

零视野条件下考虑结伴行为的行人疏散研究*

陈亮¹⁾ 郭志良²⁾ 李永行¹⁾ 张健^{1)†} 唐铁桥³⁾ 陈艳艳¹⁾

1) (北京工业大学, 交通工程北京市重点实验室, 北京 100124)

2) (陆军军事交通学院, 天津 300161)

3) (北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191)

(2024年7月19日收到; 2024年8月22日收到修改稿)

为研究零视野条件下结伴行为对行人疏散过程的影响, 本文采用可控实验与建模仿真相结合的方法, 对零视野条件下结伴行人的疏散过程进行深入研究. 首先, 通过组织零视野条件下行人的结伴疏散实验, 发现了零视野条件下结伴行人的结伴行为、听觉引导行为和沿墙行为等典型疏散行为特征. 然后, 考虑不同结伴模式下行人的运动行为特征以及听觉引导行为、沿墙行为对结伴疏散过程的影响机制, 构建了基于元胞自动机的零视野条件下行人疏散模型. 最后, 利用实验结果对提出的模型进行验证, 仿真研究了零视野条件下结伴行为对疏散过程的影响. 结果表明, 模型能有效地刻画零视野条件下结伴行人的疏散行为特征, 疏散效率随结伴感知距离增加而降低. 该研究可为类似场景中行人疏散策略和方案的制定提供科学依据.

关键词: 疏散实验, 零视野条件, 结伴行为, 元胞自动机模型

PACS: 05.50.+q, 45.70.Mg, 05.65.+b

DOI: 10.7498/aps.73.20241007

CSTR: 32037.14.aps.73.20241007

1 引言

随着社会经济的发展和城市化进程的推进, 城市人口不断增加, 城市中经常出现大型的、行人高度聚集的社会活动, 在地下交通枢纽、地下商业设施等大型地下综合体内经常出现大规模人群. 一旦发生火灾、恐怖袭击、爆炸等突发公共安全事件, 易发生视野受限的紧急情况, 将导致人群恐慌, 可能因疏散行为或应急管理策略不当造成大量的人员伤亡和财产损失^[1]. 同时, 在出行活动中, 结伴行为日益普遍. 在发生意外情况需要疏散时, 由于结伴行人之间的相互作用关系, 可能出现结伴行人寻找同伴的现象, 且结伴群体会占据更大空间, 结伴行为会对人群疏散过程产生重要影响^[2]. 在视野受

限条件下, 结伴人群疏散过程中个体间的相互作用关系变得更加复杂, 人员伤亡的风险更加严峻^[3-6]. 因此, 视野受限条件下结伴人群的安全疏散问题引起了国内外研究人员的广泛关注.

近年来, 学者们采用可控实验^[7]和建模仿真^[8]的方法对结伴行人的疏散问题展开了一系列的研究. Wei等^[9]通过问卷调查和实地观测研究了结伴行人的群组大小、空间位置、速度调整、信息传递等因素对结伴群体运动过程的影响, 发现结伴群体的等待行为对疏散过程具有重要影响. Gorrini等^[10]通过对比分析结伴行人和单个行人的运动速度, 发现结伴行人为了保持结伴队形以及互相交谈, 运动速度比单个行人的运动速度降低30%. Chen等^[11]通过疏散实验和模型仿真研究了儿童结伴行为对疏散过程的影响, 发现儿童结伴行为对疏散效率产

* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 72001009)和国家自然科学基金重点项目(批准号: 72231001)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jian.zhang@bjut.edu.cn

