

1-4-2019

Micro Modeling and Simulation of Bi-directional Pedestrian Flows Crossing Bottleneck

Li Yue

1. College of Computer Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; ;

Renyong Guo

2. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China; ;

Chen Liang

3. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

Jingdong Li

1. College of Computer Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, 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.

Micro Modeling and Simulation of Bi-directional Pedestrian Flows Crossing Bottleneck

Abstract

Abstract: An improved bi-directional pedestrian model based on reciprocal velocity obstacles (RVO) is proposed to investigate self-organization phenomena for bi-directional pedestrian flows crossing bottlenecks, and the influencing factors of pedestrian flow are analyzed. *According to the RVO model problem, an improved method is constructed. The model of bi-directional pedestrian flows crossing bottleneck in subways based on Unity 3D is established.* Based on this improved model, the bi-directional pedestrian flows crossing bottleneck in subways is simulated. Simulation results indicate that the model can veritably simulate self-organization phenomena for bi-directional pedestrian flows crossing bottlenecks in subways and pedestrians flow is an increasing linear function of bottleneck width. The present study provides theory evidence for mitigation of bottleneck congestion in subways.

Keywords

pedestrian traffic, bi-directional flow, bottleneck, RVO model

Recommended Citation

Li Yue, Guo Renyong, Chen Liang, Li Jingdong. Micro Modeling and Simulation of Bi-directional Pedestrian Flows Crossing Bottleneck[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4): 1245-1253.

穿越瓶颈的双向行人流微观建模及仿真

李月¹, 郭仁拥², 陈亮³, 李劲东¹(1. 内蒙古大学计算机学院, 内蒙古呼和浩特 010021; 2. 北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191;
3. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 为研究瓶颈处双向行人流的自组织现象, 分析影响行人流量的因素, 对 RVO (Reciprocal Velocity Obstacles)模型进行改进, 提出了一个改进的瓶颈处双向行人流模型。根据 RVO 模型中出现的问題, 提出改进方法, 建立了基于 Unity 3D 的地铁中穿越瓶颈的双向行人流仿真模型。利用改进的模型对地铁站上下车时双向行人流进行仿真, 结果表明该模型能够较真实地模拟地铁站瓶颈处双向行人流的自组织现象, 发现行人流量随瓶颈宽度线性增加。该研究为疏缓地铁站内瓶颈处拥堵提供了理论依据。

关键词: 行人流量; 双向流; 瓶颈; RVO 模型

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 04-1245-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201804005

Micro Modeling and Simulation of Bi-directional Pedestrian Flows Crossing Bottleneck

Li Yue¹, Guo Renyong², Chen Liang³, Li Jingdong¹

(1. College of Computer Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: An improved bi-directional pedestrian model based on reciprocal velocity obstacles (RVO) is proposed to investigate self-organization phenomena for bi-directional pedestrian flows crossing bottlenecks, and the influencing factors of pedestrian flow are analyzed. According to the RVO model problem, an improved method is constructed. The model of bi-directional pedestrian flows crossing bottleneck in subways based on Unity 3D is established. Based on this improved model, the bi-directional pedestrian flows crossing bottleneck in subways is simulated. Simulation results indicate that the model can veritably simulate self-organization phenomena for bi-directional pedestrian flows crossing bottlenecks in subways and pedestrians flow is an increasing linear function of bottleneck width. The present study provides theory evidence for mitigation of bottleneck congestion in subways.

Keywords: pedestrian traffic; bi-directional flow; bottleneck; RVO model

引言

行人行为的复杂性、随机性使得行人流的研究

相对于机动车流更为复杂, 这也促使越来越多的研究者借助于物理、计算机手段来研究行人交通流。与机动车相比, 行人运动没有车道的限制, 变速、转向、路径的选择更加灵活多变, 且轻微的碰撞也能接受, 所以对行人行走特性的研究比对机动车的研究更为困难^[1-4]。同时, 由于行人流是由相互作用的行人构成的多主体复杂系统, 因此行人之间具



收稿日期: 2016-04-18

修回日期:

2016-11-11;

基金项目: 国家自然科学基金(71261016), 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-1016), 内蒙古自然科学基金(2014JQ03);

作者简介: 李月(1994-), 女, 内蒙古乌海, 本科, 研究方向为交通行为仿真分析; 郭仁拥(通讯作者 1980-), 男, 内蒙古锡林郭勒, 教授, 博导, 研究方向为交通行为建模与仿真。

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

• 1245 •

有较强的非线性相互作用^[5]。一些物理模型已经成功应用到行人流的研究中,例如, Muramatsu 等^[6]利用偏向随机行走的格子气模型研究了双向行人流的阻塞相变; Burstedde 等^[7]基于二维元胞自动机 (cellular automata) 模型,研究了行人流的聚集效应和自组织现象; Wu 等^[8]以 A* 算法为基础建立了路径选择模型,研究分析最短距离、最短时间和混合模型三种路径选择方案的差别; Yang 等^[9]基于社会力模型,以研究通道内隔离的设置条件及合理形式为依据,实现计算机仿真,并从舒适性和时效性对仿真效果进行评价。

