

一种基于疏散路径集合的路径选择模型在 人群疏散仿真中的应用研究

韩延彬^{1),2),3)} 刘 弘^{1),2)}

¹⁾(山东师范大学信息科学与工程学院 济南 250014)

²⁾(山东省分布式计算机软件新技术重点实验室 济南 250014)

³⁾(济南大学信息科学与工程学院 济南 250022)

摘 要 该文在分析影响人群路径选择因素的基础上,提出了一种基于疏散路径集合的路径选择模型.首先,该文提出了一种基于避障策略的社会力模型构建疏散路径集合,进而采用路径学习算法离散和优化集合中的路径;其次,模型采用影响行人路径选择的四个因素,即行人距候选路径的距离、候选路径的长度、拥挤度和候选路径终点出口的疏散能力来实时评估候选路径的待选概率,模拟疏散过程中行人对环境的认知;再次,根据路径选择概率和轮盘赌策略实时更新行人的疏散路径,进一步模拟行人在紧急疏散过程中依据实时环境来调整疏散策略;最后,利用相互速度障碍物方法构建人群疏散仿真模型验证路径选择模型的有效性.仿真实验表明该文所提出的路径选择模型可以再现紧急情况下人群的疏散行为,有助于制定和优化此类情况下的人群疏散方案.此外,该文依据仿真结果提出了用于提高人群疏散效率的基本定理,且定理的理论证明也验证了模型的有效性.

关键词 人群疏散;路径选择;路径集合;社会力模型;交互速度障碍

中图法分类号 TP391 **DOI号** 10.11897/SP.J.1016.2018.02653

Research on Route Choice Model Based on Evacuation Route Set and Its Application in Crowd Evacuation Simulation

HAN Yan-Bin^{1),2),3)} LIU Hong^{1),2)}

¹⁾(School of Information Science and Engineering, Shandong Normal University, Jinan 250014)

²⁾(Shandong Provincial Key Laboratory for Novel Distributed Computer Software Technology, Jinan 250014)

³⁾(School of Information Science and Engineering, University of Jinan, Jinan 250022)

Abstract When the dense crowd is in closed space and emergency, it is easy to cause extruding and trampling which lead to some great disaster. Now, how to improve the evacuation efficiency of crowd to decrease the loss has been paid more attention by scholars. But it is difficult to get the data from reality in this research, so computer simulation plays an important role. This paper focuses on pedestrians in evacuation how to get the information from environment and plan their evacuation route by using computer simulation. In this paper, a route choice model based on the evacuation route set is proposed by means of the analysis about the cause of effecting efficiency for evacuation to simulate that pedestrians in evacuation get all information from environment and plan their evacuation routes. First, the evacuation route set in the model is obtained by an improved social force model that is usually used to simulate the crowd evacuation in emergency, and then the routes in set are discrete and optimized through a route learning algorithm presented in this paper. The improved social force model is more capable to avoid the obstacle than the original one

during the evacuation. The route learning algorithm can remove the redundant information of routes in the route set. Second, the model has quantified four causes affecting on the pedestrian's route choice: route's distance, route's length, route's congestion and the size of exit to evaluate the selection probability of one route. By evaluating routes in route set, the pedestrian can get more evacuation information from environment, and evaluating value of every route in set is regarded as its selection probability. The higher route's value is, the easier it is to be selected by pedestrian, and the converse is also true. Third, the route choice model has updated pedestrians' evacuation route by selection probability of routes and roulette algorithm, which has further simulated that pedestrians in evacuation do not always choose the best route to evacuate because of their panic and anxiety. When route is selected, pedestrians will adjust their tactics to move toward a new target until leave the scene. Last, the proposed route choice model is validated by a crowd evacuation model based on reciprocal velocity obstacle. The reciprocal velocity obstacle is a suitable technology for avoiding collisions among pedestrians, and it can better simulate the basic behavior of pedestrians. Experimental results show the route choice model proposed in this paper can effectively simulate that pedestrians achieve information from evacuation environment in real-time. Moreover, the experimental results also indicate that the evacuation is more efficient when all exits in the scene are made more full use of, then based on that a theory about improving evacuation efficiency is presented. The theoretical analysis of the theorem also shows the validity of our model. Comparing with other evacuation models, the route choice model in this paper gets more evacuation efficiency, because pedestrian in this model has more intelligence, which contributes to work out or optimize the evacuation scheme in emergency.

Keywords crowd evacuation; route choice; route set; social force model; reciprocal velocity obstacle

1 引 言

随着社会公共资源的极大丰富和人们生活水平的普遍提高,各类公共场所的大型集会逐渐增多,由此引发的挤压、踩踏等事件时有发生,给人们的生命带来极大威胁、财产带来巨大损失,因此针对紧急情况下行人及人群的状态和复杂行为的研究已经引起诸多学者的强烈关注^[1-4].但由于此类研究均以“人”为核心,因此其研究的真实数据难以通过实验获取,所以计算机仿真成为此类研究的主要工具^[5-6].目前,应急疏散研究的主要内容是在紧急情况下如何合理建模个体活动和由个体活动产生的群体行为,仿真人群疏散过程,进而评估疏散策略的优劣,从而为制定紧急情况下的应急疏散策略,引导行人疏散提供必要依据,最终降低由突发事件引发的挤压、踩踏等引起伤亡事件的发生概率.此外,人群疏散仿真也可公共场所的安全设计提供依据和评估,进而改善其结构(如设置出口的位置、数量及设置障碍物

等),以应对突发事件下的人群疏散管理^[4],但不在于本文讨论范围之内.

人群疏散仿真研究主要包括:环境建模和人群动作建模两大部分.前者主要是场景建模和人物建模^[7-8];后者包含三个层面:操作层面、战术层面和战略层面,分别对对应行人的基本动作、行人的疏散路径规划以及总体疏散策略等^[2].目前针对疏散人群的个体行为动作仿真模型有:元胞自动机模型^[9]、格子气模型^[10]、社会力模型^[11]和 Reciprocal Velocity Obstacle(RVO)模型^[12]等.虽然这些模型成功地仿真行人在疏散过程中的行为动作,同时满足群体运动效应的大多数自组织现象,但仍无法完全反映行人在疏散过程中的复杂行为^[2].本文主要讨论了行人在突发情况下如何获取疏散信息并实时调整疏散策略,提高人群的整体疏散效率,进而为紧急人群疏散管理提供决策依据,属于人群疏散仿真的第二层面.

一般来讲,无论行人在突发情况下表现出多么复杂的行为,其运动目的都具有唯一性,即不断调整

疏散策略(路径)以最小的代价撤离现场.但行人疏散策略的规划和调整很大程度上取决于行人自身的因素、行人间协同以及对疏散环境认知的充分性^[13-14],因此分析影响行人疏散效率的因素,并构建其相互关系是研究紧急情况下人群疏散行为的关键.当紧急情况发生后,行人通常选择用时最短、最安全的路径作为疏散路径^[15],因此路径选择既可看作是行人的疏散策略,又体现其对当前疏散环境的认知,所以可以从行人对所有可疏散路径的分析和评估入手,构建行人的环境认知机制和决策模型.

本文以紧急情况下的疏散路径集合为基础,将行人对环境的认知量化为行人距候选路径的距离、候选路径的长度、候选路径的拥挤度和候选路径终点出口的疏散能力等,并据此构建路径选择模型(Route Choice Model, RCM),进而从战术层面上仿真行人在紧急疏散情况下的行为动作,并通过引入“路径评估增益”避免路径的频繁选择,确保人群疏散过程的稳定性.其中路径选择模型采用“轮盘赌”选择策略,进一步模拟行人在紧急情况下评估路径优劣的特点:不能精确计算,只能大致评估.此外,本文还提出一种基于避障策略的社会力模型及路径学习算法来构建和优化疏散路径集合.最后本文依据模型的仿真实验结果推导出关于疏散效率的定理,而该定理的理论证明也验证了本文所提出模型的有效性.图1展示了本文所研究各项内容之间的关系.

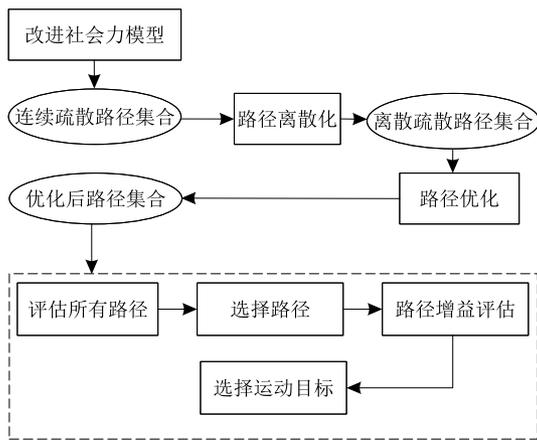


图1 论文研究内容关系图

图1所示“改进社会力模型”是指增加避障策略的社会力模型,用以获取疏散人群连续运动轨迹(详见3.2节);路径离散和路径优化的作用是消除连续路径存在的冗余信息,使路径集合中的路径更具有引导性(详见3.3节、3.4节).虚线所描述的内

容构成行人疏散的路径选择模型.其中,评估路径是指每个行人在任意时刻依据其所在位置评估集合中的所有路径(详见4.1节);选择路径的策略是依据最优路径集构建轮盘赌而非仅简单选择最优路径(详见4.2节);路径增益评估是仿真行人在路径选择过程中分析当前路径和新选择路径之间的优劣,用以提高人群仿真过程的稳定性(详见4.3节),更加符合行人的实际运动规律.

本文第2节分析现有的路径选择模型与本文研究内容之间的联系;第3节介绍本文提出路径选择模型的基础——“疏散路径集合”;第4节论述基于疏散路径集合的路径选择模型;第5节利用仿真实验验证本文提出路径选择模型的有效性,并与部分已有疏散模型进行比较分析.

