

基于改进势能场模型的地铁车站应急疏散 动态仿真

洪玲^{1,2}, 高佳³, 邱树涵^{1,2}, 朱炜^{1,2}

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804;
3. 安诚傲林规划设计顾问(上海)有限公司, 上海 200331)

摘要: 通过车站环境构成及其对乘客疏散行为作用的分析, 提出以设施或设备为目标点的吸引势能场和以事件或障碍物为核心的排斥势能场计算模型, 并设计基于最短距离的势能场迭代生成算法。在此基础上, 提出势能场模型和改进社会力模型的融合方法, 建立突发事件下地铁车站应急疏散动态仿真模型。最后, 利用Unity平台和C#编程开发技术对上述模型进行了初步实验验证与效果分析。

关键词: 地铁车站; 动态仿真; 应急疏散; 势能场模型; 社会力模型

中图分类号: U293.1

文献标志码: A

Dynamic Simulation on Emergency Evacuation in Metro Stations Based on Improved Potential Energy Field Model

HONG Ling^{1,2}, GAO Jia³, QIU Shuhan^{1,2}, ZHU Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Hyder ACLA Consulting (Shanghai) Limited, Shanghai 200331, China)

Abstract: By analyzing the station environment impact on passenger evacuation behaviors, the calculation methods of attracting potential energy field for facilities and equipment as well as repulsive potential energy field for events and obstacles were proposed. Then an iterative generation algorithm of potential energy field based on the shortest distance was developed to describe the station environmental structure and the environmental impact mechanism on passenger behaviors. On this basis, a

fusion method combining the potential energy field model and the improved social force model was put forward, and a dynamic simulation model for emergency evacuations in metro stations was established. Finally, Unity platform and C# programming technology were used to demonstrate and verify the proposed method.

Key words: metro station; dynamic simulation; emergency evacuation; potential energy field model; social force model

地铁车站作为城市中的重要交通节点, 具有人员客流密集、空间封闭狭长、设施和设备种类繁多、疏散设备数量和能力有限、车站布局不规则等特点, 给车站突发事件下的应急疏散工作带来挑战。目前, 对于应急疏散研究的最直接方式是在车站内进行疏散实验, 但一方面在车站内进行大规模的人群疏散实验各项成本高、不安全, 另一方面疏散实验只能在车站建成之后进行, 具有很大的局限性。因此, 仿真作为一种安全、直观且低成本、易实现、可重复的方法, 在车站设计阶段可以提供优化设计建议, 在车站运营阶段可以帮助并指导客流疏散组织工作, 逐渐成为一种研究应急疏散过程及策略的有效手段。现有模拟行人疏散的仿真模型^[1-4], 大多是人工预先规划疏散路径, 并采用常态行为替代应急行为, 因此对突发事件下地铁车站疏散环境的复杂性与动态性考虑不足, 从而影响仿真结果的准确性和有效性。

从对地铁车站火灾场景特征的研究出发, 提取各类应急事件影响的普遍规律, 利用改进的势能场

收稿日期: 2019-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(71701152); 上海市国际科技合作基金(18510745800)

第一作者: 洪玲(1972—), 女, 教授级高工, 工学博士, 主要研究方向为交通运输规划与管理。

E-mail: ss980308@tongji.edu.cn

通信作者: 朱炜(1982—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为轨道交通运营管理。

E-mail: zhuweimail@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

模型对疏散环境进行模拟,并结合社会力行为模型提出统一的“环境刺激+受体反应”仿真方法及模型,建立应急疏散动态仿真机制。

1 应急疏散动态仿真模型的总体架构

疏散仿真的重点研究内容主要包括三部分:静态空间结构建模、行人行为驱动引擎和外部动态刺激环境。

(1) 静态空间结构建模

相关研究比较成熟,国内外的各类商业软件和研究性模型均可实现基于 AutoCAD 底图的自动识别建模。

(2) 行人行为驱动引擎

相关研究也比较深入,国内外学者对行人仿真的研究经历了宏观模型^[5-6]、中观模型^[7-9]、微观模型^[10-15]等不同阶段。微观模型,尤其社会力模型,能够连续计算行人行进过程中的行为变化(如自组织现象),对仿真行人的行为特征描述更加细腻,更符合行人运动的实际特征,还可通过个体“涌现”的方式真实模拟群体行为^[16-17]。

(3) 外部动态刺激环境

作为疏散仿真的热点与难点,相关研究还不完善,尤其是针对疏散环境、事件影响、处置措施等方面的研究难以满足实际的评估需求。

现阶段多数行人仿真软件针对应急条件的解决思路是忽略应急事件的环境影响,仅通过设置疏散路径来分析相关问题(实际为简单的“疏散仿真”),或者针对某一特定的物理场景来开展相关研究,但按照此种研究思路,则需要穷举各类应急事件场景,势必加重未来行人仿真研究的压力。

针对目前行人仿真应急环境研究的不足,利用改进的势能场模型模拟典型应急事件影响的普遍规律,并结合社会力模型,构建能够实现“环境刺激+受体反应”的智能体模型体系(基于外部环境刺激而切换不同行为选择),为真实模拟车站内的动态疏散行为和不同引导方案效果比较提供理论基础。模型体系的总体架构如图1所示。通过势能场模型与社会力模型的改进与融合,构建了响应环境刺激的三组主要应急驱动力,即势能场作用力、人与障碍物之间的应急作用力以及人与人之间的应急作用力。