瓶颈处的双向行人流作为行人流研究的重要部分,引起越来越多研究者的关注。随着当今社会的不断发展,交通问题已经成为制约城市发展的重要课题。城市作为人口密集的地方,行人出行的安全性以及行人交通的高效性成为人们亟待解决的问题。Li 等^[3]在预先确定概率模型的基础上,对模型进行了修正,引入了行人之间交换位置和等待的行为特性; Yang 等^[10]提出以疏散结束时间最小化为目标建立模型,并利用动态网络设计算法从而解决多层建筑疏散问题; Sui 等^[11]在社会力模型的基础上增加紧张因子,整合仿真环境,建立了整合社会力模型; Blue 等^[12]提出了双向行人流有三种状态,研究了换道和前进两个步骤的更新规则,并分析了双向行人交换位置的行为; Zhang 等^[13]通过建立灾难数学模型和个体感知模型,以实现人员仿真与环境灾难模型相结合,从而对人员信息进行分析; Kirchner 等^[14]在元胞自动机模型的基础上,模拟了疏散过程,提出了静态地面场 (Static Floor Field) 和动态地面场 (Dynamic Floor Field) 的概念; Jiang 等^[15]将疏散空间和疏散路径模型化,提出三维逃生路径优选动态模型,对疏散撤离位置与逃生疏散路径进行规划; Henein 等^[16]在静态场和动态场的基础上提出了受力场 (Force Field) 的概念。Miao 等^[17]建立了一种室内人员疏散耦合模型和连续模型,并通过光滑粒子流动力学方法将模型离散化; Guo^[18]提出了一种改进的社会力模型,并通过

场景模拟证明了合理地调整该模型中的参数,可以改善行人通过瓶颈处的效率。He 等^[19]将网格分为空地网格、完全障碍物网格、渠化障碍物网格和小型障碍物网格,建立基于动态广义势能场的仿真模型,以解决计算效率与模型精度的矛盾; Zhao 等^[20]分别从速度约束、视场约束和变形约束三个方面,对人群运动的社会力模型进行改进。目前,对于瓶颈处行人流的研究多为二维空间的模拟,且多数实验没有考虑到个体的特殊性,对于个体特性的研究较少。在本文中我们提出了一类改进后的三维空间仿真模型。为了更加清晰地表述模型,本文采用地铁站中的双向行人流作为特例对模型进行了介绍。地铁中穿越瓶颈的双向行人流的运动情况十分复杂,因此影响行人流量的因素较多。基于 Unity 3D 的地铁中穿越瓶颈的双向行人流的研究,不仅能够更清晰直观地刻画行人的行为,也有利于针对不同地铁结构进行合理规划。

本文提出了一种考虑地铁瓶颈处的宽度、地铁交汇处的通行能力和不同个体之间综合特性影响的优化的 RVO 模型; 实验模拟了多种情况下行人通过地铁瓶颈处的现象,并分析了影响行人流量的因素; 利用实际数据并结合人物移动的特点对模型参数进行合理设置。仿真研究了地铁中穿越瓶颈的双向行人流现象。

1 模型

1.1 模型描述

Van den Berg 等^[21]在 2011 年提出了 Reciprocal Velocity Obstacles 模型 (简称: RVO), 算法的目的在于解决大量机器人在满足没有沟通且完全独立的条件下如何在同一工作空间内避免相互碰撞。本文根据 RVO 算法, 将其与 Unity 3D 中的 A* 算法结合。

其中原模型存在的问题有:

1) 由于在可选择的速度集合中, RVO 算法随机选择速度, 因此导致部分速度选择并不符合实际

情况, 并且当物体数量较大时, 可选择的区域为空集, 将会导致阻塞等现象。

2) 当一个物体达目的地后, 其它物体在移动过程中可能经过该物体停止时的位置, 因此该物体为避免与其他物体发生碰撞, 需要移动到远离目的地的位置, 此时当前物体将偏离目的地, 因而会导致该物体出现颤动现象。

