations and meet the real-time computing efficiency. To solve these problems, this paper proposes a crowd simulation algorithm which is suitable for multiple situations. By combining agent model and classical social force model, the algorithm can retain the advantages of the original model well, and deal with the complex and diverse scenes more flexibly. The main contents and innovative achievements of this paper are summarized as follows:

1. In this paper, we propose a perceptual range, in which pedestrians with different attributes have different perceptual ranges, so that they can show individual differences. In addition, we propose the concept of dynamic clustering combining individual behavior and group behavior.

2. In the design and implementation of simulation system, this paper optimizes the model from two aspects of simulation efficiency and simulation effect. In terms of simulation efficiency, the density estimation method based on uniform grid is proposed to optimize the calculation environment. In the simulation effect, we use the character model and animation, and consider the actual situation, use the bounding box of the cuboid, put forward the side avoidance algorithm, and can adapt to the simulation needs in many situations.

The research work of this paper has got a great effect of crowd simulation. The proposed model meets the expected effect in a variety of situations, has a high applicability and scalability, and provides reference and application value for multi role, personalized crowd simulation and other related research. In addition, a lot of optimization has been done in computing performance, which can meet the needs of real-time simulation tasks.

**KEY WORDS:** crowd simulation social force model multiple situation dynamic clustering collision avoidance

**目 录**

[第一章 绪论 1](#_Toc37089768)

[1.1 研究背景和意义 1](#_Toc37089769)

[1.2 国内外研究现状 2](#_Toc37089770)

[1.2.1 国外研究概况 3](#_Toc37089771)

[1.2.2 国内研究概况 4](#_Toc37089772)

[1.3 研究对象及研究内容 6](#_Toc37089773)

[1.4 论文结构 7](#_Toc37089774)

[第二章 相关技术 9](#_Toc37089775)

[2.1 行人仿真模型 9](#_Toc37089776)

[2.1.1 流体力学模型 9](#_Toc37089777)

[2.1.2 元胞自动机模型 9](#_Toc37089778)

[2.1.3 社会力模型 10](#_Toc37089779)

[2.1.4 基于智能体的仿真模型 12](#_Toc37089780)

[2.2 路径规划技术 13](#_Toc37089781)

[2.2.1 Dijkstra算法 13](#_Toc37089782)

[2.2.2 A\*算法 14](#_Toc37089783)

[2.3 碰撞检测 15](#_Toc37089784)

[2.3.1 基于网格的碰撞检测 15](#_Toc37089785)

[2.3.2 基于层次包围盒的碰撞检测 16](#_Toc37089786)

[2.4 三维仿真系统软件 16](#_Toc37089787)

[2.5 本章小结 17](#_Toc37089788)

[第三章 改进的社会力模型 18](#_Toc37089789)

[3.1 基于Agent的感知范围 18](#_Toc37089790)

[3.2 真实感模拟 20](#_Toc37089791)

[3.2.1 行人分群策略 20](#_Toc37089792)

[3.3 修正动力学方程 23](#_Toc37089793)

[3.3.1 群间作用力 23](#_Toc37089794)

[3.3.2 群自吸引力 24](#_Toc37089795)

[3.3.3 动态防撞力 25](#_Toc37089796)

[3.3.4 DC-SFM动力学方程 26](#_Toc37089797)

[3.4 仿真实验和分析 27](#_Toc37089798)

[3.4.1 个体穿梭模拟 28](#_Toc37089799)

[3.4.2 小列队穿梭模拟 29](#_Toc37089800)

[3.4.3 不同属性的行人模拟 31](#_Toc37089801)

[3.4.4 阵列模拟 33](#_Toc37089802)

[3.5 本章总结 36](#_Toc37089803)

[第四章 仿真系统的设计与实现 37](#_Toc37089804)

[4.1 仿真系统架构 37](#_Toc37089805)

[4.1.1 初始化模块 37](#_Toc37089806)

[4.1.2 引擎模块 38](#_Toc37089807)

[4.1.3 数据采集模块 39](#_Toc37089808)

[4.2 仿真效率优化 40](#_Toc37089809)

[4.2.1 人群密度估计 40](#_Toc37089810)

[4.3 仿真效果优化 41](#_Toc37089811)

[4.3.1 导入模型与动画 42](#_Toc37089812)

[4.3.2 行人侧身算法 43](#_Toc37089813)

[4.4 仿真效果 44](#_Toc37089814)

[4.4.1 个体穿梭模拟 44](#_Toc37089815)

[4.4.2 不同属性行人模拟 46](#_Toc37089816)

[4.4.3 小列队穿梭模拟 47](#_Toc37089817)

[4.4.4 阵列模拟 48](#_Toc37089818)

[4.5 本章总结 50](#_Toc37089819)

[第五章 总结与展望 51](#_Toc37089820)

[5.1 主要工作总结 51](#_Toc37089821)

[5.2 未来工作展望 52](#_Toc37089822)

[参考文献 53](#_Toc37089823)

[致谢 57](#_Toc37089824)

[攻读学位期间取得的研究成果 58](#_Toc37089825)

1. 绪论
   1. 研究背景和意义

动态人群模拟技术是计算机图形学(computer graphics，CG)的一个重要的研究领域，在动画制作、交通规划、公共安全、军事演练、电影后期等方面有着广泛的应用前景。近些年来，社会经济的不断发展，人口越来越集中，人们日常聚众活动增多，公共场所聚集大量人群的现象时有发生，但由于公共资源有限和场地限制，安全事故频频发生。如图1-1(a)，(b)所示，在举行一些社会活动或者仪式的时候，会产生很大的人流量，人群密度随之大幅上升，一旦发生突发性安全危机事件，如果不能采取合理的、有效的措施应对，会导致巨大伤亡。据不完全统计，我国每年因公共场所发生踩踏事件导致数十万人伤亡，间接或直接的经济损失高达千亿元。人员的聚集带来了各种各样的社会问题，所以越来越多的学者开始对动态人群模拟技术进行深入研究。

|  | |
| --- | --- |
| a. 踩踏事件 | b. 人群聚集 |
|  | |
| c. 动画场景模拟 | d. 紧急疏散模拟 |
| 图1-1 人群聚集问题及人群模拟相关应用 | |

随着计算机动画仿真技术的进步，虚拟现实技术的逐渐成熟，目前可以在计算机上动态模拟虚拟行人的行为。事故往往发生在人群密度较高的公共场所，人群的拥挤和个体对陌生场所的未知导致了一场又一场的悲剧。为了预先知晓事故中可能发生的情况，一个行之有效的方法是：在计算机中建立与真实场景比例相同的场景模型，并根据预测的人员数量向场景内导入相应数量的虚拟行人，更精确地，可以根据以往人群统计数据设置其个性元素(年龄、性别、身高、性格倾向等)，然后采用人群模拟算法来进行人群的运动仿真，最后可以借鉴多次仿真的结果并结合实际情况来制定应急方案、预警措施等。比如可以事先在仿真中出现严重拥挤的位置放置指示牌进行人员分流或者事先安排工作人员进行现场指挥以避免出口负载不均的情况，甚至也可以尝试调整建筑结构，如取消一些不必要的栅栏或障碍，以便在发生意外时将损失减少到最低。

人群模拟领域的科研工作者关注的侧重点各有不同，总体上可以分成三个方向：心理学角度、计算机科学角度、建筑构造角度。心理学家重点关注人群模拟中每个个体的具体的行为，研究人的心理因素对整个群体运动的作用，他们提出了关于人群疏散的心理理论，可供其他学科研究工作者对模型的仿真效果进行对比参考。计算机科学家是基于数学模型和算法角度，试图模拟出大规模人群运动的效果，尽可能减小仿真中个体之间的碰撞、重叠等现象，更加重视视觉的效果与算法的优化，这一方向是与建模结合最为密切，其中一个重要的应用场景是增强影视动画视觉震撼效果。有建筑背景的研究工作者基于虚拟现实的角度，关注在人群运动时建筑物的结构是否合理，在设计时着重考虑行人通行的效率和安全通道的位置等。不同学科的研究者虽然侧重点不同，但是最终目的都是尽可能真实的模拟出人群的运动情况。

本文是基于虚拟现实的研究课题，旨在研究能够适用于多情境下的人群仿真算法，需要考虑不同情境 (如紧急、休闲、庄重等)，比如在紧急状况下，人群运动呈现出来许多与正常情况下不同的特征：(1)行人个体间因为年龄、身高、体型、性别等生理因素会产生不同的决策，从而产生不同的运动状态；(2)由于个体间信息的不对称性，个体会产生不同的决策，因而场面会比较混乱；(3)在紧急状况下，行人会产生恐慌心理，因此会产生从众的现象，在现象上会产生很多小群体。

综上所述，本论文的意义可以概括为以下几个方面：

1. 本文研究适用于多种情境的人群模拟算法，并且结合了心理学，将对人群模拟的多个领域的研究相结合。

2. 本文研究工作从虚拟个体的角度出发，而非全局感知的上帝视角，更加真实地模拟出人群的运动效果，也丰富了虚拟现实在安防领域的应用和实践，为动态人群的建模提供了新的角度。

3．本文借助智能体模型的思想，改进并优化了传统的社会力模型，提出了修正后的运动学方程，并且在Unity3D引擎上开发了三维可视化的虚拟人群仿真系统，可以通过配置文件快速搭建人群仿真程序得到仿真效果。

* 1. 国内外研究现状
     1. 国外研究概况

国外的计算机图形学发展的比较早，对群体行为的研究最早起源于对动物的观察和模拟，Reynolds[1]等人探索了一种基于模拟的方法，提出了单独编写每只鸟的路径脚本的代替方法，设计的Boid模型用来模拟鸟群觅食的群体行为，该文中还提到了一个观点：进行动物模拟的成功性和有效性是很难衡量的，比起仿真出的群体符合某些统计特性，更重要的是让观众认为是表现自然的。Blumberg[2]等人从动物训练中获得的启发，提出了一种实用的强化学习方法，对狗的运动行为进行数学建模与仿真。随着仿真技术的发展，群体模拟的对象逐渐趋向高级，从低级动物到哺乳动物，从简单生物到高智能生物，因而难度也大大提高了，动物的行为一般都是为了觅食或者迁徙，其目的一般比较单一固定，而人类是有独立的思想的，而且涉及的场景众多，比如商场，电影院，学校等相对复杂的场景。

人群模拟的研究成果中，按照研究的内容一般主要可以分为三种：

第一种是人群运动的仿真模拟。研究者们提出了很多模型与真实的人群运动进行数据比较，比如基于Agent的模型由于能够比较精细的刻画个体的特征，仿真效果出众，但基于Agent的模型计算量往往较大，在中小规模的群体仿真中表现良好，随着人群数量增加，性能下降的很快，所以针对不同仿真需求要对模型进行选择。

第二种是建立对人群运动路径的风险评估的数学模型，研究者根据运动路径的距离、灾难的类型和等级、人员分布及密度、出口的数量及位置等数据评估风险度提出不同的风险评估模型，这些数据能够定量分析风险因素，以帮助做出更客观安全的决策。

第三种是优化人群模拟算法，根据不同的情境，使用不同的人群模拟算法，并且能够根据情境的特殊性进行针对性优化。在人群运动过程中，希望能够模拟出最优的运动路线，一般而言，研究者将人群疏散总时间、平均疏散路程等物理量进行计算，并通过综合考虑路径的拥塞情况和个体的生存竞争得出最佳方案。

人群模拟还有一个很重要的应用场景是紧急疏散仿真。到目前为止，研究者基于大量的观察和统计，提出了大量理论和符合一般规律的现象，最主要的有：人群的自组织现象、人群恐慌理论、紧急情况下的从众理论等，这些现象或理论为后续的算法优化提供了启发和思路。

自组织现象：指的是在自然界中形成的大量的有规律现象，具体表现在生物学和社会科学领域，在一定的条件下，整个系统由开始的混乱无序的状态渐渐演化成宏观有序的状态。在人群运动的过程中，研究人员发现人群自动形成某种结构。

恐慌理论：当发生自然灾害或者恐怖袭击的时候，行人个体会感受到自身的生命安全受到威胁，这些威胁会严重影响到行人的大脑，并造成恐慌的情绪。当行人进入恐慌状态时，行人的求生思维可能会受到影响，行动能力会受到一定的下降，机体反应时间会适当变长。

从众理论：行人在逃生的过程中，由于恐慌，很多行人难以迅速做出较优的选择，尤其是在行人不熟悉环境的情况下，行人很可能依赖身边的其他行人，与他们保持相同的运动方向，即从众理论。

人群模拟模型按照建模方式分为宏观模型和微观模型两大类。宏观模型如Henderson[3]提出的流体力学模型，其原理是将人群视为连续的流体，利用玻尔兹曼方程进行求解并且模拟，该模型可以在宏观层面大致模拟出人流的运动情况，但是没有考虑运动过程中每个行人的特征和差异，无法反映个体行为，在人数较少时的表现效果较差，故无法适应多情境下的仿真需求。

微观模型将重点集中在个体上，通过各种算法尝试去控制个体的行为，如Helbing[4][5][6]提出的社会力模型(social force model, SFM)，将行人抽象成粒子，并且结合牛顿力学定律将人与人之间的关系用“力”来表达。他抽象出“社会力”驱动行人的运动，并且使用“互斥力”进行避障，更具体的原理和对比将在第二章中详述。

另外，策略偏向和行为偏向取决于研究者关注的问题，策略偏向的模型通过分析人群的流量、平均速度、人群密度、运动轨迹、逃离时间等统计量分析行人运动的规律是否符合真实世界的规律，然而真实世界中的数据也不容易获得，只能从一定程度上判断模型的科学性、合理性，此类研究可以为人群的疏散或者是建筑的结构等提供一定的参考性。行为模型注重对个体行为的控制，描述的是微观运动场景中，个体与个体之间，个体与环境之间相互作用、相互影响的情况，通过结合社会心理学、博弈论等相关的决策，使个体之间的交互更加符合真实世界，在拓扑结构上表现为“个体-小队-阵列-人群”。

* + 1. 国内研究概况

国内的研究团队对于虚拟现实中的人群模拟方向研究的相对较晚，但是也取得了惊人的研究成果。人群模拟算法众多，针对不同的算法，众多研究者提出了针对不同情况下的改进方案，试图提高模型的仿真真实感或降低算法的时间复杂度。

人群模拟中基于元胞自动机模型[7][8][9][10]的研究方面，岳昊[11]等人通过改进元胞自动机模型，提出的动态参数模型能够很好的适应非紧急情况下的人群运动状态，并且通过调节安全出口的数量以及其布局位置得出了与疏散时间之间的定性关系。李晓雪[12]基于元胞自动机模型针对城市公共交通中的公交车停靠方式进行研究，其结合绘制的图表分析，对主流的公交车停靠方式进行理论对比，并且考虑到了现实中城市中不同区域的客流量不均衡的问题，改进其模拟的效果，大大提升了仿真模拟的真实性。中科大火灾科学国家重点实验室的杨立中[13]等人将人群模拟算法模型应用到实际的火灾场景中，合理地引入了全新的概念“total risk factor”，并且结合现实生活中行人在不同情况下的平均反应时间等信息，使得改进后的模型能够更加真实有效地模拟出火灾中行人的运动情况，为制定更有效的撤离计划奠定基础。

