

顾磊欣, 黄润才. 考虑高度信息的连通域优化社会力人群疏散仿真模型[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(10): 188-194.
DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 251029

考虑高度信息的连通域优化社会力人群疏散仿真模型

顾磊欣, 黄润才

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要: 社会力模型在人群疏散仿真中被广泛应用。针对该模型在非凸多边形障碍物存在停滞问题、未考虑低矮障碍物和无法判断环境信息等问题,提出了一种改进模型。该模型能够基于真实三维场景模型,考虑障碍物高度信息自适应生成可行走连通域。通过真实场景仿真实验,实验结果显示该模型能够自适应生成复杂场景的连通域节点,行人在多层次复杂场景中能够有效规避障碍物,产生越过低矮障碍物的行为,生成符合真实的疏散导航路径。该模型有效地改善了社会力模型的仿真结果,使得人群疏散的仿真更加真实,为建筑设计和管理人员提供了更可靠的依据。

关键词: 人群疏散; 社会力模型; 连通域

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)10-0188-07

Simulation model of social force crowd evacuation based on connected component optimization considering height information

GU Leixin, HUANG Runcai

(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The social force model is widely used in crowd evacuation simulations. In order to solve the problems that there is stagnation in non-convex polygon obstacles, the low obstacles are not considered, and the environmental information cannot be judged, an improved model is proposed. Based on the real 3D scene model, the model can adaptively generate walkable connected domains considering the height information of obstacles. At the same time, the circulation and security weights of the connected domain are considered to generate the optimal evacuation path. Through real scene simulation experiments, the results show that the model can adaptively generate connected domain nodes in complex scenes. Pedestrians can effectively avoid obstacles in multi-layer complex scenes, produce the behavior of crossing low obstacles, and the generated evacuation navigation path is in line with reality. This model effectively improves the simulation results of the social force model, makes the simulation of crowd evacuation more realistic, and provides a more reliable basis for architectural design and management personnel.

Key words: crowd evacuation; social force model; connected component

0 引言

近年来,城市人口数量稳步增长,公共场所大规模高密人群活动也在增加,如足球看台、景点走道和宿舍等人群密集狭窄的场所安全问题时有发生,造成重大生命财产危害。所以有必要对特定场所的人员进行安全疏散演练,而真实场景下的人群疏散风险度较高,难以实现。因此需要合理构建人群疏散模型,并利用计算机可视化技术对应急疏散进行仿真模拟。

人群疏散模型大致可分为基于保守力的社会力

模型(SFM)^[1-2]和基于非保守力的隐式积分模型(Implicit)^[3-5]、基于几何约束的速度障碍模型(VO)^[6-7]和基于模拟视觉的视觉梯度模型^[8]。其中,社会力模型被广泛应用。许多研究人员对其进行改造优化。文献[9]引入了尊重因子,描述了行人的期望运动空间。文献[10]在SFM中添加了领导者因子进行人群仿真。文献[11]在SFM中引入了减速规避机制。文献[12-13]为行人模型添加了感知彼此速度的机制。文献[14]通过障碍物节点无向图为行人模型找到最优疏散路径。

本文结合连通域路径节点导航提出了一种适用

作者简介: 顾磊欣(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 人群疏散仿真, 深度学习, 机器视觉。

通信作者: 黄润才(1966—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 计算机网络与信息安全, 智能计算, 大数据等。Email: hrc@sues.edu.cn。

收稿日期: 2024-01-22

哈尔滨工业大学主办 ◆ 科技创见与应用

于多边形障碍物和多层场景下的社会力人群疏散模型。该模型能够根据障碍物体高度信息自适应计算场景连通可行走域, 根据起始位置和终点位置计算出最优疏散路径。从而能够有效解决在复杂场景下的人群停滞、路径不合理等问题。

1 社会力模型及现存问题

1.1 社会力模型原理

社会力模型以具有自身驱动力的粒子系统建立人群疏散模型。人群动力学是基于简化力学模型。模型假设心理力和物理力混合影响人群的行为。行人与其他行人或障碍物保持速度相关的距离。其状态会分别被相互作用力和目标驱动力调整。研究推得的动力学公式如下:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_g + \sum_{j \neq i} f_{ij} + \sum_W f_{iw} \quad (1)$$