2 相关研究

早在2004年,Hoogendoorn等人在文献[16]中就指出路径选择是行人从无限多可能性中选择一条路径,即路径选择是行人在充分认知运动环境后进行的行为规划,是行人运动决策的外在表现形式,且不同运动目的所涉及的因素也不同.此外Hoogendoorn等人在此文献中将影响路径选择的所有因素,如障碍物、环境刺激、时间压力、拥塞、平均速度等作为路径选择的输入参数,通过优化一系列特定函数来仿真行人的路径选择过程,但尚未针对紧急情况下的人群疏散行为做出具体分析.在文献[17]中Guo等人在分析行人运动特点的基础上利用元胞传输特性构建预测行人疏散运动的框架,预测拥塞成为影响行人路径选择的重要因素.Kneidl和Borrmann在文献[18]中设计一系列模拟实验分析行人在疏散过程中的路径选择及影响因素,明确指出行人的路径选择行为具有不确定性,即并非在每次规划时都精确计算最优路径,这也启发本文在路径选择模型中采用“最优路径集+轮盘赌”的路径选择策略.Xi和Son在文献[19]中采用扩展的决策场理论模拟行人的路径选择,并用于两类行人(上班族和观光者)的运动仿真分析;同时本文还阐明紧急情况下的两种运动模式:行人总是尽快撤离危险地方,行人在运动过程中不断调整运动目标.Guo和Huang在文献[20]中提出一种综合考虑路径长度、行人拥挤度、路径容量等因素的路径选择模型,并成功用于具有障碍物的封闭区域的人群疏散仿真;而本文扩展了影响路径选择因素,实现了候

选路径的形式化描述,这确保模型能够采用“轮盘赌”策略仿真行人的路径选择. Kirik 等人在文献[21]中分析了路径拥塞和路径长度对行人路径选择的影响,并将其作为路径选择概率,进而提出一种基于元胞自动机的疏散模型用于仿真单一出口场景的人群疏散. Fu 等人在文献[22]中讨论了路径距离和局部密度等环境因素对人群疏散的影响,并据此设计了一种出口选择机制应用于仿真大教室中人群疏散运动. Guo 和 Loo 在文献[23]中的研究表明行人在运动过程中确实考虑了各种环境因素而不仅仅是距离信息,所以对环境信息的正确认知是行人决策的重要组成部分,本文基于此提出利用行人对候选疏散路径的评估模拟行人对疏散环境的认知. Canca 等人在文献[24]中采用行人对路径的主观感知长度和距离出口的 k -paths 信息来仿真行人的路径选择,对大型国际展览中行人流动分析有较好的仿真效果. 在文献[25]中 Wang 等人在量化疏散人群生理和心理因素的基础上,利用马尔可夫模型构建在紧急疏散情况下行人的路径选择模型;此外本文也明确指出行人的疏散速度和路径选择是实时变化的,路径选择结果取决于行人对周围环境的实时认知. Hoogendoorn 等人在文献[26]中利用密度梯度依赖提出一种基于局部最小化“旅行成本”假设的局部路径选择模型. Wagoum 等人在文献[27]中提出了一种基于事件驱动的路径选择模型,重点分析了行人阻塞区域变化对疏散时间(效率)的影响. Xu 等人在文献[28]中将路径拥挤度引入地面场(FF)构建路径选择模型来模拟行人的疏散过程,但该模型未考虑障碍物对疏散过程的影响. Treuille 等人在文献[29]中提出一种流体力学人群运动模型能够仿真大规模的人群运动,并构建基于路径的长度、到目的地时间、不适感等三个因素的路径选择模型,且模型梯度反方向的运动路径即为最优路径,此方法在文献[30]中被分析扩展. Treuille 等人提出的路径选择模型侧重行人的整体运动,并取得很好的仿真效果;但在实际紧急疏散过程中,短时间内行人很难精确计算最优路径而仅仅是大致估算,所以在本文提出的模型中路径选择采用“最优路径集合+轮盘赌”的选择策略,更加符合行人在紧急疏散过程中的行为动作.

此外,行人在疏散过程中的行为不但受到疏散环境的约束,而且也受到个体特性的影响. 苗志宏等人在文献[31]中利用流体力学原理,构建一种新的行人疏散混合模型,模型采用从众的路径选择方式

符合行人在场景不熟悉或视野受限情况下的行为模式,其中视野受限在文献[32]中也有所讨论;Kuang 等人在文献[33]中将行人复杂的潜意识进行量化,提出一种具有可变转移概率的修正格子气模型用于判断行人在疏散过程中选择移动方向;Tang 等人在文献[34-35]中研究了两种特定场景(飞机和教室)下不同个体特性与路径选择和疏散效率之间的关系;而 Guo 等人在文献[36-38]中分析了行人个体特性对其行为(包含路径选择)的影响以及与疏散效率之间的关系. 因为紧急情况下的人群疏散过程中极易发生行人拥塞,而拥塞将降低行人之间的个体差异^[34-35],所以本文所讨论的路径选择模型忽略行人个体差异对路径选择的影响.

根据前述相关理论,疏散过程中的路径选择是行人运动策略的外在表现形式^[39-40],因而行人的运动轨迹可视为行人的系列决策过程,而对疏散环境信息的实时认知是当前行人运动决策的依据也是前期疏散策略的反馈,因此模拟行人对疏散环境的认知是仿真行人路径选择的基础.

综上所述,本文首先提出一种疏散路径的形式化表示方法(疏散路径集合),进而利用对疏散路径的评估仿真行人对疏散环境的认知,最后在路径评估的基础上采用“最优路径集合+轮盘赌”的路径选择方法模拟行人在紧急情况下仓促制定行动策略的过程. 因此,构建紧急情况下的疏散路径集合是本文研究路径选择模型的第一步.

3 疏散路径集合的创建和优化

在紧急疏散过程中,行人运动的主要目的是尽快撤离现场^[19],因此行人对疏散环境信息的认知总是围绕可利用疏散路径进行的,即选择哪条路径达到预期目标,所以在紧急疏散过程中行人对环境的认知等同于对疏散路径的评估. 本节主要详细介绍疏散路径集合的定义及其创建和优化的方法.

3.1 疏散路径集合的有效性

定义 1. 疏散路径. 疏散场景中所有能够供行人撤离的路径都称为疏散路径,由所有疏散路径组成的集合称为疏散路径集合(Route Set, RS).

根据定义 1 所述:疏散路径的起点为场景中的任意一点,其终点为疏散场景出口之一,实际定义了场景中各个位置和出口之间的关系. 根据在连续空间中两点之间路径是无穷的基本原理,疏散路径集合为无穷集合,行人的路径选择实际上是从无数的

可能性中选择其一^[16]. 但无穷疏散路径集合不能直接用于构建人群疏散的路径选择模型. 根据前述行人的运动轨迹可视为行人的决策序列, 因此疏散轨迹可离散为场景中的一系列点(其终点必为出口), 且不同的决策序列对应不同的运动轨迹. 路径离散化后的疏散集合规模将大大减小, 疏散路径离散化的详细算法参见 3.3 节.

虽然路径选择一般被认为是一种潜意识的行为, 但实际上每次路径选择都代表了一种运动目的^[33,41]. 图 2 展示从起始点 A 到出口 E, 两种不同动机的运动路径.

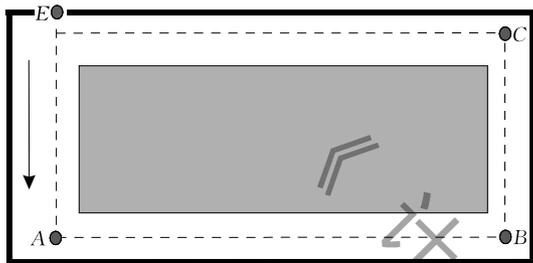


图 2 A 到 E 的两种不同路径

图 2 所示的封闭环境为某一展览馆示意图, 中间为障碍物, 周边有四条潜在的通道(如虚线所示), 其中 E 是唯一的出口, 箭头表示正常的行进方向. 在起点 A 和出口 E 之间存在长度明显差异的两条路径, 即 A-E 和 A-B-C-E. 如果行人的运动动机是尽快离开展览馆, 路径 A-E 是 A 和出口 E 之间的最短路径; 反之如果没有紧急情况, 行人的运动路径可能是 A-B-C-E. 根据上述分析, 行人在运动动机明确的情况下, 其运动路径往往是明确的, 而大部分路径将被忽略, 所以针对紧急情况下的人群疏散, 其路径集合规模将进一步减小. 在紧急疏散过程中, 依据实时变化的疏散环境精确地计算最优疏散路径是不可能的, 所以行人大多依据其自身的位置和当前的疏散状态(到各个出口的距离, 行人的分布等), 对潜在的疏散路径进行粗略估计择优而行, 这一现象亦表明在决策过程中大量的潜在路径将被忽略. 因此构建紧急情况下的疏散路径集合, 并通过评估集合中的路径来仿真行人认知疏散环境、选择路径是可行的.

此外, 虽然在实际疏散过程中, 考虑到人群的拥挤程度、出口的大小、道路的宽度等因素, 长度最短的路径并不总是“现实世界”中的最佳路径, 但在疏散信息不完整的情况下, 选择最短路径是紧急情况下行人的第一反应(正是由于这种反应, 行人会在拥挤的出口形成人群最重要的自组织现象“拱形效应”,

这是因为拱形分布满足每个行人距出口的距离最短^[2,11]). 所以在本文的研究中, 疏散路径集合中的路径进一步简化为起点到最近可用出口的最短路径.

社会力模型常用于紧急情况下的人群疏散仿真, 反映了处于紧急状态下的行人在疏散过程中的行为动作^[11], 是构建疏散路径集合的最佳工具. 鉴于原始社会力模型并不具备良好的避障策略, 本文改进了社会力模型用于具有障碍物的复杂场景.

