

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2019)10-1619-08

论文引用格式: Liu Z. Progress and problems in visual simulation of crowd emergency evacuation behaviors [J]. Journal of Image and Graphics, 2019, 24(10): 1619-1626. [刘箴. 人群应急疏散可视仿真研究进展和问题 [J]. 中国图象图形学报, 2019, 24(10): 1619-1626.] [DOI: 10.11834/jig.190130]

人群应急疏散可视仿真研究进展和问题

刘箴

宁波大学信息科学与工程学院, 宁波 315211

摘要: 人群应急疏散可视仿真是用智能体来模拟具有自主感知、情绪和行为能力的人群个体, 并采用3维可视的方式来直观呈现人群应急疏散情景, 可以为制定人群应急预案提供形象直观的分析方法。本文从人群仿真数据的来源、人群导航模型的构建、人群行为模型、人群情绪感染、人群渲染5个方面概述目前研究的进展, 然后从仿真模型的可验证性、人群疏散导航模型的构建、人与环境的物理模型、动物逃生实验与仿真、疏散中的社会行为表现以及人群情绪的可视计算6个角度讨论需要进一步研究的问题。针对需要深入研究的问题, 指出借助于紧急事件的视频监控分析和虚拟人群情景的用户调查, 有助于完善人群仿真模型。结合物理模型, 可以更准确地描述人群应急疏散场景。开展动物逃生实验分析, 有助于完善人群运动导航算法。建立人群社会行为模型, 可以更详细描述疏散中人群行为的多样性。构建基于多通道感知的人群情绪感染计算方法, 可以详尽描述情绪感染的过程。人群应急疏散行为的可视仿真研究在城市的安全管理方面具有重要的应用前景, 但其研究仍存在很多亟待解决的问题。综合地运用多学科知识, 完善实验手段是进一步推动研究的关键所在。

关键词: 人群应急疏散; 可视仿真; 情绪感染; 人群行为; 人群导航

Progress and problems in visual simulation of crowd emergency evacuation behaviors

Liu Zhen

Faculty of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: The visual simulation of crowd emergency evacuation is a method that uses agents to simulate individuals with autonomous perceptions, emotions, and behavioral abilities. With 3D visual means, it can visualize the emergency evacuation scenarios of the crowd. This study summarizes the research progress from the sources of crowd simulation data, the construction of the crowd navigation and behavior models, the crowd emotional contagion, and the crowd rendering. This study also discusses issues that must be studied from the perspective of the verifiability of the simulation model, the construction of the crowd evacuation navigation model and the physical model of humans and environments, the animal evacuation experiment and simulation, the social behavior of evacuation, and the visual calculation of crowd emotions. For the problems that must be studied in depth, results are as follows. The video surveillance analysis of emergency events and the user survey of virtual crowd scenarios can be used to improve the crowd simulation model. The analysis of animal evacuation experiments can improve the crowd navigation algorithm. The social behavior model can describe the diversity of the crowd evacuation behaviors in further details. The calculation method based on multichannel perceptions can describe the process

收稿日期: 2019-05-13; 修回日期: 2019-06-28; 预印本日期: 2019-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(61761166005, U1636111); 宁波市公益类科技计划项目(2019C50024)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61761166005, U1636111)

of emotional contagion in further details. Visual simulation research on crowd emergency evacuation behaviors has important application prospects in the management of urban safety. However, numerous problems remain to be solved in this field. The comprehensive application of multidisciplinary knowledge and the improvement of experimental methods are the keys for future studies.

Key words: crowd emergency evacuation; visual simulation; emotion contagion; crowd behavior; crowd navigation

0 引言

随着人类社会的发展,各类紧急事件也不断增多,人群密集场所的安全管理正变得日益重要。制定科学缜密的人群应急疏散预案,开展人群应急疏散演习,是降低安全风险的重要手段。现有人群实地疏散演习,由于场地、经费和时间等的限制,很难对多种紧急事件进行演练,不适合大面积推广。随着人工智能和虚拟现实技术的发展,人群仿真真正成为计算机图形学领域比较活跃的研究方向^[1],包括人群运动的算法和动画渲染等方面。人群应急疏散可视仿真是人群仿真在疏散管理中的具体运用,不同于疏散数值仿真,它使用智能体来模拟具有自主感知、情绪和行为能力的人群个体,并采用3维可视的方式来直观呈现人群疏散情景,可以模拟人群在紧急事件下的行为、情绪和运动,推演人群的各种可能情景,为公共场所的应急管理提供一种可视化的辅助手段。