3) 当模型中物体数量较多时, 物体相互避让可能导致物体移动的距离较远, 所以在下一个时间步长内, 物体会出现弹出现象。

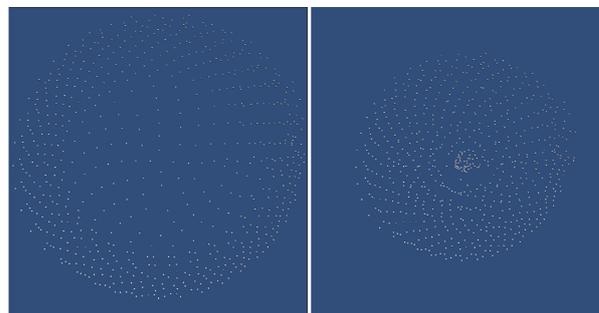
4) 在不同情况下, 对于可视区域内障碍物数量的设置并不确定。当参数设置过大时, 导致模型中行人的移动速度大大降低, 与实际情况下地铁中穿越瓶颈时的行人行为并不相符。然而, 当参数设置过小时, 由于计算的障碍数减少, 可能导致行人之间的发生碰撞。

图 1 显示利用 RVO 模型模拟 1 000 个球体向中心对称方向移动的画面, 图 1(a)分别为 $t=0$ min 和 $t=15$ min 时的画面。图 1(b)显示 $t=2$ min 时仿真场景的局部画面, 以及经过 $t=10$ s 后仿真场景的局部画面。从图 1(b)中可以看出, 经过 $t=10$ s 后, 未被标记球体的位置发生明显变化, 被标记的球体由于颤动现象, 其位置未发生明显变化。图 1(c)显示 $t=5$ min 时仿真场景的局部画面, 和经过 $t=2$ s 后仿真场景的局部画面。从图 1(c)中可以看出, 经过 $t=2$ s 后, 未被标记球体的位置变化较小, 被标记的球体由于弹出现象, 其位置发生明显变化。

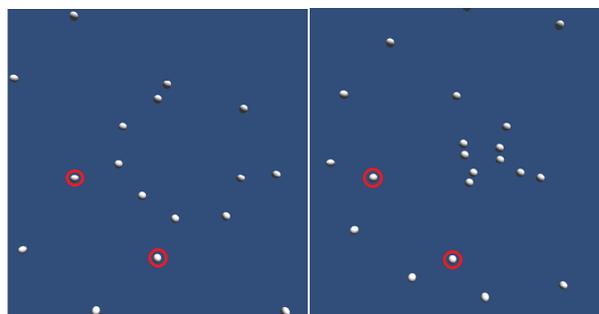
1.2 模型建立

基于以上问题, 改进后的模型对速度的选择算法进行优化, 并且将其与 A*算法结合, 使改进后的模型能够有效避免原模型中出现的阻塞现象。对停止判断条件进行优化以避免物体到达目的地后出现颤动现象。改进后的模型将每个物体的移动划分成若干个较短的时间步长, 当物体较多时, 不会发生由于移动距离较长而导致物体弹出。基于改进

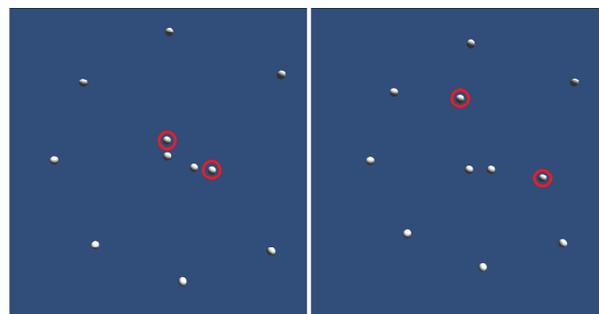
后的模型, 本文利用 Unity 3D 进行仿真研究并给出了合理的参数设置, 软件操作界面如图 2 所示。



(a) 1 000 个球体向中心对称方向移动时在 0 和 10 min 时的画面



(b) 标记球体发生颤动现象的画面



(c) 标记球体发生弹出现象的画面

图 1 模拟 1 000 个球体向中心对称方向移动
Fig. 1 The simulations of 1 000 spheres moving in the centresymmetric direction

改进后的模型可以真实地模拟较多物体穿越瓶颈时的场景。在该模型中对于一个物体, 其他所有物体都被作为障碍物。在每个物体彼此不进行交流的情况下, 物体根据自己的移动速度及方向分别计算与每个障碍物不发生碰撞的速度区域, 定义该区域所构成的集合为物体可以选择的速度集合。在原模型中, 物体 A 选择速度时是随机的, 因此在

对模型的改进过程中着力研究对于速度的选择,并且本文将RVO模型与Unity 3D模型中的A*算法结合。其过程如下:

在A*算法中,引入了当前节点 n 的启发函数 $f(n)$,定义如下:

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

式中: $g(n)$ 是从起点到当前节点 n 的实际费用的度量; $h(n)$ 是从当前节点 n 到终点的最小费用估计。

A*算法的优点在于利用启发函数,更加智能的促使搜索方向趋向终点,因此其搜索深度较小,搜索的节点数少,故占用的存储空间少。在与RVO的结合中,将移动的整个过程 τ 分割成若干个时间步长 $\Delta\tau$ 。在每个时间步长内,根据A*算法给出速度 v^{new} ,而RVO算法则给出了物体单位步长内的目的地。经过移动后物体的位置为:

$$p_A^{new} = p_A + v_A^{new} \Delta\tau \quad (2)$$

p_A 表示物体当前位置, v_A^{new} 是A*算法计算得到的速度, $\Delta\tau$ 是单位时间步长, p_A^{new} 表示当前A物体经过 $\Delta\tau$ 时间移动后的位置。

结合后的算法,避免了RVO算法中对于速度选择的随机性而导致的误差,从而避免了人数较多

时的颤动、弹出等现象。并且充分利用了RVO算法的高效性,符合行人穿越瓶颈时的实际情况。改进后的模型体现了A*算法占用较少的存储空间的优势。

由于每个物体都将其它物体作为障碍物,因此当物体数量增加到一定程度时,物体在躲避障碍时需要做大量运算才能计算出一个相对合适的速度。而对于地铁中穿越瓶颈的双向行人流是在较高密度人群下进行模拟,物体在避免碰撞时会产生较大的颤动。因此只是基于RVO算法并不能真实的反映实际中的情况。所以本文结合A*算法,对于以上问题做了新的改进。

定义第 m 个物体的初始位置为 (x_i, y_i) ,由RVO算法根据物体的目的位置 (x_n, y_n) 计算出下一个时间步长 $\Delta\tau$ 内物体将要到达的目的位置 (x_{i+1}, y_{i+1}) ,结合A*算法找到最优的移动路线,此时物体以当前速度移动到 (x_{i+1}, y_{i+1}) 。图3为改进后的RVO模型流程图。根据改进后的算法结合A*算法,可以在较小的时间步长内计算出当前物体移动的速度。