生了负面影响. Cuesta 等^[12]通过疏散实验对比分析了火灾条件下单个行人和不同规模结伴群体的疏散过程,发现大规模结伴群体的疏散效率高于小规模结伴群体和单个行人的疏散效率. Ren 等^[13]通过疏散实验研究了结伴群体的行为模式对人群疏散效率的影响,发现结伴群体的存在降低了人群疏散效率. 霍非舟等^[4]考虑结伴行为构建了行疏散仿真模型,仿真结果表明行人疏散时间随结伴比例的增大呈现先延长后缩短的趋势. 从以上研究可以发现,在正常视野条件下,行人结伴行为通常会对人群疏散过程产生负面影响. 但是,在不良视野(零视野和有限视野)条件下,行人只能从周围环境中获取有限的信息,行人运动行为与正常视野条件下的行人运动行为有很大差异,进而影响疏散效率和安全. Xie 等^[14,15]通过可控实验对比分析了不同能见度条件下个体和结伴群体的疏散效率,发现随着能见度的降低,结伴群体的疏散效率逐渐提高,而个体的疏散效率逐渐降低. Was 等^[16]通过组织烟雾环境中的隧道疏散实验,发现结伴群体在烟雾环境中的疏散速度低于正常视野条件下的疏散速度. Xue 等^[17]通过疏散实验和模型仿真研究了有限视野条件下行人在疏散过程中的沿墙行为和冲突解决过程. Zeng 等^[18]通过组织零视野条件下隧道内的个体和结伴群体疏散实验,发现零视野条件下结伴群体的移动速度高于个体移动速度,结伴行为可以提高疏散效率. 从以上研究可以发现,在正常视野条件下,结伴行人之间的交流和互动对人群疏散效率产生阻碍作用;在视野受限条件下,结伴行人之间的信息交流使行人获得更多周围环境信息,对人群疏散效率产生促进作用. 虽然学者们针对视野受限条件下行人疏散特性、结伴疏散效率已开展初步探讨,但行人结伴行为具有异质性,针对零视野条件下行人结伴疏散的研究还不充分.

实际上,行人在疏散过程中会受到多种因素的干扰^[19,20],结伴行人并不总是以整体的形式进行运动,结伴行人之间可能出现分离的情况. 在正常视野条件下,行人可以通过视觉寻找同伴或者疏散路径;但在零视野条件下,行人的视野信息完全缺失,需要依靠声音信息寻找同伴^[21]. 然而,现有零视野条件下考虑结伴行为的行人疏散研究中主要探讨结伴群体作为整体的疏散情况,未考虑到结伴行人分开时的结伴过程对疏散过程的影响. 因此,本文通过组织零视野条件下行人的结伴疏散实验,获取

结伴行人在零视野疏散过程中的运动行为特征;考虑结伴行为、沿墙行为、听觉引导行为,构建零视野条件下行人疏散模型;利用实验数据对提出的模型进行验证,仿真研究零视野条件下结伴行为对疏散过程的影响. 本文的理论贡献和创新性主要包括以下两个方面:首先,通过可控实验发现了零视野疏散过程中结伴行人的听觉引导行为、沿墙行为和结伴疏散模式,揭示了个体行为对疏散过程的影响机理;其次,考虑不同结伴模式下行人的运动行为特征对疏散过程的影响机制,构建了基于元胞自动机的零视野条件下行人疏散模型,探讨了零视野条件下结伴行为对疏散过程的影响,为制定零视野条件下行人应急疏散预案与管理策略提供了理论支持.

2 疏散实验

2.1 实验设置

零视野条件下行人的疏散实验在图 1 所示场景内进行. 实验场景由区域 1 和区域 2 组成,区域 1 长度为 9 m,宽度为 8 m;区域 2 长度为 12 m,宽度为 2 m. 在两个区域分别有一个出口,两个出口的宽度均为 0.8 m,出口 1 位于区域 1 南侧边界,距离东侧边界 1 m;出口 2 位于区域 2 西侧边界. 在区域 1 有四个障碍物,分别位于区域 1 的东侧、南侧、西侧和北侧的中间位置,障碍物的长度为 2.4 m,宽度为 0.6 m,高度为 0.74 m. 在图 1 中,黑色矩形代表障碍物和边界,边界宽度为 0.2 m. 在实验场地旁边楼宇的顶层安置一台摄像机,用来记录行人疏散的过程.

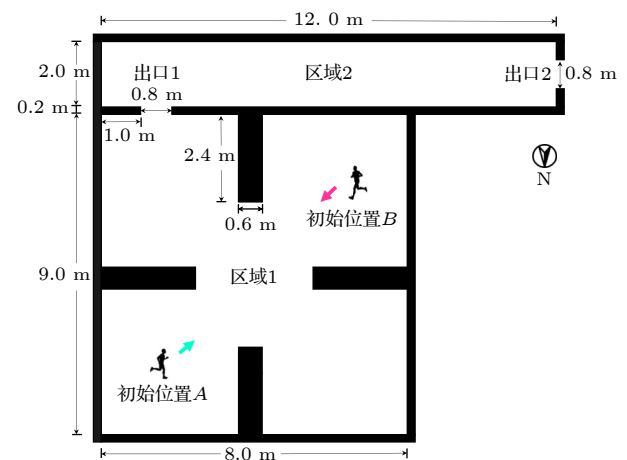


图 1 实验场景示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental scenario.