本文概括总结了人群应急疏散可视仿真的研究进展,并指出本领域一些值得深入研究的问题,为进一步推进研究提供参考。

1 人群应急疏散可视仿真进展

本节从人群仿真数据的来源、人群导航模型的构建、人群行为模型、人群情绪感染、人群渲染5个方面来概括研究进展。

1.1 人群仿真数据的来源

人们已经在基于视频数据驱动的人群仿真方面取得了一些成果^[2-3],但是很多疏散情景下的视频监控数据往往是一些片断景象,视频质量也不够高。完全采用基于数据驱动的疏散仿真存在很多困难,所以现有疏散仿真仍需要建立人群仿真模型,而真实的人群运动数据可作为仿真模型中一些关键参数设计的依据。例如,通过视频分析得到的个体的最

大运动速度可以作为一定情境下仿真中设定的个体最大速度。

利用计算机视觉跟踪算法,可以学习真实的人群运动轨迹,抽取人群运动参数,并用于人群仿真^[4-6]。基于真实的监控视频数据分析,人们已经积累了不少紧急事件下人群运动参数范围^[7],这些数据将为人群仿真提供帮助。

人群运动仿真也需要一些生理和心理参数,如个体的情绪等。以人群应急疏散中的情绪数据采集为例,早期的调查是通过采访紧急事件亲历者、咨询相关的专家,或者通过发放调查表来获取人群在疏散中的心理状态。这些传统的方法得到的数据有限,很难全面反映个体在人群应急疏散中的心理变化。近年来,随着便携式生理检测设备和头盔显示器的普及,人们开始通过创建虚拟人群环境,让用户在虚拟环境中感受人群的运动来采集个体的生理和心理参数。例如,通过虚拟人群可以帮助分析由于人群密度的变化带来的人群情绪影响^[8]。

1.2 人群疏散导航模型的构建

人群导航要确定个体的疏散路径,个体之间首先要进行碰撞检测。目前比较常用的碰撞检测方法是基于社会力模型(social force model)^[9]和RVO(reciprocal velocity obstacles)的模型^[10],这些经典的模型有不少改进版本,如文献[11-12]。在人群全局导航控制方面,已经有不少类似研究^[13],但对于复杂的障碍物环境,全局导航算法有时并不适用。在疏散的过程中,如果个体对环境熟悉,则会向着自己熟悉的出口方向疏散;如果个体不熟悉环境,则可能跟随其他人进行疏散。在疏散中,个体之间也会有知识和信念的分享,从而导致人群导航路径选择的多样性。人们已经从多个角度研究了人群导航问题,如探索对出口熟悉程度对疏散效率的影响^[14]、人群心理和疏散路径规划^[15]、机器学习和路径导航^[16]。此外,为了将导航模型具体应用到疏散方案中,人们也提出了一些可视化方法,如文献[17]提出了疏散方案的可视化编辑方法。

1.3 人群行为模型

为了模拟人群行为,可以为人群个体建立分层框架来反映人类决策过程,描述了个体对周围情况的感知和内部属性变化^[18],人群个体的行为决策通常要面对不确定信息处理,这方面工作参见文献[19-21]。由于人群个体行为表现具有差异,因此可以采用心理学中的 OCEAN 个性模型来描述行为表现的差异^[19]。

1.4 人群情绪感染

在紧急事件中,人群往往处于一种非理智的情绪状态,个体会不由自主地受到周围人群情绪的影响,即个体之间的情绪会相互感染。很多实际案例表明,人群情绪感染增加了人群应急疏散的风险,人群会快速聚集,容易导致极端后果。人群应急疏散的情绪感染模型成为近年来人群仿真领域的一个研究热点^[22-23]。现有不少情绪模型借鉴了传染病传播模型^[24]。