人群模拟中基于社会力模型的研究方面，张开冉[14]等人改进社会力模型，考虑到了不同年龄段、不同性别的乘客携带不同行李种类，以成都汽车站为例进行实验仿真，较为真实地模拟出了疏散场景。中山大学的纪庆革[15]等人提出了密度场的概念，将社会力模型和密度场结合在一起，使人群朝着密度较低的方向运动以降低拥堵阻塞的可能性，提高了社会力模型的效果。邓宇菁[16]等人额外考虑了行人的运动随机性，针对相向运动的人群场景进行仿真，通过控制人行道宽度、人群密度等变量复现了人流阻塞和自组织现象。汪蕾[17]等人改进了经典SFM，添加合理的人群行为如具有亲密度关系的朋友的影响来增加模型的真实性。

人群模拟中基于agent模型的研究方面，复旦大学的李进[18]等人观察到在大型活动例如世博会、灯会等社会活动场景中人们长时间排队的问题，提出基于多智能体模型的优化算法，该算法根据人群的偏好，场景的拥堵程度以及道路的阻力状况进行优化选择游览路径，该算法可以大大提供社会的总体效率，减少人群拥塞的情况。常钦[19]等人基于Multi-Agent模型和元胞自动机模型，将真实感(前者的优势)和时序(后者的优势)两个优势相结合，使改进后的模型既有时序逻辑性又能准确的刻画个体的优势，能够更好地模拟出人群的运动。李晖[20]等人基于多智能体模型，重点关注宏观疏散中的人群推搡和穿梭行为，实验证明在该情况下会导致疏散时间增加。陈淼[21]等人结合舰船空间内的场景，提出短期目标最短路径算法，该算法能够很好地仿真出在封闭空间内人群的有效避撞。孙立晟[22]根据传染病的传播模型和Multi-Agent模型，并结合GIS平台，使用该模型可以预测疫情的传播状态，为政府部门防疫工作提供一定的参考。

提出一种基于多智能体模型改进的无标度网络传染病传播模型，提出了一种适合传染病传播的Agent混合结构模型，并根据传染病传播数学模型，构建了传染病仿真模型中个体Agent的状态转化关系。

人群模拟研究的发展历程中，提出的模型大多知识描述运动特征，缺少了人群运动过程中行人之间和行人与环境之间的交互，极少考虑到心理因素等其他因素对于疏散过程的影响。浙江大学CAD&CG实验室的任治国[23]等人通过研究个体心理情况，将传统A\*寻路算法和心理学因素结合在一起，达到更高的仿真真实感。四川师范大学的何武[24]等人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，通过对环境熟悉度排序，提出改进的leader-follower模型, 模拟同伴疏散行为，取得了良好的仿真效果。

* 1. 研究对象及研究内容

在系统调研人群模拟领域相关研究内容的基础上，本文提出多情境下的动态人群模拟算法，可以适用于应急情境、休闲情境等多种情况，还可以根据个体间的社会关系进行行为上的区分，而且在高密度大规模的人群模拟时拥有良好的算法复杂度。本文主要的研究内容包括以下几个方面。

1. 研究人群模拟算法：人群模拟算法的相关方法有许多，比较常见的有元胞自动机、社会力模型、流体动力学模型等，这些方法主要是通过将行人的运动抽象成单纯的物理上的位移，但都有自身的缺陷，比如元胞自动机将仿真空间划分成网格，它是一种离散的仿真模型，引入的算法也较为复杂。经典社会力模型将行人当成粒子，引入了驱动力、粒子间的斥力、障碍物的斥力等，社会力模型能够模拟出较好的人群自组织现象，但是由于粒子间的力会随着粒子增多而大幅增加，而且作用力在粒子较为接近时很大所导致的粒子抖动影响了仿真的真实感。本文改进经典社会力模型，使其能够适应于多种情境。
2. 优化人群模拟模型：在微观仿真框架下结合经典社会力模型和智能体模型的优势，在社会力模型中引入了agent的感知范围，并且建立以个体为基础的环境有限认知空间，动态地感知周围环境的人群密度、危险强度，同时根据自身的情绪指数等相关参数来进行群体的选择。模型还结合从众心理效应，将个体根据环境和自身的状态进行有机的组织，形成一个个小群体，即提出了动态分群的策略。与传统的社会力模型相比，该模型可适用于多种情境，真实感相较于原模型有所提升。
3. 设计并实现了基于Unity3D的人群仿真系统，该仿真系统提供了实时的虚拟人群模拟，可以从配置文件读取虚拟人群信息，比如年龄、身高、性别等，能够适用于在特定的行人比例下的仿真情况，通过引入了行人侧身避免碰撞的算法使算法真实感进一步提升，通过优化求解人群密度的方法，进一步降低算法复杂度。

|  |
| --- |
|  |
| 图1-2 论文研究技术路线图 |

论文按照“个体感知建模”、“群体运动建模”、“人群模拟优化”的思路，对行人运动和人群运动进行建模与仿真。本文研究过程大致可以分为三个层次，如图1-2所示。

第一个层次主要是建立具有环境感知能力的agent模型，构建基于视觉信息特征的环境感知模型，每个agent根据自身的属性拥有不同的感知范围，从而可以仿真出不同属性行人的运动状态。

第二个层次是主要结合了从众心理、恐慌心理和协助心理共同作用于agent，使得agent之间会有互相的联系，会产生群体效应，为了仿真出群体的效果，本文提出了动态分群策略，并且将其结合到人群模拟算法之中。

第三个层次主要是在个体或者群体的基础上，根据不同的情境进行优化，根据情境的特征，比如人群分布、场景结构、与目标的距离等等，对人群模拟从效率和效果上进行优化。

* 1. 论文结构

第一章是绪论，其主要介绍人群模拟的研究背景和意义，人群模拟算法在国内外的研究现状，并且强调了研究对象和论文研究技术路线图，明确本文的研究内容和论文章节安排。

第二章是人群模拟领域的相关技术，介绍了本文在后续的研究章节中所涉及到的相关理论和技术研究，主要包括行人仿真的主流模型及其优劣对比，用于导航搜索的行人寻路算法，实时碰撞检测技术以及三维仿真系统。

第三章是本文的一个创新点，将智能体模型与经典社会力模型相结合，提出了改进后的智能社会力模型，其中还结合了心理学对行人行为的影响，改进后的模型不仅保持了原模型的优势，而且能够适应多种情境。仿真实验选择了实际中经常出现的情境，比如行人穿越中心路口，小列队(班级、旅游团、亲友们)组团穿梭，不同年龄段行人穿梭行为，较大人群的集体行动等，具体的仿真实验包括(1)个体穿梭模拟；(2)小列队穿梭模拟；(3)不同属性的行人模拟；(d)阵列人群模拟。

第四章为Unity3D人群模拟仿真系统的设计和实现，本章主要介绍软件系统的架构，以及引入人物模型后的仿真效果。而且考虑到行人可能会进行侧身避让，引入了侧身避让算法，使实际效果更加真实。

第五章为总结与展望。本章总结了本文的主要工作内容，并且对未来的工作进行了展望，探讨了该领域将来可能的发展方向。

1. 相关技术介绍

本章首先介绍常见的行人仿真模型，研究其原理并指出其优劣势。其次本章将介绍人群模拟中所运用到的路径规划算法，由于许多人群模拟算法中需要结合路径规划，还着重介绍一些改进方法。此外碰撞检测在计算机图形学中有着诸多应用，且与人群模拟算法密不可分，故介绍了主流的碰撞检测方法。最后本章还介绍了与行人运动相关的路径规划技术和碰撞避免技术，最后介绍三维仿真软件。

* 1. 行人仿真模型

宏观模型和微观模型是人群模拟算法的两个建模分类。宏观模型针对人群的宏观统计数据(velocity、flow rate、density)之间的联系，然而宏观模型不重视个体的具体运动情况和交互状态，故无法很好地满足更加真实的仿真需求。相对应，微观模型弥补了宏观模型的不足，仿真效果更加精致细腻，但同时也提高了算法的复杂程度，能够适应的人群数量下降。本节主要介绍宏观模型中的流体力学模型、以及微观模型中的元胞自动机模型、社会力模型和基于智能体的模型。

* + 1. 流体力学模型

流体力学[3]是物理的研究领域，但随着时间的推移，它慢慢在理论和工程两个领域有了不同的发展。理论领域以牛顿力学为基础，科学家们先后提出了理想流体运动的能量方程、理想流体的运动微分方程，为后续的发展奠定了坚实的理论基础。最后科学家们提出了著名的流体三大方程即流体的连续性方程式、伯努利方程(能量方程式)和动量方程式。而在工程方面，根据人们的日常观察和科学试验，工程师们也建立了非常实用的经验公式。在人群模拟领域中，流体力学采用的是N-S方程：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-1) |

在公式(2-1)中，表示流体的密度；表示流体的压力；表示流体应力张量；表示作用在流体中的外力；是计算散度。

将流体动力学模型运用到人群模拟中，需要将流体中的粒子看成虚拟行人，可以通过bool变量从各个梯度方向进行行人的存在性判断。但是仅仅考虑总体的人流规律是不够的，个体之间的交互作用会在很大程度上影响仿真的效果，以流体力学模型为代表的宏观模型在模拟的过程中缺失了这些变量，因此仿真的细节效果不佳。

* + 1. 元胞自动机模型

Von Neumann在1940年提出元胞自动机模型，其通过离散化时间和空间，并结合规则、元胞、领域、状态等因素，可以在描述各元胞在每个离散时刻的状态。首先将场景离散化形成若干个网格，并且假设行人在网格中进行活动，每个行人占据一个空格，可以与相邻格子中的人员与环境进行交互。元胞自动机由四个元素组成：

1. 元胞：指的是一个个具体的格点，它的形状可随着不同的情境中的空间单元分割而变化，元胞有多种离散的状态，其值域是一个具有固定数量的集合，用以描述诸如空间是否被占据、运动方向与速度等物理量。

2. 元胞空间：指的是虚拟行人的运动场所，在一般的人群模拟中使用的是二维的元胞空间，在二维空间中以正方形栅格表示，如图2-1所示。

3. 领域：指的是元胞状态转移时需要搜索当前的邻居情况，简称为领域，领域的种类有多种，但比较常见的有Von Neumann、Mole和Extended Mole三种形态，如图2-1所示。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | |
| a. Von Neumann型 | b. Mole型 | c. Extended Mole型 |
| 图2-1 元胞自动机邻域 | | |

4. 演化规则：指的是控制运动的核心算法，通过元胞自身的状态，结合领域的状态，采用一定的算法或者函数进行行人状态的转移，根据是否包含随机量，可以分为随机性规则(probability rule，PR)和不变性规则(fixed rule，FR)。

元胞自动机四元组公式如下：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-2) |

上式中，是元胞自动机模型；是元胞空间，其中n是空间维度；是元胞自动机的状态集合；是演化规则。

元胞自动机利用离散化使问题得到简化，计算时只涉及领域内的状态，通过一个个局部的运动来形成宏观现象。这种模型在人群模拟领域不仅建模快捷简单，而且计算复杂度也不高，有大量的研究人员通过该模型研究人群模拟。

但是元胞自动机也有其劣势，元胞只是抽象表达了人员的运动规则，且领域也无法完全体现运动中的个体的微观行为，行人间的运动规则较为统一固定，无法体现个体的差异性。

* + 1. 社会力模型

经典社会力模型(social force model，SFM)是1995年由Helbing提出的该模型，该模型将行人运动看成是质点的运动，将运动原因归纳成三种物理力：目标驱动力、人与人之间的相互作用力和障碍物排斥力，并结合经典牛顿力学得出运动方程，如式(2-3)所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-3) |

其中是驱动力，是行人*i*与其他行人间相互作用力，是障碍物排斥力，是仿真系统随机作用的力，用于解决行人仿真时出现的锁死现象。

|  |
| --- |
| 图2-2 社会力模型粒子受力示意图 |

如图2-2所示表现了SFM的粒子受力示意图，图中有三个粒子i，j，k，以i为分析对象，为了直观起见，假设其速度为0，且无触碰的情况。方向指向目标，其余作用力均标注在图中，方向标注在图的右侧，不一一赘述。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-4) |

根据公式(2-4)，更准确的讲，由行人当前速度和期望速度以及时间变量同时决定，相互作用力由心理作用力和接触力构成，大小由行人间距离决定，大小由行人距离和速度决定，障碍物对行人的作用与行人与行人之间的原理类似。

社会力模型提出后，学者们对其提出了很多改进。Hellbing[25][26]通过引入恐慌系数改进了传统社会力模型以适应恐慌疏散的情况，可以反映出行人在恐慌状态下的盲从他人的现象，并且模拟出了行人在路口类似转圈的现象。Lakoba[27]等人优化了社会力模型中行人重叠现象，并使用人群密度进行行人间作用力大小的优化。Parisi[28]等人在原模型的基础上提出了个人领域减速机制，改进后的模型可以改善后方行人推动前方行人的现象。纪庆革[15]等人引入密度场，并提出了密度导向阈值的概念，使得算法在时间复杂度上更有优势。

社会力模型能很好的结合心理学，具有很强的可扩展性，并且可以很好地模拟自动渠化、人群涡流、快即是慢的现象，目前已经用于一些仿真软件如Vissim，但是该模型仍然有许多问题，比如随着人群密度提高，算法的计算复杂度骤升的问题，还有当行人间距较小的时候，过大的排斥力所导致的震荡的现象。

* + 1. 基于智能体的仿真模型

MIT的计算科学家Minsky提出了智能体这一概念，智能体能够携带人物的属性，比如高度、体重、体力、性别、年龄、健康状况等，同时它还可以携带社会属性，比如焦虑程度、与他人的亲密程度、不同出口的倾向性等。Agent可以根据身上的多种传感器去感受环境信息，并综合加工处理这些信息，进而形成符合时宜的决策。智能体这一工作机制，如图2-3所示，其模仿人类的决策模式，在人群模拟中使用智能体模型能够提高仿真的真实感。

|  |
| --- |
|  |
| 图2-3 环境同Agent的输入输出示意图 |

根据agent内部结构不同，可以分成三种不同的类型[29]]：慎思型结构、反应型结构和混合型结构。

(1)慎思型agent(deliberative agent) [30]

慎思型agent是指agent具备独立的想法，比如愿望、意念、自信等，并且引入了大量影响因素增加模型的完整度，但由于引入了大量变量会导致系统比较复杂。典型的慎思型agent如Belief Desire Intention(BDI)模型，Belief指的是环境信息、agent个体性质等；Desire指的是该agent运动的目标；Intention指的是agent的行动，是根据Belief期望达到desire因而所执行的计划。

(2)反应型agent(reactive agent) [31]

