

行人同伴群社会力学仿真

何 民¹, 樊 冬², 栾庆熊¹, 于海宁¹

(1. 昆明理工大学 交通工程学院, 昆明 650500; 2. 洛阳市规划建筑设计研究院有限公司, 洛阳 471000)

摘 要: 针对同伴群的群体动力学、其比例和规模对行人流的影响以及拥挤人流中的形态特性和活动特性研究还很不充分的问题, 采用改进社会力学行人同伴群模型并构建仿真平台, 对不同场景进行仿真研究. 结果表明: 同伴群降低了行人流平均速度, 且随着人群密度增加, 同伴群平均速度也会减小. 同伴群尺寸越大, 平均速度越低, 对群体平均速度降低作用越明显. 同伴群减弱了行走空间宽度增加带来的行人流速度增加趋势. 同伴群在人群中表现出了更稳定的行走路径和行走速度, 虽然同伴群降低了人群疏散的效率, 但产生了“路径效应”.

关键词: 同伴群; 社会力学模型改进; 行人仿真; agent 仿真框架; 空间划分技术

中图分类号: U 491.2⁺5; TP 312

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2015)03-0419-07

doi: 10.11936/bjtxb2014030020

Social Dynamics Simulation of Pedestrian Social Groups

HE Min¹, FAN Dong², LUAN Qing-xiong¹, YU Hai-ning¹

(1. Faculty of Transportation Engineering Kunming, University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Luoyang City Planning and Architectural Design and Research Institute Co. Ltd., Luoyang 471000, China)

Abstract: The study on the group dynamics, the influence of their proportion and scale on the pedestrian flow, the morphological characteristics and activity features in crowd is not adequate enough. This paper builds up a simulation platform to simulate different scenarios using the social force group model. Result shows that pedestrian group lowers the average speed of pedestrian and increases the crowd density. The larger the group size is, the lower the average speed is, and the more obvious the effect can be. With the growth of width of walking space, pedestrian flow shows a trend of increase. Pedestrian groups ensure more stable walking routes and walking speed. Although social groups decrease the efficiency of crowd evacuation, they do produce the “path effect”.

Key words: social groups; improved social force model; pedestrian simulation; agent simulation framework; space partition technique

随着中国城市人口增加, 经济水平的发展, 交通方式的变迁, 目前步行已经占总出行量的 10% ~ 20%^[1]. 人们不再满足单纯的交通可达, 而是逐步强调出行活动的舒适性和安全性. 在地铁站、广场、步行街、商场等人流密集的公共步行环境中, 在高峰期或节假日常出现人流量大、人流密度高的情况, 疏

散压力大, 安全隐患突出.

行人交通从人群规模上, 可以分为宏观、中观和微观 3 个层次. 宏观层面: 着重研究行人流的流体力学等宏观特性, 关注行人流的“速度-流量-密度”集聚特性; 中观层面: 着重研究行人群组活动特性, 关注人群中局部群体的运动、相互作用及对行人流

收稿日期: 2014-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51168023)

作者简介: 何 民(1972—), 男, 教授, 主要从事交通系统分析、交通仿真、交通流理论方面的研究, E-mail: kmbemin@gmail.com

的影响;微观层面:着重研究行人个体在具体环境中采取行动及人群体活动特性的形成机理.

行人步行设施中行人常常以同伴群的形式出行^[2-5],作为行人流中的中观群体,在大部分的交通设施中,同伴群所占行人群体比例都高于一半^[2-3].根据人群中小组成员的关系,可以将小群体分为2种^[3-6]:兴趣、目标相近,行走时相互间距离较近的行人,如旅行团;有社会关系,有意识走到一块的行人,例如同学、朋友或家庭成员.针对本文,第1种群组是作为受周围环境和自身喜好产生的偶然结果,而第2种群组则是作为具有固定社会关系而产生的必然组合结果.同伴群内部同伴之间、与外部独立行人之间及与其他同伴群之间的相互作用,行进时的空间形态以及这个形态对行人流的影响研究才刚刚开始^[3-4,7].同时在人群紧急疏散中,同伴群对人群疏散过程同样产生影响^[8-10].