3.2 基于避障策略的社会力模型

社会力模型(Social Force Model, SFM)源于磁力模型^[11], 是一种连续、微观模型, 能够准确地描述行人在紧急状态下的运动状态, 能再现人群运动的大多数自组织现象, 如拱形效应、快即是慢等^[2], 能够完整地记录行人在紧急状态下的运动轨迹. 因此本文采用 SFM 构建疏散路径表述行人在紧急状态下的行为动作. 但传统 SFM 缺失行人和障碍物之间的作用力, 而仅通过行人在运动方向上随机扰动, 不能较好地完成对大障碍物的避障, 详细讨论参见我们的其他相关研究成果^[42]. 目前针对人群疏散过程中的避障问题已经提出了多种解决方法, 如 Moussaïd 等人在文献[43]中提出的一种基于行为启发式的认知科学模型能够较好描述人群行为且能实现有效避障; Ondřej 等人在文献[44]探索了基于认知科学的新型碰撞避免机制, 这种机制通过重新定位策略避免未来碰撞. 本文在分析当前相关研究成果的基础上, 将行人对静态障碍物的避障力引入到原始 SFM 中, 使之能够较为真实地模拟行人在具有障碍物场景中的疏散运动.

原始 SFM 模型之所以存在避障缺陷是因为模型仅考虑了三种社会力量源: (1) 目标的驱动力(F_d); (2) 周围行人的排斥力 F_{ij} ; (3) 墙壁的排斥力(F_{iw}). 最终驱动行人运动的合力 F_i 可由式(1)表示:

$$F_i = F_d + F_{ij} + F_{iw} \quad (1)$$

这里的 i, j, w, d 分表代表行人、周围行人、墙以及出口的编号. 根据式(1), 原始 SFM 并未考虑包含障碍物的疏散场景. 由于在原始 SFM 模型中, 墙对行人的斥力垂直于墙表面, 所以如果简单地将障碍物视为墙, 当障碍物表面与行人的行走路径垂直时, 在行人与墙、障碍物、周围行人的斥力以及驱动力的合力下极易达到一个平衡点(此时 F_i 值为 0). 行人易在平衡点震荡, 停止不前.

本文将行人对障碍物的避障社会力引入到原始

模型中,使之应用于带有障碍物复杂场景下的人群疏散仿真.式(2)为改进后的合力表达式,其中 \mathbf{F}'_d 为改进后包含避障社会力的驱动力,其表达式如式(3)所示:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{F}'_d + \mathbf{F}_{ij} + \mathbf{F}_{iw} \quad (2)$$

$$\mathbf{F}'_d = g(ds)(e^{-ds}\mathbf{F}_d + (1 - e^{-ds})\|\mathbf{F}_d\|\mathbf{P}_d) + (1 - g(ds))\mathbf{F}_d \quad (3)$$

其中, ds 表示行人在运动方向上到达第一个障碍物的距离.当运动方向上没有障碍物时, ds 为 0,此时行人所受合力等于原始 SFM 的合力. \mathbf{P}_d 为行人避开障碍物的切线方向,其表达式如式(4)所示:

$$\mathbf{P}_d = \left(\cos\left(\theta + \alpha \frac{\pi}{2}\right), \sin\left(\theta + \alpha \frac{\pi}{2}\right) \right) \quad (4)$$

在式(4)中, θ 表示行人所处的位置与行进方向上所遇第一个障碍物 i 之间的角度, α 位于 θ 的切线方向,值为 -1 或 1. $g(ds)$ 是由式(5)定义函数

$$g(ds) = \begin{cases} 1, & ds \neq 0 \\ 0, & ds = 0 \end{cases} \quad (5)$$

此外, \mathbf{F}_d , \mathbf{F}_{ij} 和 \mathbf{F}_{iw} 的具体含义参见文献[11].图 3 描述了上述参数在避障过程中的具体含义.

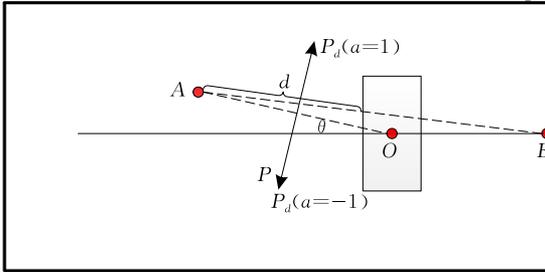


图 3 行人避障过程参数示意图

在图 3 中, A 是行人的位置, O 是障碍物的中心点, E 是出口, 直线 P 垂直于直线 AO . a 表示行人绕行障碍物的方向. P_d 表示绕行方向, a 取值为 1 或 -1, 分别表示行人将从左侧或右侧绕行障碍物.图 4 展示了在含有 5 个障碍物的疏散环境中行人疏散轨迹的仿真结果.

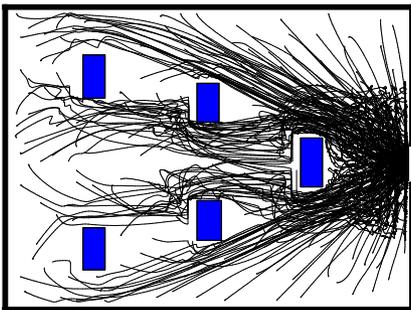


图 4 在具有障碍物的场景中,疏散轨迹结果

如果场景中存在多个出口,本文选择距离行人最近的出口作为运动目标,计算其驱动力 \mathbf{F}_d ,体现行人在人群疏散过程中选择最短路径的潜意识行为^[33,41].本文在利用 SFM 计算人群疏散轨迹的过程中,其参数设置参照文献[11],行人半径: $r=0.25\text{ m}$,行人重量: $M=80\text{ kg}$,行人初始速率: $v_i^0=2.5\text{ m/s}$.

依据图 4 所示路径,修改后的社会力模型 (Modified Social Force Model, MSFM) 能够仿真行人避障运动并获取行人连续的运动轨迹.根据 3.1 节分析,连续的运动轨迹不利于构建可描述的疏散路径集合,因此需要将连续运动轨迹离散化.

3.3 疏散路径的离散化

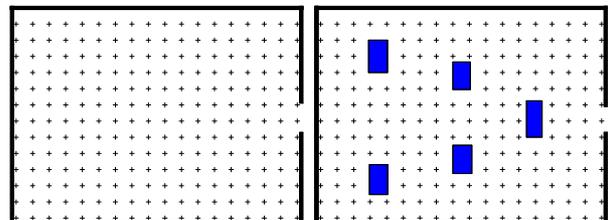
行人在疏散过程中并不是每一步都修正运动策略,只有在当前运动路径评估值低于预期时,才会重新规划路径更改运动方向^[45],而每当行人依据环境状态对当前疏散策略和运动方向进行变更时,就往往会出现运动轨迹“拐点”,因此行人的疏散路径可以离散成一系列“拐点”,运动轨迹亦可看成是由一系列“拐点”构成的决策过程.本文参照文献[9]所述元胞自动机理论,对场景关键点作如下定义.

定义 2. 关键点. 将场景转化为一组元胞单元,所有可到达单元格的中心点称为场景关键点,由关键点组成的集合称为关键点集 (Keypoint Set, KS).

图 5 展示了没有障碍物和包含障碍物场景的关键点集.对比图 5(a)和(b)可以看出集合 KS 不包含元胞中心落在障碍物区域的不可到达点.行人疏散轨迹的离散过程就是将连续运动轨迹上的点映射为 KS 中最近邻点的过程.如果 α_i 是原始连续轨迹中的一个点,则用来替换它的关键点 k_i 可由式(6)表示:

$$k_i = \min\|\alpha_i - k_i\| (k_i \in KS) \quad (6)$$

$\|\alpha_i - k_i\|$ 表示 α_i 和 k_i 之间的欧氏距离.图 6 所示行人的疏散轨迹(连续曲线)可以用式(6)转换为关键点序列(折线).



(a) 无障碍场景

(b) 有障碍场景

图 5 关键点集分布图

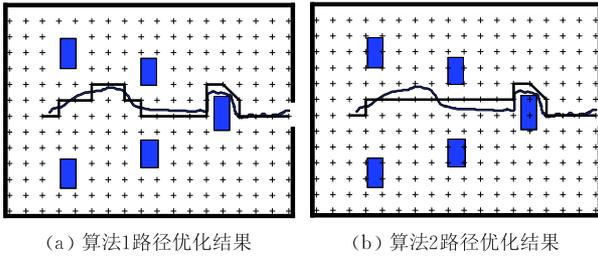


图 7 路径优化结果

线结果与图 6 相同,表明算法 1 仅去掉路径中的环,不能优化路径;而经算法 2 进一步优化得到图 7(b)所示的折线路径,其路径长度明显短于图 7(a)所示路径.

3.5 离散疏散路径集合

由于社会力模型记录的行人轨迹包含了行人在紧急情况下的运动特性,而优化离散疏散路径时亦采用路径最短作为优化标准,所以疏散路径集合中的路径代表了行人在紧急状态下的第一反应(选择最短路径撤离),但这并非行人最终的路径决策.在利用社会力模型记录行人运动轨迹的过程中,行人的初始位置为均匀分布,所以离散疏散路径集合可以覆盖整个疏散场景,如图 8 所示.

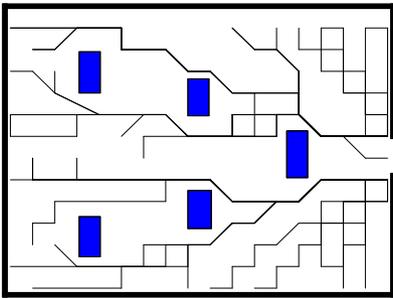


图 8 疏散路径分布

事实上,在利用路径优化算法消除环和包含路径后,RS 的规模将进一步减小.影响 RS 规模的主要因素是离散场景的元胞尺寸,与 3.3 节分析类似:当元胞尺寸较大时,RS 中的路径数目较少,但原始路径信息损失较大,不能为行人提供正确的疏散建议;反之,疏散路径数目多,疏散信息丰富,但计算量会随之增大.需要说明的是,对于同一场景,疏散路径集合构建一次就可以,并不需要在每次人群疏散仿真之初重新构建.

4 基于疏散路径集合的路径选择模型

在紧急疏散过程中,无论行人选择哪条疏散路径都是以尽快撤离当前场景为根本目的,而每一次

疏散策略的更改都对应一次疏散路径更换,因此疏散决策实际上是路径选择决策.根据前述理论分析,本文提出基于路径集合的路径选择模型(RCM),该模型利用集合中路径的评估值作为候选路径的选择概率,进而利用“轮盘赌策略”进行疏散路径选择,仿真行人实时获取场景信息不断调整疏散策略的过程.