反应型结构agent相比较于慎思型agent更加强调交互作用，其可以通过与外界环境的交互以及对周围环境的感知自我进化，模型通过“如果-那么”规则集合控制行为。“如果”是外界的制约条件，“那么”是满足该特定条件后agent所执行的反应行为。简单反应式agent的基本原理是有限状态机(finite state machine，FSM)，其本质就是设置若干个状态和状态转移方程，所以构建起来比较简单，执行速度也较快，但是它将问题简化成在一个个状态之间转化，在某些特定的情况下，根据简单的规则会陷入无限循环，导致程序死锁。

(3)混合型agent(multi-agent system) [32]

仅仅使用慎思型agent和反应型agent只能应对一些比较单一的场景，而在现实世界中，问题的复杂度和综合性会大大提高。研究者们就将慎思型agent和反应型agent综合起来，形成一个混合型的agent，其吸取了内部各个agent的各种优势，相当于构建出了一个多功能决策系统[33,34]，能够更加全面地解决问题，让多种agent并行决策，并且进行加权处理输出，这样既提高了系统的智能科学性，也增加了运行效率。

* 1. 路径规划技术

路径规划在许多领域都有广泛的运用，尤其在运动规划课题中，在构建的场景内，行人需要通过该技术进行寻找目标。迪杰斯特拉算法(Dijkstra)以及A\*算法是两种非常经典的路径规划算法。

* + 1. Dijkstra算法

该算法使用了贪心的策略，它能够在数据结构——带权图中，计算从初始节点到其余各结点的最短距离。迪杰斯特拉算法从起始点开始，首先利用直接连通的条件，计算出到相邻各节点的距离，改善了初始条件，“能达地”从初始节点增加了直接相邻的节点，这就相当于增加了选择的空间，再按照贪心的思想——距离从近到远的顺序，逐步扩大“能达地”集合，直至所有的节点都能够到达。

Dijkstra最短路径规划算法的基本原理和流程如下：

1. 将场景抽象成由若干个节点构成的图结构；

2. 将图上的初始点看成一个集合P，其余点组成另外的集合Q；

3. 根据初始点O，求出O到其余点Ai的距离di，若OA连通，则di>0，否则di为无穷大；

4. 选取3中最小的di，并将与之对应的Ai加入到集合P中，根据新加入的Ai点，更新与Ai相邻点的距离，此过程称为“松弛”；

5. 重复3、4步骤，直到目标点F加入了集合P，便可以求出OF的最短距离。

Dijkstra算法的关键部分是“松弛”，即从一开始某个节点的“不可达”状态一步步演变成“可达”，随着“可达”的节点不断增多，算法又将“可达”状态优化成“最优达”的状态，这是一种循序渐进的松弛思想，在复杂度方面，因为每次迭代时需要找到“最优达”的节点，如果有N个节点则需要进行比较N次，故其时间复杂度为O(N²)，在实际应用当中比较消耗内存空间和计算时间。余冬梅[35]等人提出了精心设计的带权单向图作为优化后的存储结构有效地消除大量冗余存储和计算。陈益富[36]等人改进Dijkstra算法，通过以空间换时间的思想，将算法时间复杂度优化到比较小。

* + 1. A\*算法

A\*算法是静态网络中求解最短路径的优秀的直接搜索方法，它属于Heuristic method算法。估价函数f(n)是用来评估网格中当前节点到目标节点的距离，抽象含义为当前节点n的综合优先级别(integrated priority，IP)，当需要选择下一个要遍历的节点时，选取IP最大即f(n)最小的节点。

A\*算法的估价函数可以表示为式(2-5)：

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2-5) |

g(n)表示节点n距离起点的代价，此值越大，表示远离起点越远，而h(n)表示节点n距离目的地的预计代价，其中对于n而言，g(n)是确定的，因此h(n)是影响算法的关键，在特殊情况下，当启发函数h(n)=0时，完全由g(n)决定节点的优先级，此时算法就退化成了迪杰克斯拉算法。

一般的情况如下描述：

* 如果h(n)始终小于等于节点n到终点的真实代价，则A\*算法保证一定能够找到最短路径。但是当h(n)的值越小，算法将遍历越多的节点，也就导致算法越慢。
* 如果h(n)完全等于节点n到终点的代价，则A\*算法将找到最佳路径，并且速度很快。可惜的是，并非所有场景下都能做到这一点。因为在没有达到终点之前，我们很难确切算出距离终点还有多远。
* 如果h(n)的值比节点n到终点的代价要大，则A\*算法不能保证找到最短路径，不过此时算法执行速度会很快。
* 在另外一个极端情况下，如果满足h(n)>>g(n)，则此时可以认为前者起决定作用，这也就变成了最佳优先搜索。

通过分析可得出以下结论：

1.迪杰克斯拉算法基于无偏好的搜索，只整合了当前的已知信息，所有情况是同概率的；

2. A\*算法是基于启发式搜索，对每次搜索的节点进行预估，预估函数会影响最终的结果。

目前有众多研究者对A\*进行了改进和优化，张仁平[37]等人改进的A\*算法，修正代价函数，添加了额外的代价项，提升了算法效率，并结合例子对算法求解的过程进行说明。高庆吉[38]等人也提出了改进后的A\*算法，在有障碍物的情况下，用欧式距离计算得到h(n)的值比实际情况要小的多，他首先对可接纳性进行分析，对h(n)进行加权处理，将权值设置在一个合理范围内，并且使用“人为标志”避免机器人重复陷入“dead state”。

* 1. 碰撞检测

碰撞检测(collision detection，CD)[39]在计算机图形学、机器人和自动化等领域均有重要应用，碰撞检测可以分成离散和连续两种，常见的碰撞检测算法[40]有：基于网格的碰撞检测算法[41]、建立在层次包围盒基础上的碰撞检测算法[44][45][46]。

* + 1. 基于网格的碰撞检测

基于网格的碰撞检测算法的思想是：将地图均匀分成一个个网格，其状态可由一个二维bool数组表示，true表示该网格中存在物体，反之则表示不存在物体。当物体运动时，首先要计算出运动方向上运动范围内的网格，根据其状态，算法就能够判断是否会发生碰撞。根据以上分析，基于网格的碰撞检测算法核心[47]有两点：

1.设置合适大小的网格；

2.正确维护网格的状态。

对于第1点，网格的大小是直接影响检测的精确度，如果将网格设置过大，实际物体仅仅占了网格一小部分，则会将没有碰撞的两个物体误判成已碰撞；如果将网格设置过小，一个物体占有多个网格，那么判断一个物体需要进行多次计算，复杂度大大提高。如果场景中所有物体的大小类似，那么就可以将网格大小设置为物体的大小相当。在人群模拟中，元胞自动机模型与该检测方法在原理和实现上高度统一。

对于第2点，网格状态的与计算间隔息息相关，在多物体的场景中，碰撞检测是按照一定的顺序进行的，但实际情况中物体是同时运动的，网格的状态具有延迟性，所以会导致误判，计算间隔越小，检测的精确度越高，与之对应的计算复杂度越高[45]。

经过上述分析，基于网格的碰撞检测的缺点总结如下：1)如果场景较大，那么网格就会很多；2)网格的大小固定，无法随时改变；3)场景中物体的大小不一，无法很好的选取合适的物体当成网格大小的基准值；4)若一个物体在两个网格的交界处的时候，无法明确地表示网格的占有情况，从而会导致误判现象。

* + 1. 基于层次包围盒的碰撞检测

层次包围盒法[48][49](bounding volume hierarchies，BVH)是碰撞检测算法中广泛使用的一种方法，如图2-4(a)所示，彩色的图形表示的是实际的物体，它们都被圆形实线所层层包围，其检测的基本思想是由粗放到细致，规则图形的碰撞检测计算量小，可以利用体积略大且几何形状简单的包围盒来近似表示复杂物体。如图2-4(b)所示，在对模型进行碰撞检测时，首先从root开始进行判断，位于同一个节点下的物体存在碰撞的可能性，故需要深入下一层的节点继续判断，使用BVH方法，可以简化大量不必要的计算，在满足基本的包围盒相交条件后，再更加细致地计算两者的相交情况。

|  |  |
| --- | --- |
| a. 实际物体包围 | b. 场景图树 |
| 图2-4 BVH结构 | |

假设模型A和B要进行碰撞检测，以下是具体的算法流程：

1. 建立模型A与B的包围盒层次树。根节点为模型的大包围盒，叶节点为构成模型的基本几何元素，中间节点为各级的包围盒；

2. 从根节点开始遍历两棵树，计算在当前层次中，模型A的子部分是否与模型B的子部分发生相交现象。

* 1. 三维仿真系统软件

上世纪末随着经典社会力模型的提出，人群模拟应用技术开启了一个新的时代，在人群疏散领域涌现出很多三维仿真系统软件，如EXODUS，SimWalk，Vissim，Massive等，其中Vissim是一个典型的代表，其底层的人群模拟算法使用的就是社会力模型，并且支持用户自定义行人行为，它还可以动态地展示运动过程中人群的密度信息、空间占用率等有效信息。

商业仿真软件虽然能够支持一定条件下的人群仿真，但是无法灵活地使用更优的算法，且无法修改软件源码，以实现更加多样的功能。为了开发出运用场景更加灵活的系统，可选方案一般有三种：一是使用OpenGL，DirectX等开放图形库，提供渲染2D、3D矢量图形的跨语言、跨平台的应用程序编程接口(API)。该方法由于涉及到底层API的使用，需要比较专业的开发团队，代码量巨大，如果追求极致灵活的效果，且不考虑人力和时间成本，可以考虑使用该方法。二是使用基于地理信息系统(GIS)的仿真平台如ArcGIS，MapInfo等，这个方法借助了GIS的固有优势，在地形上有比较大的优势，能够结合实际的地形、地貌，但是使用GIS需要得到授权，且在其上结合相应的人群模拟算法可能会出现很多兼容性问题。第三种方案是直接使用Unity3D和Unreal Engine等三维游戏引擎，这类方法可以快速导入3Dmax、Maya等建模平台的行人模型和建筑模型以及场景模型，对各类仿真的任务实现较为方便，且效果比较好。

在Unity3D中，可以使用脚本对GameObject进行控制，脚本中通过Awake、Start、Update、FixedUpdate、OnDestroy等函数对物体进行控制，而且Update函数在每一帧都会调用，可以将人群模拟的算法实现成脚本代码并挂载到虚拟行人的实例上就能控制虚拟行人的运动方式。相比于上述的前两种方法，Unity3D使用C#语言进行编程开发，其开发效率相比较于OpenGL等API高，无需编写与算法无关的模块，可以将更多的精力投入到算法的实现和优化上，且模拟仿真视觉效果好，容易移植到各个平台进行展示。根据上述分析，本文采用Unity3D作为三维仿真开发平台。

* 1. 本章小结

本章主要介绍人群模拟相关的技术，首先介绍了几种经典的行人仿真模型，如社会力模型、基于智能体的模型等，然后介绍了经典的路径规划算法和碰撞检测算法，另外对现有的商业软件进行了介绍。

1. 改进的社会力模型

传统社会力模型如前所述存在许多不足，且无法很好地适用于多情境下的人群仿真，本章结合智能体的思想，将传统社会力模型中的粒子改进为有感知能力的智能体，并且感知能力与环境因素有关。同时引入了从众心理的影响，在模型中增加分群的策略，最终提出了改进后的社会力模型，由于动态分群算法是改进的核心，故将其称为动态分群社会力模型(dynamic clustering social force model，DC-SFM)，修正了与其对应的动力学方程。本文通过多个仿真实验分析，验证了改进后模型的有效性和可扩展性。

* 1. 基于Agent的感知范围

在人群模拟的过程中，行人会利用自己的感官获取环境信息，如周围的其他行人的位置和速度信息，目标的位置，危险源的位置等。有研究表明，行人各个感官获取信息比例分别为：视觉(80%)、听觉(10%)、触觉(2%)和其他感觉(4%)，所以本文重点考虑视觉因素。

真实行人水平视觉范围大小不一，但大致上满足一个范围，一般比较清晰的可视范围为120°左右，极限可视范围为208°左右，后者通俗地被称为余光。但这是行人处于相对静止状态的数据，行人在运动过程中注意范围相对更小。

本文提出的感知范围与许多先前的研究者提出的感知范围或者感知空间的概念不同，本文的感知范围不仅仅与视觉范围有关，而且与行人当时所处的环境也有关，比如个体所处当时的人群密度。感知范围本质上是表达行人获取周围信息的能力，一般认为青壮年比未成年人或者老人拥有更好的获取信息的能力，身高较高的比身材矮小的个体有更大的感知范围，当然性别也会影响个体的感知范围[50]。基于以上分析，本文对agent的感知范围进行合理的建模，感知范围与两个因素有关：环境因素和个人因素。环境因素是行人所处的环境是否密集，个人因素选取了两个相关程度较高的属性，身高与年龄。所求得的感知范围(personality perception range，PPR)是一个二维向量，具体由感知距离(perception distance，PD)和感知角度(perception angle，PA)所构成。

|  |
| --- |
|  |
| a. 人群密度较高情况下的感知范围示意图 |
|  |
| b. 人群密度较低情况下的感知范围示意图 |
| 图3-1 不同情况下感知范围 |

如图3-1所示，图3-1(a)表示在人群密度较高情况下的感知距离，灰色虚线箭头表示行人的运动方向，绿色实线箭头表示的是行人的感知角度，紫色虚线表示的是行人的感知距离，图3-1(b)表示在人群密度较低的的情况下的感知范围，值得注意的是在人群密度较低的情况下，agent会注意到更远位置、更广角度的障碍物或者行人，分别用和表示这个增量。具体的计算公式由式(3-1)，(3-2)，(3-3)给出，这里为了计算简便，将老人和孩子的感知能力作为基准，青年人在其基础上乘以一个增强因子*E*，故、和是一个预先设置的值，根据身高和年龄决定*E*的大小。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | (3-1) | | |
|  | (3-2) | | |
|  | | | (3-3) |
|  | | (3-4) | |
|  | | (3-5) | |

为了确定个体是否处于密集人群中，需要计算个体周围*neibor*距离范围内行人的数量，假设有*N*个行人，那么计算出任意两个行人之间的距离*dis\_ij*所需的算法复杂度为O(N²)，若*dis\_ij*<*neibor*，则认为agent i和agent j距离较近，当agent i周围的行人数量超过了某一个密度阈值(density threshold，DT)，就认为agent i正处于密集人群中。

本文提出的agent的感知范围和环境因素相联系，由于后续的算法都是在感知范围的基础上，相当于环境因素成为了一个重要的自变量，很多模型中，环境因素只是作为一种次要因素存在，而本文将环境因素与agent完美的融合，体现了模型的有效性。