其中, f_g 表示目标驱动力; f_{ij} 表示行人间作用力; f_{iw} 表示行人与障碍物之间的作用力。

行人目标驱动力驱使行人往出口方向运动, 其计算公式如下:

$$f_g = m_i \frac{v_i^0(t) e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} \quad (2)$$

其中, m_i 表示行人质量; e_i^0 表示期望方向; v_i^0 和 v_i 分别表示期望速度和当前速度。

行人间的作用力是由排斥力和摩擦力组成, 其计算公式如下:

$$f_{ij} = (A_i \exp\left(\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_i}\right) + kg(r_{ij} - d_{ij})) n_{ij} + \kappa g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t t_{ij} \quad (3)$$

其中, $A_i \exp\left(\frac{r_{ij} - d_{ij}}{B_i}\right)$ 表示行人间的相互斥力,

用于描述 2 个行人之间的保持距离的心理趋势; A_i 和 B_i 为常数, 分别表示行人间的相互斥力强度和产生斥力的距离阈值; $(r_{ij} - d_{ij})$ 表示 2 个行人质心的距离; $kg(r_{ij} - d_{ij}) n_{ij}$ 表示行人间的身体力, 防止行人身体被挤压; n_{ij} 表示行人之间的径向单位向量; k 表示一个较大的常数; $g(x)$ 表示一个函数, 当自变量 $x > 0$ 时, 取值为 0, 否则取值为 x ; $\kappa g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t t_{ij}$ 表示行人间切向的摩擦力; κ 表示摩擦力系数; Δv_{ji}^t 表示行人间相对速度; t_{ij} 表示行人切向的单位向量。

行人与障碍物之间的作用力由行人与障碍物之间的斥力和切向摩擦力组成。其计算公式如下:

$$f_{iw} = (A_i \exp\left(\frac{r_i - d_{iw}}{B_i}\right) + kg(r_i - d_{iw})) n_{iw} - \kappa g(r_i - d_{iw}) (v_i \cdot t_{iw}) t_{iw} \quad (4)$$

其中, d_{iw} 表示行人与障碍物最近点的距离, n_{iw} 和 t_{iw} 分别表示行人与障碍物最近点的法线单位向量和切向单位向量。

进一步, 研究给出社会力模型参数详见表 1。

表 1 社会力模型参数

Table 1 Social force model parameters

参数	数值	单位
m_i	80	kg
τ_i	0.5	s
A_i	2×10^3	N
B_i	0.08	m
k	1.2×10^5	$kg \cdot s^{-2}$
κ	2.4×10^5	$kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$

1.2 社会力模型存在的问题

智能体会受到社会力的影像, 朝目标点趋近, 同时在行人和行人之间的斥力和行人与障碍物的斥力影响下, 这里对障碍物边缘停滞问题展开研究论述。

由式(2)与式(4)可知, 智能体 A 会受到 F_1 与 F_2 的合力 P_2 和目标驱动力 P_1 , 当智能体逐渐靠近建筑物边缘时, 会出现 $P_2 = P_1$ 的情况, 此时, 智能体 A 会停滞在建筑物边缘, 具体如图 1 所示。

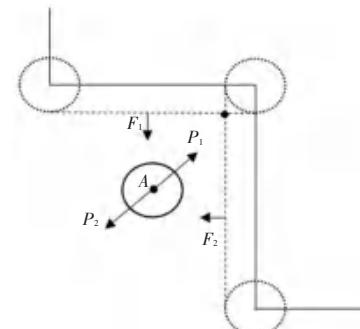


图 1 智能体边缘停滞现象

Fig. 1 Agent edge stagnation phenomenon

智能体 A 朝目标点 T 移动, 场景中存在 3 处障碍物, 其中黑色为智能体较高的障碍物, 灰色为较矮的障碍物。假设智能体 A 能够爬过灰色障碍物, 由于 VO 算法无法感知场景中的高度信息, 则会选择蓝色的较远的线路。但是橙色线路为最优路径, 且符合实际线路。对此过程的直观表述见图 2。