行人仿真研究方法可以直观地刻画行人交通,进行定量、可视、可重复、实时交互的观察研究,是行人交通研究的重要方法.行人运动仿真模型也可以分为宏观、中观和微观3个类型,宏观模型和中观模型各有不足,微观仿真模型不仅有宏观和中观模型的部分优点,能够细致描述行人个体的复杂行为,还可以进行各人群层次的研究.社会力学模型^[11-13],是目前最为认可的微观连续仿真模型,很好地模拟了如“径流”“拱形堵塞”“快即是慢”等现象.

本文针对行人中观群体(同伴群)构建改进的社会力学仿真模型及仿真平台.平台采用agent建模、分层编程的仿真框架,并加入了空间划分技术、前向观察力和靠侧行走趋势力的作用.在不同场景中进行仿真,研究同伴群对行人交通流的影响.

1 仿真模型

1.1 仿真程序框架及优化技术

1.1.1 agent与社会力学模型结合程序框架

agent是人工智能领域的核心概念,具备感知、分析、学习等智能行为,可与所处环境及其他实体动态交互、综合决策及自我调整状态^[14].行人行走时感知周围环境,分析选择合适路径,感知周围密度调整合适的步行速度等行为和agent思想契合.

而面向对象的编程技术,将对象进行封装,属性抽象为数据成员,行为抽象为函数成员,通过这些函数与环境及其他行人个体交互,感知障碍物、目的地和周围行人,根据力学模型,调整属性(数据成员)

值,改变自身的运动状态和受力状态.可见有封装性和交互反馈性的面向对象编程技术与agent核心思想及社会力学模型构建方法上具有外在形式上的高度相似性和内在逻辑结构上的一致性.

1.1.2 分层编程框架

结合对同伴群研究^[3],用面向对象分层编程思想实现仿真程序框架(见图1).仿真模型库层包含行人agent、障碍物obstacle、路径点waypoint及场景scene等实物类;向量vector、四叉树tree等数据结构类,在模型库中已实现行人仿真运算所需要的所有功能,以库文件形式进行调用.在显示及控制层包含对仿真模型参数管理类config、场景及行人初始化类loadscene、主显示界面类mainwindow及仿真过程控制对话框类control,仅仅进行仿真初始化、界面显示及参数控制方面工作.分层的思想可以把工作重心放在模型构建或仿真显示上,这不仅提高了仿真编程的效率,同时还提高了仿真模型的扩展性、移植性.

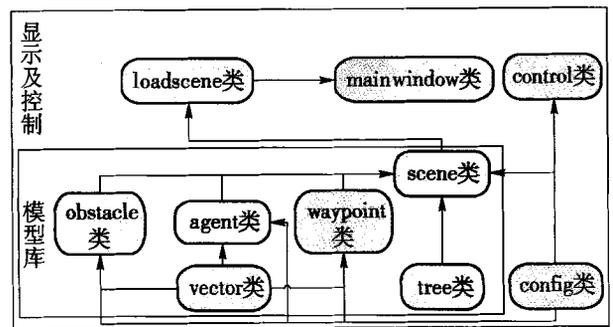


图1 仿真程序框架

Fig. 1 Simulation program framework

1.1.3 四叉树空间划分技术

社会力学模型计算受力时,需要获取行人周围一定范围内的行人墙壁的位置,这会导致大量距离计算,不利于仿真的高效运行.本文加入四叉树空间划分技术,将场景空间划分为离散方格区域,可以快速得到行人周围邻居,提高仿真效率,算法流程如图2所示.

1.2 改进基本社会力学模型

Helbing等^[11-12]最初提出的社会力模型包括3个受力项:自驱动力、行人间的作用力及行人与墙壁的作用力. Helbing等提出的改进社会力学模型^[12]修正了行人间的社会力作用,将受力项改为加速项,取消了接触力.这些改进刻画了行人间更真实的受力作用,但缺少接触力作用容易导致在密集人流仿真中发生行人重叠和穿墙的现象.对此,本文以改