疏散实验的参与人员均为在校大学生,共 234 人,平均年龄为 22 岁,其中男生 132 人,女生 102 人,所有参与人员被分为 117 个两人小组.小组内两个行人是具有同学、朋友或者恋人等社会关系的组合,用来模拟现实情况中行人结伴出行的情景.

2.2 实验流程

疏散实验的目的是研究零视野条件下两个具有社会关系的行人在出现分离情况后的紧急疏散过程,小组内的两个行人分别被称为行人 1 和行人 2.疏散实验规则如下:

- 1) 在疏散过程中,行人需要全程佩戴不透明眼罩,用来模拟零视野情景.
- 2) 疏散实验开始后,两个行人应采取自己认为最快的方式离开疏散区域.
- 3) 疏散实验开始后,两个行人之间可以通过语言、敲击障碍物、触摸等任何方式进行交流.
- 4) 当两个行人一起从出口 2 离开时,疏散实验结束.

疏散实验以组为单位进行,具体实验流程如下:

- 1) 进入实验区域前,工作人员告知参与人员实验规则和注意事项,同时为行人 1 和行人 2 分别佩戴青色帽子和红色帽子,用于提取行人轨迹.
- 2) 进入实验场地后,工作人员带领参与人员熟悉疏散空间环境,然后为其佩戴不透明眼罩.
- 3) 佩戴不透明眼罩后,工作人员告知参与人员将被带到实验场地的一个随机位置.
- 4) 两位工作人员分别带领两位参与人员在原地顺时针旋转 3 圈和逆时针旋转 3 圈,然后在场地上无序行走,随机走到某一位置后再次在原地顺时针或者逆时针旋转 3 圈,最后将两位参与人员带到指定初始位置,等待实验开始.行人 1 和行人 2 的初始位置分别为初始位置 A 和初始位置 B (见图 1),青色和红色箭头方向代表两位参与人员的初始朝向.该步骤是使行人无法获知自己的初始位置.
- 5) 工作人员发出实验开始指令后,两位参与人员开始移动,并采取自己认为最快的方式离开疏散区域.
- 6) 两位参与人员一旦一起从出口 2 离开,该组疏散实验结束.

疏散实验中设置两个行人的起点为初始位置 A 和 B 的原因是: (i) 为了更好地观察行人的结伴疏散过程,两个行人的初始位置需要有较远的距

离; (ii) 为了防止行人快速地找到出口或者墙壁,两个行人的初始位置不能离出口和墙壁太近; (iii) 为了排除行人初始位置到出口距离不同对疏散过程的影响,两个行人的初始位置到出口的距离需要大致相同.

3 实验结果分析

3.1 行人行为

3.1.1 结伴行为

在疏散过程中,所有两人小组均发生了结伴行为,他们通过声音信息的传递和相互触碰,从初始的分离状态变为结伴状态,一起寻找出口.这是因为实验中两个行人具有一定社会关系,在完全黑暗的极端环境中,行人希望获取心理上的安全感和行动上的支持,这促使行人倾向于结伴疏散.此外,实验规则要求当两个行人一起从出口 2 离开时,疏散实验结束.这条规则虽然没有要求行人必须以结伴的形式进行疏散,但也在一定程度上驱动或者强化了行人之间的结伴行为.在结伴形成后,结伴行人通过协商对疏散路径进行决策,行人之间采用拉手或触碰对方的方式维持结伴状态.

不同结伴小组的结伴行为在时间和空间上具有差异性.在时间上,结伴行为可以分为疏散开始阶段的结伴行为和疏散过程中的结伴行为;在空间上,结伴行为可以分为区域 1 内部的结伴行为和出口 1 附近的结伴行为.在 117 个两人小组中,114 个小组的结伴疏散过程表现出明显的规律性.根据结伴行为的时空差异,可以将 114 组结伴行人的结伴模式分为 3 类,具体如下.

结伴模式 I: 在疏散实验开始后,两个行人首先寻找对方进行结伴,汇合后两个行人一起寻找出口.结伴模式 I 的疏散过程画面如图 2 所示.

