

基于 Repast Symphony 平台的人群运动行为仿真及优化

刘文龙¹ 张 晶¹ 周绥平² 李月龙¹

(天津工业大学计算机科学与软件学院 天津 300387)¹

(密德萨斯大学科学与技术学院 伦敦 NW4 4BT)²

摘 要 针对地铁乘客人群的运动行为,基于 Agent 模型和粒子群搜索算法,利用仿真平台 Repast Symphony 建立了人群运动行为仿真模型,该模型模拟了乘客进入地铁候车大厅寻找车厢门进行排队和地铁到站时进入车厢的过程;基于此,提出了一种基于马尔可夫决策模型的改进寻路算法。实验表明,该算法有效地解决了传统粒子群算法容易陷入局部解的问题,明显减少了冲突次数。此外,文中提出增加地铁车厢人数指示器来避免部分车厢的拥挤状况,实验结果显示该方法行之有效,并能将乘客进入车厢的效率提高 9%。

关键词 Repast Symphony,排队,建模,仿真,粒子群,马尔可夫

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.12.030

Simulation and Optimization of Crowd Movement Behavior Based on Repast Symphony Platform

LIU Wen-long¹ ZHANG Jing¹ ZHOU Sui-ping² LI Yue-long¹

(School of Computer Science and Software, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)¹

(School of Science and Technology, Middlesex University, London NW4 4BT, United Kingdom)²

Abstract Aiming at the movement behaviors of subway passengers, based on the Agent model and the particle swarm algorithm, through utilizing the simulation platform of Repast Symphony, this paper built a simulation model of crowd movement behavior. The model simulates the process of passengers entering the waiting room of subway station, then looking for subway's door for queuing, and entering the subway when subway arrives at station. On this basis, this paper proposed an improved routing algorithm based on Markov decision model. Experimental results show that this algorithm can effectively solve the problem that traditional particle swarm algorithm is easy to trap in local solution, and significantly reduce the number of collisions. In addition, this paper proposed a method to avoid congestion in some compartments through employing passenger number indicator of subway compartment. Experimental results show that this method is effective and can improve the efficiency of passengers entering the compartment by 9%.

Keywords Repast dimphony, Queuing, Modeling, Simulation, Particle swarm, Markov

1 引言

大规模人群运动行为的研究在商业、交通、军事等领域有着广泛的应用前景,运用计算机对实际问题进行仿真可以预先以较少代价模拟真实的情况,从而达到节省人力的目的。

针对人群运动行为进行研究是一个热门的研究方向。在人群运动方面, Sun 等^[1]提出了一种模型,通过仿真模拟个人行为并增加人群行为的异质性。该模型吸取 Reynolds 的 Boids 模型以及 Helbing 的社会力模型建立在物理学基础上的优势,行为机制处理倾向于 Reynolds 的转向行为模型,且多数模型的建立常使用较为复杂的规则与理论,人群的运动行为是多个个体共同运动的结果,由于个体数量不断增加并且独立个体的决策行为不尽相同,规则会急剧增加,从而使效

率降低。在排队行为研究方面, Pan 等^[2]利用传统排队论对地铁站台的输出能力进行了模拟计算,但没有考虑乘客移动对系统产生的影响,人群的运动过程被忽略。

在特定地铁场景的人群运动行为研究方面,现阶段的研究内容多是在紧急情况下对地铁人群疏散行为的仿真模拟。例如, Wan 等^[3]模拟了地铁乘客的疏散行为。

为了提升地铁的运营效率,本文将建立抽象地铁空间的人群仿真系统,并在 Repast Symphony 仿真平台上使用基于 Agent 模型的方法,对在地铁候车大厅楼梯入口的乘客经过移动排队进入车厢的问题进行建模仿真实验,然后利用马尔可夫理论对寻路算法进行优化,最后增加地铁车厢指示器,以在地铁到来之前为乘客提示车厢人数,从而缓解局部车厢拥挤的现象。

