

8-13-2020

An Evacuation Simulation Method Based on Disaster Avoidance Psychology and Disaster Impact

Zhang Han

School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

Liping Zheng

School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

Huang Kang

School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

Haibo Lin

School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

An Evacuation Simulation Method Based on Disaster Avoidance Psychology and Disaster Impact

Abstract

Abstract: Evacuating people safely and efficiently during disasters is the important guarantee to public safety, and the effective and feasible evacuation simulation method is theoretically and practically significant. The main methods seldom consider the dynamic evolution of disasters, *so a dynamic Evacuation Route Replanning Based on Psychology (DERR) method is proposed. DERR method focuses on the psychological parameters of disaster avoidance of people. According to the change of disasters area, DERR can perform the real time evacuation process by using A* routing algorithm to re-plan and optimize the evacuation path.* The simulation experiment shows the evacuation process of this method. The psychological parameters of disasters avoidance make the simulation results closer to reality.

Keywords

evacuation simulation, A* algorithm, dynamic evolution of disasters, psychological parameters of disaster avoidance

Recommended Citation

Zhang Han, Zheng Liping, Huang Kang, Lin Haibo. An Evacuation Simulation Method Based on Disaster Avoidance Psychology and Disaster Impact[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(8): 1465-1472.

考虑避灾心理和灾害影响的疏散仿真方法

张晗, 郑利平, 黄康, 林海波

(合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 在灾害发生时, 安全高效的疏散人群是提高公共安全的重要保障。因此有效可行的疏散仿真方法具有深刻的理论和现实意义。当前主流方法较少考虑与疏散相关的灾害动态演化, 为此提出了 DERR(Dynamic Evacuation Route Replanning Based on Psychology) 方法。DERR 方法围绕人群的避灾心理参数进行相关研究, 利用 A* 寻路算法, 实时根据灾害区的变化对人群的疏散路径重新规划和优化, 以达到更加安全疏散的目的。通过仿真实验展示了本方法在灾害演化下的疏散模拟过程, 同时心理避灾参数的加入也使得仿真结果更加贴合现实。

关键词: 疏散仿真; A* 算法; 灾害动态演化; 避灾心理参数

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 08-1465-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0838

An Evacuation Simulation Method Based on Disaster Avoidance Psychology and Disaster Impact

Zhang Han, Zheng Liping, Huang Kang, Lin Haibo

(School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Evacuating people safely and efficiently during disasters is the important guarantee to public safety, and the effective and feasible evacuation simulation method is theoretically and practically significant. The main methods seldom consider the dynamic evolution of disasters, so a dynamic Evacuation Route Replanning Based on Psychology (DERR) method is proposed. DERR method focuses on the psychological parameters of disaster avoidance of people. According to the change of disasters area, DERR can perform the real time evacuation process by using A* routing algorithm to re-plan and optimize the evacuation path. The simulation experiment shows the evacuation process of this method. The psychological parameters of disasters avoidance make the simulation results closer to reality.

Keywords: evacuation simulation; A* algorithm; dynamic evolution of disasters; psychological parameters of disaster avoidance

引言

随着社会的发展, 公共场合的安全引起越来越

多的关注。一旦发生紧急事件, 如何将大量人员快速安全疏散, 已经成为公共安全首先应该考虑的问题。人群的应急疏散是指发生灾害时, 将危害区的人群在最短的时间内疏散到安全区内。因此对受灾人群的疏散路径进行动态的及时规划, 确保人群远离灾源和受灾严重的区域, 进行安全的疏散, 对公共安全有着重要的意义。

人群疏散仿真模型^[1]可分为 2 种: 宏观模型和



收稿日期: 2018-12-17 修回日期: 2019-04-03;
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0800100), 安徽省科技强警项目(1704d0802177);
作者简介: 张晗(1994-), 女, 安徽泾县, 硕士生, 研究方向为计算机图形学与信息可视化; 郑利平(1978-), 男, 湖北麻城, 博士, 教授, 研究方向为可视化与仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 1465 •