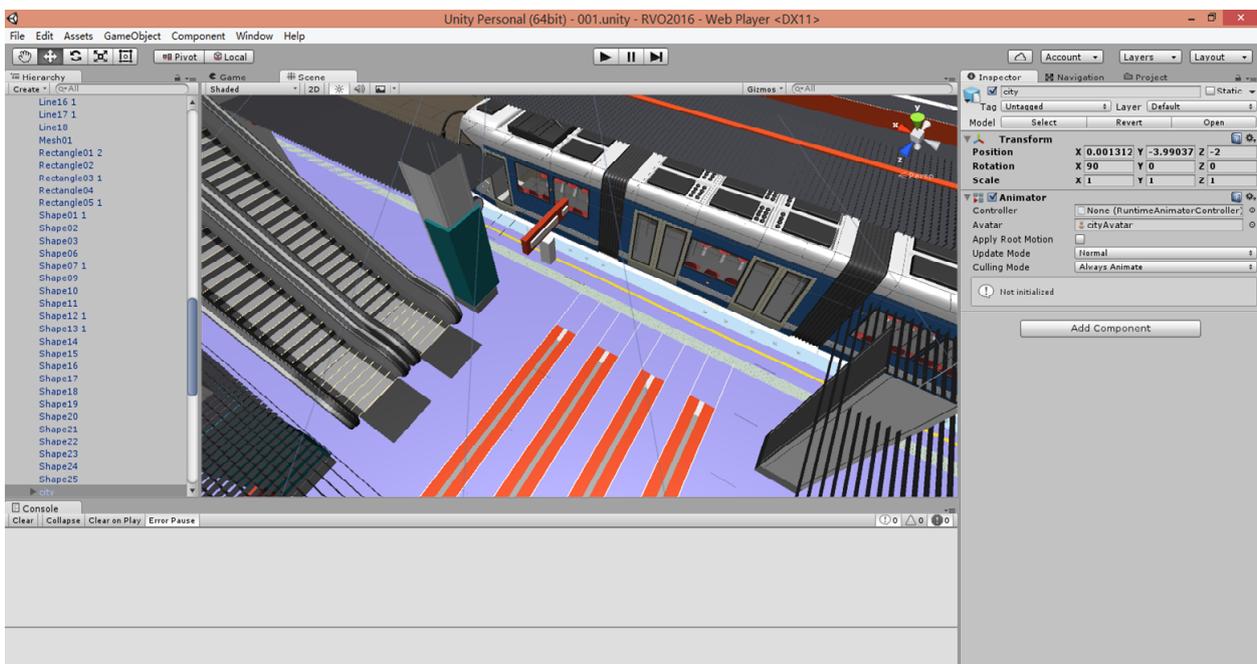


图2 软件操作界面

Fig. 2 The operation interface of the software

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

• 1248 •

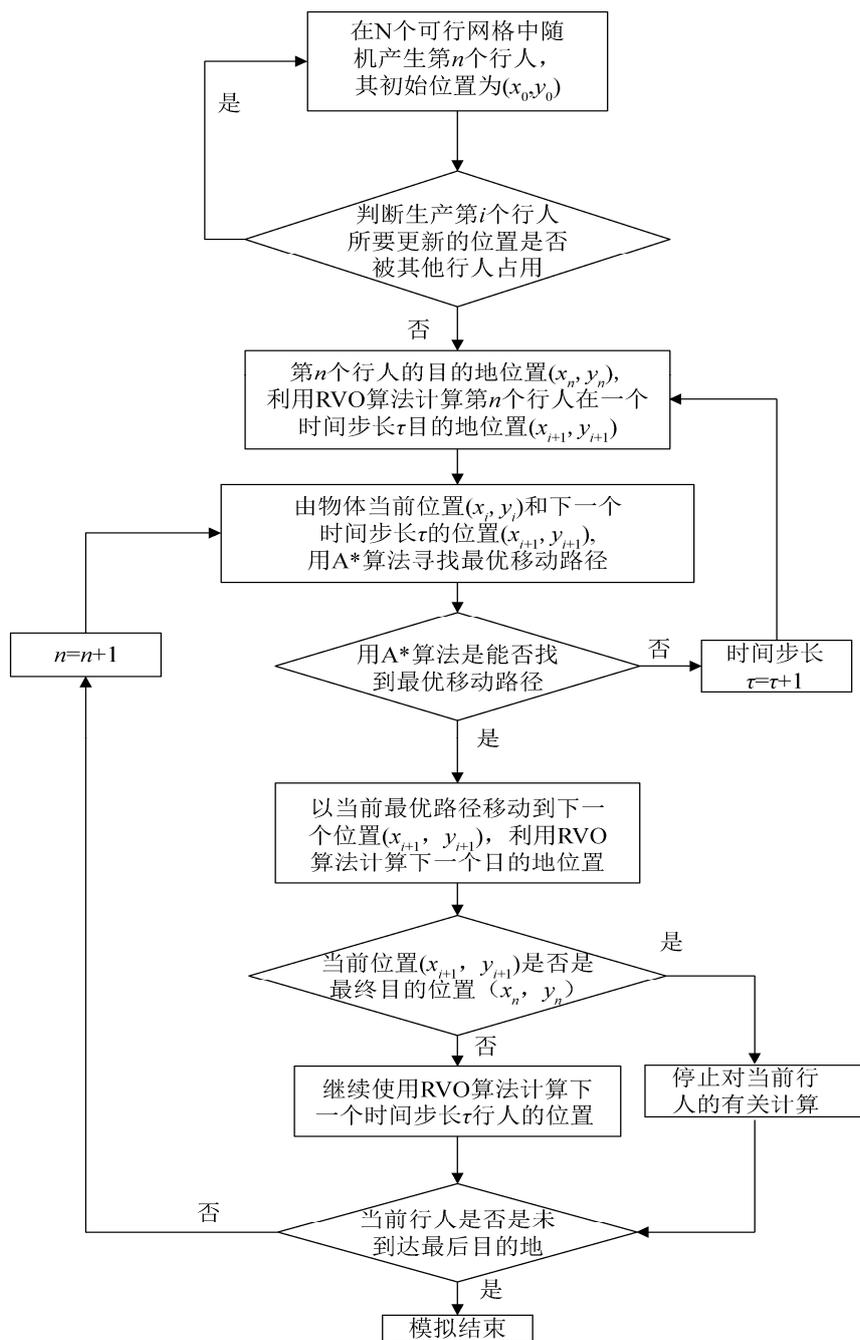


图 3 改进后的 RVO 实现流程图
Fig. 3 The flow chart of the improved RVO

模型中的当前物体将可视区域内其他物体作为障碍物, 因此在其计算最优路径的时候在可视区域内其他物体作为障碍物, 因此在其计算最优路径的时候, 需要设定当前物体将可视区域内最近的多少个其他物体作为障碍物。为每个物体定义其可视区域内最大障碍数 $OBSMi|N$, 在仿真模型中 $OBSMi|N$ 是影响行人流量的关键。为确保行人在

移动中不发生碰撞, 需要将 $OBSMi|N$ 设置为一个较大参数。然而随着参数 $OBSMi|N$ 增加, 相对于每一个行人 RVO 计算的过程增加, 因此将导致行人通过瓶颈处的时间 t 增加, 行人流量减小。图 4 给出仿真模型中将参数 $OBSMi|N$ 设置为 10 和 50 时行人通过瓶颈处的流量。