* 1. 真实感模拟

在人群模拟过程中，行人在不同情境下会产生不同的反应，比如在紧急情况下，行人往往会产生焦虑的情绪，导致其失去理智，丧失一定的判断能力，更容易产生从众的心理；在电影院或者旅行团等相关的行人模拟中，行人之间是有社会关系的，行人间会比较亲密，故结成小团体的可能性会变大等。上述情况在传统社会力模型中很难体现，为了提高多情境下的人群仿真的真实感，本文提出了动态的分群策略，综合考虑了行人与周围环境。

* + 1. 行人分群策略

先前的其他的模型[51]有考虑到了小群组的概念，但是大多都是固定分群，比如在初始化的时候，设定确定的人群为某一分组，从而模拟出固定的群体特征和分层效果。这种算法虽然实现起来容易，计算效率较高，但是在逻辑上不完全符合实际的复杂情况，因为真实环境错综复杂，瞬息万变，行人选择与其他人成为一个群组是由于多方面的因素，而这些因素随着仿真的进行会发生变化。因此本文提出动态的分群策略，该策略会在仿真中每帧都会调用，在综合考虑多方面因素后形成的成群方式，行人之间会形成动态的拓扑关系。从整体上看，在仿真初始化时，所有虚拟个体都单独为一个群组，随着仿真的进行，会根据动态分群策略逐渐分成若干个群体。群体有四个属性，分别是成员数量，群体总质量，群体平均位置，群体平均速度，如表3-1所示。

| 表3-1 群体属性 | | | |
| --- | --- | --- | --- |
| 物理属性 | 公式 | | |
| 成员数量(个) | |  |
| 群体质量(kg) | |  |
| 群体位置 | |  |
| 群体速度(m/s) | |  |

本文将群体的物理特征与行人的物理特征相结合，在仿真中，用群体的物理属性合理的代替行人的物理属性，群体的物理特征是属于这个群体的所有行人综合考虑后计算求得的。

动态分群后的群体示意图，如图3-3所示，用灰色小圆代表虚拟行人，用灰色虚线圈代表同一个群体。可以看到图中有三个比较大的群体i，j，k。其包含的行人个数分别为8、6、9个，其余的行人既可以看成是单独的个体，也可以看成是群体中仅仅包含一个个体，此时群体的属性和个体的属性是一致的，所以逻辑是完整而自洽的。

|  |
| --- |
|  |
| 图3-3 动态分群后的群体 |

结合多种人群模拟模型的分析和对真实人群的研究，本文尝试提取出与行人成群相关的因素，抽象出吸引因子(attraction factor，AF)的概念。吸引因子表示的是Group j对agent i的吸引程度，其越大，表示吸引程度越强，agent i越倾向于加入Group j。而且需要大于吸引阈值才能判定agent i加入Group j。如果没有这个吸引阈值，群体的构建和更替将变得十分容易，群体关系将变得十分混乱，吸引阈值越大，表示成群的难度越大，可以通过调整此参数来控制成群率。

动态分群算法需要计算每个个体与其感知范围内的所有群组的吸引因子，选择其中的最大的吸引指数，且当该吸引因子大于吸引因子阈值的时候，认为该虚拟行人加入了该群体，否则单独为一个群体。经过抽象和分析与以下四个分值有关：

•个体与群体中的个体的亲疏关系分值(personal intimacy score，PIS)；

•个体与群体之间的距离分值(group distance score，GDS)；

•个体与群体的速度一致性分值(speed consistency score，SCS)；

•个体对目标的确定度分值(target certainty score，TCS)。

首先将人与人之间的关系划分为4个等级，由亲到疏的级别依次是亲人，朋友，一般社会关系，陌生人。每个等级都对应相应的分数，关系越密切，*PIS*越大，如表3-2所示。

| 表3-2 人际关系分值 | |
| --- | --- |
| 关系 | 分值 |
| 亲人 | *R* |
| 朋友 | *F* |
| 一般社会关系 | *G* |
| 陌生人 | *S* |

可以通过式(3-6)计算得到*PIS*。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-6) |

、、、分别是群体*j*中与agent i是亲人、朋友、一般社会关系、陌生人的数量。本文将每个因子都归一化处理，所以*R、F、G、S*的值都是0-1之间的数。

其次是虚拟行人与群体的距离，与群体的距离越远，*GDS*的值越小。这也十分容易理解，行人更加倾向于加入离自己较近的群体。如果群体与自己的距离超过了感知范围，从逻辑上认为agent是不会加入该群体的，甚至会产生负面的因素，即*GDS*小于0的情况。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-7) |

第三是速度的一致性，根据视频监控的观察，个体往往更愿意加入与自身速度方向相似的群体。原因是群体的平均速度方向和目前虚拟行人的越一致，表明该群体的目标与个体的目标可能越一致，至少在短期内越一致。所以对虚拟个体的吸引程度就越强,由于速度是一个矢量，可以利用向量內积夹角余弦值来表示，其物理含义与本文想表达的一致。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-8) |

最后是虚拟个体对目标的确定程度，对目标越确定,加入群体的可能性越低，反之，如果对目标越不确定，加入群体的可能性越高，即盲目的从众心理。本文用一个0到1之间的*float*类型的数表示虚拟行人对目标的确定程度，当目标位于虚拟行人的感知范围内时，确定度为最大值1，这个初始值可以根据不同行人进行设置，这也反应了信息部队称在人群模拟中的影响。

每个分值都有相应的权值，、、、表示每个因素的重要程度，故得出agent i 与Group j的吸引因子为

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-9) |
|  | (3-10) |

比如在紧急的情况下，由于个体更倾向于自己亲近且较近的人群，所以可以将、调较大或者将适当调小；在轻松的情况下，个体可能不会紧跟着大部队，所以可以调整相应的参数，以满足需求。通过对*AF*的控制，可以间接的控制人群的运动轨迹，本文的动态分群策略一方面为后续的优化打下铺垫，另一方面，对人群的心理进行模拟。

* 1. 修正动力学方程

DC-SFM在仿真时表现为一个个动态变化的小群组，由于群组内的行人往往位置都相同，运动方向也相似，故可以利用群间作用力来代替原始模型中的行人间作用力以简化运算，同时动态分群可能会使得群组数量变化剧烈，故引入群自吸引力提供群组一定的稳定性，最后增加动态的防撞力可以明显提高稀疏状态下的行人碰撞避免效果。

* + 1. 群间作用力

动态分群后，在某一时刻人群划分为若干个群组，假设虚拟个体的数量为*N*，群组的数量为*M*(*M*<*N*),计算这部分的复杂度就会由O(*N*²)降低为O(*NM*)。而且由于分群时记录了群组中个体的数量，可以通过个体数量的大小来控制群间作用力是排斥还是吸引，群间作用力使得从众效果进一步提升。并且同一个群体内的个体受到的群间作用力方向一致，实际仿真的状态相比较于传统社会力不再有频繁抖动的现象，运动轨迹更加平顺真实。由式(3-2)启发，群间作用力的大小为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | (3-11) | |
|  | | (3-12) |

是Group *i*受到Group *j*的作用力，其方向与Group中组员数量有关，当对方组员数量较大时，该力表现为吸引，反之则是排斥，这样可以进一步体现人群的从众现象。

* + 1. 群自吸引力

在观察真实监控视频时存在一个现象：个体对已加入的群组有一定的依赖性，所以本文引入了群自吸引力。这个力保持了群体的相对稳定性。一个身手矫健的成年人在紧急情况下能够轻易的离开自己的群体去跑向另一个人数更多、影响力更大的群体以提升自己获救的可能性，如图3-4所示，橙色所代表的行人可能会被Group i所吸引而离开Group j。

|  | |
| --- | --- |
| a. 行人即将离开原群体 | b. 容易出现离群现象 |
| 图3-4 无群自吸引力 | |

但是如果在原来的群组中存在他的亲人、朋友，那么他更有可能放慢自己的速度去等待他们，而为了表达这一心理特征，从物理上表达为个体会被原来的群体所吸引，如图3-5(a)所示，个体受到群自吸引力，这在一定程度上保证了群体的稳定程度，群体的个体间亲密程度越高，群体的稳定性越高。

|  |
| --- |
|  |
| 图3-5 自吸引力改变行人运动 |

根据以上分析， 群自吸引力的计算公式如式(3-13)和(3-14)所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-13) |
|  | (3-14) |

其中，是自吸引常数，是agent i和所在Group j之间的亲疏关系分值，是Group j和agent i的位置之差，当行人单独为一个群体的时候，故，所以，符合逻辑。

* + 1. 动态防撞力

在紧急情况中，人群密度较大，行人的速度相比于平常也较快，经典社会力模型通过行人间相互作用力来防止碰撞，但是会导致双方速度变慢，考虑两个相向运动的行人，在靠近的时候会受到与运动方向相反的作用力，由于作用力与运动方向严格平行，故只会降低双方的运动速度，直到碰撞，在这种情境下，社会力模型无法很好地表现避撞的效果。本文提出一种基于力的动态碰撞避免[62][63]的方法，引入了动态防撞力，动态防撞力是基于行人间相互作用力而衍生的力，首先计算群间相互作用力的合力，一般情况下，这个合力由于综合了各个方向的力之后并不会很大，如果合力大于作用力阈值，可以认为群体间距离相对接近，此时需要进行碰撞避免处理，动态防撞力的大小由式(3-15)给出，否则动态防撞力为。值得注意的是，一旦产生了防撞力，说明碰撞在即，所以应该优先处理防撞问题，此时将群间相互作用力视为。

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-15) |

在式(3-15)中，为防碰系数，越大，防止碰撞的力度越大。为速度方向的垂直方向，满足。是作用力阈值，其越小，防碰撞效果越敏感。使用防撞力后碰撞避免的示意图如图3-6所示。群间相互作用力越大，防撞力也越大，这样可以尽可能避开距离较近时候的物体。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| a. 无防碰力 | b. 增加了防碰力 |
| 图3-6 动态碰撞避免 | |

、、和、、分别表示行人*i*、*j*在连续时刻的位置，在引入防碰力后，虚拟行人因受到改变了原有的运动轨迹，尽可能避免了碰撞的发生，而随着行人距离的增大，动态防撞力又会消失。可以有效的防止行人间发生生硬的碰撞，从而提高仿真的真实感。

* + 1. DC-SFM动力学方程

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3-16) |

|  |
| --- |
| 图3-7 DC-SFM的受力示意图 |

图3-7给出行人当速度为0时的受力示意图。是驱动力，此时指向target； 是群自吸引力；和是环境固定障碍物斥力； 和是群体*i*和群体*j、k*的群间作用力，其中因为人数差异，表现为吸引力，表现为排斥力。

本文DC-SFM算法步骤如下：

Step1. 初始化场景，均匀网格环境建模。

Step2. 初始化虚拟行人，初始化为各自一个群组。

Step3. 计算每个agent i的个性感知范围PPR。

Step3.1 利用式(3-3)根据agent i的年龄和身高求解扩大因子E。

Step3.2 利用式(3-4)，(3-5)判断agent i所处密集人群还是稀疏人群.

Step4. 动态分群。

Step4.1 计算agent i PPR内的群体集合。

Step4.2 利用式(3-9)计算agent i与内所有的，更新群体信息。

Step5. 利用式(3-16)计算agent i受到的力、、、、。

Step6. 更新agent i速度、位置等信息。

* 1. 仿真实验和分析

经过上述分析与优化，本文在Unity3D平台上进行仿真实验，为了验证验证模型的有效性，使用半径1m的小球来对行人进行仿真，分别进行了个体穿梭模拟、小列队穿梭模拟、不同属性的行人疏散模拟、阵列模拟。分别从仿真真实感和仿真效率层面对模型进行验证，表3-3是模型中重要参数的设置。

| 表3-3 重要参数设置 | |
| --- | --- |
| 参数 | 值 |
| (/m) | 1.2 |
| (/岁) | 12 |
| (/岁) | 70 |
| *DT* | 32 |
| (/°) | 60 |
| (/m) | 20 |
| *r* (/m) | 1 |
| *R* | 1 |
| *F* | 0.75 |
| *G* | 0.5 |
| *S* | 0.25 |
|  | 0.25 |
|  | 0.25 |
|  | 0.25 |
|  | 0.25 |
|  | 0.5 |
|  | 1 |

* + 1. 个体穿梭模拟

|  |
| --- |
| 图3-8 30个行人示意图 |

如图3-8俯视图所示，30个无差别(年龄、性别、体型等都相同)的行人初始均匀分布在一个半径为25m的圆上，他们彼此之间的社会关系默认都设置为“陌生人”，在之后的仿真中，如果没有提及具体的社会关系，都以“陌生人”关系处理。他们到达圆心的理论时间是相同的，行人们的目的地是自身位置关于圆心的中心对称点位置。选用该情境的原因是：在现实世界中的一些比较宽敞的场地上(如广场、大厅、体育馆等)，会有大量的行人交汇的情况发生，他们的初始位置往往比较分散，但一般都需要经过某个点，本文将其称为“热中心”，观察广场中的人流情况，我们发现如果行人们到达“热中心”的理论时间差异较大，那么行人在通常情况下无需做出避免碰撞的措施，如果行人们到达“热中心”的时间很接近，则行人会做出一些碰撞预警，而后者效果相对前者比较难以仿真出来，故本文将行人分布在一个圆上，到达“热中心”的理论时间控制为相同。本文先后采用了行人数量为3，10，30，60，120(都是360的因子)，发现人数在小于30人的情况下，行人数量相对较少，实验的说服力不高，而且也无法充分体现出DC-SFM分群策略的优势。而人数在超过30后，一方面，现实生活中很少有30个行人以上同时往一个中心运动的情况，实验最好是基于真实情况；另一方面，当人数超过30人后，从以往的视频中发现，场景中更多出现的是人群聚集的形式，人群密度较高，这种情境在后续的实验(小列队穿梭模拟、阵列模拟)中测试。故本节选择分析30人穿梭的仿真效果，并进行了三个实验，分别使用(一)SFM，(二)默认参数的DC-SFM和(三)时DC-SFM对该情境进行仿真，通过这些仿真实验，可以达到以下目的：

1. 证明DC-SFM能够表现出多种人群运动效果。通过不同参数的调节，DC-SFM能够产生不同的组织形式，而SFM就算改变其参数，也只能改变行人的运动幅度，而不能改变行人的组织形式。

2. 证明DC-SFM相较于SFM更真实。通过记录碰撞次数以及行人的运动轨迹，可以对比两种模型与真实情况(在真实世界中，行人在正常情况下不会与他人发生碰撞)的差异。

(一)、使用SFM模拟：

如图3-9(a)，(b)是使用SFM仿真的不同阶段的效果。通过力学分析，每个行人受到的力是关于运动方向轴对称的，故其合力的方向与运动方向在同一直线上，由SFM的运动学方程可以知道：行人先会向“热中心”直线走去，随着行人彼此靠近，合力方向与运动方向呈180°，所以会使行人减速，根据(2-4)公式中的大小，呈现出以下两种情况：

1. 当较大时，排斥力会比较大，行人减速明显，直到速度反向为止，行人朝远离“热中心”的方向运动，随着行人距离变大，排斥力变小，，故行人又会朝着“热中心运动”，如此循环往复，行人做简谐振荡，导致仿真失败。