微观模型。宏观模型主要用来解决碰撞避免等问题,旨在研究仿真人群中个体的行为,例如经典的 Boids 模型^[2-3], Boids 系统完整的提出了一个群体行为的控制规则,包括 3 条约束群体运动的规则:中心吸引力、速度跟随、相互排斥力。该模型能够很好地表现群体的运动方式,成为群体模拟常用模型之一,通常用来模拟成群飞鸟以及羊群等。但是由于 Boids 系统约束过于简单,并没有考虑群体之外的环境因素,很少被用于大规模人群仿真。除此之外,另有社会力模型^[4-5],RVO(Reciprocal Velocity Obstacle)模型^[6-7]等。而微观模型^[8]则侧重于研究人群中个体的生理、心理因素和社会行为等。应急疏散问题的重要性引起了国内外学者的高度关注,并已经取得了很多的研究成果^[9]。Yasser 等^[10]使用人群模拟软件 Building EXODUS 研究了大型建筑大厅的人群疏散模拟;朱伟等^[11]主要研究了建筑物出口位置、出口宽度等变量对疏散时间和疏散速度的影响;何明等^[12]提出基于 Dijkstra 算法的人员疏散仿真方案等。

1 相关背景

1.1 A*算法

A*算法^[13-14]是比较流行的启发式搜索算法^[15-16]之一,被广泛应用于路径优化领域。A*算法其实是 Dijkstra^[17]最短路径算法的一种扩展。使用 A*算法需要把搜索区域简化为 2 维数组。数组的每一项代表一个格子,它的状态就是可走和不可走。

A*算法有 3 个核心概念:开表,闭表,估值函数。开表记录了当前地图上需要处理的点。闭表记录了当前地图上已经处理的点。估值函数估算了当前点处于最优路径上的代价。估值函数为:

$$f(n) = h(n) + g(n) \quad (1)$$

式中: $f(n)$ 为从初始状态经由状态 n 到目标状态的代价估计; $g(n)$ 为在状态空间中从初始状态到状态 n 的实际代价; $h(n)$ 为从状态 n 到目标状态的最佳路径的估计代价。每次选择估值函数最小的方格加入选择的路径点。通过计算出从起点到目标点

需要走过哪些方格,这些方格就组成了到目的地的路径。

1.2 动态疏散

现实情况中火灾或者是别的灾害并不是静止的,随着时间,受灾区域可能会按照一定规律扩大,影响更多的疏散人群,还有可能在一些时间点产生新的受灾区域。灾害的动态演化会对人群的疏散产生更多更深远的影响。现在很多疏散方法研究中的灾害都没有考虑真实动态的特性,这样的疏散结果并不符合现实,因此也有很多学者对于动态灾害进行了相关的研究。

Ole-Christoffer Granmo 等^[18]对于发生在船舶上的动态灾害(例如船舶火灾)进行了研究,用有向图对动态场景进行建模,如图 1 所示,用节点表示各个区域,有向边则表示可通行状态,E 表示甲板, S1, S2 表示楼梯, D1, D2, D3 表示走廊, A, B, C 表示房间。当灾害发生时,如果有一些通道变得不可通行,则切断代表这些通道的有向边,如果有一些区域变得不可通行,则切断代表这些区域的节点相邻的所有有向边。即是用有向图的变化来模拟动态灾害的演化对疏散的影响,并采用蚁群算法计算疏散路径。

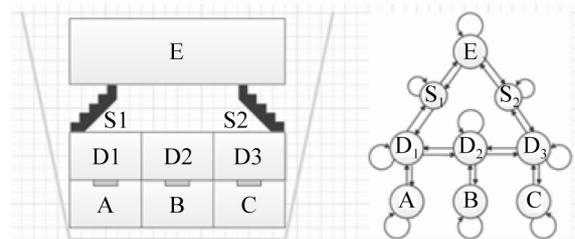


图 1 船舶火灾的建模
Fig. 1 Modeling of ship fires

何明等提出一种基于 Dijkstra 算法的人员疏散仿真方法,来模拟建筑物内火灾情况下的人员安全疏散过程。该方法借鉴网络路由的思想,将人看作是网络中的分组,将路口看作是路由器实现转发的功能部件,将通道看作是链路,将中心控制单元看作是路由器实现选路的功能部件,它与路口共同实