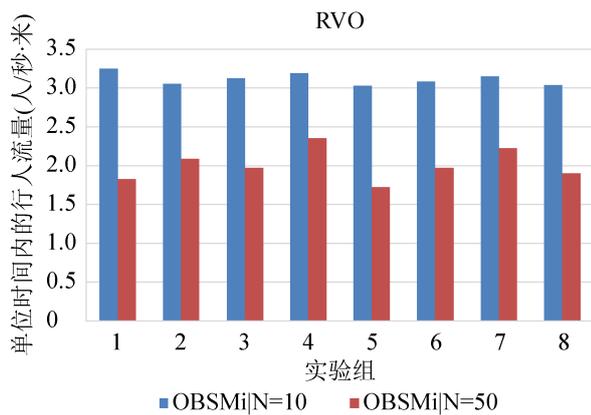


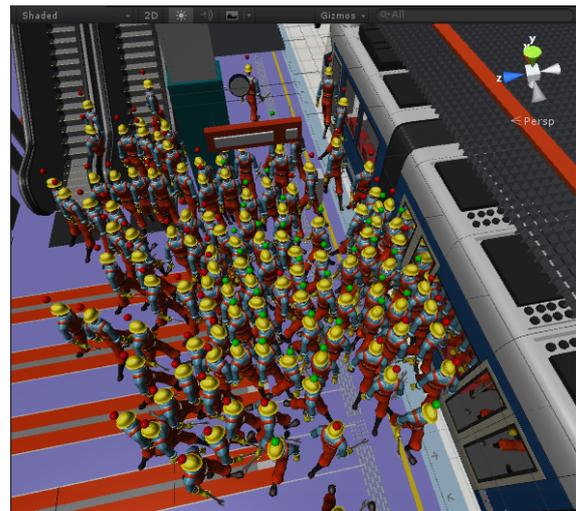
图4 可视区域内 OBSMi|N=10 和 OBSMi|N=50
Fig. 4 OBSMi|N=10 and OBSMi|N=50 in the visual area

2 实验

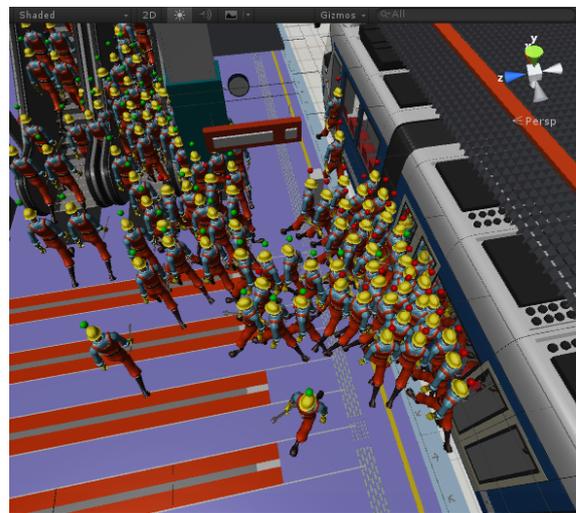
2.1 实验描述

实验在以下场景中进行, 选取一节车厢长为 22.0 m、宽为 3.0 m、高为 3.8 m, 断面面积为 11.4 m², 与实际中 A 型地铁的结构较为吻合。每节车厢都有一个车门位于车厢的中心, 车门宽度为 1.23 m, 车门高度为 3.2 m。由于在 3D 场景下, 对于物体避免碰撞的模拟是在三维坐标空间内实现的, 因此人均高度设为 1.7 m, 直径 0.34 m。在地铁站内距离轨道 12.0 m 处分别有两个直径 1.0 m 的矩形支撑柱, 作为人物运动过程中的实体障碍区。

位于地铁台中间位置分别有高 20 m, 宽 1.4 m 的上下电梯。本文根据实际环境下乘客分布的不确定性, 将地铁站内行人区域划分为 5 000 个 1.0 m×1.0 m 的正方形网格内, 实验时随机在网格内产生相应人数的乘客。图 5 为地铁中双向行人流穿越瓶颈时的仿真图。该实验中共模拟 200 个行人通过地铁车门时的场景, 其中车厢内随机分布 100 个行人, 站台处随机分布 100 个行人。将车厢内行人的目的地设置为站台处的电梯, 站台处行人的目的地设置为车厢内, 为了更加清晰地反映行人移动的效果, 使用行人头顶处红色小球区分为地铁车厢内的行人, 绿色小球区分为站台处的行人。



(a) 行人运动 20 s 后的场景



(b) 行人运动 40 s 后的场景

图5 模拟地铁中穿越瓶颈的双向流现象
Fig. 5 The snapshots of bi-directional pedestrian flows crossing bottlenecks in the subway

在该实验中, 参数设置如下:

将每个物体在其可视区域内所能避免碰撞的最大障碍数 $OBSMi|N$ 设置为 5, 即表示每个模型最多将周围五个其他当做障碍物, 将单个时间步长 Δt 设置为 0.7 s, 即每个 0.7 s 计算相应的车厢门口矩形区域内的行人密度, 其中该区域为车厢门口正中心处 7 m×5 m 的矩形区域。根据实验结果绘制行人流量状态变化图, 如图 6(a)。