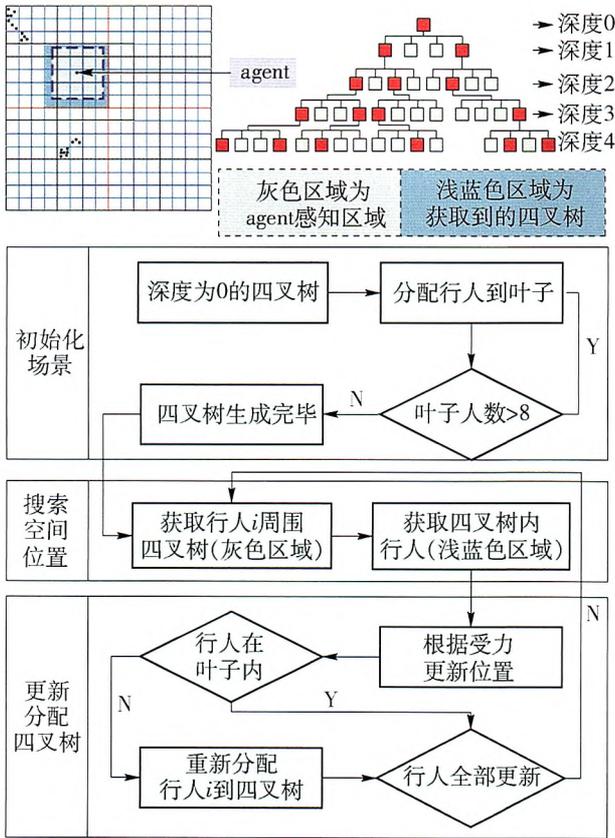


图2 四叉树计算及更新流程

Fig.2 Quadtree calculation and update process

进的社会力学模型^[13,15]为基础,社会力学的加速项不做改变,进行新特性加入及模型优化.

综上所述,行人*i*的受力作用,由3个不同的加速项来描述:

$$\frac{dv_i}{dt} = f_i^0 + \sum_j f_{ij} + \sum_j f_i^{wall} \quad (1)$$

1.2.1 期望力作用 f_i^0

反映行人*i*希望以 v_i^0 速度向特定位置运动的动机. 作为社会力学策略加速项,在此加入行人行走的避让策略(前向观察力)和靠侧行走心理倾向策略(靠侧行走作用力). 加速项表述及参数为

$$f_i^0 = \frac{v_i^0(t)e_i^0 - v_i(t)}{\tau_i} + f_i^{look} + f_i^{trend} \quad (2)$$

式中: $v_i^0(t)$ 、 $v_i(t)$ 分别为行人*i*在*t*时刻的期望运动速度和实际运动速度; e_i^0 为行人*i*在*t*时刻的期望运动方向; τ_i 为行人*i*的加速时间; f_i^{look} 为行人*i*前向观察力作用; f_i^{trend} 为行人*i*靠侧行走趋势力作用.

a) 前向观察力作用 f_i^{look} , 反映行人*i*在观察前方左右两侧行人数量、位置及速度后采取的避让策略,如图3所示. 首先,行人*i*搜索前方行人速度方

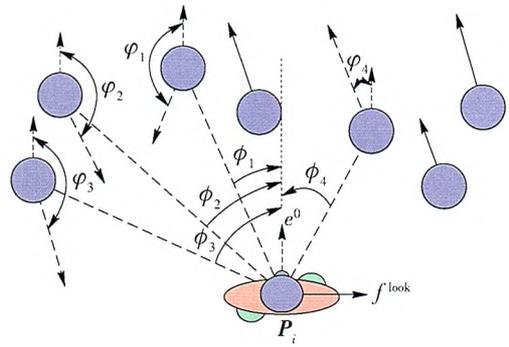


图3 前向观察力计算示意图

Fig.3 Calculating diagram of look ahead force

向与 e_i^0 (期望运动方向) 夹角大于 150° 的行人*j* (基本为对向行走, $\phi_4 < 150^\circ$, 不符合), 然后计算行人*i*与行人*j*质心连线到期望方向 e_i^0 的转角 ϕ , 如果 ϕ 绝对值小于 20° ($|\phi_3| > 20^\circ$, 不符合), 则认为行人*i*需要避让的行人*j*, 如式(3)统计两侧冲突趋势 ($\phi < 0$, 向左避让; $\phi > 0$, 向右避让), 并用式(4)计算避让.

$$count = \begin{cases} +1, & |\phi| > 150^\circ, & 0^\circ < \phi < 20^\circ \\ -1, & |\phi| > 150^\circ, & -20^\circ < \phi < 0^\circ \end{cases} \quad (3)$$

$$f_i^{look} = \begin{cases} t_+, & count > 0 \\ t_-, & count < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: t_+ 由期望方向 e_i^0 顺时针旋转 90° 得到; t_- 由期望方向 e_i^0 逆时针旋转 90° 得到.

b) 靠侧行走趋势力作用 f_i^{trend} , 反映行人*i*靠侧行走的心理倾向. 在中国, 行人有靠右侧行走偏好, 因此, 加速项

$$f_i^{trend} = 0.5t_+ \quad (5)$$

式中 t_+ 同前向观察力参数.