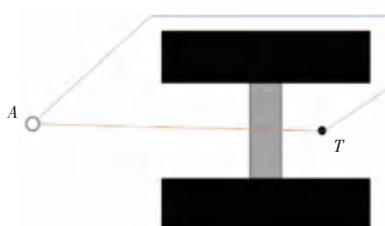


图 2 无法越过低矮障碍物

Fig. 2 Unable to negotiate low obstacles

2 考虑高度信息的连通域优化社会力人群疏散仿真模型

2.1 连通域分割

采用分水岭算法^[15-16]对高度域进行分割。分水岭算法是一种基于形态学的图像分割方法,能够将图像分割成若干个不相交的区域,每个区域内的像素具有相似的颜色和灰度值。

分水岭算法的原理是将图像看成地形地貌,将灰度值看成高度,在高度域内寻找山峰和山谷,通过标记和连接山峰及山谷来得到图像的分割结果。这种方法可以有效地处理具有明显的边缘和区域分界的图像,但对于灰度值变化较为平缓的图像、执行效果可能不佳。

连通域分割过程如图 3 所示。当注水线到 3 时,场景被分割成 3 个区域 A、B、C。随着水位上升,将场景中已被标记的栅格标记为连通域。

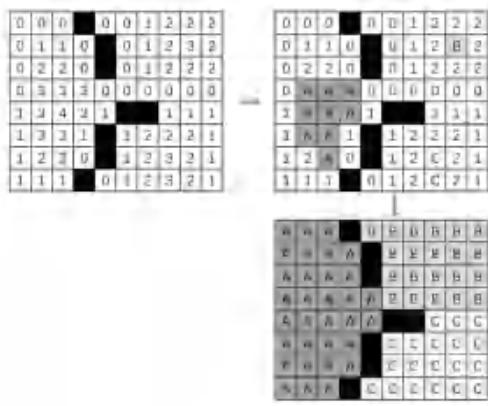


图 3 连通域分割过程图

Fig. 3 Connected domain segmentation process diagram

在得到场景中分块的连通域栅格后,若连通域过小,就会使得参与计算的连通域过多,增加计算量。为了避免不必要的性能损失,需要先计算每个区域的面积,当连通域的面积过小,就要做合并处理,将面积过小的体素连通域合并到与其接壤的面积最小的连通域。

2.2 标记轮廓点

沿着连通域边界顺时针遍历标记边界点,为了使各区域的轮廓线边界能重合,规定各区域的轮廓点必须满足以下几点:

(1) 棚格左侧是边界,则在棚格上方棚格点处插入轮廓点。

(2) 棚格上方是边界,则在棚格右上方棚格点处插入轮廓点。

(3) 棚格右侧是边界,则在棚格的右侧棚格点处插入轮廓点。

(4) 棚格下方是边界,则在棚格所在位置插入轮廓点。

根据上述 4 点规则,可得到中间区域的外轮廓线(见图 4),其中每个相邻连通域的轮廓点与中间区域的轮廓点是相互重合的。

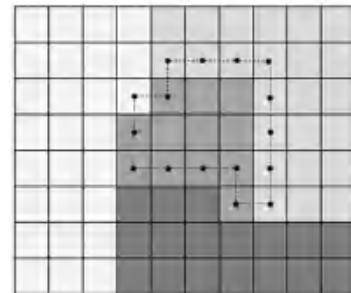


图 4 标记轮廓点

Fig. 4 Mark contour points

2.3 轮廓点简化

未处理的轮廓会存在许多不规则顶点,需要通过简化处理,规避这些不规则顶点。轮廓点简化过程示意如图 5 所示。简化过程如下:

步骤 1 从连通域的所有轮廓点中,找出最左下角的轮廓点和最右上角的轮廓点,作为初始轮廓对角线段。

步骤 2 依次遍历所有其他轮廓点,计算该轮廓点与对角线段的距离,若距离大于指定值,则将该点加入新的轮廓点。

步骤 3 依次迭代,直到遍历完所有轮廓点,使得新的轮廓点集中,除对角轮廓点之外,其他轮廓点到对角轮廓线的距离都大于指定距离。



图 5 轮廓点简化过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of outline point simplification process