现了路由器的功能。此方法综合考虑在人员动态疏散过程中发生的通道和路口损坏, 以及人员拥堵等情况, 采用 RIP 选路协议中的 DV 算法, 实时计算最佳逃离路径(最低耗费路径), 同时利用路由转发机制, 辅助人员决策疏散方向。

本文聚焦于灾害影响下的人群疏散方法研究, 提出 DERR (Dynamic Evacuation Route Replanning Based on Psychology) 方法。DERR 方法围绕人群的避灾心理参数进行了相关研究, 利用 A* 寻路算法, 实时根据灾害影响区的变化对人群的疏散路径进行重新规划和优化, 以达到更加安全疏散的目的。

2 DERR 方法

2.1 疏散路径的重定向

2.1.1 动态计算和优化疏散路径

因为现实中发生的火灾及其他灾害并不是静态的, 随着时间的推移, 随时都有可能新增灾害区或者原有的灾害区影响范围扩大, 因此传统的静态疏散方法仿真效果并不好。本文方法在仿真实验阶段实现了灾害的动态交互设置, 可以在任意时间和地点及时的生成新的灾害区, 并设置灾害的蔓延情况, 模拟现实中的突发灾害和动态演化。

DERR 方法会实时的检测场景的变化, 当灾害区域发生动态演化时会更新灾害信息, 同时用更新后的灾害信息, 结合心理避灾参数和 A* 算法重新计算疏散路径。

本文的 DERR 方法是利用 A* 算法来计算疏散路径, 而 A* 算法本身的计算是用方格的中心点来代替此方格, 因此计算出的路线由多个节点的组合, 在实验过程中, 会发生很大的震荡现象。因此本文做了一些改进, 将锯齿状的路线平滑成直线, 更加符合现实。并且经过处理之后, 人群的疏散路线也相对来说更加短, 使得疏散时间变短, 减少了无谓的抖动冗余时间。

2.1.2 灾害对疏散的影响

在 DERR 方法中, 火灾等灾害对于疏散路径可

能会造成 3 种不同的影响, 并有对应的处理方法。

第 1 种情况, 灾害对疏散路径不造成影响。即灾害发生和蔓延的区域不经过原本计划的疏散路径, 并且灾害完全没有破坏门, 楼梯, 走廊灯通道, 此时不需要重新计算疏散路径, 人群按照原先计划路径疏散。

第 2 种情况, 灾害对疏散路径的部分区域造成完全破坏的影响。即灾害区覆盖了一部分疏散路径, 或者灾害对疏散路径经过的通道造成了完全破坏。此时将会对疏散路径进行重新计算, 新的疏散路径会避开被灾害完全破坏的区域。

第 3 种情况, 灾害疏散路径的部分区域造成不确定的影响。即灾害区比较靠近疏散路径, 使得原来的计划路径安全度不高, 或者灾害对疏散路径经过的通道造成了不完全破坏, 此种情况较为特殊, 本文将其称为“半遮挡事件”。半遮挡事件是指在疏散过程中, 若有类似门、楼梯、走廊这样的瓶颈区域, 其中有一部分被灾害区覆盖, 例如火焰覆盖了一小半楼梯通道, 如果采用有向图或者计算机网络模拟场景, 该通道将被视为不可通行。但是在 DERR 方法中, 对于半遮挡事件, 依然会有一部分人冒险通过, 更加符合现实情况。

2.2 避灾心理参数

现实的人群在疏散过程中不一定会选择最快最短的疏散路径, 需要考虑更多的因素, 因此本文根据对实际现象的观察提出一个影响疏散的因素: 避灾心理参数。避灾心理参数指的是疏散人群对于灾害范围的心理预期程度。

结合 2.1 节提出的半遮挡事件, 根据避灾心理参数, 本文把疏散人群分为 2 类。(1) 冒险型, 拥有低避灾心理参数, 特点是胆大而且鲁莽, 会选择从半遮挡区域通过; (2) 保守型, 拥有高避灾心理参数, 特点是胆小而且谨慎, 他们会特意避开半遮挡区域, 优先选择绕路来保证自身安全。根据对现实中情况的观察, 可以得知疏散个体的性别、年龄和灾害扩散速度等因素均会影响避灾心理参数的