1.2.2 行人间力作用 f_{ij}

反映了行人*i*与其他行人*j*间的相互作用^[11-12], 由行人间的社会力和接触力组成, 表述及参数为

$$f_{ij}(d_{ij}, \theta) = f_{ij}^{soc}(d_{ij}, \theta) + f_{ij}^{contact}(d_{ij}) \quad (6)$$

行人间的社会力 f_{ij}^{soc} 是行人*i*试图和*j*之间保持一定距离所产生的心理作用力,

$$f_{ij}^{soc}(d_{ij}, \theta) = -Ae^{-d_{ij}/B} (e^{-(n'B\theta)^2} t_{ij} + e^{-(nB\theta)^2} n_{ij}) \quad (7)$$

式中: d_{ij} 为个体*i*和*j*之间的距离; θ 为个体*i*的坐标向量转向个体*j*时转过的角度; t_{ij} 为垂直于向量 n_{ij} 与个体*i*的速度 v_i 夹角小于 90° 的单位向量; $t_{ij} = D_{ij} / \|D_{ij}\|$; $D_{ij} = \lambda(v_i - v_j) + e_{ij}$, $e_{ij} = (x_j - x_i) /$

$\|x_j - x_i\|$, n_{ij} 由向量 t_{ij} 逆时针旋转 90° 得到; $B = \gamma \|D_{ij}\|$; A 为社会力强度因子, λ, γ, n 和 n' 为模型参数, 以行人周围半径 20 m 的圆形区域为社会力作用范围.

接触力 f_{ij}^{contact} 包括身体挤压力和滑动摩擦力, 如果 $r_i - d_{iw} > 0$, 表示行人 i 和行人 j 有接触, 此时因重叠产生身体挤压力, 因相对速度产生滑动摩擦力, 接触加速项为

$$f_{ij}^{\text{contact}}(d_{ij}) = kg(r_i - d_{ij})n_{ij} + Kg(r_i - d_{ij})(\Delta v_{ji} \cdot t_{ij})t_{ij} \quad (8)$$

式中: r_i 为行人 i 和行人 j 的半径和; $g(r_i - d_{ij}) = r_i - d_{ij}(r_i - d_{ij} > 0)$ 或 $0(r_i - d_{ij} \leq 0)$; n_{ij} 为行人 j 指向行人 i 的单位向量; t_{ij} 为垂直于向量 n_{ij} 与行人 i 的速度向量 v_i 夹角小于 90° 的单位向量; $\Delta v_{ji} = (v_j - v_i)$; k, K 分别为挤压力和摩擦力强度因子.

1.2.3 墙与人的相互作用力 f_i^{wall}

反映行人 i 与活动边界产生的力作用^[12,16], 由墙与人的社会力和接触力组成. 类似行人间的作用力, 表述及参数为

$$f_i^{\text{wall}}(d_w) = ae^{(r_i - d_w)/b_{n_{iw}}} + g(r_i - d_w)(kn_{iw} - K(v_i \cdot t_{iw})t_{iw}) \quad (9)$$

式中: a, b 分别为社会力的强度和范围; r_i 为行人 i 半径与墙壁厚度一半之和; d_w 为行人 i 质心到墙壁中心的距离; n_{iw} 为垂直于墙壁指向个体 i 的单位向量; $g(r_i - d_w) = r_i - d_w(r_i - d_w > 0)$ 或 $0(r_i - d_w \leq 0)$; t_{iw} 平行于墙壁与行人 i 的速度向量 v_i 夹角小于 90° 的单位向量; k, K 分别为挤压力和摩擦力强度因子, 行人与墙壁边缘 1 m 以内为社会力作用范围.