4.1 路径评估函数

RCM 将疏散路径选择和疏散策略统一起来.其中,对候选路径信息的评估体现了行人对当前环境的认知^[46-47].因此如何利用 RS 中的路径实时、有效地评估当前场景状态,进而制定疏散策略是 RCM 要解决的关键问题.虽然影响路径选择的潜在因素很多^[16],但是在紧急情况下影响行人路径选择的因素主要有三个:路径长度、路径拥塞程度和目标出口的拥塞程度^[26,48].本文利用路径评估函数将影响疏散因素量化,引导行人选择疏散路径.

路径评估函数用来评估所有候选路径,其基本原则是评估函数值越高的路径被选为疏散路径的可能性越大. t 时刻,RS 中第 i 条候选路径 RS_i 的评估值如下式所述:

$$\phi_i^t = \alpha_1 e^{-d_i} + \alpha_2 e^{-ps_i^t} + \alpha_3 e^{-s_i^t} + \alpha_4 e^{-l_i} \quad (7)$$

在式(7)中, i 为路径序号, d_i 表示行人到 RS_i 所包含关键点的最短距离; ps_i^t 表示 t 时刻 RS_i 的拥塞程度; s_i^t 表示 RS_i 终点出口的拥塞程度(可依据出口附近区域的面积及区域内的人数计算得到,表示出口的可利用率); l_i 表示选择 RS_i 后,关键点距路径出口的路径长度;所有参数都需要实时计算. $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 是各项权重因子,其和为 1. 权重因子的取值不同,模拟行人在紧急疏散过程中关注的侧重点不同.其中 d_i 定义如下:

d_i 定义为行人到构成 RS_i 所有关键点子集距离的最小值,设 P 为行人当前的位置.表达式如下:

$$d_i = \min(\|P - Kp\|) (Kp \in RS_i) \quad (8)$$

当行人选择路径 RS_i 时, Kp 就成为行人的新运动目标点. ps_i^t 是 RS_i 在 t 时刻路径的拥塞程度,其计算表达式如式(9):

$$ps_i^t = \frac{1}{dis(n_i, Kp)} \exp\left(-\sum_{k=id(Kp)}^{n_i} p_k^t\right) \quad (9)$$

式(9)中 $dis(n_i, Kp)$ 表示关键点 Kp 到所在路径终点的路径长度(非直线距离), n_i 表示路径 RS_i 对应的出口序号, \exp 为自然指数函数, $id(Kp)$ 表示 Kp 所在路径的序号, p_k^t 表示 t 时刻 RS_i 路径上关键点 k 邻域内行人的拥塞程度, Kp 可由式(8)

得到.

如前所述,式(7)在 t 时刻依据行人距候选路径 RS_i 的距离、剩余 RS_i 的路径拥挤程度、 RS_i 的出口拥挤程度和剩余 RS_i 的路径长度等条件评估路径集合中所有可选的疏散路径. 当 d_i , ps_k^t , s_i^t 和 l_i 越小, 路径评估值较高, 路径也更容易被选择; 反之, 路径被选择的概率越低. 这与行人在疏散过程中总是选择距离自己近、行程短、不拥挤的路径作为首选疏散路径的规律相符合.

4.2 基于轮盘赌策略的路径选择

在“现实世界”紧急疏散过程中, 行人通常不会准确评估疏散路径, 而仅仅大致估算待选疏散路径, 因此评估值最高的疏散路径不一定被选择, 但是评估值较低(明显差)的路径是一定不会被选择的, 所以为了真实地仿真行人的路径选择过程, 在本文所设计的 RCM 中采用基于轮盘赌的路径选择策略仿真行人在紧急情况下的路径选择过程. 疏散过程中, 时间每间隔 Δt , 行人根据自己所处的位置重新评估疏散路径集合中所有路径, 并利用轮盘赌策略重新选择路径. 整个过程类似于遗传算法的选择算子, 区别在于并不是路径集合中所有路径都参与路径选择. 在本文所设计的路径选择过程中, 采用评估值前 5 的候选路径参与路径选择, 归一化之后的路径评估值作为候选路径的选择概率.

4.3 路径增益评估

在实际疏散过程中行人并不是每时每刻都在地选择疏散路径, 只有在原路径评估值低于当前路径时, 才会修订运动策略. 而在仿真过程中, 频繁地选择路径, 会引起疏散运动的反复和震荡, 不能真实反映行人的运动规律. 因此为了真实再现行人的运动过程, 本文引入路径评估增益来限定行人选择路径的频率, 如式(10)所示:

$$G_d = \frac{\phi_k^{t+\Delta t} - \phi_i^{t+\Delta t}}{\phi_i^{t+\Delta t}} \quad (10)$$

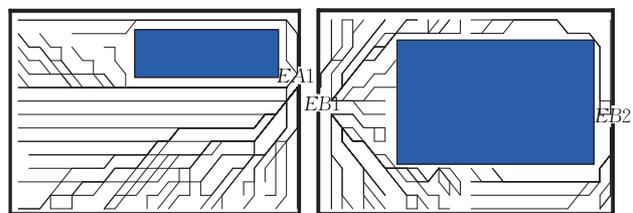
d 表示行人编号, 路径 i 和路径 k 分别是行人 d 在 t 时刻和 $t + \Delta t$ 时刻选择的路径编号, $\phi_k^{t+\Delta t}$ 和 $\phi_i^{t+\Delta t}$ 分别表示在 $t + \Delta t$ 时刻, 路径 k 和路径 i 的评估值, G_d 表示在 $t + \Delta t$ 时刻路径 k 的评估值相对于路径 i 的增益. 本文在实际疏散仿真过程中, 设增益阈值 T 来限定行人选择路径的频次, 当 $G_d \leq T$, 表示在 $t + \Delta t$ 时刻新选择的疏散路径 k 的评估增益低于行人当前预期, 应采用原疏散策略. 这种路径评估增益保证了行人总是采用相对较优的疏散策略, 进而保证了疏散过程的稳定性和收敛性.

为了更加真实地仿真行人运动, 行人所选的临时运动目标点并非是由式(8)计算的关键点 Kp . 在疏散仿真过程中, 行人实际从构成路径 RS_i 的所有关键点序列中, 选择靠近出口位置且和行人之间无障碍物遮挡的关键点, 作为临时运动目标点, 这更符合行人在紧急情况下的疏散运动.

在实际疏散过程中, 心理状态也是影响行人路径选择的重要因素, 行人疏散过程中形成的自组织效应是行人心理活动的外在宏观表现形式^[2]. 如文献[49]在总结前人相关研究的基础上设计了一套调查问卷用以分析影响地铁人群恐慌心理的相关因素, 研究成果为设计地铁疏散模型提供了依据; 文献[50]定量描述了由心理紧张而引起的行为变化, 进而提出一种扩展的元胞自动机模型来模拟紧急情况下的行人对流运动; 文献[51]在深入分析影响行人路径选择的个体心理因素(如时间消耗、安全性以及自主行动能力)的基础上, 提出一种实时路径规划方法, 并采用 mental cost 评价指标和 A* 算法仿真行人依据周围的现场环境信息(如群密度、危险源强度等)选择和调整疏散路径的过程, 取得了良好的仿真效果. 对比上述文献, 本文 4.1 节所描述的路径选择模型实际是将行人急于逃离的心理因素量化为影响路径选择因素的权值; 同时“轮盘赌策略”也模拟了行人在选择过程中“慌不择路”的心态(恐慌往往会影响行人对场景的准确分析). 关于心理(特别是恐慌情绪)因素对行人在疏散过程中的影响可参见我们其他研究成果^[52].

5 基于疏散路径集合的疏散仿真

在 RCM 中, 评估函数中的参数(a_1, a_2, a_3, a_4)代表了行人在选择路径时对距离、拥挤度、路径长度、出口疏散能力的关注程度; 不同的参数对应不同的疏散轨迹和人群分布. 为了进一步分析和验证本文提出 RCM 的有效性, 本文设计如图 9(a)和(b)所示的两种疏散场景.



(a) 场景A的疏散路径集合 (b) 场景B的疏散路径集合

图 9 两种不同的场景及其疏散路径集合

图 9 中, 实心矩形表示内部障碍物, 折线表示 RS 中的疏散路径, 四周是墙壁. $EA1$ 、 $EB1$ 和 $EB2$ 分别代表两种场景中的出口. 因为 MSFM 中的行人总是选择最近的出口作为目标(见 3.1 节), 所以图 9 所示路径是关键点到对应出口的最短路径. 图 9 所示两个场景存在诸如出口数量、障碍物位置和大小等明显的差异, 这些差异用来分析不同参数和疏散结果之间的关系. 本文采用交互速度障碍(Reciprocal Velocity Obstacle, RVO)技术构造人群疏散的仿真模型来验证 RCM 的有效性^[12]. RVO 是一种基于速度的模型, 可以有效地模拟疏散过程中行人相互之间运动避撞问题. 其仿真过程是: 行人利用 RCM 选择疏散路径, 并从路径上选择靠近出口的关键点作为行人疏散决策的中间目标(4.3 节), 直至到达出口. 此外, 由于关键点不在障碍物区域内, 所以行人可以绕过障碍物(RVO 的更多细节详见文献[12]).

需要说明的是, 路径评估增益阈值 T 的设置很重要. 如果 T 非常小则行人可能会频繁地改变其运动路径; 如果 T 过大则行人可能沿着恒定的路径撤离, 均不符合实际的疏散情况. 本文采用的 T 值为 0.5, 即当 $G_d \geq 0.5$ 时, 行人才选择新路径, 以确保行人合理更换疏散路线.

5.1 单出口场景疏散路径选择仿真

在场景 A 中, 存在一个出口($EA1$)和一个障碍物, 因此不考虑出口的拥挤度(s'_i)对疏散效率的影响. 为了便于分析行人运动的特征, 将场景分为三个区域: A 、 B 和 C , 如图 10 所示, 障碍物在 B 区域.