2.4 轮廓线三角剖分

采用耳切法对多边形进行三角剖分。耳尖顶点定义满足: 相邻顶点的连线在多边形内部; 相邻顶点的连线其他边不相交。

轮廓线三角剖分示意如图 6 所示。多边形 $V_0V_1V_2V_3V_4V_5V_6V_7$ 的所有顶点中, $V_0, V_2, V_4, V_5, V_6, V_7$ 为耳尖点, 选取相邻顶点连线最短的 V_0 点对多边形进行分割, 得到多边形 $V_1V_2V_3V_4V_5V_6V_7$ 。对于多边形 $V_1V_2V_3V_4V_5V_6V_7$ 的耳尖点为 V_2, V_4, V_5, V_6, V_7 , 取相邻顶点连线最短的 V_4 点对多边形进行分割, 得到新多边形 $V_1V_2V_3V_5V_6V_7$ 。对于新多边形 $V_1V_2V_3V_5V_6V_7$ 的耳尖点为 V_2, V_3, V_5, V_6, V_7 , 取 V_7 点进行分割, 得到多边形 $V_1V_2V_3V_5V_6$ 。多边形 $V_1V_2V_3V_5V_6$ 的耳尖点为 V_1, V_2, V_3, V_5, V_6 , 取 V_5 对多边形进行分割, 得到多边形 $V_1V_2V_3V_6$ 。多边形 $V_1V_2V_3V_6$ 的耳尖点为 V_1, V_2, V_3, V_6 , 取点 V_1 对多边形进行分割, 此时得到的三角形 $V_2V_3V_6$ 。由于三角形为三角剖分的最小单位, 停止三角剖分。

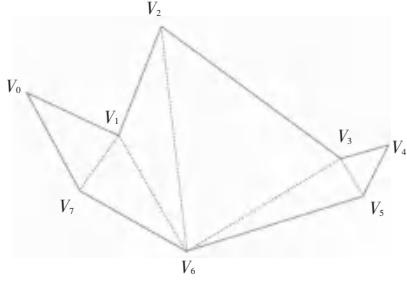


图 6 轮廓线三角剖分示意图

Fig. 6 Contour line triangulation diagram

2.5 合并凸多边形

三角剖分得到的三角形过多, 需要将多余三角形合并为凸多边形。合并结果需要满足: 两凸多边形必须要有重合边; 重合边的两端点必须保证在合并后仍然是凸点。

合并凸多边形示意如图 7 所示。三角形 $V_1V_2V_6$ 与三角形 $V_2V_3V_6$ 存在 2 条重合边 V_2V_6 , 重合边顶点 V_2 和 V_6 在多边形 $V_1V_2V_3V_6$ 中仍然是凸点。则将三角形 $V_1V_2V_6$ 与三角形 $V_2V_3V_6$ 合并得到凸多边形 $V_1V_2V_3V_6$, 凸多边形 $V_1V_2V_3V_6$ 与三角形 $V_1V_6V_7$ 和三角形 $V_3V_5V_6$ 存在重合边, 而顶点 V_1 在多边形 $V_1V_2V_3V_6V_7$ 内不满足凸点, 凸多边形 $V_1V_2V_3V_6$ 无法与三角形 $V_1V_6V_7$ 合并, 而重合点 V_3 和 V_6 在多边形 $V_1V_2V_3V_5V_6$ 内仍然是凸点。凸多边形 $V_1V_2V_3V_6$ 无法与三角形 $V_3V_5V_6$ 进行合并, 得到凸多边形 $V_1V_2V_3V_5V_6$ 。凸多边形 $V_1V_2V_3V_5V_6$ 与三角形 $V_3V_4V_5$ 存在重合边 V_3V_5 , 而顶点 V_3 在多边形 $V_1V_2V_3V_4V_5V_6$ 中不是凸点, 凸多边形 $V_1V_2V_3V_5V_6$ 与三角形 $V_3V_4V_5$ 无法合并。三角形 $V_0V_1V_7$ 与三角形 $V_1V_6V_7$ 存在重合边 V_1V_7 , 并且重合边顶点 V_1 和 V_7 在多边形 $V_0V_1V_6V_7$ 中仍然是凸点, 将三角形 $V_0V_1V_7$ 与三角形 $V_1V_6V_7$ 合并为凸多边形 $V_0V_1V_6V_7$ 。最终得到 3 组凸多边形集合 $\{t_0, t_1, t_2\}$, 见图 5。