1.5 人群疏散渲染

要实现人群的3维可视效果,个体动作一般采用骨骼动画来实现。可以用不同的动画序列来描述个体的不同动作状态。对于情绪感染效果,则采用不同的颜色来区分已经感染的人群和未感染的人群。为了表现人群个体的差异性,可以采用几种不同的人物几何模型,使所呈现的群体可视效果更为丰富。此外,为了加快渲染效率,可以采用预先数值仿真的方法,先计算出人群运动的位置坐标信息,然后再用图形渲染计算的结果,这比较适合在普通计算机上渲染大规模人群运动。此外,也有些研究采用 LOD (level of detail) 技术或者并行计算来渲染人群^[25],为了增加人群个体显示的多样性,可以通过改变人群个体的面部贴图的手段^[26]。

2 人群应急疏散可视仿真面临的问题

虽然人们已经在人群应急疏散可视仿真领域取得了不少研究成果,但是这个领域仍有大量问题需要进一步研究和探索,由于人群场景的复杂性,现有的各类仿真模型都有不同程度的局限性。如何验证仿真模型的有效性,是疏散可视仿真的重要方面。为了更好地再现人群疏散景象,需要从全局和局部来再现人群,因此要从人群导航、人群物理和环境特效来强化人群可视效果。由于人群个体在疏散中趋

利避害,借助于动物逃生实验,可以发现人群疏散情景下的应急行为。人群仿真研究急需在仿真模型的可验证性、人群疏散导航模型的构建、人与环境的物理模型、动物疏散实验和仿真、疏散中的社会行为表现以及人群情绪的可视计算几个方面深入开展研究。

2.1 仿真模型的可验证性

人群仿真模型的验证一般包括定性验证和定量验证。前者要验证仿真模型是否可以呈现疏散场景中的人群特征,后者是要通过一定的数据检验模型,如使用实际案例中的一些数据来检验仿真结果。检验一个仿真模型是否合理,要看它在对实际案例进行仿真时,得到的仿真数据和实际数据是否接近。例如,可以用通过疏散出口的人数、相应的疏散时间数据和人群运动的轨迹线来检验仿真模型是否能得到与实际相似的数据。此外,也可以对比已有的经典模型来进行定量验证,以分析不同模型的特点。例如,可以将社会力模型作为对比模型来与仿真结果进行对比分析。

目前在疏散模型的定量验证中仍有很多问题没有解决,由于人群疏散景象的多样性,使得不同的仿真模型有不同的适用范围,评判仿真模型的有效性仍缺少相应的标准。例如,选择多少参数来验证仿真模型以及仿真数据和实际数据偏差多少才算有效。在比较不同仿真模型的时候,要依据哪些指标参数评判模型的特点。虽然有些仿真模型计算的疏散时间最少,但这不一定能反映实际的情况,单纯地对比不同仿真模型计算出来的疏散时间并不能用来评判不同模型的优劣。另外考虑到仿真模型未来的使用情况,需要考虑仿真模型计算的复杂度。如果仿真模型计算复杂度较高,在实际部署中则需要更多的硬件投入。文献[27]提出了一种针对聚集人群相似性的度量方法,引入了熵来度量人群的差异性,这就为进一步对比仿真人群和真实人群的差异性提供了新思路。

2.2 人群疏散导航模型的构建

人们已经对密集人群的个体间相互作用进行过不少探索,如文献[28]提出的肩部碰撞仿真。现有的人群导航模型在描述个体之间的碰撞检测时,很少考虑人群在拥挤环境下的侧身运动,通常假设个体在2维平面上的投影是一个圆形。而实际上真实的人群个体可以侧身,个体在2维平面上的投影应