结伴模式 II: 在疏散实验开始后,两个行人经过沟通分别寻找出口,期间即使相遇也依旧按照自己的决策寻找出口.当其中一个行人找到出口 1 后,会发出声音信息(如呼喊、拍手、击打边界等)引导另一个行人向出口 1 行进.此时,接收到声音信息的行人会停止寻找出口,开始向同伴所在位置运动.在出口 1 附近汇合后,两个行人进入区域 2,一起寻找出口 2.结伴模式 II 的疏散过程画面如图 3 所示.

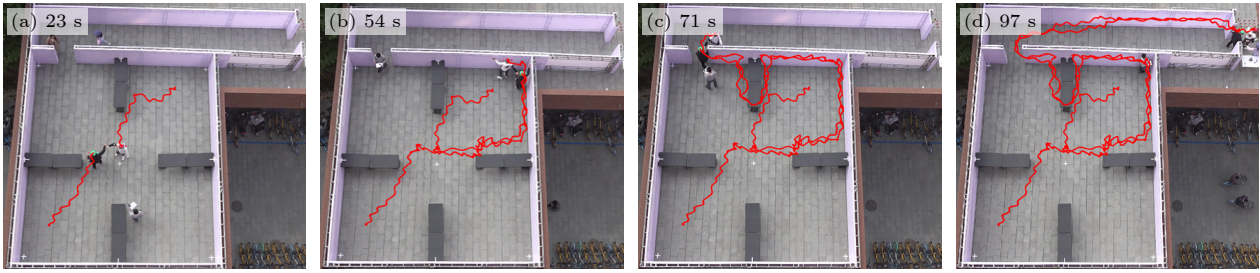


图 2 结伴模式 I 下行人的运动轨迹
Fig. 2. Pedestrian trajectories under group mode I.

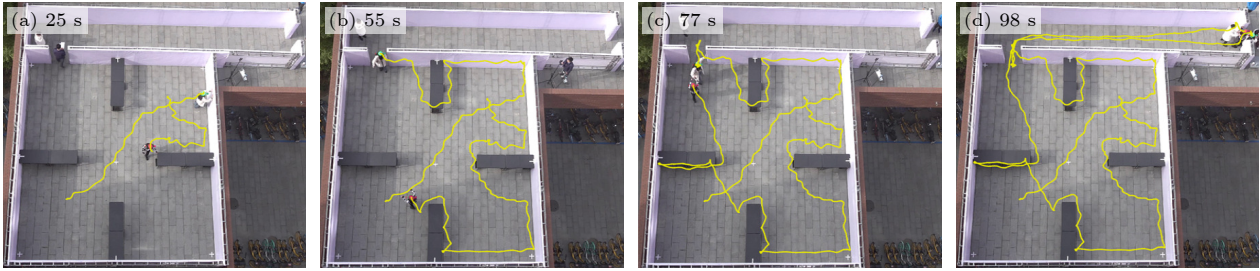


图 3 结伴模式 II 下行人的运动轨迹
Fig. 3. Pedestrian trajectories under group mode II.



图 4 结伴模式 III 下行人的运动轨迹
Fig. 4. Pedestrian trajectories under group mode III.

结伴模式 III: 在疏散实验开始后, 两个行人经过沟通分别寻找出口, 但如果两个行人相遇或者相距较近, 两个行人会进行结伴, 然后一起寻找出口. 结伴模式 III 的疏散过程画面如图 4 所示.

在结伴疏散过程具有规律性的 114 个两人小组中, 64 个小组的结伴行为是结伴模式 I, 占结伴小组总数的 56%; 17 个小组的结伴行为是结伴模式 II, 占结伴小组总数的 15%; 33 个小组的结伴行为是结伴模式 III, 占结伴小组总数的 29%.

在其他 3 个两人小组中, 行人的结伴疏散行为没有明显的规律性, 无法将他们的结伴疏散过程归纳成特定的结伴模式. 我们将这 3 个两人小组称为无规律小组 1、无规律小组 2 和无规律小组 3. 图 5 给出了 3 个无规律小组的行人运动轨迹. 在无规律小组 1 中, 两个行人在区域 1 内先结伴进行疏散,