1.3 同伴群社会力学模型

Moussaï 等^[3] 采用社会力建模方法, 构建了同伴群力学模型. 模型使用 3 个加速项: 交流需求加速项、同伴群归属作用项及避免同伴重叠作用项. 考虑到基础社会力学模型已经加入了接触力作用, 故取消避免同伴重叠作用项. 因此, 同伴群成员 i 所受加速作用有 2 部分组成,

$$f_i^{\text{group}} = f_i^{\text{vis}} + f_i^{\text{all}} \quad (10)$$

式中: f_i^{group} 为同伴群成员 i 所受加速作用; f_i^{vis} 为成员 i 交流需求加速项; f_i^{all} 为成员 i 同伴群归属加速项.

同伴群成员之间的交流需求产生同伴群的形态特征. 成员 i 为了避免和内部成员、外部行人之间发生冲突, 会不断调整自身的位置以便于相互交流. 注视方向和眼神交流亦是同伴群交流的基本特性, 成员可以通过观察得到其他同伴的实时动态, 以便进行自身调整. 因此, 引进视野域进行同伴群行人

仿真建模.

在成员人数是 N 的同伴群中, 定义向量 H_i 为成员 i 的注视方向(观察方向), 成员 i 可以方便观察在 H_i 左右角度 ϕ 范围内的同伴. 定义 C_i 为行人 i 所在同伴群成员的质心点, 如图 4(a) 所示.

a) f_i^{vis} 交流需求作用项. 同伴群成员为了和其他同伴交流, 需要改变注视方向, 如图 4(b) 所示. 可表述为, 注视方向向量 H_i 转动 α_i , 使得质心点 C_i

($C_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i$) 包含在成员 i 的视野范围内. 转动角度越大, 步行时就越不舒服. 因此, 成员 i 通过调整自身的位置以减小头部旋转的角度 α_i , 增加行走的舒适性. 一般可认为注视方向为期望方向, 即 $H_i = e_i^0$. 加速项表述及参数为

$$f_i^{\text{vis}} = -\beta_1 \alpha_i v_i \quad (11)$$

式中: v_i 为成员 i 速度向量; α_i 为成员 i 注视方向转动的角度; β_1 为作用力强度因子.

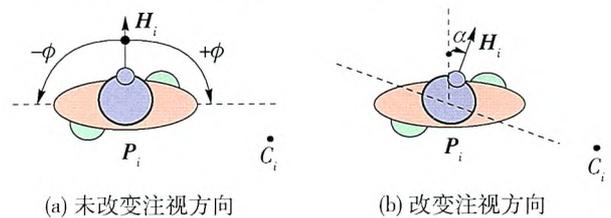


图4 视野域及变量

Fig.4 View area and variables

b) f_i^{all} 同伴群归属作用项. 同伴群成员因为交流需要, 成员 i 和同伴群质心会保持一定的距离. 根据文献[3], 随着同伴群规模的加大, 最远成员到质心的自由距离会增加. 加速项表述及参数为

$$f_i^{\text{all}} = q_2(d_{ij}, N)\beta_2 U_i \quad (12)$$

式中: $q_2(d_{ij}, N) = 1(d_{ij}$ 距离超过阈值) 或 $0(d_{ij}$ 小于阈值); 阈值为 $(N-1)/(2m)$; N 为同伴群的人数; U_i 为个体 i 指向同伴群质心的单位向量; β_2 为引力作用强度因子.

最后, 综合基础社会力学模型及同伴群模型, 完整的运动方程描述为

$$\frac{dv_i}{dt} = f_i^0 + \sum_j f_{ij} + \sum_j f_i^{\text{wall}} + f_i^{\text{group}} \quad (13)$$

式中: 等式左侧代表个体 i 的加速度; 等式右侧为各加速项.

2 仿真实验

2.1 模型参数及场景设计

根据上述建立的仿真模型, 在广场(长 50 m, 宽

50 m 4 个方向行人流)、步行街(双向行人流,如果不进行特别说明,默认的场景尺寸为宽 5 m,长 100 m)及瓶颈处(出入口宽度 6 m)进行仿真研究. 仿真场景中蓝色边界代表墙壁,方块代表单独行人,圆代表同伴群成员,黄色的线条代表行人的速度方向及大小. 参考文献[12-13,15],模型参数及行人属性参数如表 1 所示.