该是一个“胶囊状”的图形。仅有少量文献提出了人群拥挤时的侧身控制方法^[29](图1),这是一个值得继续探讨的问题。

在真实的人群疏散中,当人群汇集到狭小通道中,经过疏散训练的人群会相互感知彼此的运动状态,并不会出现拥挤卡住的现象。比如在庐山地震教室逃生监控视频中能够观察到这种情况,由于平时学生已经多次训练过紧急疏散,当地震发生时,尽管教室的过道狭窄,但是学生都能够迅速疏散,没有出现拥塞现象。这说明通过训练,个体之间已经具备一定的协作性。现有人群导航模型在描述人群通过狭小通道时一般不考虑人群个体的已有经验知识,仿真人群的运动往往出现“卡住”现象。对于有经验的个体,需要通过增加个体之间的协作控制来呈现真实的人群运动效果。另外,人群碰撞检测还涉及到人群的心理和生理状态,这些也都是现有模型未能充分考虑的因素。

现有模型对于人群运动轨迹的呈现不够自然,由于人群在疏散中的运动轨迹往往是曲线。如在超市疏散中,个体经过货架的转角处,运动的轨迹是曲线而非折线。在图2中的虚拟疏散实验中,当用户在已知出口位置的情况下,从虚拟环境中向出口疏散时,记录他们的运动轨迹是曲线(图2中长方形为货架)。目前不少疏散研究对人群的运动轨迹线还缺少较为细致的分析,如果用多个线段近似模拟人群运动轨迹,则人群仿真的可视化效果会显得不够自然。

2.3 人与环境的物理模型

现有人群疏散仿真大多只关注人群本身,忽视了人群情境的环境描述,往往缺少物理真实感,文献[30]虽然给出了密集人群的个体之间的物理交互描述方法,但对环境与人群的物理交互考虑得还不够充分。例如,人群踩踏是人群疏散的一种危险后果,但有关人群踩踏的物理仿真研究目前仍处于探索阶段,有大量问题亟待深入研究。

在实际疏散中,环境的变化对疏散过程有很大的影响,如果能显示环境的动态变化,将能够提升人群仿真的体验感。例如,在地震应急疏散仿真中,很多研究没有考虑到场景的动态变化。比如在真实的地震中,地面会不断抖动,人群会有跌倒、停滞的状态,周围会有物体落下或倒塌,甚至发生火灾等次生灾害。为了更好呈现人群仿真的可视效果,人群仿



图1 蓝衣者侧身进电梯(蓝色线条是其运动路径)

Fig. 1 The agent in blue enters the elevator sideways (the blue line is the path of his movement)

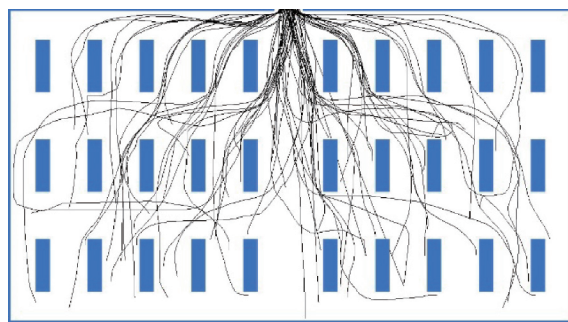


图2 不同用户在虚拟疏散中的运动轨迹线

Fig. 2 Motion trajectories generated by different users in virtual evacuation

真需要进一步融合物理模型,对人和物体进行物理建模,创造具有物理真实感的疏散情景。图3是采用物理引擎实现的地震场景,模拟上方物体纷纷落下的物理效果,可以烘托地震情景。



图3 地震中物体落下的物理特效

Fig. 3 Physical effects of falling objects in the earthquake

在城市的大规模疏散中,人群往往通过车辆进行疏散,在描述道路上车辆疏散的景象中,也要考虑

到车辆群组各种物理效果和环境的各种物理模型,如模拟灾害中道路前方山体塌方的物理效果等。文献[31]提出了有雾环境下的车辆群组仿真模型,对雾的变化提出了生成方法,形象直观地描述了环境变化对车流运动的影响,参见图4。