但在进入区域 2 后分开, 两个行人分别向出口 2 的方向移动一段距离后, 又向相反方向行进, 直到触碰到区域 2 内的东侧墙壁后, 两个行人再次结伴, 一起向出口 2 方向移动. 因此, 如图 5(a) 所示, 无规律小组 1 在区域 2 内有多条重复的运动轨迹. 在无规律小组 2 中, 两个行人在区域 1 内首先进行结伴并一起寻找出口, 但结伴移动一段距离后, 两个行人便分开寻找出口, 之后出现多次结伴后分开的情形, 直到进入区域 2 后, 两个行人一直结伴向出口 2 移动. 如图 5(b) 所示, 无规律小组 2 在区域 1 的局部区域形成密集的运动轨迹. 在无规律小组 3 中, 两个行人在区域 1 内先分别进行疏散, 相遇后结伴寻找出口, 但在结伴疏散过程中, 行人 1 的速度明显更快, 两个行人无法保持结伴队形, 行人 1 离开行人 2 独自寻找疏散出口. 行人 1 找到出口 1



图 5 无规律小组的行人运动轨迹 (a) 无规律小组 1; (b) 无规律小组 2; (c) 无规律小组 3

Fig. 5. Pedestrian trajectories of the irregular groups: (a) Irregular group 1; (b) irregular group 2; (c) irregular group 3.

后, 引导行人 2 向出口 1 处移动. 两个行人从出口 1 结伴进入区域 2 后又再次分开, 分别向出口 2 移动. 如图 5(c) 所示, 在区域 1 内, 两个行人的运动轨迹存在较大差异.

相比于 114 个具有规律性的疏散小组, 3 个无规律小组中行人的疏散行为表现出较强的随机性, 行人的疏散路线十分混乱, 需要更多的时间才能离开疏散区域. 为了更好地归纳零视野条件下行人在结伴疏散过程中的运动规律, 在后续的结果分析和建模仿真中, 我们将剔除 3 个无规律小组, 只探讨其余 114 组行人的结伴疏散过程.

3.1.2 听觉引导行为

在零视野条件下, 行人无法通过视觉获取周围信息, 但是听觉不会受到影响. 在结伴过程中行人通过“声音传递信息、听觉接收信息”的方式确定彼此的位置. 图 6 给出了听觉引导行为发生的情景. 这种听觉引导行为一般在以下两种情景中发生.

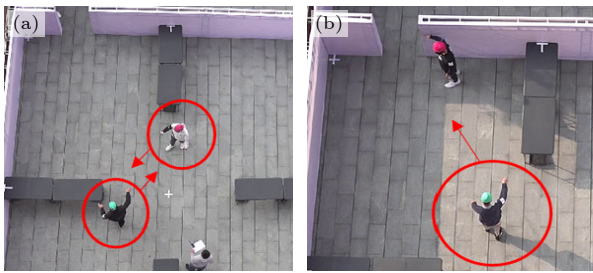


图 6 听觉引导行为 (a) 疏散开始阶段; (b) 同伴发现出口后

Fig. 6. Auditory guidance behavior: (a) At the beginning of the evacuation; (b) after the companion has discovered the exit.

1) 在疏散实验开始阶段, 结伴行人首先寻找同伴, 如图 6(a) 所示. 此时行人之间进行沟通, 确定两个人的疏散策略, 通过声音判断同伴的位置, 并向对方位置移动.

2) 在疏散过程中, 分离状态的结伴行人中的

一个行人发现出口 1 时, 如图 6(b) 所示. 此时行人通过呼喊或拍击边界等方式发出声音, 引导同伴向自己移动.

3.2 运动速度

在疏散过程中, 行人的运动速度是衡量行人疏散效率的重要指标. 图 7(a)–(c) 分别是结伴模式 I、结伴模式 II 和结伴模式 III 下结伴行人的运动轨迹, 颜色代表行人运动速度的大小, 单位是 m/s. 从图 7 可以看出, 结伴行人在不同空间位置的运动速度具有差异性.

为进一步探究零视野条件下行人运动速度的规律, 将区域 1 的空间位置分为 3 类, 具体为: 空间位置 I 是指在疏散过程中, 行人不能接触到边界或者障碍物的运动区域; 空间位置 II 是指在沿墙行走过程中, 行人会改变运动方向的区域; 空间位置 III 是指在沿墙行走过程中, 行人不会改变运动方向的区域. 图 8 给出了疏散场景中不同空间位置划分示意图. 在图 8 中, 绿色区域代表空间位置 I, 青色区域代表空间位置 II, 蓝色区域代表空间位置 III, 灰色区域代表区域 2. 成年人的手臂加手长的长度约为 0.733 m^[22]. 当行人与边界或者障碍物的距离小于此距离时, 认定行人已经触碰到边界或者障碍物. 因此, 设置空间位置 II 和空间位置 III 的宽度 (即边界或障碍物与空间位置 I 的距离) 为 0.75 m.