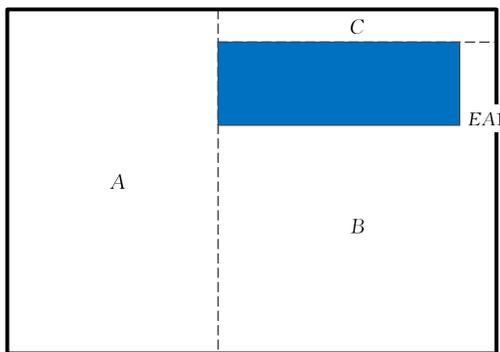


图 10 场景 A 的区域划分

图 10 所示的区域划分表明行人疏散过程中必须经过的区域是 B 或 C . 如果行人位于 B 或 C 区域, 行人自然会倾向于选择最短的路径. 然而, 当行人位于区域 A 时, 两条路径(经过区域 B 和 C)都有可能. 一般来讲, 位于区域 A 的行人会将经过区域

B 的路径作为首选.

因为它的距离最短(参见图 9(a)所示疏散路径). 当区域 B 中出现严重拥塞时, 这并非最优选择; 甚至由于过度拥挤, 经过区域 B 的疏散路径不可用, 此时经过区域 C 的路径可能是更好的选择. 场景 A 验证了 RCM 中 p'_i 和 l_i 因素对路径选择的影响. 在此仿真实验中, 本文设计了 3 种仿真方案($EsA1$ 、 $EsA2$ 和 $EsA3$), 其相关参数设置如下:

方案 $EsA1$. 最短路径选择方案($a_1=0, a_2=0, a_3=0, a_4=1.0$).

方案 $EsA2$. 距离行人最近路径选择方案($a_1=1.0, a_2=0, a_3=0, a_4=0$).

方案 $EsA3$. 综合路径距离, 拥挤度和路径剩余长度的方案($a_1=0.1, a_2=0.8, a_3=0, a_4=0.1$).

图 11 展示了在 3 种不同的疏散方案中, 疏散时间与行人人数的关系曲线(横纵坐标分别为疏散总人数和对应疏散时间).

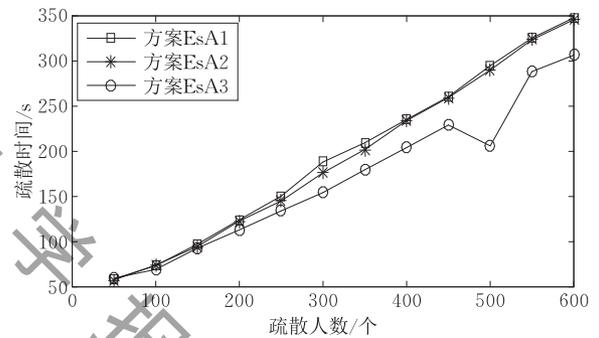
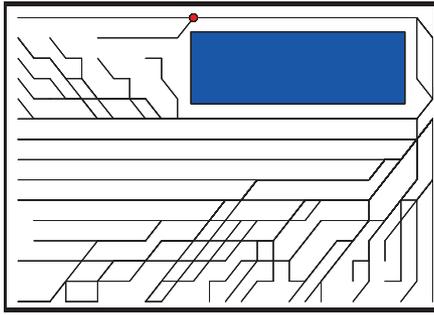


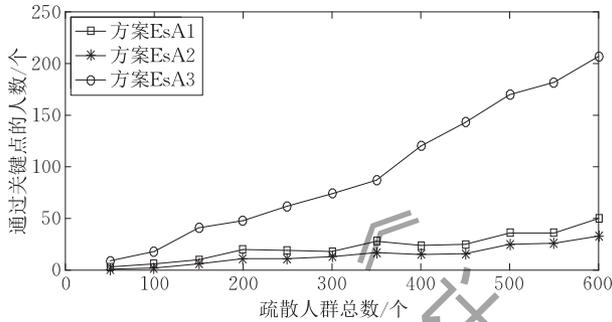
图 11 疏散时间随疏散人群规模变化曲线

如图 11 所示, 方案 $EsA1$ 的疏散效率略小于 $EsA2$, 方案 $EsA3$ 的疏散效率明显高于 $EsA1$ 和 $EsA2$, 即最短的路径并不总是最好的选择. 当每个人都选择相同的最短路径(方案 $EsA1$), 区域 A 中的大多数行人会选择经过区域 B 的路径, 则在区域 B 中会发生严重拥塞, 这将降低疏散效率. 方案 $EsA1$ 的效率甚至略低于行人就近选择疏散路径(方案 $EsA2$)的效率. 方案 $EsA3$ 疏散效率高是因为行人在疏散过程中加入了路径拥塞的分析. 这一策略在人群密度相对较高的情况下效果尤为明显; 而当人群 ≤ 200 时, 在区域 B 未形成有效的拥塞, 所以疏散效率并未得到显著提高.

为了进一步分析拥塞程度对疏散时间的影响, 仿真过程统计了经过特定点的人数. 图 12 展示了特定点位置和经过该点的人数, 其中图 12(b)的横纵坐标分别为疏散总人数和通过特定点的总人数.



(a) 特定点位置



(b) 途经特定点的人数随疏散人群规模变化曲线

图 12 特定点以及途径特定点的人数统计分析

图 12(b) 充分说明方案 EsA3 效率更高的原因:随着行人密度的增加,经过特定点的路径被越来越多的行人选择。当人群规模为 600 时,在整个疏散过程中,选择通过特定点的行人累计达到 207 个(占总数的 34.5%),其他方案中分别为 8.3% 和 5.5%。因此,虽然 RCM 引入路径拥塞评估会导致行人总的疏散轨迹长度增加,但人群拥塞被有效分解,因此整体疏散效率得到提高,这与人群运动“快即是慢”的自组织现象相对应^[2,11]。需要说明的是,由于特定点处于疏散瓶颈区域,因此在 EsA3 的疏散过程中,特定点处存在一定拥堵现象,而由于特定点出现的拥堵有助于减弱通过区域 C 的行人流量,所以区域 C 不会出现拥堵现象。另外,由于在 EsA1 和 EsA2 中通过特定点的人数较少,因此在特定点处的拥堵现象不严重,起不到分解区域 B 拥堵的效果,所以人群整体疏散效率较低。

5.2 双出口场景疏散路径选择仿真

场景 B 用来测试出口密度对疏散结果的影响。场景 B 有 EB1 和 EB2 两个出口和一个障碍。场景 B 可分为四个区域,即 A, B, C 和 D,如图 13 所示。

位于不同区域的行人有不同的疏散方案。例如:区域 A 的行人很少选择出口 EB2 作为疏散方向,因为 EB1 是最近的出口;区域 B 或区域 C 的行人,有两个潜在的选择;如果区域 B 或 C 的行人靠近区

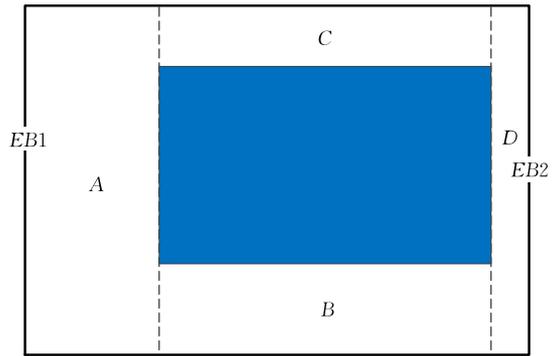


图 13 场景 B 区域分割

域 A,那么行人通常会选择出口 EB1;但如果区域 A 比区域 D 拥塞程度高,行人可能会选择出口 EB2。本文设计了 3 个仿真方案来验证 RCM,即 EsB1, EsB2 和 EsB3。疏散人数规模为 50 至 550。结果如图 14 所示。

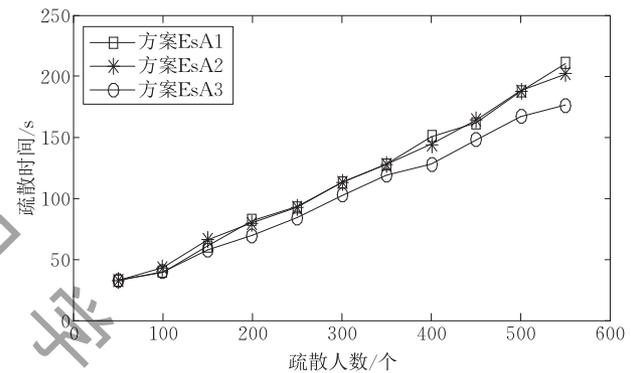


图 14 疏散时间随疏散人群规模变化曲线

方案 EsB1. 只考虑疏散路径的相对长度($a_1 = 0, a_2 = 0, a_3 = 0, a_4 = 1.0$).

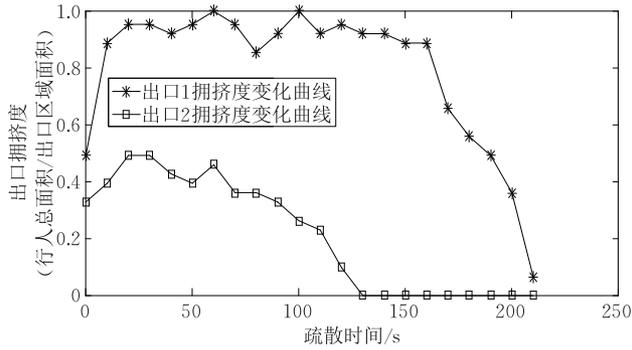
方案 EsB2. 根据出口的最低拥挤程度选择疏散路径($a_1 = 0, a_2 = 0, a_3 = 1.0, a_4 = 0$).

方案 EsB3. 考虑所有影响路径选择的因素($a_1 = 0.05, a_2 = 0.7, a_3 = 0.2, a_4 = 0.05$).