既有研究主要是通过常态环境中,重新(通常是人工手动)设定疏散目的地和路径来模拟疏散场景,但实际的疏散行为和疏散环境均没有变化,仍为

常态环境。通过势能场概念,模拟了应急事件和管制措施等对疏散环境的影响(以事故发生源为中心呈涟漪扩散形式),重新构造了车站内疏散吸引区域的“高差”变化,引导乘客自动疏散。疏散环境势能场变化如图2所示。

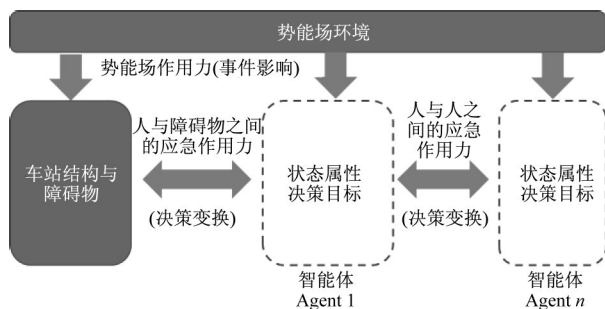


图1 基于势能场环境刺激的智能体模型架构

Fig.1 Agent model framework based on environment stimulation of potential energy field

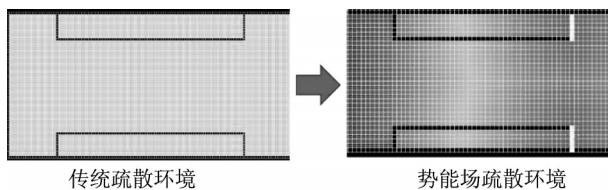


图2 疏散环境的势能场变化

Fig.2 Changes of potential energy field in evacuation environment

2 基于改进势能场模型的建模方法

地铁车站环境建模是应急疏散动态仿真建模的第一步,车站结构、设施设备和障碍物等对站内乘客在目标选择、路径规划和走行运动方面的影响属于静态因素,在此基础上进一步重点考虑车站的特定事件(如火灾等)对乘客应急疏散行为的动态影响。这是实现动态疏散外部刺激的主要来源,也是本研究模型区别于其他应急疏散仿真模型的关键特征。

2.1 车站改进势能场模型构建

“势能”的概念来源于物理学,指由于各物体间存在相互作用而具有的、由各物体间相对位置决定的能。以“势能场”进行人群疏散仿真则是为地图上每个点构造势能值,使事件发生源(如火灾等)的势能场最大,同时安全方向的出入口、楼扶梯、导向标志等的势能场最小,进而为仿真环境构建了可以随着时间、空间变化而变化的外部动态刺激条件,对各个仿真 Agent 的疏散行为模型产生影响和刺激。

利用势能场模型构建上述仿真环境,不是为了模拟每个事故源本身的特征(否则会陷入对特定事故的穷举分析),而是为了模拟事故发生后在疏散方向上车站环境的变化,进而自动引导仿真乘客实现动态疏散。具体事件影响强度的变化应该通过对不同事件影响强度的统计来逐渐完善标定,并通过公式中的系数来调整。

传统上势能场构造的方法有2种:第1种是人工势能场的方法,由Khatib于1986年提出并应用于机器人的无碰撞路径规划^[18],指的是对在运动场景中的个体构造2种力——目的地的吸引力和障碍物的排斥力,由这2种力分别形成2个不同的势函数,在计算势能时每一点的总势能为吸收势能与排斥势能之和;第2种是通过求解带有狄利克雷函数边界条件的拉普拉斯方程来构造势能场^[19],利用调和函数构造势能场相比人工势能场的方法计算量较小。在实际应用中,障碍物处为势能最小点,障碍物的个数越多,局部势能极小点的个数就越多。当行人运动到局部势能极小点时,行人将陷入局部最小点无法运动,这显然是不符合实际的。这种方法的目的是引导仿真乘客到达最终目的地,一般情况下成立,但在特殊情况下(如最终目的地附近有一块较小障碍物),按照传统计算方法,越接近最终目的地吸引力就越小,但越靠近障碍物斥力就越大,有可能造成引力和斥力相当,进而造成仿真乘客震荡徘徊。

为此,提出“改进势能场”概念,在势能场的计算中仅考虑目标点的吸引势能,而将障碍物的作用抽象为对目标点吸引作用的阻碍。由于障碍物的作用是阻碍乘客沿直线方向前进,因此目标点在遇到障碍物时,会绕过障碍物而对障碍物另一边的点产生作用,即目标点是沿着最短路线的方向对乘客产生作用的。最短路线越长,则对应点的势能越高,因此将问题转化为如何求解两点间的最短路径和最短距离。具体地,两点间最短距离的计算和求解主要遵循以下原则:

(1) 在可见的两点之间,直线距离为最短(见图3)。

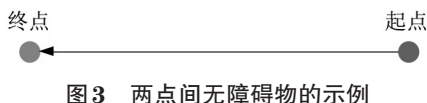


图3 两点间无障碍物的示例

Fig.3 Example of no obstacle between origin and destination points

(2) 在中间有直边障碍物(如栏杆或矩形障碍物)的两点之间,最短路线必通过直边障碍物的端点(见图4)。

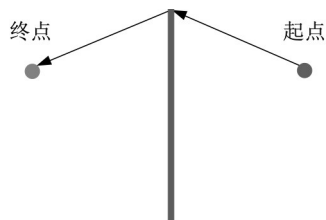


图4 两点间有直边障碍物的示例

Fig.4 Example of straight edge obstacles between origin and destination points

(3) 在中间有曲边障碍物(如大厅立柱等)的两点之间,最短路线必与曲边障碍物相切,并沿障碍物的边缘延伸一段距离(在实际模拟沿障碍物的边缘延伸时采用多段直线代替曲线的方式),如图5所示。

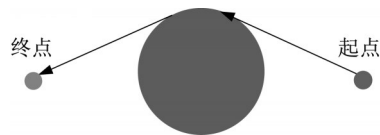


图5 两点间有曲边障碍物的示例

Fig.5 Example of curved edge obstacles between origin and destination points

此外,在同一场景下可能有多条满足上述原则的路线,则选取最短的一条来计算距离,如图6所示。图6中,按照以上3个原则,从起点到终点的最短路径可能为a、b、c中的一条,这取决于障碍物的位置、大小和起点与终点的位置。同时,在实际仿真时,考虑到乘客不会紧密地沿着障碍物的边缘行走,在生成势能场时将障碍物适当地放大一部分,以反映该现象。

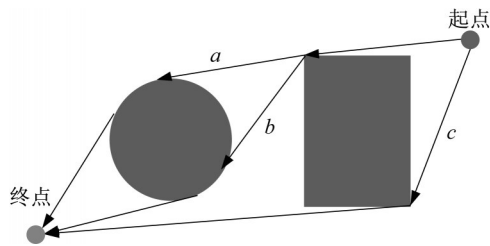


图6 同时满足3个原则的示例

Fig.6 Example satisfying three principles at the same time

在所建立的车站环境改进势能场模型中,势能场的作用在于体现目标点对乘客的吸引作用(即乘客趋向于目标点的作用)。在实际车站中,往往有多个出口与屏蔽门,因此乘客往往也有着多个可选择的目标点。这种情况下的势能场为具有多个目标点

的势能场,每个位置的势能为到所有目标点的最短距离的最小值。

2.2 车站改进势能场迭代生成算法

上述基于改进势能场模型进行车站环境建模的优点是符合实际的,不会产生局部最小值。在此方法的基础上扩展后,不但可以描述事件(如火灾等)发生源、障碍物等的斥力,还可以为车站中指路标识的设立提供指导。

为了利用计算机生成上述车站环境势能场,通过逻辑分析建立势能场的生成算法。

首先考虑最简单的情况,即只有一个出入口的一层车站的情况。对于给定场景,由于要计算场景中所有可达点的势能值,而地图中相近的许多点在最短路径的选择上具有明显的相似性,并且从上文中可以看出最短路径的寻找较为困难,因此在生成势能场时不能针对每个具体的点去寻找最短路径,而是要从出口处出发,逐步遍历图中的各个点,通过迭代算法来实现势能场的生成。

针对单一出口的单层车站建立可行的迭代算法。在迭代过程中,设 A 为该轮迭代中要考虑的点集, B 为在该轮迭代中发现的下一轮要考虑的点集, C 为递归时的出发点集。

迭代算法的具体实现步骤如下所示:

步骤1 从出口开始逐步向外迭代,即将出口的势能赋为初始势能,出口周围一圈的点(如果是通道点)放入 A 中。

步骤2 对 A 中的所有点进行考虑。若点 P 与出口的连线没有经过障碍物,说明该点对出口可见,则将 P 点处的势能值赋为 P 到 A 的距离加上初始势能,并将 P 周围一圈的点放入 B 。若点 P 与出口的连线经过障碍物,说明该点对出口不可见,对该点做标记。

(1) 如果点 P 附近没有标记点,就说明该点是应急疏散时的拐点,将该点添加进集合 C 。

(2) 如果点 P 附近存在标记点,就说明该点是对出口可见区域的边界点。

注意,对于以上2种情况,均不将 P 周围的点放入 B 中,即对可见区域的遍历到此为止。

步骤3 进行多次迭代后,若 B 中没有其他点,则说明对该出口可见区域的遍历已经完成。此时,对 C 中所有点进行函数递归调用,即将 C 中的每个点单独作为出口,将未遍历区域作为新的场景,进行势能场的求解。

步骤4 若在整个程序中,某个点被遍历了多次,

则说明该点到出口存在多条符合上文中3个原则的路线(即图6中的复杂情况)。此时,将该点处最小势能值作为该点的势能值。

步骤5 当所有点都计算出最小势能值后,程序结束。

如图7所示,计算目标点为出口的势能场时,先计算对出口可见的区域①的势能场。在第1次迭代中发现了 A_1 、 A_2 这2个拐点;第2次迭代以 A_1 、 A_2 为目标点, A_1 、 A_2 处势能为初始势能,计算区域②的势能场;同理第3次迭代以 B_1 、 B_2 为目标点,计算区域③的势能。对于复杂的区域,以此类推。