图 9 给出了不同结伴模式下行人在不同空间位置的平均运动速度. 结伴模式 I、结伴模式 II 和结伴模式 III 的两人小组在空间位置 I 的平均速度分别是 0.237, 0.281, 0.219 m/s, 在空间位置 II 的平均速度分别是 0.123, 0.130, 0.139 m/s, 在空间位置 III 的平均速度分别是 0.281, 0.353, 0.325 m/s, 在区域 2 的平均运动速度分别是 0.389, 0.438, 0.446 m/s. 由图 7 和图 9 可知得以下结果.

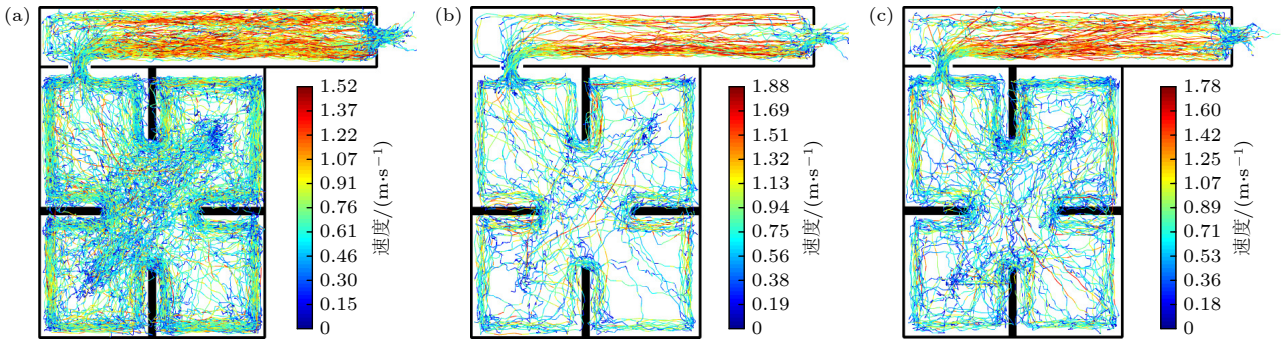


图 7 不同结伴模式下基于速度变化的行人运动轨迹 (a) 结伴模式 I; (b) 结伴模式 II; (c) 结伴模式 III

Fig. 7. Pedestrian trajectories based on velocity changes under different group modes: (a) Group mode I; (b) group mode II; (c) group mode III.

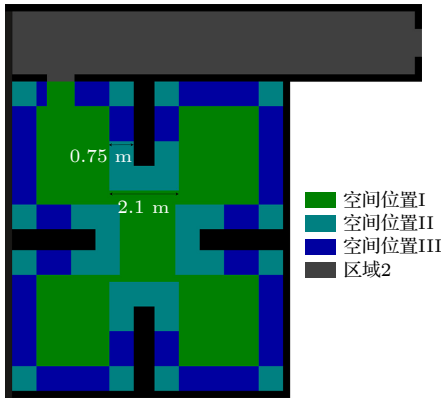


图 8 不同空间位置划分示意图

Fig. 8. Schematic diagram of different spatial locations.

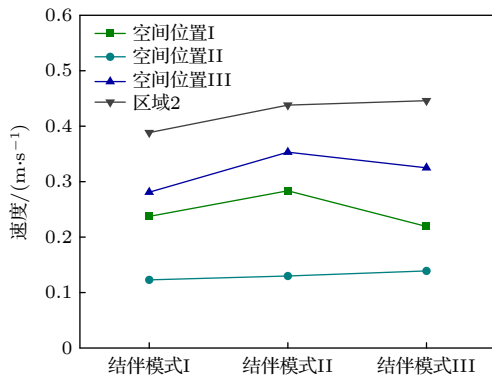


图 9 不同结伴模式下不同空间位置的行人速度

Fig. 9. Pedestrian speeds at different spatial locations under different group modes.

1) 行人在初始位置的运动速度较小. 这是因为疏散实验开始时, 行人需要对黑暗环境进行适应. 在行人没有接触到同伴或者依附物时, 从外界环境中感知到的有利于寻找出口的信息非常有限, 导致行人在初始位置的运动速度较小.

2) 行人在障碍物和边界转角处的运动速度较小. 这主要有两个原因: 一是行人在沿墙行走的过

程中碰到障碍物或者边界的转角时, 行人会与障碍物或边界发生碰撞, 使得行人速度下降; 二是在黑暗环境中, 行人期望依附障碍物行走, 为了不脱离依附物, 行人障碍物转角处需要降低运动速度.