收稿日期:2017-10-12 返修日期:2018-01-16 本文受中国博士后科学基金(2015M570228)资助。

刘文龙(1989—),男,硕士生,主要研究方向为模拟仿真, E-mail: 383500654@qq.com; 张 晶(1975—),女,博士,副教授,主要研究方向为人工智能、虚拟仿真, E-mail: China_ximeng@sohu.com(通信作者); 周绥平(1972—),男,博士,教授,主要研究方向为人工智能; 李月龙(1982—),男,博士,副教授,主要研究方向为图像合成、轮廓模型、机器学习。

2 人群仿真模型的相关工作

2.1 模型的种类及选择

1) 基于规则的模型^[4]。Reynolds 对鸟群群体的行为进行了研究,提出了 Boids 模型。Olfati-Saber 使用分布式算法对该模型进行了改进,提升了效率;但该模型一般只能模拟较简单的群体运动。

2) 基于社会力的模型^[5]。Helbing 最早提出社会力模型,他是从人类感知变化和力学的共同作用中得到的启发。Wang 等^[6]提出了一种使用期望方向替换排斥力的改进社会力模型,其有利于行人以快速的方式寻找目标;但该模型提出了大量的作用力变量参数且各种力之间较难平衡,因此实现难度较大。

3) 元胞自动机模型^[7]。冯诺依曼的元胞自动机理论是一种时间和空间都离散的动力系统。汪洋等^[8]提出的基于正六边形的改进元胞自动机模型,可以较真实地模拟人群疏散运动过程。与复杂的行为模型相比,其计算过程简单且高效;但人群比较集中时效果仍然不尽人意,会导致结果失真。

4) 基于 Agent 的模型^[9]。Agent 是一种具有自适应性的智能体,复杂系统可以分解为多 Agent 系统,每种 Agent 按照属性和行为来建模。Mukai 等^[10]提出了基于心理学的虚拟 Agent 模型,个体通过视觉感官获取环境情况来决定接下来的行为。从心理学角度定义五大性格因素以及两种行为,可以较好地模拟人群运动的行为。

鉴于 Agent 模型的优势,本文选取其进行建模。模型由具有自治和交互能力的 Agent 组成,使用时模拟个体的行为并纳入相对真实的环境之中,同时与其他个体交互模拟出复杂的群体运动现象。

2.2 人群运动算法的选择

人群运动的实质就是每个个体依照自身的心理和目的行走,前进的每一步涉及去某一个方向的选择,也就是一种搜索的策略,属于人工智能的范畴。到目前为止,学者们已经研究出了很多各具优势的算法。

爬山(HC)算法^[11]是一种简单、便捷的搜索策略,可以从一棵初始树的根节点出发并通过基于距离的算法策略改善这棵树。爬山算法虽然可以解决很多问题,但是其搜索盲目且低效。

蚁群(AC)算法^[12]是一种仿生进化算法,灵感来源于蚂蚁在搜索食物过程中发现路径的行为。它是一种正反馈机制,其个体只能被局部信息影响,不能直接利用全局信息,搜索时需要花费大量的时间且容易出现停滞现象,同时对初始化参数的设置也较为敏感。

粒子群优化(PSO)算法^[13]是一种并行算法,其思想十分接近生物种群的行为并且简单易于实现,已经被广泛应用到各领域的研究中。该思想是鸟群捕食过程的一个抽象模型,也是一种随机搜索迭代算法,各个体遵循一种协作的精神,个体之后的行为决策不仅受到个体自身经验的影响,还受到群体中其他个体经验的影响。其中,自身的经验就是个体极值 $Pbest$,代表个体的历史最佳位置向量;群体中其他个体经验就是群体极值 $Gbest$,代表种群的历史最佳位置向量。每次迭代个体时,通过这两个极值共同作用来更新自己的速度 V_i 和

位置 X_i ,更新公式如式(1)和式(2)所示:

$$V_i = V_i + c_1 r_1 (Pbest_i - X_i) + c_2 r_2 (Gbest - X_i) \quad (1)$$

$$X_i = X_i + V_i \quad (2)$$

其中,参数 ω 是 PSO 的惯性权重,取值范围为 $[0, 1]$;参数 c_1 和 c_2 分别为学习因子和社会学习因子,用以调节 $Pbest$ 和 $Gbest$ 的步长;而 r_1 和 r_2 是 $[0, 1]$ 之间的随机概率值。本文将使用该算法模拟人群运动,通过迭代寻找最优目标,具体步骤如下:

Step 1 在各个楼梯口处初始化 Agent 个体,计算每个 Agent 个体的适应值,选出个体局部最优位置向量 $Pbest_i$ 和 Agent 群体全局最优位置向量 $Gbest$ 。

Step 2 设置迭代终止条件,并令当前迭代次数 $g=0$ 。

Step 3 更新每个 Agent 的速度向量。

Step 4 更新每个 Agent 的位置向量。

Step 5 对于每个 Agent,选出个体局部最优位置向量并更新每个个体的 $Pbest_i$ 和群体的 $Gbest$,更新迭代次数 $g=g+1$ 。

Step 6 若满足终止条件,则输出结果;否则跳转至 Step 3 继续进行迭代。

3 地铁排队模型的建立

3.1 Repast Simphony 平台的简介

Repast Simphony 是一个基于 Agent 的建模系统,有着高度的集成性、丰富的交互性和跨平台的优势,可以使用工作站或者小型的计算机集群进行开发。Repast Simphony 提供了一系列类库,用来生成、运行、显示模型并收集模型的有关数据,还能对运行中的模型进行“快照”并生成模型运行的影像资料。

3.2 地铁仿真模型的建立

地铁候车大厅楼梯口的乘客排队进入地铁的建模仿真可分为两个过程,即从楼梯口进入候车大厅到地铁车厢门前的排队过程和地铁到达时乘客进入车厢的过程。通常,排队系统是由输入过程、排队规则和服务机构 3 部分组成的。本系统中乘客源对应输入过程,排队算法对应排队规则,地铁车厢门对应服务机构,如图 1 所示。

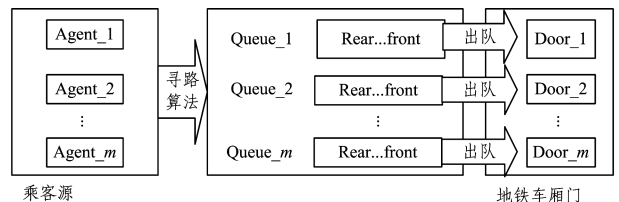


图 1 排队模型

Fig. 1 Queuing model

根据面向对象的方法和地铁排队模型的需求,该系统使用 Repast Simphony 仿真平台和 MVC 设计模式进行开发实现,Agent 实体类主要由乘客、队列、地铁车厢门和楼梯 Agent 组成。

乘客 Agent 使用粒子群算法进行寻路,每次迭代都有个体自身极值 $Pbest_i$,需要定义和初始化相关属性和决策行为。乘客属性包括:乘客的初始坐标位置,说明该乘客是从电梯、扶梯或是楼梯进入地铁车厢;行走速度,一般受乘客自身的身体

条件所影响,但是当环境发生变化时速度也会变化;心理状态,乘客是更倾向少走路还是倾向寻找人员较少的队伍。

乘客决策行为就是一组个体共同拥有的基本行为,是构成整个人群运动高级行为的基础,可以理解为该类中所有方法的集合。乘客决策行为包括:乘客行走行为,该行为是为了能进行高级决策所需要的最基本的行为;避让其他人和障碍物,该行为是在行走的基础上实现的基本策略,主要为了防止发生碰撞;寻找理想目的地,该行为也是优化问题的重点所在;寻找已有队列进行排队行为,当最终确定一个目的地且到达时跟随前方乘客进行排队;进车厢行为,地铁到达时乘客要进入车厢的行为。

乘客 Agent 行动方法将使用注解 Annotations 的 @ScheduledMethod(start=1, interval=1, priority=2) 方法迭代执行,这样就可以控制方法执行的开始时间、执行间隔和优先级。其他 Agent 迭代方法也需要定义这个注解才可以迭代执行。

队列 Agent 是中间环节且唯一一对应地铁车厢门的 Agent,它主要负责乘客 Agent 进入地铁候车区域进行排队,并且在地铁到站之后出队并进入地铁车厢的过程,因此需要并行同步处理。该方法不仅需要使用注解的方法,而且还需编写一个同步多线程处理类,以达到并行处理乘客 Agent 入队和进入地铁的行为。图 2 为仿真系统的程序流程图。