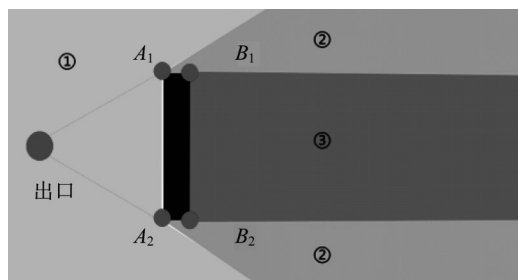


图7 迭代算法生成势能场

Fig.7 Potential energy field generated by iterative algorithm

对于多出口情形,对各个出口逐一进行遍历。对某次遍历中的出口,如果程序运行到所计算的势能值比场中已有的势能值高的位置(说明这个位置是离乘客最近出口区域的分界点),程序就不再从此向远处遍历。该方法相比于对各个出口遍历取最小值的方法大大缩短了程序的运行时间。

3 改进势能场模型与社会力模型的融合方法

行人行为模型根据描述行为细节的详细程度分为宏观、中观和微观模型。宏观模型描述的对象是行人的集体交通行为,描述的行人流信息较为简单,一般为行人流量、速度和密度等。中观模型位于宏观模型和微观模型之间,主要代表是格子气模型,将平面划分为小格子或三角形用于描述行人运动,但不描述行人之间的相互作用力。微观模型描述的对象是单个行人的交通行为,描述的信息较为详尽,如行人的位置、速度和加速度等,由多个行人的位置和速度可以得到行人流量、速度和密度等宏观量,因此微观行人模型是未来发展的重要方向。微观行人模型又分为离散模型(如元胞自动机)和连续模型(如社会力模

型),其中连续模型对行人行为的模拟更为细腻和真实,而且社会力模型具有接受各类外界影响的参数接口。

社会力模型为多粒子自驱动模型,将行人类比为运动形态符合牛顿第二定律的粒子,并假设质量为单位1,最大特点是行人的坐标和速度都是连续的而不是离散的。社会力模型主要考虑行人的内在动机,将内在动机类比为各种作用力即“社会力”,并大体分为三类:一是为到达目的地行人自身产生的驱动力 F_d ;二是人与人之间的作用力 $F_{a\beta}$,其中又分为人与人之间的吸引力、人由于“领域效应”而产生的心理排斥力、人与人之间由于相互接触而产生的摩擦力和挤压力等;三是行人对各种障碍物或边界的躲避作用力 F_{aw} 。“社会力”计算式如下所示:

$$m_a a_a = F_d + \sum_{\alpha \neq \beta} F_{a\beta} + \sum_W F_{aw} + \xi \quad (1)$$

式中: W 表示障碍物; m_a 表示行人 α 的质量; a_a 表示行人 α 的加速度;下标 β 表示其余行人; ξ 为随机项。 F_d 可通过势能场作用力予以替换,以反映应急事件的疏散影响(为疏散仿真乘客自动指明方向)。 F_d 本身含义即为按照“期望”速度向目的地运动的力,与本研究势能场作用吸引力含义类似,因此其功能是可以替代的。

在疏散仿真中,社会力模型有着以下优点:

(1) 行人之间的作用力、领域效应以及行人受障碍物的挤压作用力表示起来比较简单。

(2) 模型中速度与加速度方向均比较丰富。

(3) 可以体现多种现实情形,如行人的从众行为、自组织行为和挤压行为等。

另一方面,结合改进势能场模型生成的精细网格的势能值,可构成完整的地铁车站势能场。目的地的势能值最低,其余网格距离目的地的距离越远,势能值就越高(事故源最高);此处的距离并非到目的地的直线距离,而是在不穿过障碍物的前提下,到目的地的最短距离;每个网格的势能值是对其到最近某个目的地的最短行走距离的量化描述,乘客沿着势能下降最快的方向行走,就可以尽可能快地走向最近的目的地;在势能场的引导下,乘客结合周围可感受范围内的环境信息,在宏观层面上进行决策以更快地到达目标点。

同时,在人群疏散仿真模型建立的过程中,不仅要考虑目标点对乘客的作用,还要考虑人与人之间的相互作用、障碍物对人的作用。由于社会力模型能较好地反映运动过程中多个乘客之间相互作用的

变化,特别是在模拟领域效应、挤压等现象上的优越性,在实时模拟中有着较好的效果,因此仍采用社会力模型来体现人与人之间的相互作用、障碍物对人的作用。

综上,地铁车站乘客所受到的合力由势能场产生的指引作用力 F_a 、乘客之间的作用力,以及行人与障碍物之间的作用力等三力合成,乘客在合力的作用下产生加速度 a_a ,计算式为

$$m_a a_a = F_a + \sum_{\alpha \neq \beta} F_{a\beta} + \sum_W F_{aw} \quad (2)$$

(1) 势能场的作用力

势能场的作用力为式(2)等号右边的第一项,即由势能场产生的指引作用力。根据车站环境建模,势能场对乘客的作用力指向势能的最快下降方向,并且正比于势能场梯度的大小,表达式如下所示:

$$F_a(q) = -M \nabla U_a(q) \quad (3)$$

式中: M 为比例系数,代表了仿真效果与实际情况之间的贴合度,其取值可通过对历史事件的仿真效果评估来拟定; q 为根据仿真环境中划分的精细网格像素单位确定的仿真乘客位置(虚拟相对位置)。 $U_a(q)$ 的计算式为

$$U_a(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{D(q_o, q)} - \frac{1}{D_o} \right)^2, & D(q_o, q) \leq D_o \\ 0, & D(q_o, q) > D_o \end{cases}$$