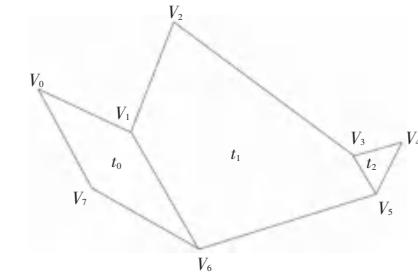


图 7 合并凸多边形示意图

Fig. 7 Schematic diagram of merging convex polygons

3 实验仿真与结果分析

3.1 与基于平面感知的算法比较

在仿真场景中存在一处黄色的低矮障碍物, 如图 8、图 9 所示, 本文算法能产生越过低矮障碍物的行为, 而文献[14]的算法无法越过黄色低矮障碍物。相比文献[14]的疏散轨迹, 本文算法轨迹更加合理真实。

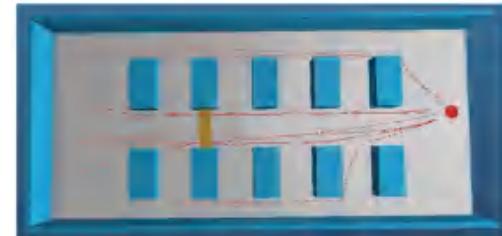


图 8 本文算法仿真图

Fig. 8 Algorithm simulation diagram of this article

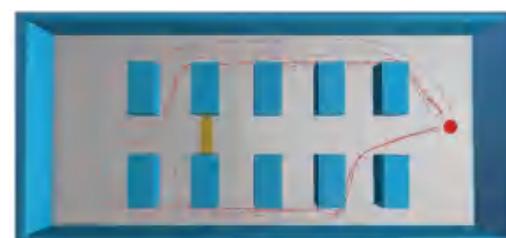


图 9 文献[14]的算法仿真图

Fig. 9 Algorithm simulation diagram in Literature [14]

3.2 仿真平台

本文采用 C++ 作为构建实验平台编程语言, 利用 CMake 构建项目工程, 采用 Vulkan 作为渲染 API, 采用 Qt 构建软件平台界面。通过 ECS 架构对场景中实例进行批量管理, 采用资源池化技术实现资源复用。仿真平台界面如图 10 所示。

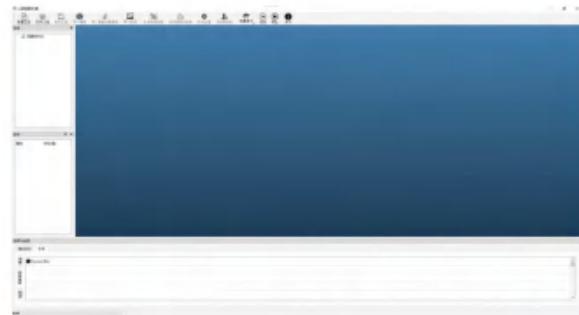


图 10 仿真平台界面

Fig. 10 Simulation platform interface

3.3 恐慌因子与死亡因子

研究[17-18]表明行人在黑暗环境下,由于恐慌和视力受到阻碍,而无法明确地找到期望方向、即出口方向,此时行人往往会表现出群体行为、即跟随群体的从众行为。这里假设每个行人 i 可能会选择个体方向 e_i 或者跟随在特定半径 R_i 中 j 个周围行人的平均方向 $\langle e_j^0(t) \rangle_i$, 或者尝试将两者混合。假设对这 2 种情况的选择是通过参数 p_i 加权实现。研究推得的数学公式如下:

$$e_i^0(t) = N((1 - p_i)e_i + p_i \langle e_j^0(t) \rangle_i) \quad (5)$$

其中, $N(z) = z / \|z\|$ 表示对向量 z 的单位化。因此,当 p_i 较小时,更倾向于个体行为表现;当 p_i 较大时,更倾向于群体行为表现。因此, p_i 反映了个体 i 的惊恐程度。