数值, 进而影响该个体属于冒险型或是保守型。例如, 一般来说男性较女性会更加偏向于冒险, 老年人和少年儿童会更加偏向于保守, 而灾害的扩散速度越快人群越偏向保守, 但是一旦扩散速度超过一个阈值, 人群会变得恐慌而趋于冒险。

关于疏散人群中每个个体的避灾心理参数值, 本文提出用公式(2)来计算:

$$\begin{cases} C = X * Y * Z * \text{rand}() \\ X \in \{x_a, x_b\} \\ Y \in \{y_a, y_b, y_c\} \\ Z \in [z_a, z_b] \cup z_c \end{cases} \quad (2)$$

式中: C 为某个个体最终计算得出的避灾心理参数值; X 为性别属性的影响, x_a 和 x_b 分别为性别为男或为女; Y 为年龄层属性的影响, 其中 y_a , y_b 和 y_c 为少年儿童, 成年和老年人; Z 代表灾害的扩散速度属性的影响, 随着扩散速度的变化, 该影响因子由 z_a 向 z_b 变化, 但是当扩散速度超过某一阈值 θ 时, 会直接变成 z_c 值。

DERR 方法在计算疏散路径时, 把避灾心理参数加入考虑来处理半遮挡事件, 使仿真结果更真实。

对第 2 章的内容进行总结, 整个 DERR 方法的流程图如图 2 所示。

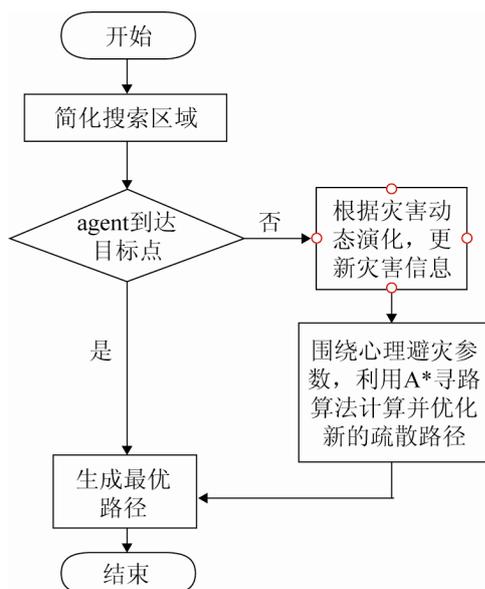


图 2 DERR 方法流程图
Fig. 2 DERR method flow chart

整个流程的伪代码如下:

算法 1: DERR 方法流程算法

输入: Agent 当前位置

Agent 速度

Agent 相关心理避灾参数

目标点位置

障碍场信息

输出: 在当前条件下, Agent 的规划疏散路线

1.Begin

2. 简化疏散区域

3. Repeat

4. if 灾害信息发生动态演变

5. 更新灾害信息

6. Endif

7. 围绕 Agent 的心理避灾参数, 利用 A* 算法计算并优化疏散路径

8. Until Agent 已到达疏散目标区域 or Agent 发生伤亡

9. 得到疏散路径

10. End

3 仿真结果

本文仿真实验基于 Unity 2018.2.0b2(64bit)和 Microsoft Visual Studio 2017 来实现。本文研究方法对于大部分灾害都可以通用, 但是目前使用火灾作为例子来进行说明。

3.1 仿真平台

本文平台提供了一个设置界面, 如图 3 所示。设置页内所有参数均有默认值, 也可以手动调整。

平台内置了几种比较典型的演示模拟场景, 可以根据需要选择适合的场景, Agent 数量是指参与灾害疏散仿真的个体数量, Agent 行走速度是指仿真过程中个体的最大行走速度, 在开阔的区域 Agent 较有可能达到此行走速度, 在拥挤的时候、靠近障碍物边缘或者即将达到目标点等情况, Agent 的实际速度一般小于最大行走速度, 经过实