2. 当较小时，排斥力相对情况1较小，故始终成立，但行人之间的非接触力在运动过程中始终与运动方向在同一直线上，故行人没有任何避免碰撞的措施，在不断接近“热中心”的过程中，在“热中心”处产生了严重拥挤的现象，如图3-9(a)所示，且行人有自身的体积，故会发生接触(碰撞)，因而产生了接触力，在一番“挣扎”后，拥塞现象才逐渐得以缓解，如图3-9(b)所示，实验统计出的行人碰撞的总次数为178次，平均约为6次/人，每一次的仿真实验数据都会略有不同，但在总体上可以看出SFM在此情境的仿真中会有大量的碰撞。由于在记录时，A与B发生碰撞，是记录两次碰撞信息(A发生一次碰撞，B也发生一次碰撞)，故需要真正的碰撞次数需要将总次数减半。

实验中我们调节了SFM中的各种参数，但都会出现上述1、2中描述的情况，这些仿真效果图与3-9(a)，(b)类似，故不予赘述。实验记录了行人的位置信息，并使用Matlab作出其轨迹如图3-9(c)所示，在“热中心”附近行人轨迹互相重叠，可见有碰撞发生。综上分析，使用SFM仿真，行人会有回头、碰撞等不自然的行为，这些行为与现实中差别很大，仿真效果不佳。

(二)、使用默认参数的DC-SFM模拟：

根据视频资料，我们发现行人在避免碰撞时有两种常见的策略：(1)跟着前面的行人顺势穿过拥挤的人群，所以会产生一条条相对固定的轨迹，即人群渠化效应；(2)提前进行碰撞预警，宁可绕一些路来避免进入“热中心”。针对以上两点优化策略，我们使用DC-SFM进行模拟。如图3-9(d)，(e)所示是使用默认参数(如表3-3所示)的DC-SFM的仿真结果，仿真可分为三个阶段。

1、运动初期阶段：行人各自为一个群组，且都不在彼此的个性感知范围内，与SFM的效果类似，行人朝着“热中心”运动；

2、动态分群阶段：随着行人不断靠近“热中心”，行人之间的距离也越来越近，进入了彼此的个性感知范围，从而动态分群算法开始产生影响，行人根据式(3-9)计算出吸引因子*AF*，并与预设的进行比较，如果达到了分群标准，则形成若干个群体，如图3-9(d)所示，黄色框内的内行人为同一个群组，一共有18个群组，其中6个群组内部的成员数量为3，有12个行人单独为1个群组。随着时间推移，行人进一步靠近“热中心”，行人间距进一步缩小，*AF*的值相对更大，行人成群更加容易，如图3-9(e)所示，群组的数量发生了变化，一共分成了12个群组，其中有6个群组内部成员数量为4，有6个行人单独为1个群组，从通行效果来看，DC-SFM在“热中心”附近比SFM有序很多，形成了“跟着前面的行人”的状态，拥挤现象大幅度改善。如果将调小，降低分群的标准，则行人更容易形成一个更大的群组，会更加整齐有序。

3、动态离群阶段：在经过“热中心”后，行人继续往目的地前进，行人之间的距离开始增大，逐渐无法达到分群的标准，所以离开大群组各奔目的地。

使用默认参数的DC-SFM仿真出的行人，拥有成群避撞的效果，符合现实生活中“跟着前方行人避开碰撞”的特点，从轨迹图3-9(f)可知，行人在距离“热中心”一定距离的时候开始聚群，行人不会经过“热中心”，而是互相避让以防止正面僵硬地碰撞，实验统计的碰撞次数为34次，约为1次/人。相较于SFM碰撞次数得到了明显的改善，而且通过观察碰撞发生的时间，DC-SFM是发生在动态分群的时候，同一群组中行人间距较小发生了轻微的碰撞，而SFM是发生在“热中心”附近，碰撞时产生的用于改变行人运动方向，故效果很不自然。

(三)、使用时DC-SFM模拟：

在比较了默认参数的DC-SFM和SFM的行人仿真效果后，可以看出分群对于运动的影响，但DC-SFM的优势不仅仅在于其能够根据实际情况改变行人的组织结构，并且在碰撞预防方面也有着重大的提升。为此，我们构造了实验三，设置，意味着分群的标准提高了，削弱动态分群的效果(事实上，我们希望取消分群效果，由于行人之间是陌生人关系，故在该情境中已经足以取消分群效果)。如图3-9(g)所示，行人在开始阶段不在彼此的个性感知范围内，故依旧向“热中心”运动，直到距离较近时，行人进入了彼此的感知范围，然而此时由于，行人之间的*AF*值无法达到分群标准，故依旧各自为一个群体。虽然动态分群失效了，但是由于动态防撞力的存在，行人会开始避让。如图3-9(h)所示，该图虽然与3-9(g)类似，但是实际上，行人并非直线运动，从图3-9(i)的轨迹图中就可以发现，行人是不断在调整自己的位置以避免碰撞，行人不会像SFM模拟的那样，径直地经过“热中心”，而是走一个弧线，这是符合现实生活中“人们绕点远路去避免靠近人群最拥挤的中心”的现象。在仿真过程中，行人碰撞的次数为0，所有的行人都愿意绕些远路去避免发生拥塞的情况，虽然这种情况的发生概率不高，但说明了DC-SFM在防撞方面要优于SFM，这里是为了方便才采用30个无差别的行人，故所有行人的行为基本是高度统一的，若想要更加真实的效果，只需要改变行人的属性，从而改变行人的个性感知范围，也就改变了动态防撞力的作用时间和强度，因此那样仿真出来的情境会更加真实自然，本文为了与SFM产生比较，从控制变量的角度上仍然选用无差别行人只是为了说明引入动态防撞力的优势。

|  | | |
| --- | --- | --- |
| a. SFM拥挤现象 | b. 拥塞好转 | c. 行人轨迹 |
|  | | |
| d. DC-SFM分群 | e. 分群有序通过 | f. 行人轨迹 |
|  | | |
| g. DC-SFM不分群 | h. 转圈以避撞 | i. 行人轨迹 |
| 图3-9 SFM、默认参数DC-SFM、的DC-SFM模拟效果 | | |

本实验选取了一个典型的情境，分别使用SFM、默认参数的DC-SFM和的DC-SFM进行仿真，分别记录了仿真过程中的视频、行人运动轨迹、碰撞次数、群组数量对三种仿真结果进行对比分析。由于DC-SFM的参数众多，如果控制变量，一一展示会显得过于繁复，故本实验主要改变了与分群效果最为直接的参数，实验结果表明：

1. 默认参数的DC-SFM能够模拟出“跟着前面行人穿过拥挤的人群”的效果，因而减少了碰撞次数，比SFM更加真实自然；

2. 取消了分群效果的DC-SFM，凭借动态防撞力，不会使人群陷入不自然的拥塞状态，模拟出“绕点远路去避免靠近人群最拥挤的中心”的效果，通过更改行人的属性，可以模拟出更多的效果。

* + 1. 小列队穿梭模拟

如图3-10所示，两队行人共60人初始分布在两侧并排列成矩形形状，相邻行人间初始距离为2m，两队行人分别要到达对方队列的位置。选用该情境的目的是：在现实世界中的路口，路旁常常有行人等待红绿灯的现象，随着时间的推移，等待的行人越来越多，往往会形成一个小型的队列。虽然现实中的队列不像图3-10中那么整齐划一，但是总体而言可以用一个矩形队列来表示。此种情境不仅仅发生在路口行人等待红绿灯的时候，还可以描述很多情境，比如两个旅游团相互交汇时的情境也与图3-10中所述十分相似，又比如军队练操的时候，两个队伍交汇的场景。选择60人的队列依旧是出于现实的考虑，更庞大的人群模拟，在3.4.4节、4.4.4节阵列模拟中展现。本小结包括四个仿真实验：(一)使用SFM模拟，(二)使用默认参数的DC-SFM模拟，(三)使用的DC-SFM模拟，(四)使用高亲密度的人群DC-SFM模拟，通过这些仿真，可以达到以下目的：

1. 证明DC-SFM能够满足多情境下人群仿真的需求，包括休闲情境、较有组织的情境、严格组织的情境等。

2. 证明DC-SFM能够体现行人之间的社会关系，很多模型仅仅从数学公式上进行优化，但未考虑行人之间的社会关系，虽然DC-SFM仅仅把行人关系粗略地分为四类：亲人、朋友、一般社会关系和陌生人，但是也足以区分行为特点。

|  |
| --- |
| 图3-10 列队行人穿梭仿真 |

(一)、使用SFM模拟：

如图3-11(a)所示，行人队列在开始时就逐渐分散，这是由于SFM中agent i和agent j之间的作用是全局的，而当他们距离较近时，会比较大，因而会相互分散。在实验中在同一个小队的行人的目的地是一致的，就算行人之间应该保持一定的“安全距离”，但是这种严重排斥的现象与现实情况不相符，显得不自然。随着行人间距的不断增大，扩散逐渐趋于稳定，故两个列队交汇时有很大的空间进行避让，如图3-11(b)所示，在行人交汇过程中，行人间距又会缩小，故又会增大，导致行人会发生上下震荡，虽然交汇期间行人间不会发生碰撞(建立在大空隙的基础之上)，但是上下震荡的行为极其不自然。在列队交汇后，行人逐渐到达目的地，初始的列队形状已经不存在，场景比较混乱，如图3-11(c)所示。从整个仿真过程来看，开始阶段的扩散现象过于严重，不符合现实，如果调小公式(2-4)中的，相当于减小了，虽然可以减小扩散的强度，但是行人间防止碰撞的效果也会减弱，行人就会发生碰撞，一般情况下行人不会发生碰撞，这也不是很符合逻辑。综上所述，使用SFM虽然能够模拟小列队交汇的情境，但是莫名的扩散和震荡效果使整个仿真效果不太自然，有巨大的提升空间，而无法通过参数的调整从根本上解决这两个问题。

(二)、使用默认参数的DC-SFM模拟：

如图3-11(d)所示，行人在开始时就进入动态分群阶段，由于他们的速度一致性很高，根据式(3-7)计算，*SCS*比较大，且他们的距离比较小，根据式(3-8)，*GDS*也比较大，故能够达到分群的标准，因为行人数量较大，间距较小，在图中标注具体的分群情况会使画面比较混乱，但读者仍然可以通过行人间距来判断分群的情况。将3-11(d)

使用SFM因行人间的相互作用力会互相保持距离，阵型比较分散，仿真开始的效果不佳，两列行人相遇时可以呈现出自组织的渠化效果，但到达目的地时行人仍旧由于相互作用力显得很混乱。图3-11(d)，(e)表现了 DC-SFM的仿真过程，人群呈现出动态地按行分群的现象，不仅存在渠化效应，保留了传统SFM的优势，而且行人交汇和到达目的地时更加有序自然。图3-11(g)，(h)表现了DC-SFM可以通过设置合适的吸引因子阈值来呈现更好的整体效果，能够模拟较为亲密的群体效果，越低，分群数量越少，整体效果越好，并且防撞系数越大，两个队列在交汇时相距越远，这可以模拟非严格组织的团队交汇情况，如旅游团，班级活动等。图3-11(j)，(k)所示的DC-SFM通过进一步设置一个队列里行人的互为亲人关系，并设置，，，提高行人亲密度在 所占的比重，两个列队在仿真时分别形成一个群体，呈现出严格按群体运动、避让的效果，可以用来模拟军队、仪仗队、巡逻队这种具有高整齐度的场景。

|  | | |
| --- | --- | --- |
| a. SFM分散现象 | b. 行人穿梭 | c. 到目的地混乱 |
|  | | |
| d. DC-SFM分群 | e. 行人渠化效应 | f. 到达较为有序 |
|  | | |
| g. DC-SFM整体 | h. 整体避让 | i. 到达较为有序 |
|  | | |
| j. 高亲密DC-SFM | k. 避让效果 | l. 到达非常有序 |
| 图3-11 不同场景中SFM与DC-SFM仿真结果对比 | | |

* + 1. 不同属性的行人模拟

为了表现DC-SFM体现行人的差异性，本文设计了不同属性的行人，参数仅仅为了表达行人的差异性，设置合理范围的参数即可，具体如表3-4所示。

如图3-12(a)所示，引入了不同行人，红球表示老人，绿球表示孩子，蓝球表示青壮年，初始位置在一个半径为25m的圆上，互相之间的角度为120°，各自的目的地为其自身官员圆心的中心对称点。

图3-12(b)，(c)的仿真效果表明青壮年行人运动速度较快，穿过圆心时由于另外两者不在其感知范围内，故不会受到两者影响，图3-12(d)显示其轨迹是一条笔直的直线，而传统SFM的作用力是全局的，所有行人互相之间始终有作用力，所以三者都会有明显的抖动，可见引入了个性感知的DC-SFM呈现出的效果更加符合真实行人的习惯。其次老人和孩子的速度较慢且较为接近，两者在接近圆心的时候，由于老人的感知范围比孩子要大，所以图3-12(d)中红色虚线圆圈标记了老人避让孩子而产生的轨迹变化，而孩子因为感知范围较小，不会产生避让行为，故其轨迹也是直线。该仿真实验体现了DC-SFM不同年龄的个体因其感知范围不同而表现出的不同行为，相较于传统SFM体现了行人的智能性，提升了仿真的真实感。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | |
| a. 不同属性的行人运动 | | |
|  | | |
| b. 青壮年快速通过 | c. 先后到达终点 | d. 行人轨迹 |
| 图3-12 引入行人差异性仿真结果 | | |

如图3-13(a)所示，本实验拟仿真出具有亲人关系的行人在疏散时的运动特征，假定有5个家庭，每个家庭有两个孩子，两个青壮年，两个老人，共30人，他们初始随机分布在半径为20m的圆内。

如图3-13(b)，(c)所示，传统SFM模拟出不同速度的行人疏散的情况，并没有考虑到行人的社会关系，而且位于后方的老人和孩子会受到前面青壮年的排斥力，导致整体疏散速度变慢。而如图3-13(d)，(e)所示，DC-SFM通过引入了动态分群和群自吸引力，这些行人会迅速的形成一个群体，并且速度较快的青壮年会放慢自己的速度来保持家人的距离，整个群体内部没有相互斥力，所以整体疏散速度较快。行人间关系越亲密，形成的群体越紧密。这个仿真实验表明利用DC-SFM可以比较真实地仿真出具有社会关系的疏散情况。

|  | | |
| --- | --- | --- |
| a. 疏散示意图 | | |
|  | | |
| b. SFM中行人各自逃离 | | c. 青壮年优先逃离 |
|  | | |
| d. DC-SFM中聚团现象 | e. 亲人们聚团前进 | |
| 图3-13 具有亲人关系的疏散仿真 | | |