文献[18-19]指出,在国内外重大拥挤踩踏事故中,人群拥挤造成死亡的比例约占所有死亡原因的 70%。所以由于周围人群过多而造成的拥挤是造成人群疏散人员伤亡的第一大原因。本小节将对拥挤造成的人群伤亡进行数学建模,假设智能体 i ,其相邻智能体 n 与智能体 i 的距离 $d \leq (r_i + r_n)$,则表示两智能体存在挤压风险。添加参数阈值 e 表示死亡阈值,并获取存在挤压风险的相邻智能体 n 的速度 v_n ,得到则死亡代价函数为:

$$d_i = N\left(\sum_{j=0}^n e^{\frac{1}{\|d_{ij}\| + \|v_j\| + \|d_{ij} \cdot v_j\|}}\right) \quad (6)$$

其中, \vec{d}_{ij} 表示智能体 i 与相邻智能体的距离相邻; \vec{v}_j 表示智能体 i 与智能体 j 的相对速度;正则项 e 为自然常数,将每个死亡代价函数的值限制在 0 到 1 之间; N 表示归一化函数。将距离相邻与相对位置做点积处理来获取相邻智能体对当前智能体 i 的挤压程度,并对时间进行积分累计。死亡因子示意如图 11 所示,死亡因子大致可以理解为智能体所受挤压持续信息,其中 $\vec{d}_{ij} \cdot \vec{v}_j$ 部分反映的是相邻智能体对当前智能体 i 的挤压状况,通过对事件的积分得到一段时间内智能体 i 受到周围智能体 j 的持续挤压情况。为平衡挤压时间和挤压强度,本文采用阈值 0.6,即当 $d_i > 0.6$ 时,判定智能体处于伤亡状态,此时智能体被认定为静态障碍物。

压持续信息,其中 $\vec{d}_{ij} \cdot \vec{v}_j$ 部分反映的是相邻智能体对当前智能体 i 的挤压状况,通过对事件的积分得到一段时间内智能体 i 受到周围智能体 j 的持续挤压情况。为平衡挤压时间和挤压强度,本文采用阈值 0.6,即当 $d_i > 0.6$ 时,判定智能体处于伤亡状态,此时智能体被认定为静态障碍物。

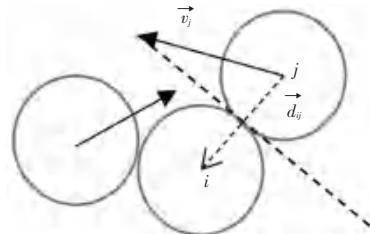


图 11 死亡因子示意图

Fig. 11 Schematic diagram of death factors

3.4 基于宿舍场景的实验仿真与分析

实验硬件参数为 AMD Ryzen 3 3100 4-Core Processor 3.60 GHz、16 G 内存、RTX3060 12 G。

宿舍楼一楼有 2 处应急逃生出口,每层楼各有 2 处宽 2.5 m 的应急逃生出口,且假设处于常开状态。宿舍楼梯为平行双跑式走廊,宽 1.5 m、单节楼梯高 15 cm。疏散人群假设为 20~25 岁的青年男子占 95%,5% 为宿舍员工、为 30~45 岁的中年女性。根据参考文献分析可知,青年男性的疏散期望速度为 1.2 m/s,中年女性为 1 m/s,每间宿舍最多容纳 4 人。二层以上宿舍每层有 17 间宿舍,一层为 12 间,共 8 层楼,最大可容纳 524 人。

人群伤亡位置如图 12 所示。由图 12 可知,死亡人数主要集中于楼梯转角位置。转角位置发生伤亡的原因是转角处速度变缓,导致人群拥挤于此。恐慌因子为 0.32 的人群疏散轨迹如图 13 所示,恐慌因子为 0.47 的人群疏散轨迹如图 14 所示。由图 13 和图 14 可知,当恐慌程度较高时、在楼梯位置的人群疏散轨迹线较密集,而当恐慌程度较低时、人群轨迹线较为松散。