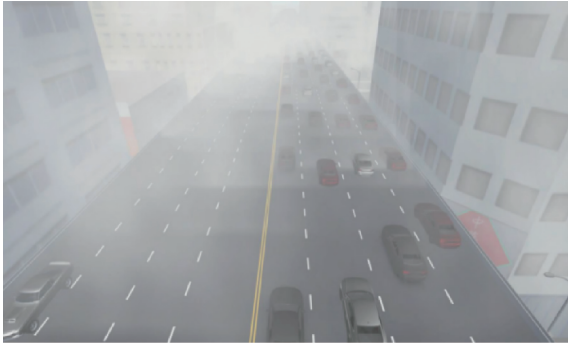


图4 动态雾影响下的车流仿真演示

Fig. 4 Simulation of traffic flow under the influence of dynamic fog

2.4 动物逃生实验与仿真

由于使用真人进行疏散演习存在着多种制约和安全风险,人们在很早的时候就尝试从动物实验和仿真中发现和推演人群的行为规律。但是,这两种方式都存在着不少尚未解决的问题。在动物实验中,实验的设计和装置对实验结果的影响非常大,操作时也必须考虑动物的习性特点,否则可能得不到明确的实验结论。例如,在开展的小白鼠逃生实验中,最初的构想是使用烟雾作为刺激源。但由于装置的密闭性、烟源及送风系统的限制,无法形成连续的烟雾刺激,有部分小白鼠会在装置中探索而非逃向出口。为了产生稳定的刺激源,我们使用了水淹的方法。在此刺激之下,小白鼠会在入水的第一时间进行逃生。图5是双出口条件下的小白鼠紧急逃生状态。此外,在实验过程中需要注意的事项点也很多。例如,由于外观的相似性,个体的跟踪定位在动物群体中非常难以实现。以小鼠逃生实验为例,最稳定的标记物——耳标也有可能发生脱落,影响个体的标记。

动物仿真主要应用于群体的疏散行为推演。但是早期的仿真大多基于经验观察。比如鸟群的仿真^[32]和鱼群的仿真^[33]。也有人利用场模型(如速度场)来控制群体的运动,以模拟大规模昆虫运动景象^[34]。近年来人们开始利用动物的习性设计其行为模式和运动约束规则,从而可以仿真动物群体



图5 小白鼠水淹逃生实验

Fig. 5 Drowning experiment of mice

的不同行为^[35]。总体而言,现有动物仿真研究没有对真实的动物群体运动数据进行统计和采集,缺乏准确的仿真参数,需要通过动物实验来提升仿真模型的可信性。

2.5 疏散中的社会行为表现

在紧急疏散中,除了群体运动的影响之外,个体的行为还受到自身社会属性的影响。但是目前对疏散中个体的社会行为的研究较少。

现有的人群疏散模型大多从力学或者几何学角度建模,只是从宏观的角度描述了人群的疏散运动,忽视了个体之间的社会联系,仅有少部分文献从疏散信息分享的角度提出人群仿真模型^[36]。而真实的疏散视频监控案例表明,人群在紧急疏散中不仅有应急行为,也可能有互助等社会行为。互助行为还容易导致人群疏散中的小群体现象。家庭成员或者朋友通常会聚集成为一个小群体进行疏散。近年来,人们在社会力模型的基础上,提出了一种考虑群组关系的疏散仿真模型^[37](图6)。实验结果表明,如果考虑到社会互助带来的小群组效应,人群会加快疏散,这说明互助行为在一定情境下对于紧急疏散是有利的。

2.6 人群情绪的可视计算

人群的情绪测量一直是尚未解决的问题,在分析人群情绪状态时,可以通过统计分析真实案例中人群在紧急情况下的行为变化,推测出人群情绪变化的指标。例如,个体的疏散速度通常与情绪状态相关。通过对比正常运动速度和疏散速度,能够近似分析个体情绪的大小。此外,为了调查人群在不