验, Agent 行走速度设定为 2~5 时实验结果较为合理。Agent 的各种属性为生成时自动赋予, 并按照 2.2 节中公式(2)来计算避灾心理参数, 为更加方便的进行对比实验, 增加了对冒险型 Agent 占比的控制, 如果选择随机选项, 那么将根据公式生成。火灾点的数量主要是用于默认设置, 如果不对火灾点进行动态设置, 则系统会根据设定的火灾点数量在相应数量的关键点位置产生火灾。火焰扩散速度影响灾害随着时间变化向四周蔓延的变化率。风向和风速的选择也会影响灾害区域的扩散情况, 使得灾害动态演化的仿真情形变得较为复杂, 也更加真实。动态生成火灾点的选项不受之前的火灾点数量的影响, 如不勾选此选项, 系统会根据默认位置来生成火灾点, 如果勾选了此选项, 在仿真实验运行过程中, 可以随时点击屏幕画面, 将在对应的位置生成一个动态的灾害点, 影响到人群的疏散路径和行为。

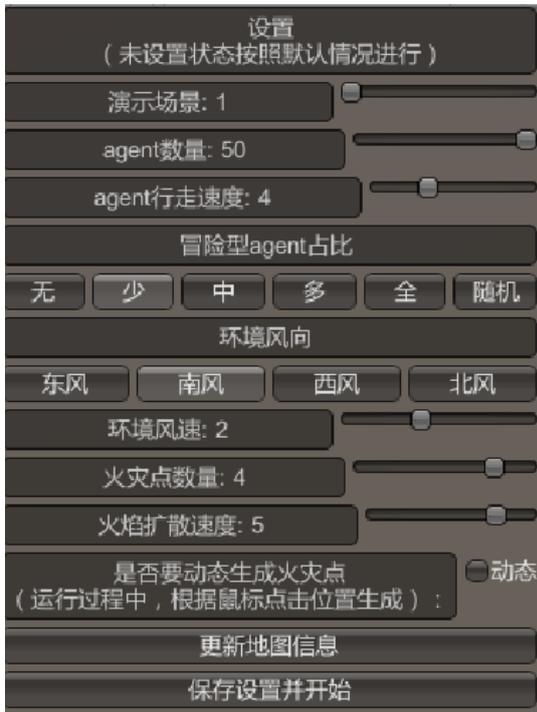


图 3 交互界面

Fig. 3 System user-interface

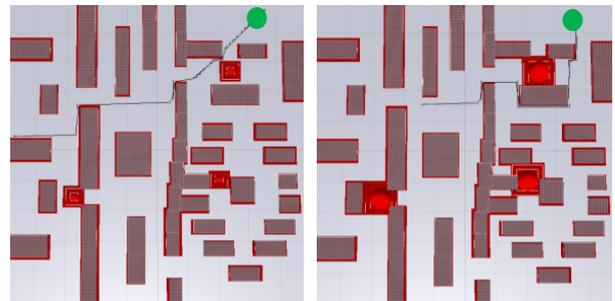
当需要的参数设置完毕后, 即可以按钮保存设置并开始, 进行个性化的灾害动态演化下的人群疏

散仿真实验。

3.2 动态疏散仿真结果和分析

本节采用 2 个场景来展示动态疏散仿真结果。

第 1 个采用图 4 所示的场景进行疏散仿真, 右上角绿点附近是安全区, 目的就是把受灾区的人群引导疏散到绿点附近。使用传统的静态疏散方法, 基于静态的 A* 寻路算法计算的路径如图 4(a) 所示, 其中的黑线表示 Agent 的规划路径, 如果没有发生灾害的动态演化, 人群按照既定的路线是可以到达安全区的, 即右上角的绿点。但是在本文之前的部分, 已提出现实中的灾害并不是静止的, 如果有额外的灾害区产生, 并且覆盖了原来的路径, 人群将无法安全的疏散。图 4(b) 展示了利用 DERR 方法计算得出的寻路方案, Agent 路线得到了重新规划, 绕开了灾害区, 可以进行安全的疏散。如果继续有新增的灾害点, 或者灾害区的范围扩大, 利用 DERR 方法依然可以得出安全的疏散方案。



(a) 静态规划的路径图 (b) 动态规划的路径

图 4 疏散路径重定向示意图(场景 1)

Fig. 4 Evacuation path redirection diagram (scenario 1)

第 2 个场景如图 5 所示, 该场景相比前一个更为复杂, 且该场景内设置有一定速度的东风, 同时安全区域在疏散过程中发生了变化。图 5(a) 依然显示的是疏散开始时的场景和疏散路径, 经过一定的时间之后, 原来的右上角绿点区域变得不再安全并且不可到达, 将会更改 Agent 的疏散目标区域到右下角, 同时场景内的火灾区域也因为增加的风向和风速因素发生了更多的动态演化, 疏散人群将会根据 DERR 算法获取新的疏散路径, 如图 5(b) 所示。