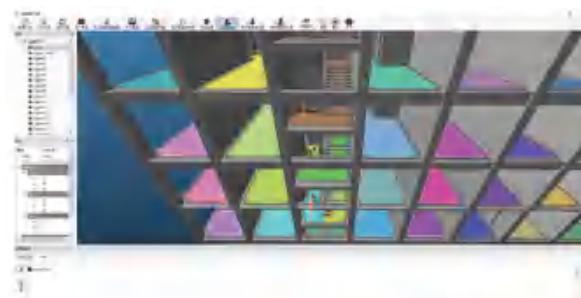


图 12 人群伤亡位置

Fig. 12 Crowd casualty location

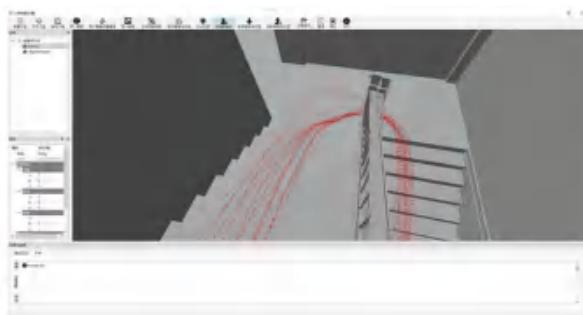


图 13 恐慌因子为 0.32 人群疏散轨迹图

Fig. 13 Crowd evacuation trajectory chart while panic factor is 0.32

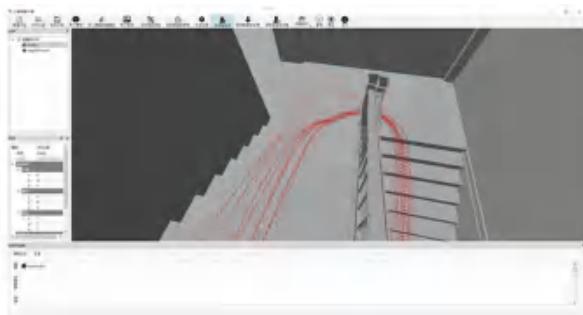


图 14 恐慌因子为 0.47 人群疏散轨迹图

Fig. 14 Crowd evacuation trajectory chart while panic factor is 0.47

恐慌因子疏散时间数据结果如图 15 所示。由图 15 可知,当恐慌因子为 0.32 时,相较于较低的恐慌和较高的恐慌,适中的恐慌和紧张能够更有利于人群在较为狭窄的区域进行疏散,当出现过度恐慌情况时,会使得在原本较为宽敞的区域聚集更多人群,增加人群的伤亡,所以恐慌情绪适当能在一定程度上优化人群疏散表现。恐慌因子人群伤亡人数数据结果如图 16 所示。由图 16 可知,随着恐慌因子增加,人群的伤亡人数也在适度增加,但是适度的恐慌增加的伤亡人数较为客观。