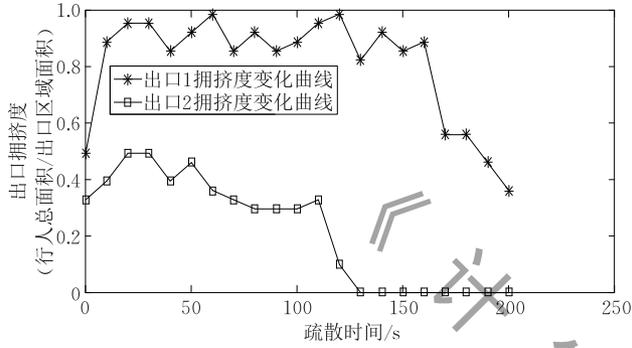
如图 14 所示(横纵坐标分别为疏散总人数和疏散时间),最短路径策略(EsB1)和仅考虑出口拥塞策略(EsB2)的 RCM 显然不是最佳方法;而当 RCM 采用距离、出口拥塞和路径拥塞等多个因素(EsB3)时,疏散效率有所提高。

根据图 14 可以看出,本文提出的 RCM 能够模拟行人对场景的实时分析,进而提高人群的整体疏散效率。此外,本文统计了出口密度随着时间的变化规律,进一步分析方案 EsB3 疏散效率高的根本原因,如图 15,其中横纵坐标分别为疏散时间和出口密度值。

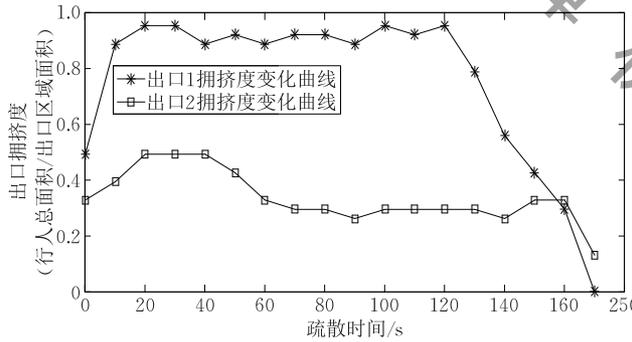
如图 15 所示,每个出口在疏散期间都被充分利



(a) 仿真EsB1出口密度随时间变化曲线



(b) 仿真EsB2出口密度随时间变化曲线



(c) 仿真EsB3出口密度随时间变化曲线

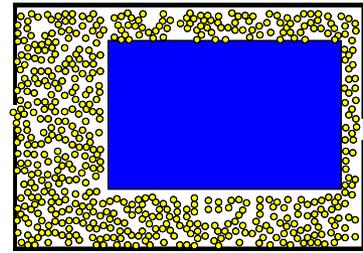
图 15 疏散过程中不同出口密度变化曲线图

用时疏散效率较高. 因此本文提出定理 1 来描述疏散效率和出口利用率之间的关系. 其证明过程见附录 A.

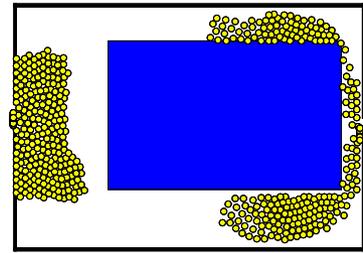
定理 1. 在人群紧急疏散过程中, 如果每个出口在空间和时间上被充分使用, 将缩短群体整体的疏散时间, 提高群体疏散效率.

如图 15 所示, 在方案 EsB1、EsB2(图 15(a)和(b))中, EB2 的密度过早为零, 这表明大多数行人在疏散的后期聚集在出口 EB1 附近, 此时出口 EB2 的利用率很低. 这个问题在 EsB3(图 15(c))中得到了改善, 出口 EB1 和 EB2 在整个疏散过程中被完全利用, 因此疏散效率得到提高. 仿真结果在验证定理 1 成立的同时, 也证明本文提出路径选择模型的有效性. 图 16 展示方案 EsB3 在不同时刻的人群分

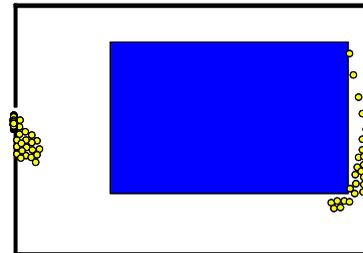
布(初始状态, 疏散中期, 疏散末期). 从图 16 展示内容来看, 两个出口在整个疏散过程中, 都得到了充分地利用.



(a) 疏散人群初始分布



(b) 疏散人群中期分布



(c) 疏散人群末期分布

图 16 方案 EsB3 在不同时刻的人群分布图

需要说明的是, 在本文提出的路径选择模型中, 疏散路径集合是路径选择的基础和前提, 所以只要路径集合中存在可使用路径, 行人就可以依据 4.1 节和 4.2 节评估候选路径, 选择疏散路径, 调整自身运动方向. 以场景 B 为例, 一旦某一出口不可用时, 与之相连路径将从路径集合中删除, 但是该出口附近的行人依然可以评估集合中剩余的路径, 从可选路径上选择新的关键点作为临时目标点, 最终通过另一出口撤离现场.

5.3 仿真结果和对比分析

本文在 5.1 节和 5.2 节所述的疏散仿真中通过设置特定疏散环境来验证本文所述模型的有效性, 同时仿真结果也充分说明了疏散策略对疏散效率的影响. 实际上, 本文所提出的 RCM 侧重分析疏散策略对疏散效率的影响, 并不局限于前述仿真实验场景. 为了进一步说明该模型的有效性和鲁棒性, 我们还进行了一系列的仿真实验, 包括与社会力模型、

RVO 模型等人群疏散模型的对比。

仿真实验 1. 本仿真实验是在行人数量和初始分布相同的情况下对比社会力模型、RVO 模型以及本文所研究模型的疏散效率. 实验仿真人数为 500, 仿真场景为图 9 所示的两种场景, 其疏散时间的仿真结果如图 17 所示。

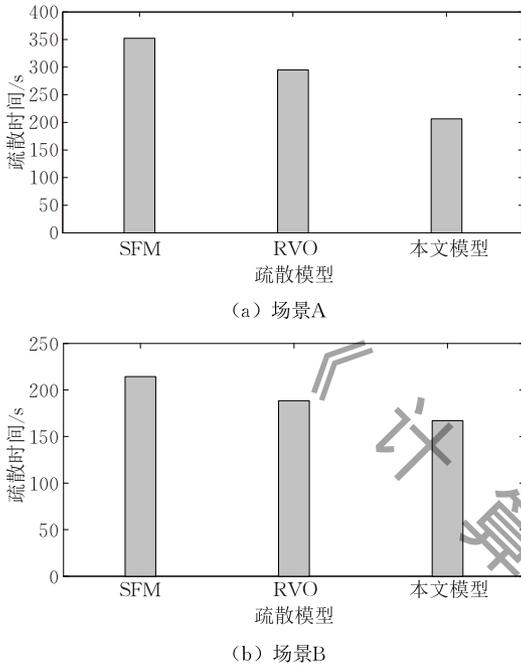


图 17 不同模型 500 人疏散时间对比

由于社会力模型不能有效地避障, 所以仿真实验 1 中的社会力模型实际为 3.2 节所述改进后的社会力模型, 其运动目标为最近出口的中心点; RVO 模型用于人群疏散有两种模式, 本文采用 roadmap 模式, 仿真行人选择最邻近出口疏散, 且路径在整个疏散过程中保持不变, 路径终点为出口中心点。

如图 17 所示, 由于在社会力模型和 RVO 模型中, 仅考虑了路径长度而没有考虑拥挤度和出口疏散能力对疏散效率的影响, 因此疏散效率要低于本文所提出的模型. 此外, 由于社会力模型仅提供粒子疏散的最终目标, 所以在疏散过程中极易形成拥塞, 因此效率略低于基于 roadmap 的 RVO. 需要注意的是, 在场景 A 中, 如果路径集合中仅包含一条疏散路径时, 本文提出的疏散模型退化成基于 roadmap 的 RVO 疏散模型。

仿真实验 2. 本仿真实验是验证本文所提出模型在复杂场景中的应用. 仿真实验场景模拟市场环境, 包含 3 个出口, 8 个障碍物柜台. 图 18 展示在仿真过程中不同时期的人群分布。

从图 18 所示的仿真实验结果来看, 本模型可以

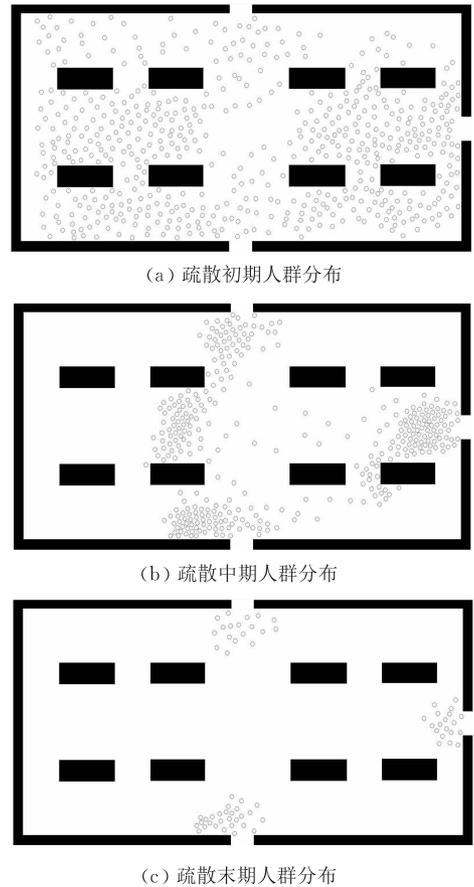


图 18 疏散模型在复杂场景中的仿真实验

应用于比较复杂的场景, 而且从疏散末期人群分布的状态来看, 3 个出口在疏散过程中都得到了充分的利用, 因此根据定理 1, 疏散效率比较高。

仿真实验 3. 本次实验场景依据某一办公楼场景平面示意图. 在封闭场景中有 9 个房间, 3 个厅和 1 个出口. 其仿真结果如图 19 所示。

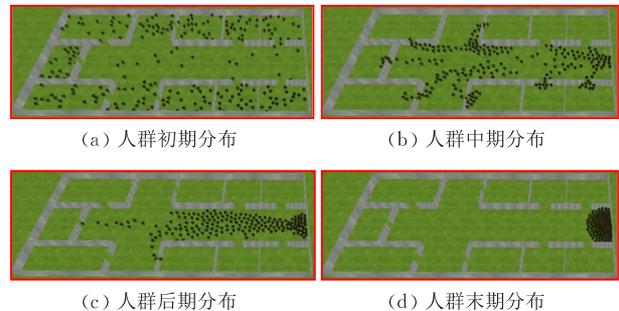


图 19 疏散模型在办公楼场景的仿真实验

从图 19 所示不同时刻的人群分布来看, 本模型能够再现人群疏散的自组织现象^[2], 即在疏散瓶颈位置(出口)形成拱形效应, 这也说明基于本文所提出路径选择策略的人群疏散模型能够很好地仿真人群在紧急情况下的疏散过程. 此外, 本次仿真实验采