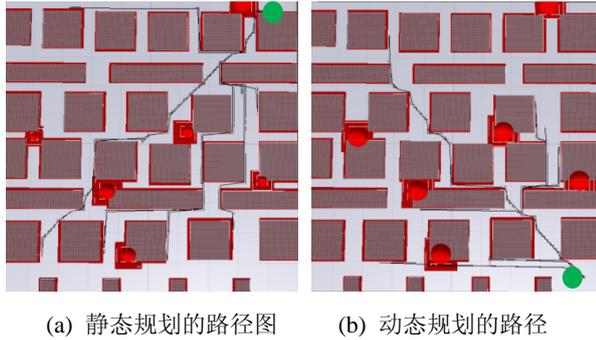


图 5 疏散路径重定向示意图(场景 2)

Fig. 5 Evacuation path redirection diagram(scenario 2)

本文提出的 DERR 方法, 和传统的 A*寻路疏散方法的对比分析如表 1 所示。表格内展示的数据所做的实验, 都是基于同条件下, Agent 行走速度设为 4, 灾害点扩散速度设为 5, 灾害点数量设为 3, 使用默认的位置。

表 1 不同方案对于疏散时间和伤亡人数的影响

Tab. 1 Impact of different programs on evacuation time and number of casualties

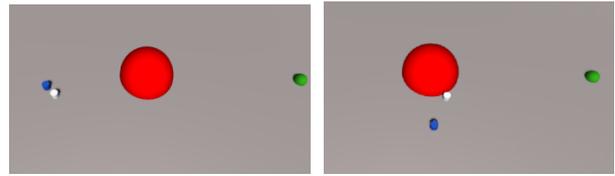
方法	平均疏散时间/s	平均伤亡人数/ 人
传统的 A*寻路疏散	34.01	4.5
DERR	32.72	0.5

从表 1 中可以看出, 使用本文的疏散方法, 平均疏散时间和伤亡人数都优于传统的 A*寻路疏散方法。尤其是能够有效控制伤亡人数, 对于实际疏散行为意义重大。

3.3 避灾心理参数仿真结果和分析

在本文的仿真平台上, 拥有不同避灾心理参数的 Agent 在避开灾害区时的行为如图 6 所示。其中白色 Agent 表示低避灾心理参数人群, 蓝色表示高避灾心理参数人群, 均从场景左方开始疏散, 红色表示不可通行的灾害区, 绿点表示安全疏散目标点。

另一个场景是一个门被灾害区覆盖了一半的场景, 以展示在遇到类似瓶颈区域时, 避灾心理参数对于人群疏散行为的影响。仿真结果如图 7 所示。

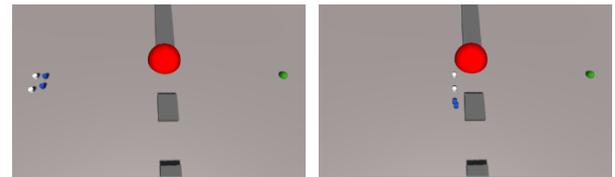


(a) 经过灾害区前

(b) 途经灾害区时

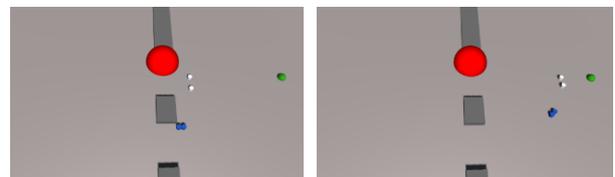
图 6 避灾心理参数影响示意图

Fig. 6 Schematic diagram of impact of psychological parameters



(a) 经过灾害区前

(b) 途经灾害区时



(c) 经过灾害区后

(d) 前往安全区域

图 7 半遮挡事件中, 心理避灾参数的影响

Fig. 7 Impact of psychological avoidance parameters in semi-occlusion events

本文还研究了避灾心理参数对于总体疏散时间的影响, 实验过程演示如图 8 所示, 仿真实验结果如表 2 所示。表格内展示的数据所做的实验, 都是基于同条件下, Agent 行走速度设为 4, 灾害点扩散速度设为 4, 灾害点数量设为 3, 使用默认的位置。这样能保证仿真实验基于相同的大环境, 变化量只有参与疏散的总人数和避灾心理参数。