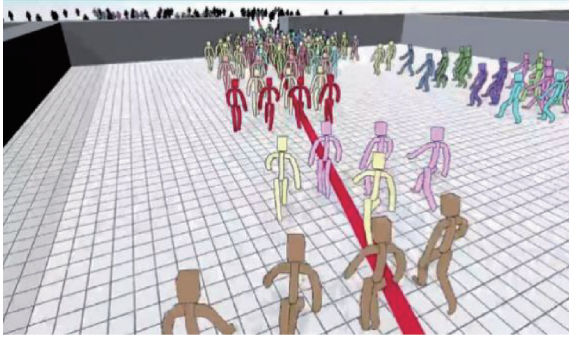


图6 疏散中的不同人群分组

Fig. 6 Different groups in evacuation

同情境下的情绪变化,可以借助虚拟人群环境来采集人群的情绪信息。

目前的情绪可视计算方法仍处于探索阶段,大量的问题需要深入研究。已有的情绪感染模型大多基于疾病传播模型的思想,个体情绪感染量的计算很少考虑个体对外部刺激的感知。而实际的案例表明,个体启动疏散是因为感知到了紧急事件,即个体是通过直接感知或者通过他人的信息间接感知到紧急事件。文献[38]提出了一种基于感知驱动的情绪感染模型(图7)。黄色的区域代表火灾信息传播的范围,该范围从左向右移动。红色的虚拟人代表处于恐慌情绪状态,并开始疏散。黄色的虚拟人代表处于临界状态,即将进入情绪感染状态。通过情绪感染,远处的虚拟人也能很快感知到紧急事件,人群开始陆续疏散,该模型能够很好描述在紧急事件中人群在感知驱动下的陆续疏散过程。图8是基于情绪感染模型实现的人群疏散虚拟仿真演示,该演示还没有考虑到烟雾扩散的影响。在实际火灾疏散中,人群在烟雾作用下的视觉感知能力减弱,这时要依赖于听觉和触觉感知。如何建立基于虚拟视觉、听觉、触觉、嗅觉等多通道感知的情绪感染模型是一个有待解决的问题。

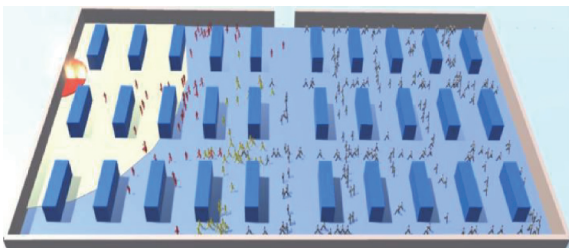


图7 感知驱动的情绪感染可视化演示

Fig. 7 Visualization of perception based emotional contagion



图8 基于情绪感染模型的紧急疏散仿真

Fig. 8 Emergency evacuation simulation based on the perception-driven emotional contagion

3 结 论

人群应急疏散行为的可视仿真研究涉及人工智能、图形图像、计算机视觉、心理学等多个学科领域,其在城市的安全管理方面具有重要的应用价值。本文总结了人群应急疏散行为仿真的已有研究成果,分析了需要进一步研究的问题。指出了采用视频分析技术是人群数据收集和仿真模型验证的重要手段,而采用人群虚拟环境则有助于分析人群在紧急事件下的心理变化。若能结合物理模型,则可以更好描述人群应急疏散场景。为了更全面地描述人群应急疏散情景,需要进一步研究人群在不同情境下的运动导航算法,借鉴动物逃生实验,研究人群的应急行为。借鉴社会心理学的研究思路,研究人群疏散中的社会行为,有助于更准确描述人群应急疏散中的行为。在情绪可视计算方面,采用多通道感知的情绪感染模型可以更好描述情绪感染过程。

人群应急疏散行为可视仿真仍是一个具有挑战性的领域,本文的工作旨在抛砖引玉,期望有更多新的研究方法涌现出来,共同深化研究。

参考文献(References)

- [1] Thalmann D, Musse S R. Crowd simulation[M]. 2nd ed. London, UK: Springer-Verlag London, 2013.
- [2] Charalambous P, Karamouzas I, Guy S J, et al. A data-driven framework for visual crowd analysis[J]. Computer Graphics Forum, 2014, 33(7): 41-50. [DOI: 10.1111/cgf.12472]
- [3] Lerner A, Chrysanthou Y, Shamir A, et al. Context-dependent crowd evaluation[J]. Computer Graphics Forum, 2010, 29(7):