表 1 模型和行人属性参数

Table 1 Model and pedestrian property parameters

参数名称	参数值或范围
行人半径 r/m	0.25 ~ 0.35(均匀分布)
期望速度 $v^0/(m \cdot s^{-1})$	1.29 ± 0.19(正态分布)
加速时间 τ/s	0.5
社会力因子 $A/(m \cdot s^{-2})$	4.5
速度影响权重 λ	2.0
社会力影响范围因子 γ	0.35
速度影响角系数 n	2.0
位置影响角系数 n'	3.0
视觉需求力因子 β_1/s^{-1}	4
归属感因子 $\beta_2/(m \cdot s^{-2})$	1
挤压力因子 κ/s^{-2}	1 200
摩擦力因子 $K/(m^{-1} \cdot s^{-1})$	2 400
行人与墙壁社会力因子 $a/(m \cdot s^{-2})$	10
行人与墙壁作用力范围 b/m	0.3

2.2 同伴群形态特征

为了进行同伴群形态特征及对人流宏观特性研究,设计了广场、步行街和瓶颈 3 个仿真场景,人流中同伴群比例都设为 70%^[5].

广场 4 个方向各 100 人,人流中都出现了同伴群的“V”、“U”及“W”的形态特征,如图 5 所示,验证了以往研究中所描述的低密度人流中同伴群的形态特征.

步行街 2 个方向各有 100 个行人(2 个方向行人颜色分别为黄色和白色),双向行人流出现了明显的“径流”现象,如图 6 所示. 加入前向观察作用增强了行人“径流”趋势,减少了冲突数量. 同伴群出现受挤压的形态,表现出线性和倒“V”字形形态.

瓶颈为一双向出入口,宽度为 6 m,2 个方向各有 90 个行人(2 个方向行人颜色分别为黄色和白色),如图 7 所示. 在出入口出现了明显的“拱形”拥堵,同伴群因挤压形态被破坏,只表现出聚集的特性. 同时同伴群因群体优势形成“通行路径”,同向

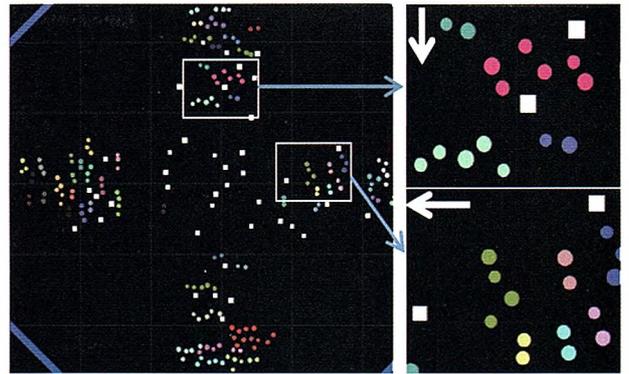


图 5 广场场景及同伴群形态

Fig. 5 Square scenario and social groups pattern

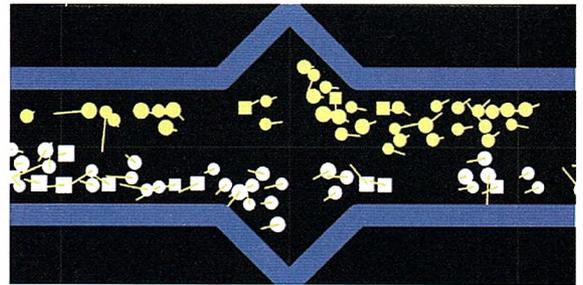


图 6 步行街仿真快照

Fig. 6 Simulation snapshot of pedestrian street scenario

行人出现明显的跟随同伴群的行为.

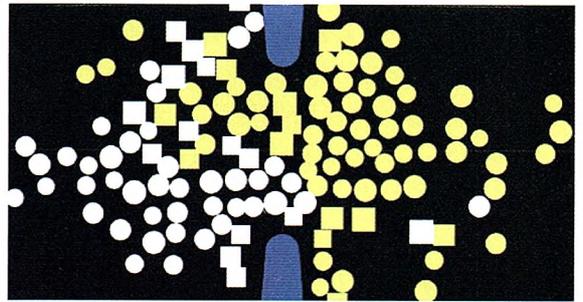


图 7 瓶颈仿真快照

Fig. 7 Simulation snapshot of bottleneck scenario

2.3 同伴群对行人流速度影响

场景控制行人数量和人群中同伴群尺寸进行对比研究,并将人流中同伴群比例都设为 70%.