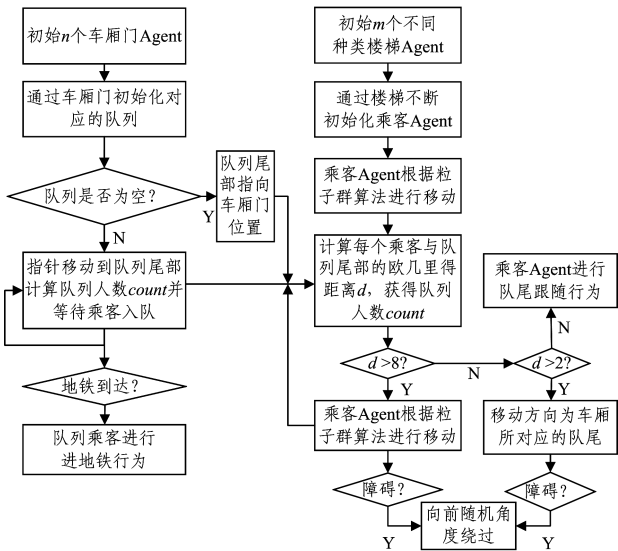


图 2 仿真系统的程序流程图

Fig. 2 Program flow chart of simulation system

4 仿真实验与优化方案

4.1 仿真实验

根据梁妍妍^[14]和孟志强等^[15]的分析与研究,地铁站载人梯的通行能力如表 1 所列。

表 1 地铁站载人梯的通行能力

Table 1 Manned ladder capacity of subway station

类型	通行能力/(人/(m·min))
地铁站楼梯	约 70
地铁站扶梯	约 135
地铁站直梯	约 11

就是人员从载人梯进入地铁候车厅的方法,并且根据以上的数据实现楼梯、电梯以及扶梯各自类的实体,它们的作用主要是使乘客 Agent 通过各种载人梯以不同的规则进入候车大厅。仿真实验系统参数的初始化设置如表 2 所列。

表 2 仿真实验系统参数的初始化设置

Table 2 Initialization settings of parameters of simulation

参数	参数描述	数值
w	惯性权重	0.9
c_1, c_2	学习因子	1.4961
r_1, r_2	增加移动的随机性	0 到 1 之间的随机值
cus_count	乘客人数	300
car_count	地铁车厢数量	12
car_rest_count	地铁每节车厢可容纳的 剩余人数	{30,30,30,30,30,30,30, 30,30,30,30,30}
$escalat_count$	自动扶梯数量	2
$straight_count$	直梯数量	1
$stairs_count$	楼梯数量	2

图 3 给出了地铁乘客从电梯、直梯或者楼梯进入大厅寻找车厢门并排队进站的过程,其中的黑色圆点代表行走中的乘客。

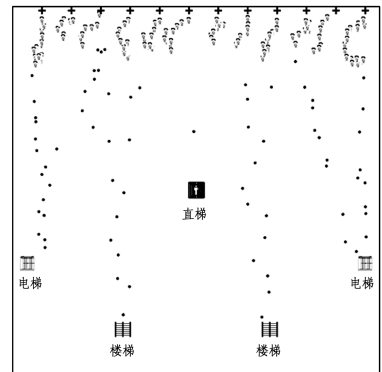


图 3 地铁乘客运动的仿真截图

Fig. 3 Simulation screenshot of subway passenger movement

图 4 给出了车厢空余均匀情况下的仿真数据收集结果。该过程使用粒子群算法进行寻路,其中线 1(实线)代表大厅中寻路尚未排队的乘客人数,线 2(虚线)代表已排队正等待进站的乘客人数。tick=0 时两者均为 0,然后乘客经过楼梯进到大厅,这时线 1 上升;当 tick=80 时线 1 下降且线 2 上升,这表示乘客找到车厢口时乘客队伍增加且移动中的乘客数量降低;当 tick=210 时,线 1 突然增加而线 2 降低,进入车厢过程发生冲突,乘客需要重新移动寻找其他车厢;经过 4 次冲突直至 tick=330 后,乘客才全部进入车厢。