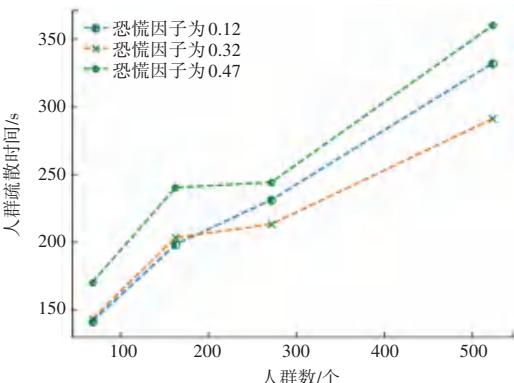


图 15 恐慌因子疏散时间数据图

Fig. 15 Panic factor evacuation time data chart

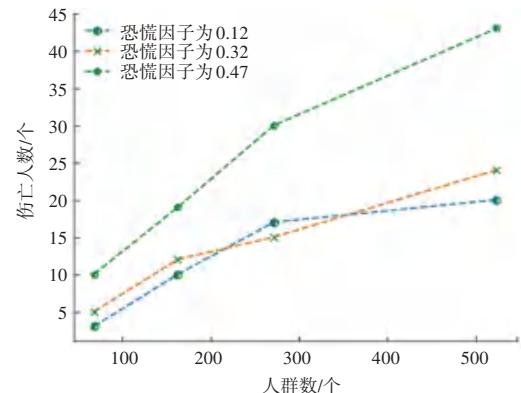


图 16 恐慌因子人群伤亡人数数据图

Fig. 16 Panic factor crowd casualty data chart

4 结束语

为解决社会力算法在处理非凸多边形障碍物时的停滞缺陷,本文提出了考虑智能体所处环境的高度信息的人群疏散仿真算法,通过将环境划分为不同高度的连通域来实现更准确的环境感知。算法还能够生成更真实和合理的全局导航路径,从而提高人群疏散的效率。通过考虑高度信息,智能体能够根据实际环境情况自主决策何时需要跨越障碍物,同时也避免了停滞问题的出现。实验结果表明,该算法在人群疏散领域具有一定的创新性和实用性。

参考文献

- [1] HELBING D, MOLNAR P. Social force model for pedestrian dynamics [J]. Physical Review E, 1995, 51(5): 4282–4286.
- [2] HELBING D. Order and disorder in traffic and self-driven many-particle systems [J]. AIP Conference Proceedings, 2002, 622: 239–250.
- [3] LIANG Jing, PATEL U, SATHYAMOORTHY A J, et al. Realtime collision avoidance for mobile robots in dense crowds using implicit multi-sensor fusion and deep reinforcement learning [J]. arXiv preprint arXiv, 2020. 03089, 2020.
- [4] KARAMOUZAS I, SOHRE N, HU Ran, et al. Crowd space: A predictive crowd analysis technique [J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(6): 186.
- [5] KARAMOUZAS I, SOHRE N, NARAIN R, et al. Implicit crowds: optimization integrator for robust crowd simulation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2017, 36(4): 1–13.
- [6] FIORINI P, SHILLER Z. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles [J]. International Journal of Robotics Research, 1998, 17(7): 760–772.
- [7] BERG J V D, LIN Ming, MANOCHA D. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation [C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 1–8.
- [8] DUTRA T B, MARQUES R, CAVALCANTE-NETO J B, et al. Gradient-based steering for vision-based crowd simulation algorithms [J]. Computer Graphics Forum, 2017, 36 (2):

337-348.

- [9] 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: Statistical Mechanics and its Applications*, 2009, 388(17):3600-3608.
- [10] HOU Lei, LIU Jianguo, PAN Xue, et al. A social force evacuation model with the leadership effect [J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2014, 400: 93-99.
- [11] 李珊珊, 钱大琳, 王九州. 考虑行人减速避让的改进社会力模型 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(3): 623-628.
- [12] JI Qingge, WANG Fuchuan, ZHU Ting. VPBS: A velocity-perception-based SFM approach for crowd simulation [C]// Proceedings of 2016 International Conference on Virtual Reality and Visualization. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 317-324.
- [13] JIANG Yanqun, CHEN Bokui, LI Xi, et al. Dynamic navigation field in the social force model for pedestrian evacuation [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2020, 80: 815-826.
- [14] 李俊. 结合最短路径改进的社会力人群疏散仿真模型 [J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(8): 264-270.
- [15] 宋妙然, 李子豪, 魏泽涵. 基于灰色系统和分水岭优化算法在解决图像提取与分割中的研究 [J]. *黑龙江科技信息*, 2021(14): 91-92.
- [16] 张毅. 分水岭算法在图像分割中的应用研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2013.
- [17] 谢启苗, 王焘, 王维莉. 考虑恐慌心理的人员疏散模型 [J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(7): 180-187.
- [18] 江华良. 突发危机事件中基于资源约束的群体恐慌心理和行为特征研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [19] 张蒙, 朱记伟, 朱庆华, 等. 基于 BIM 与 Pathfinder 的楼梯间堆积物对高层住宅建筑人群疏散影响研究 [J]. *工程管理学报*, 2019, 33(5): 74-79.