3) 在不改变运动方向时, 行人在沿墙过程中的运动速度高于寻墙过程中的运动速度. 这是因为行人在接触到依附物后, 依附物会对行人的疏散路径提供指引信息, 使行人的运动速度变大.

4) 行人在区域 2 的运动速度高于在区域 1 的运动速度. 这是因为参与人员知道地形图, 但是区域 1 中障碍物的设置和可行走空间是对称的, 增加了参与人员判断出口 1 位置的难度, 而行人从出口 1 进入区域 2 后, 比较容易判断出口 2 的方向. 同时, 与区域 1 相比, 区域 2 是一个狭长的走廊区域, 没有障碍物阻碍行人的行进路线. 因此, 行人进入区域 2 后, 为了尽快离开疏散区域, 行人运动速度变快.

5) 行人在区域 2 的运动轨迹并不总是沿墙行走. 这是因为结伴行人具有前后结伴和左右结伴两种结伴形态. 当结伴行人在区域 2 中以左右结伴行为移动时, 其中一个行人在运动过程中将不会接触到墙壁, 那么其运动轨迹便不会沿墙行走.

3.3 疏散时间

行人的疏散时间是指从发出疏散指令开始到两个行人一起从出口 2 离开疏散区域的时间. 图 10 给出了不同结伴模式下每个小组的疏散时间及其分布. 在疏散实验中, 结伴模式 I、结伴模式 II 和结伴模式 III 的两人小组的平均疏散时间分别为 127.6, 106.5, 100.7 s. 配对样本 *t* 检验结果显示不同结伴模式下行人的疏散时间没有显著性差异.

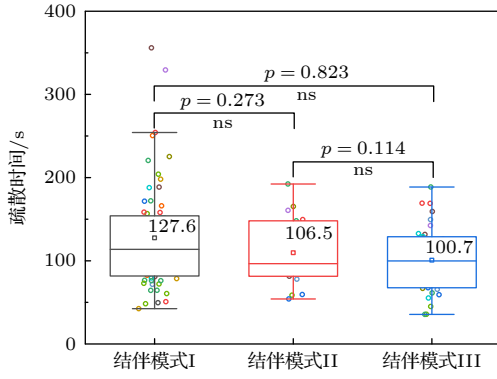


图 10 实验中不同结伴模式下每个小组的疏散时间

Fig. 10. Evacuation time for each group in the experiment under different group modes.

4 模型构建

疏散场景的地面结构由二维网格表示. 每个网格代表一个元胞, 一个元胞可能被墙壁、障碍物或者行人占据, 也可能为空. 每个行人可以用圆来表示, 成年人的半径是 (0.255 ± 0.035) m [23]. 因此, 每个圆的半径设置为 0.25 m. 根据行人所占据空间的大小, 将每一个元胞的大小设置为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$.

每一个时间步, 疏散空间内的行人可以向北、东、南、西 4 个方向移动一个元胞. 行人的移动方向由转移概率决定, 在移动方向上的转移概率越大, 行人更偏向于选择该方向运动. 如果行人移动方向上的相邻元胞被墙壁、障碍物或者其他行人占据, 则行人无法向该方向移动. 如果四个方向都不能移动, 则行人的位置不变. 图 11 给出了行人可以移动的方向以及相邻元胞的转移概率.

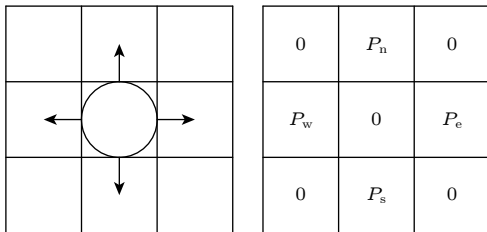


图 11 行人可以运动的方向和相邻元胞的转移概率

Fig. 11. Direction in which pedestrians can move and the transfer probability of neighboring cells.