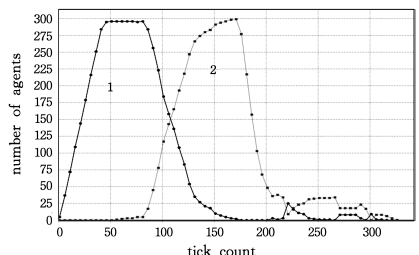


图 4 均匀空间的仿真实验

Fig. 4 Simulation experiment of uniform space

因此,对载人梯定义一个公共接口,其中有一种公共方法

车厢空余不均匀数据的仿真结果如图 5 所示,此时会发

生很多次冲突之后乘客才找到最佳位置。发生冲突的原因一方面是地铁到达前乘客预先不知道各节车厢的人数,只有当地铁到达后,人多或者满员车厢对应排队的乘客才开始重新寻找其他车厢;另一方面是由于粒子群搜索算法容易陷入局部解,造成数据的不准确,下节将对这个问题进行改进。

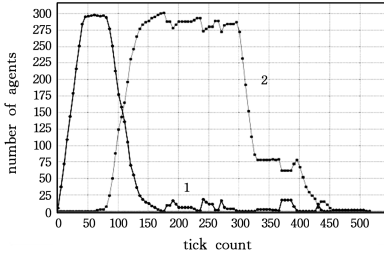


图5 不均匀空间的仿真实验

Fig. 5 Simulation experiment of nonuniform space

4.2 改进的寻路算法

由于 PSO 算法在数据较少时容易陷入局部极值点,因此引入马尔可夫决策过程(Markov Decision Processes, MDP)模型^[16]来改进此算法。马尔可夫性可以理解为下一状态只与当前状态有关,与之前的状态无关。根据 MDP 模型,可以智能选择移动算法以达到优化行动策略的目的,以五元组 $\lambda = (N, Q, \pi, A, B)$ 描述该模型。其中, N 代表状态的集合, $N = \{\theta_1, \theta_2\}$, θ_1 为粒子群优化算法, θ_2 为加权最短距离算法; Q 代表状态时间序列的集合, $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, 记 $q_i(t = 1, \dots, n)$ 代表 t 时刻马尔可夫链所处的状态; π 为系统初始状态概率, $\pi = (\pi_1, \pi_2)$, $\pi_i = P(q_1 = \theta_i)$, $1 \leq i \leq 2$; A 为状态转移概率矩阵, $A = (a_{ij})_{2 \times 2}$, $a_{ij} = P(q_{t+1} = \theta_j | q_t = \theta_i)$, $1 \leq i, j \leq 2$; B 为全局观察值概率矩阵, $b_{i1} = \text{已排队人数}/\text{总人数}$, $b_{i2} = 1 - \text{已排队人数}/\text{总人数}$ 。

本文提出的基于马尔可夫决策过程模型的改进寻路算法是为了让 Agent 在每次迭代时都能选取最优移动算法来达到优化移动策略的目的。图 6 给出了单个 Agent 选择行动策略的过程。

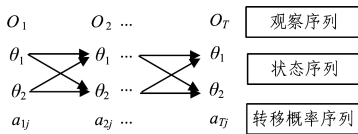


图6 马尔可夫过程模型

Fig. 6 Markov process model

根据此模型,定义 $\alpha_t(\theta_i)$ 为 t 时刻在状态 i 的转移概率, $selected_t(\theta_i)$ 为在时刻 t 的选择状态,具体表示为:

$$\alpha_t(\theta_i) = P(q_1 q_2 \dots q_t, q_t = \theta_i | \lambda) \quad (3)$$

$$selected_t(\theta_i) = \max_{q_1 q_2 \dots q_t} P(q_1 q_2 \dots q_t, q_t = \theta_i | \lambda) \quad (4)$$

本系统中的具体逻辑如下:

Step 1 对每个 Agent 的两种状态 $i(1 \leq i \leq 2)$ 进行初始化:

$$\alpha_1(\theta_i) = \pi_i b_{i1} \quad (5)$$

$$selected_1(\theta_i) = \alpha_1(\theta_i) \quad (6)$$

Step 2 进行迭代递推,对于 $t(2 \leq t \leq T)$ 和 $j(1 \leq j \leq 2)$,

有:

$$\alpha_t(\theta_j) = \alpha_{t-1}(\theta_i) \alpha_{ij} b_{ij} \quad (7)$$

$$selected_t(\theta_j) = \alpha_t(\theta_j) \quad (8)$$

根据以上过程,每个 Agent 每次选择最优状态的行动策略 θ_j 。

4.3 进站效率优化

为了节省运营时间并提高乘客满意度,针对地铁到站时有的车厢已经满员不能进入而有的车厢还有空余的问题,本文提出一种解决方法,即增加车厢拥挤程度指示器来提示即将到达的地铁车厢当前已容纳的人数,以引导乘客选择理想的车厢。该功能可以依照张超宇^[17]所提出的地铁车厢人数检测方法实现,仿真系统将设计一个车厢容纳人数 Agent 提示每个车厢的人数情况,并附加权重因子 f 来影响乘客的行动策略。

4.4 仿真结果与分析

改进的寻路算法可以弥补 PSO 算法在数据较少时出现局部极值点的缺陷,仿真实验结果如图 7 所示。与图 4 相比,改进算法的寻路过程基本上没有冲突。

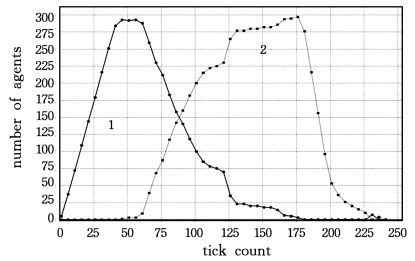


图7 引入马尔可夫模型的仿真实验

Fig. 7 Simulation experiment of introducing Markov model

图 8 给出了对车厢空余均匀分布情况改进后的仿真结果,可见在 tick 约为 205 时乘客全部进入车厢,乘客的进站效率提升了 8.8%。

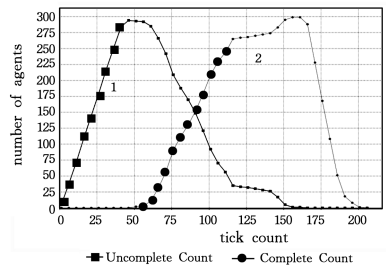


图8 对均匀空间改进后的仿真实验

Fig. 8 Improved simulation experiment of uniform space

对车厢剩余空间不均匀分布情况改进后的仿真结果如图 9 所示。与图 5 相比,改进后仅发生了一次冲突,且乘客能够很快找到到最优位置。

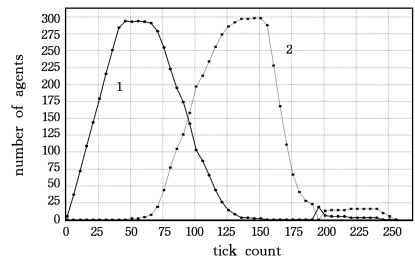


图9 对不均匀空间改进后的仿真实验

Fig. 9 Improved simulation experiment of nonuniform space

表 3 列出了多次仿真实验的结果,从中可以看出有指示

器时的进站效率比无指示器时的进站效率平均提升了约 9%。

表 3 不同车厢空间人数的仿真结果对比

Table 3 Simulation results comparison of different space in carriage

可容纳人数分布	无指示器时的 迭代次数/tick	有指示器时的 迭代次数/tick
{30,0,30,30,30,30,30,30, 30,0,30,30}	293	265
{30,30,30,30,30,30,30,30,30, 30,30,30}	225	205
{45,45,45,45,45,45,45,45,45, 45,45,45}	221	204
{60,0,60,0,60,0,60,0,60,0,60,0}	312	280
{60,30,60,30,60,30,60,30,60, 30,60,30}	223	203
{60,60,60,60,60,60,60,60,60, 60,60,60}	220	202