式中: q_o 为障碍物坐标; $D(q_o, q)$ 为仿真乘客到障碍物的最小距离; D_o 为障碍物所能影响到的范围。

(2) 人与人的作用力

乘客在行走过程中,出于“领域效应”的心理作用总是与其他乘客保持一定距离。乘客 α 与乘客 β 之间的排斥力 $F_{a\beta}$ 由心理排斥力 $F_{Pa\beta}$ 和身体接触力 $F_{Ga\beta}$ 两部分构成,计算式如下所示:

$$F_{a\beta} = F_{Pa\beta} + F_{Ga\beta} \quad (4)$$

在经典社会力模型中,心理排斥力 $F_{Pa\beta}$ 的计算式如下所示:

$$F_{Pa\beta} = \sum_{\beta=1, \beta \neq \alpha}^{N_p} A \exp\left(\frac{-\epsilon_{a\beta}}{B}\right) e_{a\beta} \quad (5)$$

式中: N_p 是乘客 α 周围一定视野范围对 α 产生作用的人数; A 是乘客 α 心理排斥力的强度; B 是心理排斥力的作用范围; $e_{a\beta}$ 是乘客 β 指向乘客 α 的单位方向向量。乘客 α 与乘客 β 之间的距离(去除乘客的半径)

$$\epsilon_{a\beta} = d_{a\beta} - (R_\alpha + R_\beta) \quad (6)$$

式中: R_α 是乘客 α 的身体半径; R_β 是乘客 β 的身体半径; $d_{\alpha\beta}$ 是乘客 α 与乘客 β 之间的距离。当 $\epsilon_{\alpha\beta}$ 为负时,除了心理排斥力,乘客还会受到身体接触力,计算式如下所示:

$$F_{G\alpha\beta} = \sum((-\epsilon_{\alpha\beta}k_n)e_{\alpha\beta,n} + (\epsilon_{\alpha\beta}k_t)e_{\alpha\beta,t}) \quad (7)$$

式中: k_n 、 k_t 分别表示挤压力和摩擦力对 $\epsilon_{\alpha\beta}$ 的比例系数; $e_{\alpha\beta,n}$ 、 $e_{\alpha\beta,t}$ 分别表示法线和切线方向的单位方向向量。式(7)中,等号右边第一项为乘客 α 受到的挤压力,等号右边第二项为乘客受到的摩擦力。

(3) 人与障碍物或边界的力

乘客 α 与障碍物 W 之间同样存在排斥力。该排斥力与乘客之间的力类似,同样分为心理排斥力和身体接触力,故采用类似的计算式,如下所示:

$$F_{\alpha W} = A \exp\left(\frac{-\epsilon_{\alpha W}}{B}\right) e_{\alpha W} + \sum((-\epsilon_{\alpha W}k_n)e_{\alpha W,n} + (\epsilon_{\alpha W}k_t)e_{\alpha W,t}) \quad (8)$$

经过从仿真环境中势能场的生成,到将其用于改进社会力模型后,乘客将会沿着势能场所指引的方向在其他乘客、障碍物之间的共同作用下到达目标点。

此外,本研究所关注的主要是应急事件所造成的疏散空间方向指向方面的变化,进而引导仿真乘客实现自动疏散。在此基础上,实际疏散过程中应急事件还可能会对疏散乘客产生“心理”上的压迫,使乘客在空间方向指向变化的基础上进一步产生诸如“回返行为”、“退避行为”、“从众行为”、“竞争行为”等行为^[15],该部分的内容需要在本研究基础上进一步完善。

4 仿真实验与分析

利用Unity平台结合C#编程开发技术,基于上述模型及算法初步搭建地铁车站势能场生成仿真实验系统。

根据所要绘制车站的节点坐标信息,通过Unity平台输入网格边长,将楼层、楼梯、扶梯等划分成精细化网络,为势能场的建立提供环境,其中运用了计算机图形学的栅格算法和扫描线算法。车站设施势能场建模和表示如图8所示。

通过对全局势能场和局部势能场的生成,计算出每个网格的势能值并用色阶图来直观地表示距离远近,如图9、10所示。深灰色代表势能值最高,浅灰色代表势能值最低,亮白色代表过渡带。



图8 车站设施建模和表示

Fig.8 Station facility modeling and representation

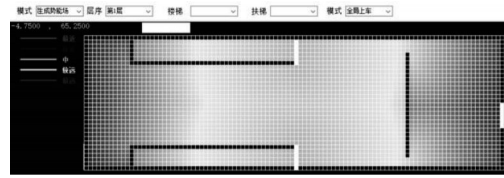


图9 车站站厅层势能场生成

Fig.9 Potential energy field generation for station hall layer

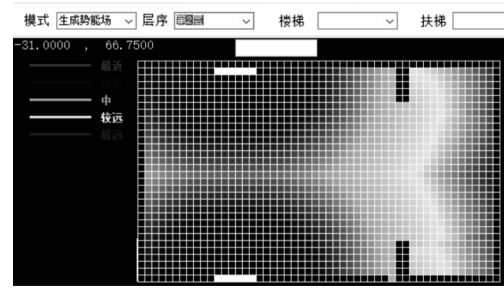


图10 车站站台层势能场生成

Fig.10 Potential energy field generation for station platform layer

势能场模型构建完成后即可为社会力模型提供详细的环境影响因素,进而影响社会力模型的参数取值和执行效果。

基于以上成果,使用Unity Prefab完成基本模型平台(构建车站静态结构,并在后台加载行人行为驱动引擎(社会力模型)、外部动态刺激环境模型(势能场模型))的建立。Unity Prefab是Unity2D软件的一类基本对象,对仿真中的物体外观、属性、物理特征做出了基本描述。图11为所用到的Unity Prefab及所代表的对象。