初始时, 行人随机分布在地铁及车厢内部, 当行人开始移动时, 位于地铁进出口处的行人流量逐

渐增加。但是由于空间的限制, 行人流量达到一定的峰值后保持不变, 随着行人的移动位于地铁进出口处的行人流量逐渐降低。

在可行区域内随机产生大量行人, 当地铁到达后通过瓶颈处的行人流量达到稳定时, 计算单位时间内行人的流量。

为了更好地反映多组数据之间的关系, 根据数据结果计算不同情况下行人流量的平均值, 得到图 6(b), 其中 OBSMi|N 表示每个物体在其可视区域内所能避免碰撞的最大障碍数。

仿真初始时刻, 行人以给定的密度随机分散在通道中; 通过模拟的现象可以发现一些双向行人流的特征。

2.2 行人行为

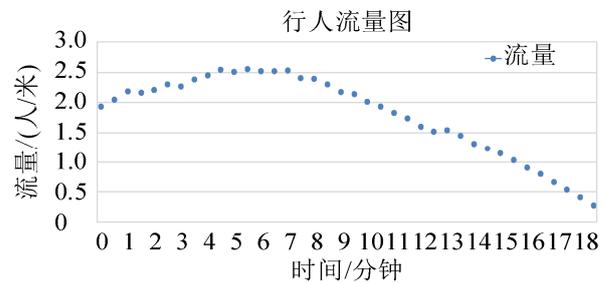
第一、当地铁到来, 乘客对于地铁站内的环境已经有所了解, 此时乘客按照朝向目的地的首选路径行走。所以, 行人在行走时具有强烈地朝目的地行走的倾向性。由于障碍物或者其他乘客阻碍移动, 当前行人会根据障碍物的位置及速度和障碍物的首选速度做相应调整。为了避免实验的特殊性, 实验根据地铁通道的实际面积随机产生相应数量的乘客。

第二、实验中, 根据得到的数据可以证明穿越瓶颈时影响单位时间内的行人流量的关键因素是瓶颈宽度。随着瓶颈宽度增加行人穿越时单位时间的流量逐渐增加, 但是当宽度增加到一定时间后对行人移动失去限制性作用。

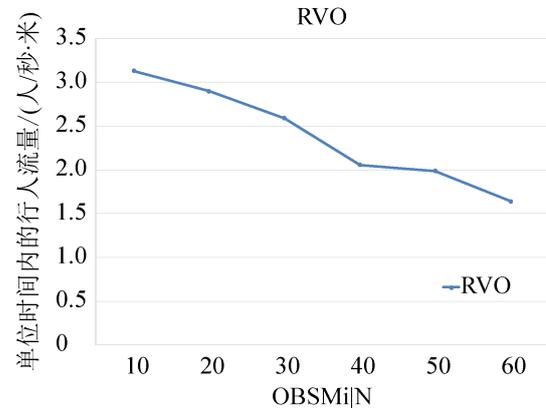
第三、根据以上数据反映出, 尽管随着最大障碍数的增加模型中行人发生碰撞的可能大大降低, 但是因此会导致行人流量逐渐减少, 并且随着 OBSMi|N 的增加, 行人在移动过程中的不确定性增加, 在模型中表现为行人流量的波动性。

利用改进后的 RVO 模型对地铁中穿越瓶颈的双向行人流的密度和速度的关系进行研究。行人密度的统计定义为车厢门口矩形区域内的行人密度, 其中该区域为车厢门口正中心处 7m×5m 的矩形

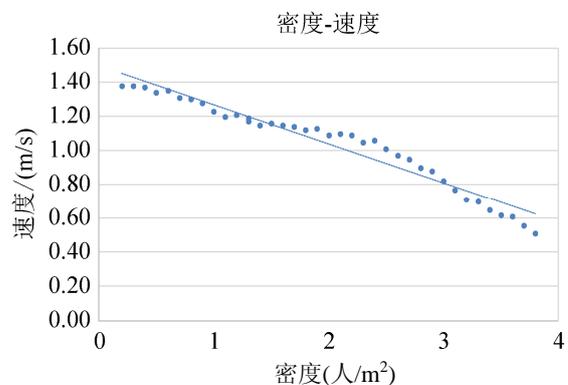
区域。地铁车门前密度和速度的关系如图 6(c)所示, 该行人速度是 50 次仿真的平均值。