通过统计两种疏散情况的最快个体逃离时间、最慢个体逃离时间和平均逃离时间，如表3-4所示。

| 表3-4 逃离时间 | | | |
| --- | --- | --- | --- |
| 参数 | SFM | | DC-SFM |
| 最快个体逃离时间(/s) | 14.141 | 21.406 | |
| 最慢个体逃离时间(/s) | 38.516 | 25.703 | |
| 平均逃离时间(/s) | 26.073 | 23.658 | |

在群自吸引力的作用下，速度较慢的个体能够靠近群组中心，速度较快的个体会适当放慢自己的速度，带领着整个群体朝着目标运动。模拟出了现实中亲人选择聚团撤离的现象，这也是传统SFM所不具备的优势。

* + 1. 阵列模拟

上述仿真实验从多个角度说明了新引入的群自吸引力、防撞力和动态分群对仿真真实感上的优化。大规模行人仿真实验旨在比较SFM和DC-SFM在算法复杂度上的差距。如图3-14(a)所示，两个400人的方阵分别要到达对方方阵的位置。

如图3-14(b)所示，SFM呈现出中间人群阻塞的情况，可以模拟出人群聚集效应。如图3-14(c)所示，默认参数的DC-SFM中的动态分群使人群分群聚集，形成了更多的空隙路径，整体效果更加自然。如图3-14(d)所示，该仿真将每个阵列的人群的关系设置为亲人，由于亲密度较高导致群体数量较少，呈现出良好的渠化效应，画面比较流畅。

|  | | |
| --- | --- | --- |
| a. 人群阵列 | | |
|  | | |
| b. SFM聚集 | c. DC-SFM分群 | d. DC-SFM渠化 |
| 图3-14 原始SFM、默认参数DC-SFM、高亲密度DC-SFM的聚集效果 | | |

由于算法的复杂度与群体的数量成正相关，故分别记录了三个仿真过程中每个时刻的群体数量，如图3-15(a)所示，SFM没有分群概念，800个行人相当于各自为一个群组，第二个仿真中使用默认参数的DC-SFM，仿真开始后群体数量从800不断递减，期间降至100个群体附近，仿真快结束时群组数量再次上升，大约有150个群组，每个群组所包含的个体数量约为7，从理论上效率可以提升7倍左右。第三个仿真将每个阵列中的行人关系调整到亲人关系，一个群组内包含更多的行人，群组数量在100个以下，平均每个群体包含36个行人，所以效率能提升36倍左右。

实际的表现通过记录仿真时的帧率来确定，从图3-15(b)可以看出虚拟行人在800人时，传统SFM始终在1帧左右，默认参数的DC-SFM能够将帧率维持在5帧至10帧，帧率约为传统SFM的7倍左右，在数值上符合理论上的分析，而高亲密度的DC-SFM仿真帧率能够提升至40帧以上，是SFM的40余倍，符合理论的预期效果。

|  |
| --- |
| a. 实时群体数量 |
|  |
| b. 实时帧率 |
| 图3-15 800个行人实时的群体数量和帧率 |

如图3-16所示，传统SFM随着行人数量增加帧率呈指数型下降，当行人数量到达800人时，帧率为1fps，而默认参数的DC-SFM 每个群体包含7个行人，故平均帧率有10fps左右，高亲密度的DC-SFM每个群体包含40多个行人，平均帧率为40fps左右。当行人数量为2000人时，传统SFM平均帧率只有0.1fps，默认参数的DC-SFM每个群体包含有20个行人，平均帧率为3fps，而高亲密度的DC-SFM每个群体包含有50个行人以上，平均帧率有10fps。

|  |
| --- |
| 图3-16 行人数量和帧率的关系 |

* 1. 本章总结

本章提出的基于个性感知动态分群的社会力模型考虑到了每个行人的个性特征，提出个性感知范围，能够有效地区分不同行人之间的差异，同时动态分群策略体现了行人的做决策时的一定的灵活性和智能性，相比于传统社会力模型，改进后的模型可以更真实地模拟出多种场景下的群体运动。改进的模型中还增加了防碰力、群自吸引力，不仅保持了传统社会力模型能模拟出人群自组织效应的优势，而且使行人在面对碰撞和疏散时表现更加自然，通过设置合适的参数，能够达到接近于真实的效果。

在算法复杂度方面，本文的仿真实验表明，在行人数量超过100人时，改进后的模型由于分群的效果，设置合理的分群策略的参数就能使复杂度明显降低，当每个群体平均包含10个行人时就能使复杂度下降为原来的十分之一，能够改善传统社会力模型在大规模人群仿真中复杂度较高的问题。

使用本文的方法，一个可能的应用场景是：事先预估出公共场所的行人的物理属性区间，就能够比较真实的模拟出疏散的情况。比如在电影院里，亲人、朋友、一般社会关系、陌生人的比例往往在一个区间内，利用该模型可以估算疏散时间，为电影院座位和出口的设计提供一定参考。

1. 仿真系统的设计与实现

本章所构建的仿真系统是基于Windows 10操作系统，以Unity 5.3.1f1 (64-bit)为开发环境，采用的硬件计算环境为：Intel i7 2.6GHz CPU，16GB内存，NVIDIA GeForce GTX1070。本章首先介绍仿真系统的架构组成，介绍系统中每个模块实现的功能，然后分别从仿真效率和仿真效果两个角度对系统进行优化，并从定性和定量的角度分析优化的效果。

* 1. 仿真系统架构

人群仿真系统的要求是满足三大特性：运行高效性、数据完整性、仿真真实性。运行高效性指的是系统可以根据需要更改仿真的场景，仿真人群的属性，以及仿真过程中运行的实时性。数据完整性指的是仿真系统需要实时保存仿真过程中的重要运动数据，为后续的分析、计算、复盘做完备的支持。仿真真实性指的是仿真系统需要采用合适的模型，合理地控制行人的运动，并且在仿真过程中拥有良好的视觉效果。为了满足以上三大特性，本文设计并实现了如图4-1的仿真系统架构。

|  |
| --- |
|  |
| 图4-1 仿真系统架构图 |

如图4-1所示，仿真系统架构可以分为三大模块，分别为初始化模块、数据采集模块和引擎模块分别满足三大特性的需求。

* + 1. 初始化模块

初始化模块由三个子模块组成，其分别的作用为行人配置文件、场景人物模型载入、均匀网格划分。

行人配置文件的功能是配置每个行人的信息，这本质上是一个典型的xml解析器，用户将行人的属性(如年龄、身高、体重、亲属、初始位置、是否知道目的地位置等信息)按照指定的格式输入到指定位置的xml文件中，当系统启动时，会去指定位置寻找xml文件，进行解析，若格式正确解析成功后将会在内存中保存一个数组，这个数组存储了行人的所有信息，并且使用图的结构来表示行人之间的关系方便之后的引用。这样做的好处是将系统的输入与逻辑解耦，一旦用户希望修改行人的属性，就可以轻松替换xml文件内的内容而不需要修改仿真系统。

场景人物模型载入的功能是遍历上述的行人信息数组，准确的实例化行人，此步骤使用了Unity的预制体prefab实例化的功能，这样可以高效地产生行人模型。

均匀网络划分是将场景划分成多个均匀网格，并且将其上的行人信息存放在一个数组中，通过在仿真过程中修改更新此数组，就可以完成人群密度的估计。

以上三个功能是按顺序依次执行，只有配置行人信息是对用户显式的，其余的两个功能对用户都是透明的，也表现了系统的易用性。

* + 1. 引擎模块

数据采集模块有六个子功能组成，分别为算法实现、动画系统、物理引擎、脚本系统、优化模块、渲染引擎。

算法实现即为第三章所描述的动态分群的人群仿真模型的代码实现，其所有逻辑均使用C#编程语言高效实现，模型包含多个参数，影响着仿真的效果，系统提供用户自定义参数的面板，将重要的参数设置为public，并预留在Unity的运行面板上，可以由用户自行选择数值，同时也会提供默认值，这套自定义参数系统是可以在仿真过程中实时调节的，用户可以在观察行人运动的同时修改关键参数大小来达到预期的仿真效果。这对于参数调优与易用性而言都是巨大的帮助。

动画系统的功能是Unity自带的，它可以使静态的模型动态化，使用动画状态机后，选择与模型骨骼对应的动画，并且设置动画之间切换的条件，就可以通过脚本来控制模型的动画效果，这对于人群模拟的展示效果起到了巨大的作用，在第三章中，本文为了验证算法的有效性和可用性仅仅使用了小球，但是在仿真过程中，小球很难看出其朝向和动作，使用动画系统后，用户可以很方便地观察到人物的运动姿势，对仿真会产生更加强烈的视觉冲击感。

物理引擎的功能是在仿真过程中进行碰撞的检测和运动速度、方向的控制，通过碰撞检测机制，使得行人不会轻易的重叠或穿越，满足真实世界的物理规律，并且通过脚本系统的代码编写，可以很轻松的记录行人的碰撞情况已经实时的速度情况。通过记录这些信息，系统具有一定的真实性。

优化模块是本系统的一个特色，系统需要保证运行高效和仿真真实。本文深度探索了系统运行过程中的性能瓶颈，发现了在求解行人密度的时间复杂度会随着行人数量增多迅速增大，在牺牲可以忍受的精确度后，将时间复杂度优化到与行人数量一个数量级。这在大规模人群仿真时，能够带来很大的提升。在真实感方面，本文提倡充分借鉴生活中行人的细节特征，比如改变自身形态的侧身避免碰撞的细节动作，将其融入已有的模型中，进一步提升在仿真过程中视觉的真实感。

渲染引擎是Unity3D默认的，能够将行人和场景真实地渲染到电脑屏幕上。 使用着色器定义了对象如何与光线产生反应，其产生图像的流程是通过渲染管线。渲染管线的流程是使用GPU，主要使用电脑的显存，在渲染管线中，进行了顶点处理、面处理、光栅化、像素处理等等。本文对不同属性的行人采用不同的材质，正是有了渲染引擎，才得以优秀的表现出不同的视觉效果。

以上六个模块互相联系，是系统的核心，保证了系统的三大特性。

* + 1. 数据采集模块

数据采集模块包括四个功能，分别为行人轨迹采集、疏散时间统计、群组动态统计、帧率实时统计。

行人轨迹采集功能是分析行人运动的关键，该模块通过记录每个虚拟行人的位置坐标信息，在记录坐标时，先将坐标信息存储到内存中，在大于一定内存时会将内存中的信息存储到硬盘中同时释放内存，这个过程比较费时，会造成卡顿，所以当人群数量较大时，可以适当降低坐标采样的频率，或者在不需要轨迹采集时关闭该模块以提高性能。

疏散时间统计功能是用于分析人群疏散的时间，该模块记录三个时间，分别是最短疏散时间、最长疏散时间、平均疏散时间。在仿真过程中，可能会存在大量虚拟行人的目的地是相同位置坐标的情况，所以可能位于后方的行人因人群拥挤无法到达，在这种情况下，会导致统计的疏散时间不准确的情况，尤其是最长疏散时间和平均疏散时间比真实值要偏大。第一种解决方案是当虚拟行人到达目的地后取消其碰撞的体积限制，后续的行人可以“穿过”先前的行人到达目的地，但该方法会导致画面的真实感下降。第二种方案是当虚拟行人到达目的地后继续往先前的运动方向运动，并将运动速度调整为一个比较小的随机值，如果在疏散过程中行人是“奔跑”的姿态，则将其转换为“行走”的姿态，该方案既可以表现行人到达目的地后从紧张到放松的心态的转变，而且对疏散时间的正常统计也没有影响。

群组动态统计功能是用于分析算法的复杂度的，该模块将实时记录群组的数量，由于在改进后的模型中计算群间作用力占用了大量的计算量，而群间作用力与群组的数量N成正相关，在理论时间复杂度上分析与SFM的效率进行对比。

帧率实时统计功能用于分析模型的实际性能表现，该模块实时记录在不同情境和不同人群规模下的仿真帧率。

* 1. 仿真效率优化
     1. 人群密度估计

在计算每个agent的感知范围时，引入了人群密度因素，需要判断agent是否处于密集人群中，但是其中会计算任意两个行人间的距离，会使得算法复杂度较高的问题，所以需要对求解人群密度进行优化。本文采用的是基于均匀网格的密度估计方法，为了叙述方便，从俯视的角度看整个仿真场景，并且假设行人是半径为R的圆，场景为一个二维平面。将平面均匀分割成若干个等大的网格(*Block*)，可以求出每个*Block*中最多能容纳的行人数量和实际的行人数量，如图4-2所示。

|  |
| --- |
| 1575018575(1) |
| 图4-2 基于均匀网格的密度估计 |

初始化阶段需要划分网格，依次顺序编号，用一个数组保存网格中行人的数量。值得注意的是：网格的数量不宜过大或者过小，原因是网格数量过大，每个网格会较小，因而网格内行人的数量会较少，极限情况是网格最多只能包含一个行人，那么设置密度阈值将变得困难，反之如果网格数量过少，每个网格就会很大，因而估算出的密度不够准确。仿真中选取8R作为网格的边长，其中8是2的指数次方，可以通过左右移位来优化与8相关的乘法和除法。在仿真时行人的位置会发生变化，就可以计算出运动后行人落入的网格，如果发生变化，则更新网格的行人信息。

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| a. t时刻行人位置 | b. t+1时刻行人位置 |
| 图4-3 根据行人位置更新网格信息 | |

如图4-3所示，分别为t时刻和t+1时刻行人的位置，在示意图中关注两个网格边界处的行人，注意到图中标注为蓝色的行人从左侧的的网格移动到了右侧的网格中，移动后的行人标注成了黄色，在更新行人位置信息时可以同时更新其所在网格的行人数量，如此一来，更新并获取正确网格密度信息只需要O(1)的时间复杂度。优化具体的流程如图4-4所示。

|  |
| --- |
| 图4-4 算法流程图 |

如此优化后，仿真系统可以几乎无性能损耗地获取到行人所处的环境信息，虽然人群密度是估计出来的，但是由于每个网格的尺寸都不是很大，不会导致巨大的误差。

* 1. 仿真效果优化

第三章中的仿真实验旨在实现与证明算法模型的有效性，但是仅仅用小球来仿真行人效果不佳，而且也忽略了行人各方面的特性。所以本节从两个角度来提升仿真效果，其一是使用人物模型代替小球，并且引入动画，使用动画状态机来实现相对真实的效果，其二是从实际的角度分析行人运动过程中人物体态的特征来优化其运动的细节效果。

* + 1. 导入模型与动画

本文使用的模型是Unity3D引擎经典的人物模型，如图4-5所示。

|  |
| --- |
| C:\Users\sth\AppData\Local\Temp\WeChat Files\5a6c3ff98850881d76288658b3d54cb.png |
| 图4-5 Unity人物模型 |

模型结构包括头、颈、身体、手、大腿等，同时提供一系列常用的动画，如站立、蹲下、跳起、跑动、行走等，效果如图4-6所示。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | |
| a.站立 | b.蹲下 | c.跳起 | d.跑步 | e.走路 |
| 图4-6 动画效果 | | | | |