首先,将步行街场景行人数量分别设为 100、150、200 及 250 的 4 种情况,分别仿真计算出人群不同尺寸同伴群(G1 为行人个体,G2 为人数 2 的同伴群,G3 为人数 3 的同伴群,依次类推)的平均速度,结果如图 8 所示. 随着人群人数的增加,不同尺寸的同伴群速度均有下降的趋势. 在相同人群中,同伴群的平均速度随同伴群尺寸的增加而减小.

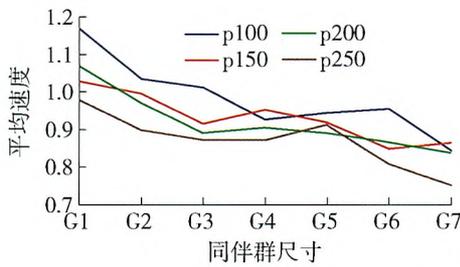


图8 步行街不同流量下同伴群流平均速度分布
Fig.8 Velocity distribution of pedestrian street scenario under different flow rates

表2 行人同伴群组合对人群速度的影响
Table 2 Influence of pedestrian social groups combination on pedestrians speed m/s

类型	总体速度	个体速度	同伴群速度
G1	1.164	1.164	—
G1 + G2	1.035	1.162	0.983
G1 + G3	1.029	1.168	0.971
G1 + G4	1.023	1.189	0.954
G1 + G5	1.007	1.161	0.941
G1 + G6	0.997	1.156	0.931

其次,将步行街场景行人人数设为100,进行个体和不同同伴群尺寸组合(G1表示没有同伴群,G1 + G_x表示个体和尺寸为x的同伴群组合),仿真计算不同组合下行人的平均速度变化.结果如表2所示,同伴群明显降低了人群平均速度,且人群平均速度随同伴群尺寸增加而减小.同伴群尺寸对个体的速度减小影响较弱.在同伴群尺寸为4的组合中,个体平均速度高于其他几种组合,同伴群的平均速度出现了明显的降低,可以认为尺寸为4同伴群对行人流速度有最为显著的影响.

最后,将行人人数设为100,分别设置步行街宽度4~7 m,间隔0.5 m,进行个体(红色折线)和同伴群混合人群(浅绿色折线)仿真,计算不同步行街宽度下行人流速度变化,结果如图9所示.

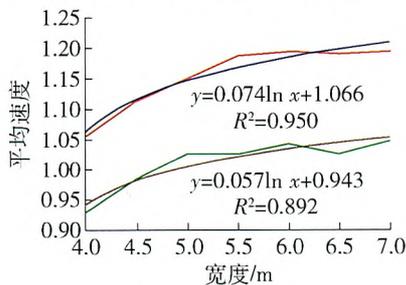


图9 步行街宽度对行人流速度影响
Fig.9 Influence of pedestrian street width on pedestrians speed

结果显示:随着宽度增加行人流速度都有增加趋势.通过拟合曲线(显示曲线方程和R²)发现随着宽度增加个体较混合人群有更大的速度增加趋势(拟合曲线系数).

2.4 同伴群和行人速度稳定性分析

根据观察发现同伴群属于人群中的优势群体,在冲突时有较少的速度改变,在仿真中体现为同伴群成员速度角度改变比个体行人要小,对此,进行步行街人数100、瓶颈人数200两个场景仿真,计算人群中个体和同伴群的速度方向(弧度值)变化,进行均值和方差分析,结果如表3所示.

表3 同伴群速度稳定性分析
Table 3 Stability analysis of social groups velocity

场景	类型	均值	方差
步行街	个体	0.227	0.087
	同伴群	0.205	0.060
瓶颈	个体	0.888	0.817
	同伴群	0.885	0.817

数据显示,同伴群较行人个体有更加稳定的行进方向(均值和方差均较小),即在人群中处于优势,行进时同伴群有更少的避让.但随着人群中挤压作用增加,同伴群结构被破坏,速度稳定性的差别非常微小,可见同伴群的形态和同伴群的行进稳定性有着密切的关联.