- 2197-2206. [DOI: 10.1111/j.1467-8659.2010.01808.x]
- [4] Bera A, Kim S, Manocha D. Interactive crowd-behavior learning for surveillance and training [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2016, 36(6): 37-45. [DOI: 10.1109/mcg.2016.113]
- [5] Zhong J H, Cai W T, Luo L B, et al. Learning behavior patterns from video for agent-based crowd modeling and simulation [J]. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2016, 30(5): 990-1019. [DOI: 10.1007/s10458-016-9334-8]
- [6] Grant J M, Flynn P J. Crowd scene understanding from video: a survey [J]. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications*, 2017, 13(2): 19. [DOI: 10.1145/3052930]
- [7] Bernardini G, Quagliarini E, D'Orazio M. Towards creating a combined database for earthquake pedestrians' evacuation models [J]. *Safety Science*, 2016, 82: 77-94. [DOI: 10.1016/j.ssci.2015.09.001]
- [8] Dickinson P, Gerling K, et al. Virtual reality crowd simulation: effects of agent density on user experience and behaviour [J]. *Virtual Reality*, 2019, 23(1): 19-32. [DOI: 10.1007/s10055-018-0365-0]
- [9] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic [J]. *Nature*, 2000, 407(6803): 487-490. [DOI: 10.1038/35035023]
- [10] Van Den Berg J, Lin M, Manocha D. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation [C]// *Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Pasadena, CA, USA: IEEE, 2008: 1928-1935. [DOI: 10.1109/robot.2008.4543489]
- [11] Saboia P, Goldenstein S. Crowd simulation: applying mobile grids to the social force model [J]. *The Visual Computer*, 2012, 28(10): 1039-1048. [DOI: 10.1007/s00371-012-0731-y]
- [12] He G Q, Jiang D X, Jin Y, et al. Crowd behavior simulation based on shadow obstacle and ORCA models [J]. *Scientia Sinica Informationis* 2018 48(3): 233-247. [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.] [DOI: 10.1360/n112017-00253]
- [13] Treuille A, Cooper S, Popovi Z. Continuum crowds [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 1160-1168. [DOI: 10.1145/1179352.1142008]
- [14] Chu M L, Law K H. Incorporating individual behavior, knowledge, and roles in simulating evacuation [J]. *Fire Technology*, 2019, 55(2): 437-464. [DOI: 10.1007/s10694-018-0747-6]
- [15] Ren Z G, Gai W J, Peng Q S. Ego-centered path planning in evacuation simulation [J]. *Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2015, 27(9): 1775-1785. [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. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2015, 27(9): 1775-1785.] [DOI: 10.3969/j.issn.1003-9775.2015.09.023]
- [16] Ozcan C Y, Akcapinar Sezer E, Haciomeroglu M. A time-based global path planning strategy for crowd navigation [J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2019, 30(2): e1864. [DOI: 10.1002/cav.1864]
- [17] Du Q Q, Liu S H, Mao T L, et al. Visualized editing method on evacuation schemes facing emergency simulation [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2017, 29(8): 1488-1496. [杜晴晴, 刘绍华, 毛天露, 等. 面向应急撤离的人员疏散方案可视化编辑方法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报* 2017 29(8): 1488-1496.] [DOI: 10.3969/j.issn.1003-9775.2017.08.011]
- [18] Luo L B, Zhou S P, Cai W T, et al. Agent-based human behavior modeling for crowd simulation [J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2008, 19(3-4): 271-281. [DOI: 10.1002/cav.238]
- [19] Durupinar F, Pelechano N, Allbeck J, et al. How the ocean personality model affects the perception of crowds [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2011, 31(3): 22-31. [DOI: 10.1109/mcg.2009.105]
- [20] Yu Q X, Terzopoulos D. A decision network framework for the behavioral animation of virtual humans [C]// *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. San Diego, California: ACM, 2007: 119-128. [DOI: 10.1145/1272690.1272707]
- [21] Zhou M, Dong H R, Wen D, et al. Modeling of crowd evacuation with assailants via a fuzzy logic approach [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(9): 2395-2407. [DOI: 10.1109/TITS.2016.2521783]
- [22] Liu Z, Jin W, Huang P, et al. An emotion contagion simulation model for crowd events [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2013, 50(12): 2578-2589. [刘箴, 金炜, 黄鹏, 等. 人群拥挤事件中的一种情绪感染仿真模型研究 [J]. *计算机研究与发展* 2013 50(12): 2578-2589.] [DOI: 10.7544/j.issn1000-4239.2013.20130960]
- [23] Xiang N, Zhang M M, Zhu L Y. Paralleled dynamic crowd emotion contagion algorithm [J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(9): 1964-1969. [向南, 张明敏, 朱凌云. 动态人群情绪感染并行仿真算法 [J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(9): 1964-1969.] [DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2016.09.006]
- [24] Durupinar F, Gudukbay 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 [DOI: 10.1109/TVCG.2015.2501801]
- [25] Beacco A, Pelechano N, Andújar C. A survey of real-time crowd rendering [J]. *Computer Graphics Forum*, 2016, 35(8): 32-50. [DOI: 10.1111/cgf.12774]
- [26] McDonnell R, Larkin M, Hernández B, et al. Eye-catching