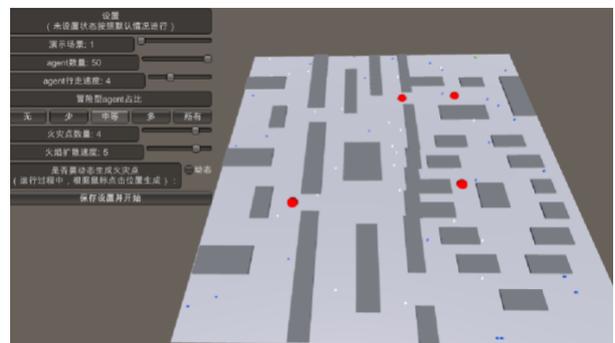


图 8 仿真实验过程演示

Fig. 8 Simulation experiment process demonstration

表 2 避灾心理参数对于总体疏散时间的影响
Tab. 2 Impact of psychological parameters of disaster avoidance on overall evacuation time

保守型 Agent 占比/%	平均疏散时间(s)/平均伤亡人数		
	10 人	25 人	50 人
0	30.93/0.5	34.11/2	37.70/6
20	35.06/0.2	38.35/0.5	37.97/5
50	34.02/0.2	42.94/0.1	44.83/2
80	38.88/0	44.33/0.1	46.59/1
100	42.26/0	47.41/0.1	47.78/0

从表 2 中数据可以得出, 平均疏散时间与总疏散人数和高避灾心理参数 Agent 占比成正相关。符合现实中疏散的情况。

表 3 几种疏散仿真方法的对比

Tab. 3 Comparison of several evacuation simulation methods

仿真方法	是否可以处理灾害的动态演化	是否考虑个体生理因素	是否考虑个体心理因素	是否考虑个体间疏散的影响	是否可以处理半遮挡事件
本文 DERR 方法	是	否	心理避灾参数	否	是
文献[12]方法	是	否	密度	密度	否
文献[18]方法	是	否	否	预测人群流动方向	否

4 结论

相比于传统的静态疏散方法, 本文提出了适用于灾害动态演化的 DERR 方法, 围绕人群的避灾心理参数进行了相关的研究, 发现不同的避灾心理参数水平会对 Agent 在疏散中的寻路行为产生影响, 符合现实中的疏散情景, 同时利用 A* 寻路算法, 实时根据灾害影响区域的变化对人群的疏散路径进行重新规划和优化, 以达到更加安全疏散的目的。

参考文献:

[1] 赵巍, 刘畅, 廉兴宇, 等. 人群运动仿真和疏散优化方法设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(3): 523-529. Zhao Wei, Liu Chang, Lian Xingyu, et al. Simulation of Crowd Movement and Design and Implementation of Evacuation Optimization Method[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(3): 523-529.

[2] Reynolds C W. Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model[J]. Acm Siggraph Computer Graphics (S0097-8930), 1987, 21(4): 25-34.

[3] Ikegami T, Mototake Y I, Kobori S, et al. Life as an

3.4 对比分析

在表 3 中, 个体生理因素主要是指年龄、性别等, 个体心理因素主要指恐慌、心理避灾参数等, 个体生理因素和个体心理因素均会影响单个个体对于疏散路线的选择, 个体间疏散的影响是指疏散人群相互之间是否会影响路线的选择(例如密度的影响), 半遮挡事件在 2.2 节中提到, 是指某些门、走廊、楼梯等被灾害区域覆盖一部分的情况。

同时从表 3 中可以看出, 本文的方法在于重点研究了人群在疏散时的心理避灾参数, 并且可以处理半遮挡事件, 使仿真结果更加符合现实。

Emergent Phenomenon: Studies from a Large-scale Boid Simulation And Web Data[J]. Philos Trans A Math Phys Eng Sci (S1364-503X), 2017, 375(2109): 20160351.