用 MFC+OGRE 来展示疏散的 3D 效果。

实际上,文献[29]早在 2006 年就提出基于路径距离、时间和舒适度(拥挤度)的路径选择算法,并且取得了不错的仿真效果.该文献利用前述 3 个因素构造线性组合表达式,并通过计算表达式的梯度方向获取行人的最优运动方向,仿真行人的路径选择.此种处理方法在人群达到一定规模时,优势更加明显.确如文献[29]所述,由于本文采用了 Agent 的仿真模式,所以实时计算复杂度高,因此仿真时间远高于文献[29]采用的流体力学模型,但是相比于文献[29]研究的群体运动规律,基于 Agent 的仿真模式更能描述行人在运动过程中的个体差异.这里的“个体差异”并非指行人之间的生理和心理差异,而是运动决策的个体差异,主要是指:在实际疏散过程中,行人并非都能依据疏散信息进行精确的路径规划,而对环境状态认知的模糊性往往导致所选择的路径具有一定的随机性,即行人在决策过程中是有差异的.这种决策差异能够体现行人对环境状态认知的模糊性和决策时的恐慌性.因此对比文献[29]所述模型,本文研究的路径选择模型除了增加出口疏散能力因素用来评估所选路径外,更引入了基于“轮盘赌”的路径选择方法,模拟行人在紧急疏散环境中,短时间内行人很难精确计算最优路径而仅对其大致估算.

最后,需要补充说明的是,在利用社会力模型创建疏散路径集合时,需要获取行人在其运动方向上距障碍物表面的距离信息,并据此计算行人的目标驱动力,达到绕行障碍物的目的,因此式(3)仅适用于凸多边形障碍物.而凹多边形障碍物可利用其外接包围盒转化为凸多边形障碍物,所以在本文研究中,障碍物均采用最小外接矩形包围盒表示.在本文所示仿真实验中,我们采用矩形障碍物,是为了进一步简化障碍物的建模过程.

6 总结展望

本文通过分析行人认知环境的方法和疏散路径选择的本质,提出一种基于疏散路径集合(RS)的路径选择模型(RCM)用于分析和仿真紧急情况下的人群疏散,该模型将路径疏散效率的评估与场景认知、路径选择和疏散规划统一起来.模型中的疏散路径集合是利用引入避障策略的社会力模型构建的,保留了紧急状态下人群疏散的特点;其次利用路径离散和路径学习算法对连续路径集合进行离散和优化,便于后续的路径评估和路径选择.模型中的路径

评估实际上是利用影响行人路径选择因素(行人与候选路径的距离、候选路径长度、候选路径的拥塞状况以及候选路径出口密度等)仿真行人获取疏散环境信息的过程;路径评估可用于构建路径选择概率.路径选择模型采用基于“轮盘赌”的路径选择策略可以真实再现行人对环境认知的模糊性及决策的不确定性.此外,路径增益评估和临时目标点的选择也是为了更好地仿真行人在真实疏散过程中的动作.仿真结果表明,本文提出的模型可以模拟人群在紧急疏散过程中的行为动作和路径规划.

本文提出的基于疏散路径集合的路径选择模型为研究紧急情况下的人群疏散提供了一种研究方法,能够有效地减少疏散时间和提高疏散效率(5.3节).此外,模型仿真实验结果可得出两个符合实际疏散情况的结论,即分解拥塞可以有效地提高疏散效率(5.1节);充分利用每个出口可以有效地缩短整体的疏散时间(5.2节).然而,目前仍然存在一些问题需要进一步研究,如:如何自动设置参数、如何构建拥塞和场景之间的关系,如何完成拥塞的自动分解等.此外,本文提出的疏散决策模型尚未考虑疏散过程中行人的生理和心理差异对路径选择的影响.这些工作的进一步开展有助于研究紧急情况下疏散场景、疏散策略以及疏散效率之间的内在联系,为提高突发事件下的人群疏散效率,降低损失提供疏散方案.

参 考 文 献

- [1] Helbing D, Johansson A. Pedestrian, crowd, and evacuation dynamics. *Encyclopedia of Complexity & Systems Science*, 2012, 16: 697-716
- [2] Duives D C, Daamen W, Hoogendoorn S P. State-of-the-art crowd motion simulation models. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2013, 37(3): 193-209
- [3] Zhang P, Liu H, Ding Y H. Crowd simulation based on constrained and controlled group formation. *Visual Computer*, 2015, 31(1): 5-18
- [4] Sagun A, Bouchlaghem D, Anumba C J. Computer simulations vs. building guidance to enhance evacuation performance of buildings during emergency events. *Simulation Modelling Practice & Theory*, 2011, 19(3): 1007-1019
- [5] Hu Yu-Ling, Wang Fei-Yue, Liu Xi-Wei. ACP-based research on evacuation strategies for high-rise building fire. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(2): 185-196(in Chinese)
(胡玉玲, 王飞跃, 刘希未. 基于 ACP 方法的高层建筑火灾中人员疏散策略研究. *自动化学报*, 2014, 40(2): 185-196)
- [6] Sun Xu-Bin, Dong Hai-Rong, Ning Bin, et al. ACP-based emergency evacuation system. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(1): 16-23(in Chinese)

- (孙绪彬,董海荣,宁滨等.基于 ACP 方法的应急疏散系统研究.自动化学报,2014,40(1):16-23)
- [7] Zhang Gui-Juan, Lu Dian-Jie, Liu Hong, et al. Toward accurate fluid animation with geometry-coupled method. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(6): 1281-1295 (in Chinese)
(张桂娟,陆佃杰,刘弘等.耦合几何特征的高精度流体动画建模方法.计算机学报,2015,38(6):1281-1295)
- [8] Shen Jing-Jing, Wang Xin-Jie, Chao Qian-Wen, Jin Xiao-Gang. Fast and large-scale crowd authoring based on samples. Chinese Journal of Computers, 2014, 37(3): 621-631 (in Chinese)
(申晶晶,王欣捷,钞倩文,金小刚.基于样本的大规模人群快速创作.计算机学报,2014,37(3):621-631)
- [9] Fu Z, Zhou X, Zhu K, et al. A floor field cellular automaton for crowd evacuation considering different walking abilities. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2015, 420: 294-303
- [10] Li X, Chen T, Pan L, et al. Lattice gas simulation and experiment study of evacuation dynamics. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2008, 387(22): 5457-5465
- [11] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic. Nature, 2000, 407(6803): 487-490
- [12] van den Berg J, Lin M, Manocha D. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation//Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation Pasadena, CA, USA, 2008: 1928-1935
- [13] Guo R Y, Huang H J, Wong S C. Route choice in pedestrian evacuation under conditions of good and zero visibility: Experimental and simulation results. Transportation Research Part B Methodological, 2012, 46(6): 669-686
- [14] Nasir M, Lim C P, Nahavandi S, et al. A genetic fuzzy system to model pedestrian walking path in a built environment. Simulation Modelling Practice & Theory, 2014, 45(6): 18-34
- [15] Levy N, Ben-Elia E. Emergence of system optimum: A fair and altruistic agent-based route-choice model. Procedia Computer Science, 2016, 83: 928-933
- [16] Hoogendoorn S P, Bovy P H L. Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models. Transportation Research Part B Methodological, 2004, 38(2): 169-190
- [17] Guo R Y, Huang H J, Wong S C. Collection, spillback, and dissipation in pedestrian evacuation: A network-based method. Transportation Research Part B Methodological, 2011, 45(3): 490-506
- [18] Kneidl A, Borrmann A. How do pedestrians find their way? Results of an experimental study with students compared to simulation results//Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Radom, Poland, 2011: 1-7
- [19] Xi H, Son Y J. Two-level modeling framework for pedestrian route choice and walking behaviors. Simulation Modelling Practice & Theory, 2012, 22(3): 28-46
- [20] Guo R Y, Huang H J. Route choice in pedestrian evacuation, Formulated using a potential field. Journal of Statistical Mechanics Theory & Experiment, 2011, 4: 1-18
- [21] Kirik E, Yurgel'yan T, Krouglov D. On realizing the shortest time strategy in a CA FF pedestrian dynamics model. Cybernetics & Systems, 2011, 42(1): 1-15
- [22] Fu L, Luo J, Deng M, et al. Simulation of evacuation processes in a large classroom using an improved cellular automaton model for pedestrian dynamics. Procedia Engineering, 2012, 31(16): 1066-1071
- [23] Guo Z, Loo B P Y. Pedestrian environment and route choice: Evidence from New York city and Hong Kong. Journal of Transport Geography, 2013, 28(28): 124-136
- [24] Canca D, Zarzo A, Algaba E, et al. Macroscopic attraction-based simulation of pedestrian mobility: A dynamic individual route-choice approach. European Journal of Operational Research, 2013, 231(2): 428-442
- [25] Wang J, Sun J, Lo S. Randomness in the evacuation route selection of large-scale crowds under emergencies. Applied Mathematical Modelling, 2015, 39(18): 5693-5706
- [26] Hoogendoorn S P, Wageningen-Kessels F V, Daamen W, et al. Continuum theory for pedestrian traffic flow: Local route choice modelling and its implications. Transportation Research Part C, 2015, 59: 183-197
- [27] Wagoun A U K, Seyfried A, Holl S. Modeling the dynamic route choice of pedestrians to assess the criticality of building evacuation. Advances in Complex Systems, 2012, 15(7): 145-155
- [28] Xu Y, Huang H J. Simulation of exit choosing in pedestrian evacuation with consideration of the direction visual field. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2012, 391(4): 991-1000
- [29] Treuille A, Cooper S, Popović Z, et al. Continuum crowds. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 1160-1168
- [30] Sun Li-Bo, Sun Xiao-Feng, Qin Wen-Hu. Dense crowd simulation based on continuum model and aggregate dynamics model. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(7): 1375-1392 (in Chinese)
(孙立博,孙晓峰,秦文虎.基于连续模型和动力学仿真模型的高密度人群仿真算法.计算机学报,2016,39(7):1375-1392)
- [31] Miao Zhi-Hong, Li Zhi-Hui. A hybrid evacuation model and simulation based on SPH method. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(5): 935-941 (in Chinese)
(苗志宏,李智慧.一种基于 SPH 方法的人员疏散混合模型及模拟.自动化学报,2014,40(5):935-941)
- [32] Jian X X, Wong S C, Zhang P, et al. Perceived cost potential field cellular automata model with an aggregated force field for pedestrian dynamics. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2014, 42(2): 200-210
- [33] Kuang H, Song T, Dai S Q. Subconscious effect on pedestrian counter flow in a modified lattice gas model with the variable transition probability. International Journal of Modern Physics C, 2009, 20(12): 1945-1961
- [34] Tang T Q, Wu Y H, Huang H J, et al. An aircraft boarding model accounting for passengers' individual properties. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2012, 22: 1-16