为了更好的展现行人的仿真状态，本文将选用站立、走路和跑步三种动作。并且使用动画状态机来进行切换，如图4-7所示。

|  |
| --- |
| C:\Users\sth\AppData\Local\Temp\WeChat Files\1d7a66e371786bef30e3402306a62c6.png |
| 图4-7 动画状态机 |

当行人的速度为0m/s，即行人的初始状态，使用站立HumaniodIdle的动画；当行人的速度增加，且小于3m/s时，行人由站立状态切换至步行HumanoidWalk动画；当行人速度不断增加，大于3m/s时，行人由步行状态切换到HumanoidRun跑步状态。使用动画状态机，再配合脚本系统的C#代码实现，就可以根据虚拟行人的速度来改变其运动姿势，进一步提升仿真的真实感。

* + 1. 行人侧身算法

为了简化分析和计算，大部分的人群模拟研究都将智能体建模为简单的圆模型，agent只能通过调整运动方向来避免碰撞，但是根据生活中的观察，行人有时会通过改变身体形态来避免碰撞，比如卧倒、侧身等。其中最为常见的是侧身动作，在人群密度较高的情况下或者狭窄的通道里，由于间隙比较小，行人往往会采取侧身来进行顺利通过。已经有学者对真实世界中人群的侧身避免碰撞行为进行研究，对相向人流进行研究，研究者发现行人会通过改变速度大小和方向以及改变朝向来避免碰撞。如果场景中人群较为稀疏，有足够的空间调整速度避免碰撞，行人将不采用侧身的方式。举例而言，在人群密度为4人/m²时，若相向人群以180°的方向相向行走时，行人主要依靠侧身进行碰撞避免。而在同样的人群密度下，相向人群角度为45°时，人群则主要依赖于改变速度的方式进行避碰。Hughes等人也通过实验的方式证明，如果行人将在未来很短的一段时间内发生碰撞，行人倾向于直接采用侧身的方式避免碰撞。

设置包围盒是Unity进行碰撞检测的前提，首先需要将智能体的包围盒改变，本节将智能体模型用一个长宽高分别为0.6m，0.3m，1.65m的长方体作为其碰撞包围盒，如图4-8所示。

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\sth\AppData\Local\Temp\WeChat Files\9a32537cbae638747bbd5d63ec19252.png | C:\Users\sth\AppData\Local\Temp\WeChat Files\773fd23b12ee836e3e67e97c98c5e9e.png |
| a. Agent正面包围体 | b. Agent侧面包围体 |
| 图4-8 Agent模型与其包围盒 | |

本文基于以上学者的观察研究，设计侧身避撞算法。

|  |
| --- |
| C:\Users\sth\AppData\Local\Temp\WeChat Files\9f58dcdacf0b315f044e8e256b42ddd.png |
| 图4-9 行人侧身效果 |

考虑侧身避撞发生的场景，根据上述的研究，可以假设侧身避撞需要满足以下条件：

1.系统开启了侧身避撞机制。

2.碰撞将在未来的一小段时间内。

3.行人可以通过侧身来避免碰撞。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | |
| a. 行人接近 | b. 侧身效果 | c.包围盒俯视效果 |
| 图4-10 侧身避撞示意图 | | |

侧身避撞算法需要结合在已有的模型中，可以使用到已有模型所提供的信息。如图4-10所示。

对于条件1，侧身避撞机制属于针对视觉效果且非常细节的操作，需要大量计算量进行提前碰撞检测，所以不适用于大规模和高密度人群，在系统检测到以上情境时，会关闭侧身避撞机制；在相对稀疏且小规模人群的情境下，会开启侧身避撞机制。

对于条件2，碰撞将在未来的一小段时间内，行人间的距离在动态分群策略中已经计算过，所以只需要根据需求设置合理的阈值即可。

对于条件3，是最复杂的一步，行人采取侧身操作是为了不改变自身的运动方向和速度，所以需要计算行人在侧身后是否还有碰撞，如果侧身后没有了碰撞，则采取侧身操作，如果侧身并不能避免碰撞，那么就取消侧身操作，进行普通的避撞操作，调整位置后再考虑侧身。

* 1. 仿真效果

本节首先将第三章的经典场景进行重新仿真，通过对比来发现更多的行人运动的特性，然后通过仿真更多的情境，表现了模型的通用性。值得注意的是，第三章中为了验证算法的有效性将行人用半径为1m的小球代替，而这里的行人模型比小球要小，故仿真时的行人间距会有所不同。

* + 1. 个体穿梭模拟

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | |
| a. 行人开始运动 | b. 中心剧烈抖动 | c. 抖动逐渐好转 |
|  | | |
| d. 俯视初始时 | e. 俯视中心 | f. 从中心分散 |
| 图4-11 传统SFM 30个行人穿梭仿真 | | |

在使用小球模拟的个体穿梭仿真实验时，采用SFM的仿真效果表现出行人在相遇时会有剧烈抖动，但是用行人模型代替小球后，由于行人朝向与运动方向相同，所以可以清楚地表现行人转身回头的动作。在真实场景下，行人穿梭时一般不可能有转身的动作，所以SFM在行人穿梭实验中的仿真效果并不理想。

图4-12是DC-SFM的仿真结果，由于模型引入了动态防撞力和动态分群策略，仿真表现与SFM相差很多，第一个差别是行人形成若干个小的群体，一般都是相邻的行人相互组成了一个群体，虽然在本实验中并没有设置行人之间的亲疏关系，但是距离较近，运动方向较为一致的行人还是达到了分群的默认标准，所以这里产生了“组团”的效果。第二个差别是引入了动态防撞力后，行人接近后，所受到的作用力很大，会产生垂直于运动方向的动态防撞力来规避碰撞，具体的表现为行人会迅速左右躲开而不是回头或者产生振荡，仿真效果就比较真实。

当然这里也可以将调大，使得所有行人都不能达到成群的门槛。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | |
| a. 行人成群 | b. 成群结队地通过 | c. 行人回归独立 |
|  | | |
| d. 行人成群 | e. 成群结队地通过 | f. 行人回归独立 |
| 图4-12 DC-SFM个体穿梭模拟 | | |

* + 1. 不同属性行人模拟

|  | | |
| --- | --- | --- |
| a. 青壮年先离开 | b. 青壮年离开 | c. 老人孩子随后离开 |
|  | | |
| d. 青壮年先离开 | e. 青壮年离开 | f. 老人孩子随后离开 |
| 图4-13 SFM疏散模拟 | | |

如图4-13所示，本文尝试使用不同颜色的人物模型来代表不同属性的行人，使用蓝色模型代表青年人，绿色模型代表孩子，红色模型代表老年人，且他们互为亲人关系。由于在紧急疏散过程中人物运动速度较快，所以了使用人物的奔跑动画，当模型速度大于3m/s后切换到奔跑动画。仿真开始时行人随机分布在一个直径为20m的范围内，往目的地运动。SFM疏散模拟过程中青壮年运动速度较快，率先离开原地，老人孩子在后面，速度较慢。SFM无法模拟出具有亲密关系的群体，在疏散的时候，位于前面的行人会对位于后方的行人形成排斥作用，导致位于后方的行人运动速度变慢，在紧急情况或者疏散过程中，位于后方的行人放慢速度是不科学的，所以SFM不适用于紧急情况下的疏散仿真。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | |
| a. 青壮年回头 | b. 青壮年带领团队 | c. 老人孩子紧随其后 |
|  | | |
| d. 青壮年回头 | e. 青壮年带领团队 | f. 老人孩子紧随其后 |
| 图4-14 DC-SFM疏散模拟 | | |

图4-14所示为DC-SFM疏散模拟情况，在疏散过程中，由于行人们的关系是亲人关系，故根据动态分群策略他们组成了一个群体，同一个群体内部会有群自吸引力来保证一个群体的相对稳定性，4-14(a)所示，所有的行人会先朝着人群的中心运动，从一个分散的状态转变为了一个紧凑的状态，在之后的疏散过程中，青年人一直保持与整个群体的距离，在远离时会放慢速度，和老人小孩在一起，由于他们是一个群体，故位于后方的行人不会受到前方的作用力，而且还会受到向前的群自吸引力，很容易就达到自身的最快速度，这体现了协助的心理，是SFM无法模拟出来的效果。而且自吸引系数越大，群体中所有行人的间距越紧密，就越能表现出聚团前行的效果，适用于高度紧急的情境。

* + 1. 小列队穿梭模拟

|  | | |
| --- | --- | --- |
| a. 列队穿梭 | b. 列队接近 | c. 列队穿梭结束 |
|  | | |
| d. 列队穿梭 | e. 列队接近 | f. 列队穿梭结束 |
| 图4-15 SFM列队模拟 | | |

如图4-15所示，SFM列队模拟中，由于SFM没有分群的概念，故列队穿梭开始的时候，同一个队伍的行人间出现了互相排挤，无法保持一个整齐的队形，在现实生活中，朝同一个方向的队伍内部不会有太多的相互排挤的情境，故SFM也无法很好地模拟列队穿梭。

|  | | |
| --- | --- | --- |
| a. 列队穿梭 | b. 列队接近 | c. 列队穿梭结束 |
|  | | |
| d. 列队穿梭 | e. 列队接近 | f. 列队穿梭结束 |
| 图4-16 DC-SFM列队模拟 | | |

如图4-16(a)，(b)，(c)所示，同一个列队的行人拥有相同的运动方向，在列队模拟时，将速度一致性分值所占的比重提高到1，就可以使得同一个队列划分成一个群体，由于本次列队穿梭模拟不在紧张的情境中，故把自吸引系数调小，行人之间保持一定的距离，总体是非常整齐一致的，如图4-16(a)所示，在两队行人相遇时，两队行人分别受到群间作用力，很优雅地避开了彼此，如图4-16(b)，(c)所示。在这种参数设置下，DC-SFM可以模拟训练有素、有组织的群体，如仪仗队、阅兵式等。

如图4-16(d)，(e)，(f)所示，与4-16(a)，(b)，(c)形成对比，使用默认参数，在同一个列队中，行人们选择离自己较近的行人进行分群组队，故一个列队分成若干个小群体，但与SFM不同的是，他们是比较有组织的，在此参数的配置下，DC-SFM可以模拟比较休闲的场景，比如商场逛街的行人，校园里并肩行走的学生等。

从上述两种参数的设置可以看出，DC-SFM比SFM有更多可调节的空间，可以表现更多情境下的人群效果，尤其在队列模拟中，不同的参数能够表现完全不同的分群结果和避让效果，通过改变参数，完全可以满足大部分情境。

* + 1. 阵列模拟

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | |
| a. 阵列人群 | | b. 人群拥挤 | | c. 人群穿梭结束 | |
|  | | | | | |
| d. 阵列人群 | e. 人群接近 | | f. 人群交汇 | | g. 穿梭结束 |
| 图4-17 SFM大规模行人模拟 | | | | | |

如图4-17(a)，(b)，(c)所示，仿真两个200人的方阵相遇的情况，SFM在大规模人群时仿真效果会十分混乱，而且帧率为5fps左右，尤其是在人群接近后，会产生不自然的抖动现象，整体穿梭的效果不佳。如图4-17(d)，(e)，(f)，(g)所示，仿真两个400人的方阵相遇的情况，从仿真结果中可以清晰地看出人群分散的情况，仿真帧率在1fps以下，无法满足实时仿真的需求。

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | |
| a. 列队 | | b. 交汇 | | c. 结束 | |
|  | | | | | |
| d. 列队 | e. 交汇开始 | | f. 交汇中 | | g. 到达 |
| 图4-18 DC-SFM大规模行人模拟 | | | | | |

如图4-18(a)，(b)，(c)所示，仿真中行人方阵由于动态分群策略分成数十个小的群体，并且在默认参数情况下，两队行人会有一定的避撞措施，所以两个行人方阵仅仅有一部分行人会交汇，仿真过程中，方阵整体十分整齐，帧率在10fps以上。当调小防碰系统，行人的避撞能力下降，如图4-18(d)，(e)，(f)，(g)所示，大量行人会进行交汇，交汇后阵型还是相对比较整齐，相比较于图4-17(g)中的效果要真实很多。

|  | | | |
| --- | --- | --- | --- |
| a. 分成4队 | b. 不断接近 | c. 行人渠化 | d. 有序到达 |
|  | | | |
| e. 分成1队 | f. 不断接近 | g. 太极拥挤 | h. 有序到达 |
| 图4-19 DC-SFM大规模分群 | | | |

如图4-19所示，同样是分群策略，只是改变人群的亲密关系，仿真效果就截然不同。如图4-19(a)所示，将方阵均分成4个小队，将小队内的行人关系设置为亲人关系，仿真开始后方阵迅速聚成类似“蝌蚪”的状态，在行人交汇时，小队之间互相主动避让，呈现出良好的渠化效果。如图4-19(e)所示，将方阵分成一个团体，仿真开始时方阵呈现聚团的现象，在交汇时，两队行人呈现出类似“太极”的形状，随后逐渐有序通过。

将大规模行人分成4队和1队，其表现出的效果完全不同，也体现了动态分群策略的优势，能够提升模型的多样性。

|  | | | |
| --- | --- | --- | --- |
| a. 队列接近 | b. 大队伍让行 | c. 行人渠化 | d. 末尾行人转弯 |
|  | | | |
| e. 队列接近 | f. 大队伍让行 | g. 行人渠化 | h. 末尾行人转弯 |
| 图4-20 DC-SFM 非对称队列穿梭 | | | |

之前的仿真实验几乎都是对称式的，现在构造一个非对称式的实验，如图4-20(a)所示，左侧是5\*20的行人阵列，并且行人关系均设置为亲人，右侧是30\*20的行人阵列，均分成上下两个团队，每个团队行人关系均设置成为亲人关系。仿真开始后，两个阵列都十分整齐地接近，到了距离较近的时候，右侧队列向两侧扩散为左侧的小队让行，小队依旧保持整齐的状态。值得注意的点是如图4-20(d)所示，位于大队伍末尾的行人在小队即将穿越的时候由于小队的局部人员数量优势而跟从了小队，这个现象需要从两个角度来看，一个方面是在大规模行人穿梭中，要想获得预期的效果需要控制好参数的大小，可能需要多次尝试才能获得满意的效果；另一个方面，SFM无法模拟出行人这样的从众心理，试想一个场景，位于末尾的行人之前就是一个盲从的状态，即确实不知道目标的位置，遇到一个迎面而来的队列，是有一定的可能跟从新的队伍的，这是一种好奇心和博弈心理下产生的行为，本文认为也是符合情理的。

以上实验证明了DC-SFM在仿真效率上比SFM优秀，而且可以通过参数的调整表达很多种交汇情况，DC-SFM相对于无法控制阵型的SFM真实感强，可拓展性强。

* 1. 本章总结

本章描述了仿真系统的架构，在效率和效果的角度上对系统进行了优化，提出了均匀网格密度估算，而且提出了行人侧身优化，实验效果表明本文方法可以更为真实地完成多情境下人群模拟的仿真任务，可以通过间接的参数设置来表示不同的行人运动效果。