[4] 张开冉, 杨树鹏, 何琳希, 等. 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, 2017, 27(1): 30-35. Zhang Kairan, Yang Shupeng, He Linxi, et al. Evacuation Simulation of Station Load-bearing Population Based on Social Force Model[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(1): 30-35.

[5] 隋杰, 万佳慧, 于华. 基于社会力的应急疏散仿真模型应用研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(6): 1197-1201. Sui Jie, Wan Jiahui, Yu Hua. Research on Simulation of Emergency Evacuation Based on Social Force Model[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(6): 1197-1201.

[6] Berg J V D, Guy S J, Lin M, et al. Reciprocal n-Body Collision Avoidance[J]. Springer Tracts in Advanced Robotics (S1610-7438), 2011, 70(4): 3-19.

[7] Li X, Qin W. A Crowd Behavior Model Based on Reciprocal Velocity Obstacle Algorithm[J]. Procedia Engineering(S1877-7058), 2012, 29: 2887-2893.

[8] 何流, 李旭宏, 卢静. 基于动态广义势能场的行人微观模型及仿真[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(11): 2558-2563. He Liu, Li Xuhong, Lu Jing. Microscopic Pedestrian

- Modeling and Simulation Based on Dynamic Generalized Potential Field[J]. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(11): 2558-2563.
- [9] 张学锋, 张成俊, 白晨曦, 等. 基于智能体技术的多重灾难人员疏散感知模型[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(3): 534-541.
Zhang Xuefeng, Zhang Chengjun, Bai Chenxi, et al. Multi-disaster Evacuation Perception Model Based on Agent Technology[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(3): 534-541.
- [10] Yasser M, Muhammad N. Simulation of Building Evacuation: Performance Analysis and Simplified Model[J]. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications (S2156-5570)*, 2016, 7(8): 10-17.
- [11] 朱伟, 王亚飞, 马英楠, 等. 紧急疏散路径选择行为的实验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(3): 115-121.
Zhu Wei, Wang Yafei, Ma Yingnan, et al. Experimental Study on Behavior of Route Selection in Emergency Evacuation[J]. *China Safety Science and Technology*, 2016, 12(3): 115-121.
- [12] 何明, 陈国华, 杜有翔, 等. 基于 Dijkstra 算法的火灾环境下人员疏散仿真方法[J]. *中国安全科学学报*, 2010, 20(12): 46-51.
He Ming, Chen Guohua, Du Youxiang, et al. Simulation Method for Personal Evacuation under Fire Based on Dijkstra[J]. *China Safety Science Journal*, 2010, 20(12): 46-51.
- [13] Ozcan C Y, Haciomeroglu M. A Path-based Multi-agent Navigation Model[J]. *The Visual Computer (S0178-2789)*, 2015, 31(6/8): 863-872.
- [14] 刘浩翰, 郭晶晶, 李建伏, 等. 基于随机游走的多目标 A*算法的改进[J]. *计算机应用*, 2018, 38(1): 116-119.
Liu Haohan, Guo Jingjing, Li Jianfu, et al. Improvement of Multi-objective A* Algorithm Based on Random Walk[J]. *Journal of Computer Applications*, 2018, 38(1): 116-119.
- [15] 李志建, 郑新奇, 王淑晴, 等. 改进 A*算法及其在 GIS 路径搜索中的应用[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(10): 3116-3119.
Li Zhijian, Zheng Xinqi, Wang Shuqing, et al. Application of Improved A* Algorithm for Path Searching in GIS[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(10): 3116-3119.
- [16] 吴健宏, 翁文国, 倪顺江. 不同路径选择策略的城市疏散仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(1): 122-126.
Wu Jianhong, Weng Wenguo, Ni Shunjiang. Simulation Study on Urban Evacuation with Different Routh Choice Strategies[J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(1): 122-126.
- [17] Ciesielski K C, Falcão A X, Miranda P A V. Path-Value Functions for Which Dijkstra's Algorithm Returns Optimal Mapping[J]. *Journal of Mathematical Imaging & Vision (S0924-9907)*, 2018(1): 1-12.
- [18] Radianti J, Granmo O C, Sarshar P, et al. A Spatio-temporal Probabilistic Model of Hazard and Crowd Dynamics for Evacuation Planning in Disasters[J]. *Applied Intelligence (S0924-669X)*, 2015, 42(1): 3-23.