(a) 行人流量状态变化图



(b) 可视区域内行人在不同情况下流量的均值



(c) 地铁车门前密度与速度的关系图

图 6 行人流量状态变化图

Fig. 6 The pedestrian flow change charts

考虑格林希尔治线性模型

$$u = b_0 + b_1k \tag{3}$$

得到地铁内行人速度与密度模型

$$u = 1.496 - 0.229k \tag{4}$$

式中: u 为行人步行速度, k 为行人密度, 决定系数 $R^2=0.947$, 满足拟合要求。

3 结论

本文在 RVO 算法的基础, 分析了该算法的不足之处, 结合 A*算法提出了改进方法。行人流量受到瓶颈宽度、障碍物参数的设置和行人数目的影响。实验中的行人特征: 1)穿越瓶颈时的行人流量根据瓶颈宽度线性增加; 2)当障碍物的参数设置的越大时, 行人通过瓶颈处的时间越长; 3)不断增加地铁中行人的数量, 由于可选择的路径受到限制, 因此行人通过瓶颈处的时间也不断增加。

将改进后的模型用 Unity 3D 进行仿真研究, 实现了模型的 3D 化, 使其能够更真实细腻地描述行人流现象, 从而可以让 RVO 模型在更多的领域得到应用。利用改进的模型对地铁站上下车时双向行人流进行仿真, 实验结果表明改进后的模型能够有效地模拟地铁中穿越瓶颈的双向行人流现象。

参考文献:

- [1] Fang W F, Yang L Z, Fan W C. Simulation of Bi-direction Pedestrian Movement Using a Cellular Automata Model [J]. *Physica A (S0378-4371)*, 2003, 321(3/4): 633-640.
- [2] 任刚, 陆丽丽, 王炜. 基于元胞自动机和复杂网络理论的双向行人流建模[J]. *物理学报*, 2012, 61(14): 144501. Ren G, Lu L L, Wang W. Modeling bi-direction pedestrian flow by cellular automata and complex network theories [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(14): 144501.
- [3] Li J, Yang L Z, Zhao D L. Simulation of Bi-direction Pedestrian Movement in Corridor [J]. *Physica A (S0378-4371)*, 2005, 354: 619-628.
- [4] 胡清梅, 方卫宁, 邓野. 一种基于社会力的行人运动模型研究[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(4): 977-980. Hu Q M, Fang W N, Deng Y. Research on Pedestrian Movement's Model Based on Social Force[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(4): 977-980.
- [5] 周金旺, 邝华, 刘慕仁, 等. 成对行为对行人疏散动力学的研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(5): 3001-3007. Zhou J W, Kuang H, Liu M R, et al. Paired behavior effect on pedestrian evacuation dynamics[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(5): 3001-3007.
- [6] Muramatsu M, Irie T, Nagatani T. Jamming Transition in Pedestrian Counter Flow [J]. *Physica A (S0378-4371)*, 1999, 267(3/4): 487-498.
- [7] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A, et al. Simulation of Pedestrian Dynamics Using a Two-Dimensional Cellular Automaton[J]. *Physica A (S0378-4371)*, 2001, 295(3/4): 507-525.
- [8] 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 J H, Weng W G, Ni S J. Simulation Study on Urban Evacuation with Different Route Choice Strategies[J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(1): 122-126.
- [9] 杨森炎, 吴建平, 徐彬, 等. 地铁通道客流组织措施的仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2014, 26(10): 2492-2496. Yang S Y, Wu J P, Xu B, et al. Simulation Study of Passenger Flow Organization Effects for Different Isolation Measures in Subway Passageway[J]. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(10): 2492-2496.
- [10] 杨建芳, 高岩, 王宏杰. 多层建筑物应急疏散模型和算法[J]. *系统仿真学报*, 2014, 26(2): 267-273. Yang J F, Gao Y, Wang H J. Multi-storied Building Emergency Evacuation Model and Algorithm[J]. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(2): 267-273.
- [11] 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 J, Wan J H, Yu H. Research on Simulation of Emergency Evacuation Based on Social Force Model[J]. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(6): 1197-1201.
- [12] Blue V J, Adler J L. Cellular Automata Microsimulation for Modeling Bi-Directional Pedestrian Walkways [J]. *Transp. Res. B (S0191-2615)*, 2001, 35(3): 293-312.
- [13] 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): 534-568. Zhang X F, Zhang C J, Bai C X et al. Multiple Disasters Evacuation Perceptual Model Based on Agent Technology[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(3): 534-568.
- [14] Kirchner A, Schadschneider A. Simulation of Evacuation Processes Using a Bionics-Inspired Cellular Automaton Model for Pedestrian Dynamics [J]. *Physica A (S0378-4371)*, 2002, 312(1/2): 260-276.
- [15] 江辉仙, 林广发, 江立辉, 等. 校园楼宇火灾疏散路径分析和应用[J]. *系统仿真学报*, 2013, 25(9): 2171-2183. Jiang H X, Lin G F, Jiang L H, et al. Analysis and Application of Evacuation Path Inside Buildings Geared to Campus Fire[J]. *Journal of System Simulation*, 2013, 25(9): 2171-2183.