3 结论

- 1) 同伴群在受到挤压、冲突时出现侧向前进或队列前进的现象.
- 2) 同伴群降低了行人流的平均行走速度,且对行人流速度影响随同伴群尺寸速度增大而增强.
- 3) 同伴群在行走时拥有群体优势,表现在行走中较少改变行进方向,但在拥挤环境中群体行进方向优势基本消失,但产生了“路径效应”.
- 4) 同伴群和行人个体在行走空间宽度变化时有相同的速度变化趋势,但同伴群减弱了宽度增加带来的行人流速度提高的趋势.

参考文献:

[1] 胡清梅,方卫宁,李广燕,等.公共建筑环境下行人行为特性及拥挤机理研究综述[J].中国安全科学学报,2008,18(8):68-73.
HU Qing-mei, FANG Wei-ning, LI Guang-yan, et al. Review on pedestrian behavior characteristics and crowding

- mechanism in public building [J]. *China Safety Science Journal*, 2008, 18(8): 68-73. (in Chinese)
- [2] LOSCOS C, MARCHAL D, MEYER A. Intuitive crowd behaviour in dense urban environments using local laws [C]// *Proceedings of the Theory and Practice of Computer Graphics*. Birmingham: IEEE Computer Society, 2003: 122-129.
- [3] MOUSSAÏD M, PEROZO N, GARNIER S, et al. The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd dynamics [J]. *Plos One*, 2010, 5(4): e10047.
- [4] QIU F, HU X. Modeling group structure in pedestrian crowd simulation [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2010(18): 190-205.
- [5] JAMES J. The distribution of free-forming small group size [J]. *American Sociological Review*, 1953(18): 569-570.
- [6] 肖俊, 李文通. 视觉信息在行人群体仿真中的应用 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2012, 24(2): 217-226.
XIAO Jun, LI Wen-tong. Visually-guided pedestrian crowd simulation [J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2012, 24(2): 217-226. (in Chinese)
- [7] SINGH H, ARTER R, DODD L, et al. Modelling subgroup behaviour in crowd dynamics DEM simulation [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, 33(12): 4408-4423.
- [8] SANTOS G, AGUIRRE B E. A critical review of emergency evacuation simulation models [C]// *Proceeding of Conference on Building Occupant Movement during Fire Emergencies*. Gaithersburg: IEEE Computer Society, 2004: 27-52.
- [9] 周金旺, 邝华, 刘慕仁, 等. 成对行为对行人疏散动力学的影响研究 [J]. *物理学报*, 2009(5): 3001-3007.
ZHOU Jin-wang, KUANG Hua, LIU Mu-ren, et al. Paired behavior effect on pedestrian evacuation dynamics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009(5): 3001-3007. (in Chinese)
- [10] 黄志德. 基于元胞自动机的行人疏散模拟研究 [D]. 桂林: 广西师范大学物理科学与技术学院, 2010.
HUANG Zhi-de. Research study on simulation of pedestrian flow evacuation based on cellular automaton [D]. Guilin: College of Physical Science and Technology, Guangxi Normal University, 2010. (in Chinese)
- [11] HELBING D, MOLNAR P. Social force model for pedestrian dynamics [J]. *Physical Review E*, 1995, 51: 4282-4286.
- [12] HELBING D, FARKAS I, VICSEK T. Simulating dynamical features of escape panic [J]. *Nature*, 2000, 407(6803): 487-490.
- [13] MOUSSAÏD M, HELBING D, GARNIER S, et al. Experimental study of the behavioural mechanisms underlying self-organization in human crowds [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009, 276(1668): 2755-2762.
- [14] GOLDSTONE R L, JANSSEN M A. Computational models of collective behavior [J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2005, 9(9): 424-430.
- [15] HELBING D, FARKAS I J, MOLNAR P, et al. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations [J]. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 2002, 21: 21-58.
- [16] JOHANSSON A, HELBING D, SHUKLA P K. Specification of the social force pedestrian model by evolutionary adjustment to video tracking data [J]. *Advances in Complex Systems*, 2007, 10(Suppl 2): 271-288.

(责任编辑 杨开英)