- crowds: saliency based selective variation[J]. ACM Transactions on Graphics , 2009 , 28 (3) : 55. [DOI: 10. 1145/1531326. 1531361]
- [27] Guy S J , Van Den Berg J , Liu W X , et al. A statistical similarity measure for aggregate crowd dynamics[J]. ACM Transactions on Graphics , 2012 , 31 (6) : 190. [DOI: 10. 1145/2366145. 2366209]
- [28] Hoyet L , Olivier A H , Kulpa R , et al. Perceptual effect of shoulder motions on crowd animations[J]. ACM Transactions on Graphics , 2016 , 35 (4) : 53. [DOI: 10. 1145/2897824. 2925931]
- [29] Stüvel S A , Magnenat-Thalmann N , Thalmann D , et al. Torso crowds [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics , 2017 , 23 (7) : 1823-1837. [DOI: 10. 1109/TVCG. 2016. 2545670]
- [30] Kim S , Guy S J , Hillesland K , et al. Velocity-based modeling of physical interactions in dense crowds[J]. The Visual Computer , 2015 , 31 (5) : 541-555. [DOI: 10. 1007/s00371-014-0946-1]
- [31] Xu M L , Wang H , Chu S L , et al. Traffic simulation and visual verification in smog[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology , 2019 , 10 (1) : 3. [DOI: 10. 1145/3200491]
- [32] Reynolds C W. Flocks , herds , and schools: a distributed behavioral model [J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics , 1987 , 21 (4) : 25-34. [DOI: 10. 1145/37402. 37406]
- [33] Tu X Y , Terzopoulos D. Artificial fishes: physics , locomotion , perception , behavior [C]// Proceedings of the 21st Annual Conference of Computer Graphics and Interactive Techniques. Orlando , FL , USA: ACM , 1994: 43-50. [DOI: 10. 1145/192161. 192170]
- [34] Wang X J , Jin X G , Deng Z G , et al. Inherent noise-aware insect swarm simulation[J]. Computer Graphics Forum , 2014 , 33 (6) : 51-62. [DOI: 10. 1111/egf. 12277]
- [35] Xiang W , Ren J P , Wang K , et al. Biologically inspired ant colony simulation [J]. Computer Animation and Virtual Worlds , 2018: e1867. [DOI: 10. 1002/cav. 1867]
- [36] Liu H , Liu B X , Zhang H , et al. Crowd evacuation simulation approach based on navigation knowledge and two-layer control mechanism [J]. Information Sciences , 2018 , 436-437: 247-267. [DOI: 10. 1016/j. ins. 2018. 01. 023]
- [37] Jaklin N , Kremyzas A , Geraerts R. Adding sociality to virtual pedestrian groups[C]. 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. Beijing , China: ACM , 2015: 163-172. [DOI: 10. 1145/2821592. 2821597]
- [38] Liu Z , Liu T T , Ma M H , et al. A perception-based emotion contagion model in crowd emergent evacuation simulation [J]. Computer Animation and Virtual Worlds , 2018 , 29 (3-4) : e1817. [DOI: 10. 1002/cav. 1817]

作者简介



刘箴 , 1965 年生 , 男 , 研究员 , 主要研究方向为虚拟现实和人工智能。

E-mail: liuzhen@nbu.edu.cn