利用Unity Prefab构建通路、验票闸机、车站扶梯、车辆、车站出口等多个基本的Prefab对象,并且在合适的时机创建并生成,构造如图12和图13所示的多层车站。

经过各种经典场景的仿真实验,可以得到如下结论:

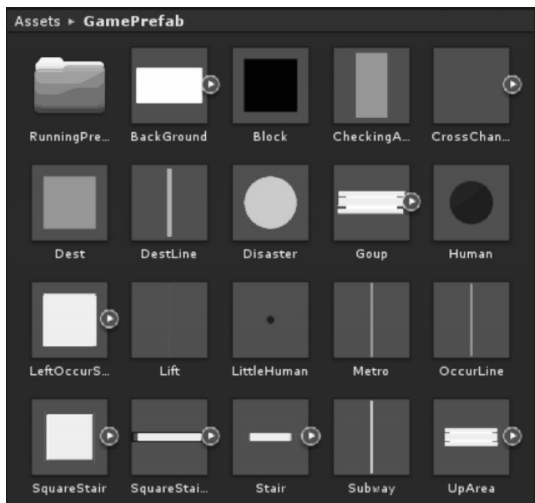


图11 Unity Prefab对象

Fig.11 Unity Prefab objects

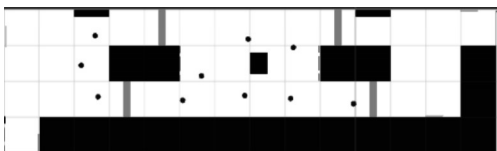


图12 车站站厅层的图像

Fig.12 Images of station hall layer



图13 车站的总图像

Fig.13 Images of station

(1)场景一:乘客从出口逃生

如图14所示(右图一并显示了势能场),图中点代表了移动的行人。左图中方格主要用于划分空间,使行人的相对位置醒目;右图中方格用于后续的势能场显示(每个方格显示某一颜色,通过不同方格颜色的渐变产生连续势能场)。

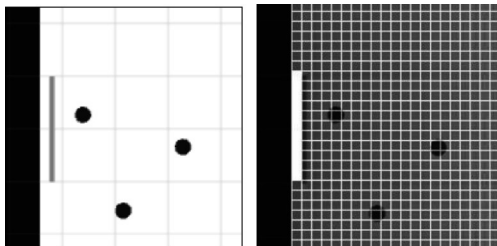


图14 乘客从出口逃生

Fig.14 Passengers escaping from the exit

上方乘客即将从左前方的车站出口处逃生。接触到车站出口时,乘客会显示已经逃生或出站,从车

站出口消失。

(2)场景二:乘客上楼、下楼等活动

如图15所示,乘客到达楼梯时可以进入楼梯、扶梯层,完成上楼、下楼的过程仿真。在常态时,扶梯是单向的,乘客只能通过对应的扶梯上下楼;在应急疏散时,扶梯停止运行,乘客可以双向通过。图15中,点代表了移动的行人,方格主要用于空间划分,使行人的相对位置醒目。

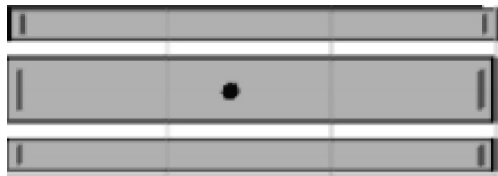


图15 乘客上楼、下楼等活动

Fig.15 Passengers going upstairs and downstairs

(3)场景三:乘客绕过障碍物

如图16所示(一并显示了势能场),在算法上采用改进势能场模型与社会力模型的融合方法,乘客在障碍物较远处便会产生转弯来躲避障碍物进而到达终点。这说明模型达到了克服传统社会力模型缺点的目的。图16中,点代表了移动的行人,方格用于后续势能场显示(每个方格显示某一颜色,通过不同方格颜色的渐变产生连续势能场)。