1. 总结与展望
   1. 研究工作与成果

虚拟人群仿真在公共安全领域有着十分广泛的应用，可以为城市应急预案的设定、评估、优化提供真实可感的参考。传统的人群仿真方法或者需要大量专家经验指导，并且需要使用多种模型进行模拟；近年来流行的几种人群模拟算法也存在着场景高度相关的问题。本文在此背景上设计了能适应于多情境的人群模拟算法，研究如何实现快速建模、高效计算、适用性强的人群仿真。主要研究工作与成果如下：

1. 将基于Agent的模型与经典社会力模型相结合，不仅保留了社会力模型的优势，而且通过引入了感知范围，将行人与环境人群密度有机的结合在一起，综合心理学提出焦虑指数和亲密指数，使得刻画agent更加全面，基于上述的信息，再通过动态分群策略实现动态群组的划分，从效果上看，不仅使得人群从众的效果更加自然，而且能够降低算法复杂度。又在分群的基础上提出了群自吸引力的概念，保证了分群后的聚集效果，而且能够模拟出在紧急疏散情况下，行人互助的效果。最后在大规模人群模拟的仿真实验中，定量证明了改进后算法的高效性。

2. 在仿真系统设计与实现方面，做了大量的工程上的优化和改进。提出了均匀网格的密度优化方法，使得求解人群密度的算法时间复杂度从O(N²)降低到O(1)，并且从定性的角度证明了最终结果不会有太大的误差。同时将仿真中的小球替换成人物模型，使用动画状态机和脚本系统对其进行精确控制，这也使得仿真的效果更贴近真实。本文还针对公共安全背景下常见的密集人群以及狭窄场景，使用长方体包围盒，从生活实际的角度出发对仿真过程中虚拟行人的运动姿态进行真实感调优。系统还设计了一整套后台数据监控模块，可用于统计仿真过程中的行人的轨迹、疏散时间、群组数量、实时帧率等信息，为后续的实验分析提供数据上的保障。

本文的创新点和技术贡献可以总结为如下两点：

1. 综合了基于agent和经典社会力模型的优势，并且结合了心理学因素，将虚拟行人从更多维度进行描述，从而可以适应多种情境下的仿真需求，创新性的将动态分群的策略有机的结合到社会力模型中，使其模拟出的人群不再是盲目的从众效果而是有组织有目的的。动态分群比固定分群的好处是考虑到了影响行人运动多方面的因素，行人不再是一个孤立的个体或者是固定为某个组织的成员。这为人群模拟创造了多样性和灵活性。

2. 本文在设计与实现仿真系统时观察人群模拟的效果，重视算法实现的效率和效果，就这两个方面对系统进行了很多的优化，以满足更大规模人群的实时模拟。同时结合生活实际，提出侧身避碰的算法，并且结合到模型中，进一步提高仿真的真实感。本文系统的设计与实现拥有很强的可扩展性，可以满足后续更多要求的人群模拟仿真研究。

* 1. 未来工作展望

人是极其复杂的生物，环境也瞬息万变，人群仿真任务对于仿真的逼真度与科学性的追求没有终点。针对本文研究的局限性，未来需要进一步加深研究的工作主要有：

1.获取关于公共安全的典型场景的真实行人运动视频，采用高精度的行人跟踪算法得到不同情境下行人运动轨迹的数据集，为仿真提供更对的真实参考。

2.对于大规模人群的模拟依旧是一个难点，仿真的帧率在考虑微观细节时还是无法达到实时的效果。

参考文献

1. Reynolds C W . Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4):25-34.
2. Blumberg B, Downie M , Ivanov Y , et al. Integrated Learning for Interactive Synthetic Characters[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3):417-426.
3. Henderson L F. The statistics of crowd fluids.[J]. Nature,1971,229(5284).
4. Helbing D . A Fluid Dynamic Model for the Movement of Pedestrians[J]. Complex Systems, 1998.
5. Helbing D , Molnar P . Social Force Model for Pedestrian Dynamics[J]. 1998.
6. Helbing D , Buzna L , Werner J T . Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulations, and Design Solutions[J]. Transportation Science, 2005, 39(1):1-24.
7. Blue V J , Adler J L . Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways[J]. Transportation Research, Part B (Methodological), 2001, 35(3):0-312.
8. Mariepaule C . Steering Behaviors for Autonomous Cameras[J]. 2013.
9. Okazaki S . A STUDY OF PEDESTRIAN MOVEMENT IN ARCHITECTURAL SPACE : PART 1 PEDESTRIAN MOVEMENT BY THE APPLICATION OF MAGNETIC MODELS[J]. Transactions of the Architectural Institute of Japan, 1979, 283:111-119.
10. Okazaki S . A STUDY OF PEDESTRIAN MOVEMENT IN ARCHITECTURAL SPACE : Part 2 : Concentrated Pedestrian Movement[J]. Transactions of the Architectural Institute of Japan, 1979, 284:101-110.
11. 岳昊, 邵春福, 姚智胜. 基于元胞自动机的行人疏散流仿真研究[J]. 物理学报, 2009, 58(7).
12. 李晓雪. 基于元胞自动机模型的公交线路系统建模与模拟[D]. 北京交通大学, 2010.
13. 杨立中, 方伟峰, 黄锐, et al. 基于元胞自动机的火灾中人员逃生的模型[J]. 科学通报, 2002(12):18-23.
14. 张开冉, 杨树鹏, 何琳希, et al. 基于社会力模型的车站负重人群疏散模拟研究[J]. 中国安全科学学报(1).
15. 纪庆革, 何浩, 王福川. 密度场下的短程社会力模型[J]. 计算机科学, 2015(06):18-23+59.
16. 邓宇菁, 冯页新, 胡列格. 社会力模型中行人的心理因素和随机行为对人群疏散过程的影响[J]. 系统工程, 2014(11):144-148.
17. 汪蕾, 蔡云, 徐青. 社会力模型的改进研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2011(01):148-153.
18. 李进, 朱道立. 基于multi-agent的大型人群活动多阶段动态协调控制模型[J]. 中国管理科学, 2009(05):115-121.
19. 常钦, 党会森. 基于网格Agent的群体性事件人群聚集模型研究[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2011(03):76-79.
20. 李晖, 王汉宁, 曾文聪, et al. 宏观场景指导下的微观agent人员疏散仿真模型[J]. 计算机应用研究, 2011(11):117-120.
21. 陈淼, 韩端锋, 于洋, et al. 基于Agent的舰船人员疏散模型研究[J]. 计算机工程与科学, 2013(04):167-171.
22. 孙立晟. 基于Multi-Agent复杂网络的自然疫源性疾病计算模型研究[D]. 2015.
23. 任治国, 盖文静, 彭群生. 疏散仿真中关注个体心理的路径规划[J]. 计算机辅助设计与图形学学报(9):191-201.
24. 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, v.22;No.260(12):151-160.
25. dified Social Force Model for Pedestrian Behavior Simulation at Signalized Crosswalks[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2014, 138:521-530.
26. Helbing D , Farkas I , Vicsek T . Simulating Dynamic Features of Escape Panic[J]. Nature, 2000, 407(6803):487-490.
27. Lakoba, T. I . Modifications of the Helbing-Molnar-Farkas-Vicsek Social Force, Model for Pedestrian Evolution[J]. SIMULATION, 2005, 81(5):339-352.
28. Parisi D R , Gilman M , Moldovan H . A modification of the Social Force Model can reproduce experimental data of pedestrian flows in normal conditions[J]. Physica A, 2009, 388(17):3600-3608.
29. 李斌, 张东摩, 朱朝晖, et al. 基于行动理论的智能体模型[J]. 南京航空航天大学学报, 1999(6):660-665.
30. 迟妍, 谭跃进. 基于知识表示的作战智能体模型描述研究[C]// 中国系统工程学会全面建设小康社会和系统工程会议. 2004.
31. 陈丹, 窦明罡, 陈靓影, et al. 一种基于自适应智能体模型的复杂人群疏散行为仿真方法:.
32. 杨少凡. 基于智能体模型的疏散仿真软件研究[D].
33. 宋运忠 刘毛妮. 基于改进智能体模型的群集运动行为研究[J]. 河南理工大学学报：自然科学版, 2015(34):825.
34. 王飞, 尹占娥, 温家洪, et al. 基于多智能体的自然灾害动态风险评估模型[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(2).
35. 余冬梅, 张秋余, 马少林, et al. Dijkstra算法的优化[J]. 计算机工程, 2004, 30(22):145-146.
36. 陈益富, 卢潇, 丁豪杰. 对Dijkstra算法的优化策略研究[J]. 计算机技术与发展, 2006(09):79-81+84.
37. 张仁平, 周庆忠, 熊伟, et al. A＊算法改进算法及其应用[J]. 计算机系统应用, 2009, 18(9):98-100.
38. 高庆吉[1], 于咏生[2], 胡丹丹[2]. 基于改进A＊算法的可行性路径搜索及优化[J]. 中国民航大学学报, 2005(4).
39. 高春晓, 刘玉树. 碰撞检测技术综述[J]. 计算机工程与应用, 2002(05):9-11+40.
40. 涂超, 颜辉武. 碰撞检测技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2001, 37(19):142-143.
41. 申玉斌, 蔡勇, 华才健. 虚拟环境中的碰撞检测技术的研究与应用[J]. 交通信息与安全, 2005, 23(1):74-78.
42. 李芙玲[1], 张瑾[1]. 碰撞检测技术研究[J]. 华北科技学院学报, 2004, 1(2):71-73.
43. 李晓霞, 李百川, 侯德藻, et al. 车辆追尾碰撞避免技术[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2001, 21(2):94-97.
44. 黄鹏, 刘箴. 一种RVO碰撞避免的人群仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(11):34-37.
45. 李猛, 梁加红, 李石磊. 一种改进的多智能体碰撞避免行为[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(3):92-98.
46. 税斌. 基于ORCA碰撞避免的人群疏散模拟[J]. 现代计算机(专业版), 2016(2):73-75.
47. 谢凯丽. 大规模人群模拟中的碰撞避免研究与实现[J]. 现代计算机(专业版), 637(01):69-73.
48. 王冬梅, 方华京. 基于有限记忆的智能群体的群集运动与避障控制[J]. 系统仿真学报, 2009(13):109-111.
49. 万明. 多机器人群集运动控制与避障研究[D]. 南京邮电大学.
50. Anthony Palmer, Robert Bailey. Sex differences and the statistics of crowd fluids[J]. 1975.
51. Von Sivers I , Templeton A , Künzner, F, et al. Modelling social identification and helping in evacuation simulation[J]. Safety Science, 2016, 89:288-300.
52. Funge J , Tu X . Abstract Cognitive Modeling: Knowledge, Reasoning and Planning for Intelligent Characters[C]// Conference on Computer Graphics & Interactive Techniques. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. 1999.
53. Fridman G A K N . Towards a cognitive model of crowd behavior based on social comparison theory[C]// National Conference on Artificial Intelligence. AAAI Press, 2007.
54. He C , Xiao H , Dong W , et al. Dynamic group behavior for real-time multi-agent crowd simulation[C]// 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2010). IEEE, 2010.
55. Pax R , Gomez-Sanz J J , Olivenza I S , et al. A Cloud Based Simulation Service for 3D Crowd Simulations[C]// 2018 IEEE/ACM 22nd International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT). ACM, 2018.
56. Hu L I , Tao W U , Yong H . Simulation Model of Small Group Members' Behavior in Emergency Evacuation[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2016.
57. Gou Chengqiu, Yu Hanyou, Xu Zian,等. Simulation of Small Social Group Behaviors in Emergency Evacuation Based on Information Asymmetry[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018.
58. Kim, Sujeong. Velocity-Space Reasoning for Interactive Simulation of Dynamic Crowd Behaviors[J]. Dissertations & Theses - Gradworks, 2015.
59. Jablonski K , Argyriou V , Greenhill D . Crowd Simulation for Dynamic Environments based on Information Spreading and Agents’ Personal Interests[J]. Transportation Research Procedia, 2014, 2:412-417.
60. Fu Y W , Li M , Liang J H , et al. Modeling and Simulating the Walking Behavior of Small Pedestrian Groups[C]// Asian Simulation Conference. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.
61. Weiss T , Litteneker A , Jiang C , et al. Position-based multi-agent dynamics for real-time crowd simulation[C]// the ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium. ACM, 2017.
62. Guy S J , Lin M C , Manocha D . Modeling collision avoidance behavior for virtual humans[C]// 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010), Toronto, Canada, May 10-14, 2010, Volume 1-3. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010.
63. Park J H , Rojas F A , Yang H S . A collision avoidance behavior model for crowd simulation based on psychological findings[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2013, 24(3-4):173-183.

致谢

在此论文成文之际，我感触良多，回顾我在北京邮电大学的两年多的时光，我成长了很多，也收获了不少。

首先要特别感谢我的导师苑金辉老师。你不仅在科研工作上对我进行了耐心的指导，并且时常在组会中分享精彩的人生经历，在个人发展上给予了许多启发，让我受益匪浅。

同时，我很感谢实验室的桑新柱、王葵如、颜玢玢、于迅博老师，感谢你们对我们支持、帮助和信任。在读硕士期间，最令人振奋的是身边有那么多优秀的老师，你们刻苦钻研、求真务实的精神无时无刻不感染着实验室的同学们，我的学习能力、自主能力都有了改善和提高，让我切身体会到“越努力，越幸运”的真谛，也体会到“世上无难事，只怕有心人”的含义。你们不仅是我科研生活中的领路人，而且是我精神上的灯塔，指引着我不断前行，谢谢你们。

我还要感谢邢树军师兄、管延鑫师兄、李远航师兄对我科研和工作上的耐心指导，感谢申瑞瑶师兄、项维康师兄在我刚开学迷茫时为我制定了很好的学习途径，让我走了不少捷径。感谢李天昊同学，在我遇到技术困难时给予帮助。也感谢实验室的其他同学，在这里不一一列举，实验室因为你们的共同努力发展的越来越好。

最后，我想感谢我的父母和家人对于我这么多年来的支持和陪伴，你们让我更加乐观地面对生活中的一切。

攻读学位期间取得的研究成果

1. 苏腾辉，苑金辉. 紧急情况下分群的社会力模型[EB/OL]. 北京：中国科技论文在线 [2019-12-27]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201912-120>.

2. Tenghui Su, Jinhui Yuan, Shujun Xing, Xinzhu Sang, Kuiru Wang, Binbin Yan, Yanxin Guan. Modeling and Simulation of Social Force Model based on Dynamic Clustering of Personality Perception, has been accepted for presentation at the 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference(ITOEC 2020).

3. 苏腾辉，苑金辉，邢竖军，桑新柱，王葵如，颜玢玢，管延鑫. 基于个性感知动态分群的社会力模型建模与仿真. 计算机辅助设计与图形学学报 (已投稿).

专利：

1.《基于视频融合的三维地理信息可视化方法及系统》，专利号：KHP191113133.3

2.《一种三维悬浮光场显示系统及显示方法》