- [35] Tang T Q, Chen L, Guo R Y. An evacuation model accounting for elementary students' individual properties. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2015, 440: 49-56
- [36] Guo R Y, Huang H J. A modified floor field cellular automata model for pedestrian evacuation simulation. *Journal of Physics A Mathematical & Theoretical*, 2008, 41(38): 1-13
- [37] Guo R Y, Wong S C, Huang H J, et al. A microscopic pedestrian-simulation model and its application to intersecting flows. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2010, 389(3): 515-526
- [38] Huang H J, Guo R Y. Static floor field and exit choice for pedestrian evacuation in rooms with internal obstacles and multiple exits. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2008, 78(1): 1-6
- [39] Jiang Y, Wong S C, Zhang P, et al. Numerical simulation of a continuum model for bi-directional pedestrian flow. *Applied Mathematics & Computation*, 2012, 218(10): 6135-6143
- [40] Tang T Q, Shao Y X, Chen L. Modeling pedestrian movement at the hall of high-speed railway station during the check-in process. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2017, 467: 157-166
- [41] Kielar P M, Borrmann A. Modeling pedestrians' interest in locations: A concept to improve simulations of pedestrian destination choice. *Simulation Modelling Practice & Theory*, 2016, 61(5): 47-62
- [42] Hong Liu, Baoxi Liu, Hao Zhang, et al. Crowd evacuation simulation approach based on navigation knowledge and two-layer control mechanism. *Information Sciences*, 2018, 437: 247-267
- [43] Moussaïd M, Helbing D, Theraulaz G. How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(17): 6884-6888
- [44] Ondřej J, Petrě J, Olivier A-H, et al. A synthetic-vision based steering approach for crowd simulation. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(4): 1-9
- [45] Li W, Li Y, Yu P, et al. The trace model: A model for simulation of the tracing process during evacuations in complex route environments. *Simulation Modelling Practice & Theory*, 2016, 60: 108-121
- [46] Wei Wei, Ouyang Dan-Tong, Lv Shuai, Feng Yu-Xuan. Multi objective path planning under dynamic uncertain environment. *Chinese Journal of Computers*, 2011, 34(5): 836-846(in Chinese)
(魏唯, 欧阳丹彤, 吕帅, 冯宇轩. 动态不确定环境下多目标路径规划方法. *计算机学报*, 2011, 34(5): 836-846)
- [47] Wu Li-Bing, Fan Jing, Nie Lei, et al. A collaborative routing method with internet of vehicles for city cars. *Chinese Journal of Computers*, 2017, 40(7): 1600-1613(in Chinese)
(吴黎兵, 范静, 聂雷等. 一种车联网环境下的城市车辆协同选路方法. *计算机学报*, 2017, 40(7): 1600-1613)
- [48] Wei X, Song W, Lv W, et al. Defining static floor field of evacuation model in large exit scenario. *Simulation Modelling Practice & Theory*, 2014, 40(1): 122-131
- [49] Wang J H, Yan W Y, Zhi Y R, et al. Investigation of the panic psychology and behaviors of evacuation crowds in subway emergencies. *Procedia Engineering*, 2016, 135: 128-137
- [50] Li X, Guo F, Kuang H, et al. Effect of psychological tension on pedestrian counter flow via an extended cost potential field cellular automaton model. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2017, 487(1): 47-57
- [51] Ren Zhi-Guo, Gai Wen-Jing, Peng Qun-Sheng. Ego-centered path planning in evacuation simulation. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2015, 27(9): 1775-1785(in Chinese)
(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)
- [52] Cao M, Zhang G, Wang M, et al. A method of emotion contagion for crowd evacuation. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2017, 483(1): 250-258

附录 1.

参数假设如下:

- (1) n 是场景出口的数量;
- (2) t_i 表示了第 i 个出口行人数量为 0 时, 此后不再有行人通过此出口;
- (3) 依据出口出现不再有行人通过的先后顺序进行出口排序, 则 $0 \leq t_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$, 总的疏散时间 $t = t_n, t_0 = 0$;
- (4) S_i 表示在 t_{i-1} 到 t_i 时刻中, 通过所有出口的行人数量, $S_0 = 0$;
- (5) α_i 是出口 i 的疏散能力;
- (6) 总的疏散人数 $S = \sum_{i=1}^n S_i$.

基于上述假设, 定理 1 的证明如下:

根据假设, 可以得到如下的等式:

$$t_k - t_{k-1} = \frac{S_k}{\sum_{i=k}^n \alpha_i},$$

该等式中 $t_k - t_{k-1}$ 表示在第 $k-1$ 个出口到第 k 个出口出现行人通过为 0 的时间, 即如下等式亦成立

$$\begin{aligned} t_1 - t_0 &= \frac{S_1}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}, \\ t_2 - t_1 &= \frac{S_2}{\sum_{i=2}^n \alpha_i}, \\ &\dots, \\ t_k - t_{k-1} &= \frac{S_k}{\sum_{i=k}^n \alpha_i}, \\ &\dots, \end{aligned}$$

$$t_n - t_{n-1} = \frac{S_n}{\sum_{i=n}^n \alpha_i}$$

将 n 个等式的两侧相加,得如下等式:

$$\sum_{i=1}^n (t_i - t_{i-1}) = \sum_{k=1}^n \frac{S_k}{\sum_{i=k}^n \alpha_i}$$

根据假设(3),疏散时间 t 和疏散人数和出口疏散能力之间的关系如下式:

$$t = t_n = \sum_{k=1}^n \frac{S_k}{\sum_{i=k}^n \alpha_i}$$

又因为 $\alpha_i \neq 0$,

$$\sum_{k=1}^n \frac{S_k}{\sum_{i=k}^n \alpha_i} \geq \sum_{k=1}^n \frac{S_k}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}$$

即总的疏散时间 t 的下限可表示如下:

$$t \geq \sum_{k=1}^n \frac{S_k}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} = \frac{\sum_{k=1}^n S_k}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} = \frac{S}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}$$

上述不等式的右侧表示在整个疏散过程中,每个出口自始至终都被利用,定理 1 得证. 证毕.



HAN Yan-Bin, born in 1979, Ph. D. candidates, associate professor. His research interests include swarm intelligence, machine learning and crowd evacuation.

LIU Hong, born in 1955, Ph. D., professor. Her research interests include distributed pervasive computing, computer-aided design, multi-agent system and cooperative design.

Background

With the development of public facilities and improvement of people's living standard, more and more people attend all sorts of huge party, which often results in extruding and trampling, and these events lead to some great disaster for human. Now more and more scholars have paid greater attention to pedestrian's station and complex behavior during evacuation in emergency. However, it is difficult to get the actual data from reality, therefore computer simulation plays an important role. The research focuses on how to describe pedestrian's behavior and social action in emergency in the machine world. The work can provide the safety evaluation and design suggestion for community facilities, improve a building structure, plan evacuation routes, and then decrease loss caused by extruding and trampling in emergency. Most studies have generally divided crowd dynamics and pedestrian behavior into three levels: operational, tactical and strategic, which represent basic walking behavior, evacuation route choice and general planning respectively. Most studies focus on pedestrian behaviors in crowd evacuation, such as cellular automata model, lattice model, social force model and reciprocal velocity obstacle model. Although these models can better describe pedestrian's basic behavior (self-organization), they can't still fully reflect pedestrian's complex

motions during evacuation.

In this paper, we propose a route choice model based on the evacuation route set to simulate the crowd evacuation in an emergency. In the model, the four causes affecting the route choice of pedestrian (i.e., the distance between pedestrian and route, length of route, traffic congestion of route, and density of exit) are used to evaluate route in route set to simulate that pedestrian gets environmental information in emergency. The experimental results demonstrate that the proposed model effectively simulates that pedestrian plans the evacuation route by his/her perceiving evacuation environment in real-time, which has contributed to work out or optimize the evacuation scheme. Moreover, the theory about how to improve evacuation efficiency is analyzed and proved in this paper, and it is also verified by simulation result of our model.

The work received the support of the National Natural Science Foundation of China (Nos. 61472232, 61876102). The contribution of this paper is designing a route choice model to simulate the pedestrian's perceiving evacuation environment and planning the evacuation route in real-time. As a case, the model and proposed theory can effectively support our following research work.