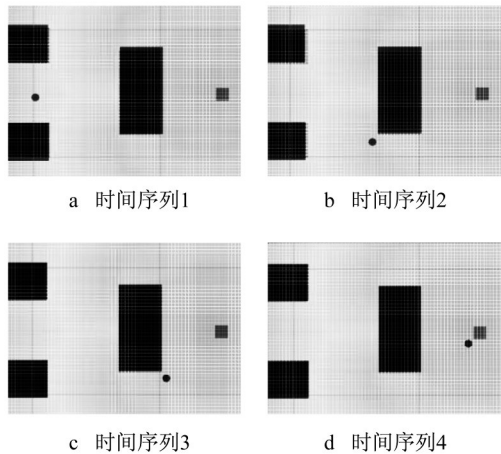


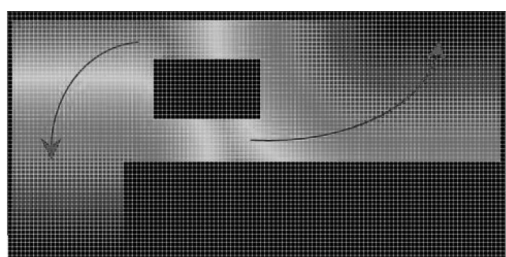
图16 乘客绕过障碍物

Fig.16 Passengers bypassing obstacles

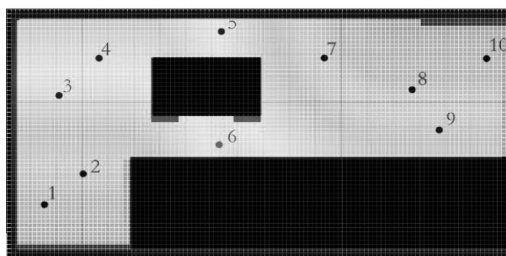
(4)场景四:乘客的归巢行为

如图17所示(一并显示了势能场),标号为6的乘客进入车站右上角出入口,出于归巢心理,其在应急疏散开始后没有选择从较近的左下角出口逃生,而是从右上角出口疏散。图17中,点代表了移动的行人,方格用于后续势能场显示(每个方格显示某一

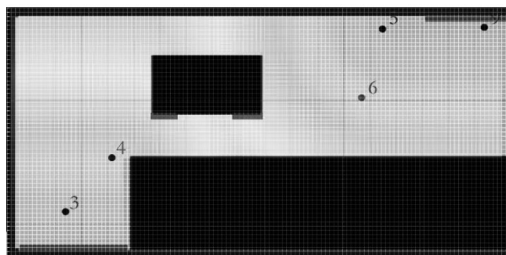
颜色,通过不同方格颜色的渐变产生连续势能场)。



a 势能场展示



b 初始状态



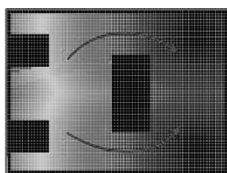
c 后续疏散状态

图17 乘客的归巢现象

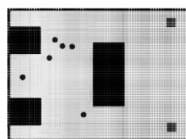
Fig.17 Phenomenon of returning to the nest

(5)场景五:乘客的从众行为

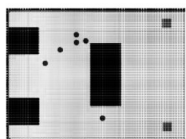
如图18所示(一并显示了势能场),处在线路交叉口的乘客在2个交叉口中选择了人多的1个交叉口,这很好地体现了实际中盲目从众现象。图18中,点代表了移动的行人,方格用于后续势能场显示(每个方格显示某一颜色,通过不同方格颜色的渐变产生连续势能场)。



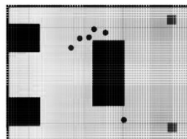
a 势能场展示



b 初始状态



c 中间状态



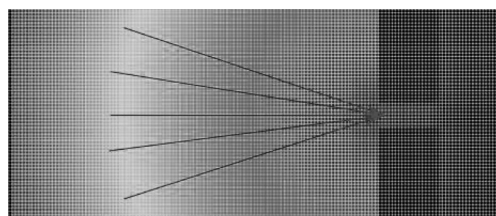
d 后续状态

图18 盲目从众现象的示例

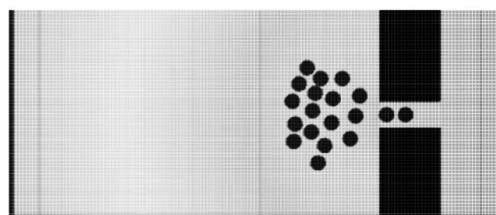
Fig.18 Example of blind herd phenomenon

(6)场景六:瓶颈现象

如图19所示(一并显示了势能场),当一群乘客处在一个较窄的交叉口时人与人之间相互拥挤,处于被拥挤状态的乘客半径相对减小,人群呈扇形分布。图19中,点代表了移动的行人,方格用于后续势能场显示(每个方格显示某一颜色,通过不同方格颜色的渐变产生连续势能场)。



a 势能场展示



b 疏散状态

图19 瓶颈现象的示例

Fig.19 Example of bottleneck phenomenon

(7)场景七:乘客自组织现象

如图20所示,当一个通道中存在两部分人群相向而行时,会不由自主地形成相间的相向人流,此现象能够加速人流通行的速度。图20中,点代表了移动的行人,方格主要用于空间划分,使行人的相对位置醒目。不同箭头代表了不同人群的行进方向,如深色点向左,浅色点向右。