结束语 本文分析了各种模型和搜索算法,并根据它们各自的特点以及地铁乘客的排队行为,基于 Agent 模型和粒子群算法模拟人群的运动,并使用 Repast Symphony 对人群从候车区域排队到进入车厢的问题进行了仿真实验。系统可以较好地模拟乘客从载人梯口进入大厅,通过实时感知周围环境以及其他乘客的影响,来寻找理想的车厢门进行排队,并在地铁到站后有序地进入车厢的过程。

仿真结果显示,乘客要进入的车厢因满员而无法进入时会发生冲突,这是由于传统粒子群算法陷入了局部解。为此,本文提出一种基于马尔可夫决策模型的改进寻路算法,实验表明该算法使得冲突明显减少。另外,为了提高地铁整体的运营效率和乘客满意度,本文提出增加地铁车厢人数指示器以方便乘客选择车厢,仿真实验结果显示其能将乘客的进站效率提高约 9%。

参 考 文 献

- [1] SUN Q, WU S. A Crowd Model with Multiple Individual Parameters to Represent Individual Behaviour in Crowd Simulation. [C]// 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2011:107-112.
- [2] PAN H, LIU Z. A Queuing Network Based Optimization Model for Calculating Capacity of Subway Station[J]. Discrete Dynamics in Nature & Society, 2017, 2017(6):1-7.
- [3] WAN J, SUI J, YU H. Research on evacuation in the subway station in China based on the Combined Social Force Model[J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2014, 394(4):33-46.
- [4] OLFATI-SABER R. Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(3):401-420.
- [5] HELBIG D, MOLNAR P. Social Force Model for Pedestrian Dynamics [J]. Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics, 1995, 51(5):4282-4286.
- [6] WANG Q L, CHEN Y, DONG H R. A new collision avoidance model for pedestrian dynamics [J]. Chinese Physics B: English version, 2015, 24(3):453-462.
- [7] QIN Y, LU H, XU Y, et al. Saliency detection via Cellular Automata [C]// Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2015:110-119.
- [8] WANG Y, LI N, ZHANG L. Research on Pedestrian Evacuation Based on Hexagonal Cellular Automata [J]. Computer Engineering, 2017, 43(8):310-315. (in Chinese)
汪洋, 李楠, 张磊. 基于正六边形元胞自动机的行人疏散研究 [J]. 计算机工程, 2017, 43(8):310-315.
- [9] JENNINGS N R. On agent-based software engineering [J]. Artificial Intelligence, 2000, 17(2):277-296.
- [10] MUKAI N, TANAKA K, CHANG Y. Crowd Simulation by Applying Individual Human Model with Vision [C]// International Conference on Cyberworlds. IEEE, 2016:210-215.
- [11] GUINDON S, GASCUEL O. A Simple, Fast, and Accurate Algorithm to Estimate Large Phylogenies by Maximum Likelihood [J]. Systematic Biology, 2003, 52(5):696-704.
- [12] DORIGO M, VITTORIO M, ALBERTO C. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B, 1996, 26(1):1-13.
- [13] KENNEDY J, EBERHART R. A new optimizer using particle swarm theory [C]// The Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya, Japan; Nagoya Municipal Industrial Research Institute, 1995:39-43.
- [14] LIANG Y J. Study on selection of departure facilities of traffic hub based on passenger characteristics [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
梁妍妍. 基于乘客特性的交通枢纽出站设施选择研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [15] MENG X Q, LIAO M J, WANG K Y. Analysis of escalator capacity in rail transit station [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2012, 33(3):42-45. (in Chinese)
孟宪强, 廖明军, 王凯英. 轨道交通站内自动扶梯通行能力分析 [J]. 上海海事大学学报, 2012, 33(3):42-45.
- [16] ZHANG Y, WANG X M, LIN Y G, et al. Opportunistic network forwarding strategy based on Markov decision process [J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2016, 10(1):82-92. (in Chinese)
张杨, 王小明, 林亚光, 等. 基于马尔可夫决策过程的机会网络转发策略 [J]. 计算机科学与探索, 2016, 10(1):82-92.
- [17] ZHANG C Y. Research on the number of Metro Cars Based on radio frequency identification technology [J]. Technological wind, 2016(11):115. (in Chinese)
张超宇. 基于射频识别技术的地铁车厢人数检测方法研究 [J]. 科技风, 2016(11):115.