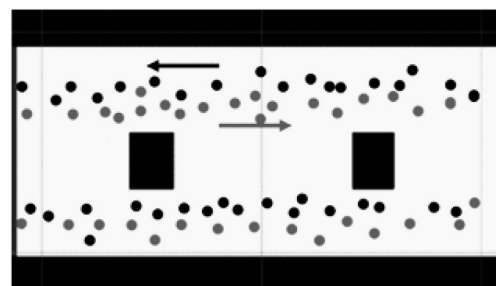


图20 乘客自组织现象的示例

Fig.20 Example of self-organizing phenomenon

从以上场景实验示例可以看出,基于本研究提出的模型及算法所建立的仿真系统能够较好地模拟并复现现实中地铁车站乘客在应急疏散时的一些经典行为现象,从而达到了预期目的。

5 结语

在已有研究基础上进一步改进了势能场模型和社会力模型,并提出了用于地铁车站应急疏散的动态仿真方法及模型。通过利用Unity平台和C#编程开发技术构建了原型系统,实验验证了基于所提出的仿真方法建立的仿真系统与实际情况的符合程度,可为地铁规划、设计及运营等各阶段的应急疏散仿真评估工作提供理论方法及模型基础。

参考文献:

- [1] 胡清梅, 方卫宁, 李广燕, 等. 地铁车站出口布局对人群疏散性能的影响[J]. 铁道学报, 2009, 31(3):111.
HU Qingmei, FANG Weining, LI Guangyan, *et al.* Influence of exit layout of a metro station on pedestrian evacuation [J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(3):111.
- [2] 毛军, 郝艳红, 李胜利, 等. 地铁车站火灾防灾减灾关键技术的研究[J]. 铁道学报, 2009, 31(4):115-120.
MAO Jun, XI Yanhong, LI Shengli, *et al.* Key technologies of prevention and control of subway station fire [J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(4):115.
- [3] 陈绍宽, 刘爽, 肖雄, 等. 基于M/G/c/c模型的地铁车站楼梯通道疏散能力瓶颈分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(1):7.
CHEN Shaokuan, LIU Shuang, XIAO Xiong, *et al.* M/G/c/c-based model of passenger evacuation capacity of stairs and corridors in metro stations [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(1):7.
- [4] 胡丽娟, 姚加林, 郑亮. 基于NetLogo的地铁车站人员紧急疏散仿真研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(12):2731.
HU Lijuan, YAO Jialin, ZHENG Liang. Emergency evacuation simulation for pedestrians at metro station by NetLogo [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(12):2731.
- [5] HENDERSON L E. The statistics of crowd fluids [J]. Nature, 1971, 229(2):381.
- [6] 温坚, 田欢欢, 薛郁. 考虑次近邻作用的行人交通格子流体力学模型[J]. 物理学报, 2010, 59(6):3817.
WEN Jian, TIAN Huanhuan, XUE Yu. Lattice hydrodynamic model for pedestrian traffic with the next-nearest-neighbor pedestrian [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(6):3817.
- [7] MASAKUNI M, TAKASHI N. Jamming transition in two-dimensional pedestrian traffic [J]. Physica A, 2000, 275(1):281.
- [8] 郭细伟. 基于非均匀格子气模型的人群疏散动力学模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
GUO Xiwei. Modeling of pedestrian evacuation dynamics based on the heterogeneous lattice gas model [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [9] HOOGENDOORN S, BOVY P H L. Gas-kinetic modeling and simulation of pedestrian flows [J]. Transportation Research Record, 2000(1710): 28.
- [10] 金泽人, 阮欣, 李越. 基于元胞自动机的火灾场景行人疏散仿真研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2018, 46(8):1026.
JIN Zeren, RUAN Xin, LI Yue. Evacuation simulation in narrow passage under fire scenario based on cellular automaton [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2018, 46(8):1026.
- [11] BLUE V J, ADLER J L. Cellular automata micro simulation for modeling bi-directional pedestrian walkways [J]. Transportation Research, Part B: Methodological, 2001, 35(3):293.
- [12] 叶建红, 陈小鸿, 俞梦骁. 个体特征对步行通道行人最大通过量的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(12):1834.
YE Jianhong, CHEN Xiaohong, YU Mengxiao. Impact analysis of individual characteristics on pedestrian maximum volume [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(12):1834.
- [13] HELBING D, MOLNAR P. Social force model for pedestrian dynamics [J]. Physical Review E, 1995, 51(5):4282.
- [14] 徐瑞华, 李璇, 高鹏. 上海世博会主入口广场客流集散仿真研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(11):1599.
XU Ruihua, LI Xuan, GAO Peng. Pedestrian flow simulation study at main entrance square of Shanghai World Expo Park [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(11):1599.
- [15] 洪玲, 徐瑞华, 段晓英. 基于动态切换的城市轨道交通车站应急疏散模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2016, 44(1):87.
HONG Ling, XU Ruihua, DUAN Xiaoying. Emergency evacuation model of urban rail transit station based on dynamic switching pattern [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2016, 44(1):87.
- [16] HONG Ling, GAO Jia, ZHU Wei. Self-evacuation modelling and simulation of passengers in metro stations [J]. Safety Science, 2018, 110:127.
- [17] HONG Ling, GAO Jia, ZHU Wei. Simulating emergency evacuation at metro stations: an approach based on thorough psychological analysis [J]. Transportation Letters, 2016, 8(2):113.
- [18] KHATIB O. Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [J]. The International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1):90.
- [19] 张鸣鸣, 施朝健. APF方法在船舶自动避碰中的应用[J]. 上海海事大学学报, 2007, 28(1):126.
ZHANG Mingming, SHI Chaojian. Application of APF method in ship's autonomous collision avoidance [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2007, 28(1):126.