根据疏散实验的结果, 行人的疏散过程可以分为 3 个阶段, 分别是发生结伴行为前阶段、结伴完成前阶段和结伴完成后阶段. 发生结伴行为前阶段是指疏散开始后, 行人没有寻找同伴, 单独找出

口的过程. 结伴完成前阶段是指行人与同伴开始进行结伴到两个行人汇合的过程. 结伴完成后阶段是指从结伴行人汇合到结伴行人从出口 2 离开的过程. 在疏散实验中, 结伴模式 I 的两个行人首先寻找同伴, 不存在发生结伴行为前阶段, 只存在结伴完成前阶段和结伴完成后阶段; 结伴模式 II 和结伴模式 III 下的两个行人均存在单独寻找出口和结伴寻找出口的过程, 都存在 3 个疏散阶段. 下面分别对不同阶段的行人疏散过程进行建模.

4.1 发生结伴行为前疏散行为建模

在发生结伴行为前的疏散过程中, 单独寻找出口的行人将会出现寻墙行为和沿墙行走行为. 模拟行人寻墙行为和沿墙行为的步骤如下:

第 1 步 确定寻墙方向. 疏散开始后行人可以随机选择北、东、南、西 4 个方向中的一个方向作为寻墙方向, 选择每一个方向的概率相等, 均为 P_f .

第 2 步 向寻墙方向移动一个元胞的距离.

第 3 步 检查行人是否触墙. 如果行人的相邻元胞被障碍物或者墙壁占据, 则寻墙过程结束, 执行第 4 步; 否则, 执行第 2 步.

第 4 步 确定沿墙行走方向. 选择顺时针方向沿墙行走的概率为 P_w , 选择逆时针沿墙行走的概率为 $P'_w = 1 - P_w$.

第 5 步 向沿墙行走方向移动一个元胞的距离.

第 6 步 判断行人是否感知到另一个行人. 如果另一个行人在感知范围内, 对于结伴模式 II 的行人, 不会产生结伴行为, 执行第 5 步; 对于结伴模式 III 的行人, 产生结伴行为, 发生结伴行为前阶段结束. 否则, 执行第 7 步.

第 7 步 判断行人是否到达出口. 如果行人的相邻元胞被出口占据, 行人发出声音信息指引另一个行人疏散, 产生结伴行为, 发生结伴行为前阶段结束. 否则, 执行第五步.

以上算法基于两人小组的结伴模式, 设置寻墙方向、沿墙方向的确定规则以及结伴行人之间的交互规则, 能够模拟在发生结伴行为前的疏散过程中, 行人单独寻找出口时寻墙行为和沿墙行为.

4.2 结伴完成前疏散行为建模

在结伴过程中, 行人依靠听觉和触觉判断同伴的位置. 模型中将行人感知到同伴所发出声音信息的最大距离称为结伴感知距离. 当两个行人的距离

小于或等于结伴感知距离时, 结伴行人将会做出与同伴结伴行动的决策. 当两个行人的距离小于或等于结伴感知距离但未完成结伴时, 行人处于结伴完成前疏散阶段. 3种结伴模式的两人小组在疏散过程中均存在结伴完成前疏散阶段. 行人的移动方向由转移概率决定, 用 P_n , P_e , P_s , P_w 分别代表行人向北、东、南、西方向的转移概率, 其计算公式如下:

$$P_n = Na_n e^{-f_n}, \quad (1a)$$

$$P_e = Na_e e^{-f_e}, \quad (1b)$$

$$P_s = Na_s e^{-f_s}, \quad (1c)$$

$$P_w = Na_w e^{-f_w}, \quad (1d)$$

其中, $N = 1/[a_n e^{-f_n} + a_e e^{-f_e} + a_s e^{-f_s} + a_w e^{-f_w}]$. f_n , f_e , f_s , f_w 分别代表行人北、东、南、西方向的相邻元胞的势能值. a_n , a_e , a_s , a_w 分别代表行人北、东、南、西方向的相邻元胞是否被墙壁、障碍物或者其他行人占据. 例如, 如果与行人东面相邻的元胞没有被障碍物占据, 那么该行人可以向东移动, $a_e = 1$; 否则, $a_e = 0$. 在疏散过程中, 行人向势能值较小的方向移动的概率较大.

由于行人失去视觉, 在依靠听觉判断同伴位置时可能会产生误差^[24]. 在模型中, 行人会误认为与同伴相邻的某个元胞为同伴所在的元胞, 该元胞被称为“误差元胞”. 行人选择同伴所在元胞和“误差元胞”的偏好是不同的, 用 $\alpha_d (d = 0, 1, 2, \dots, 8)$ 表示行人选择同伴所在元胞和“误差元胞”的偏好强度. 在结伴过程中, 行人最终选择的同伴所在元胞称为目标元胞. 目标元胞 (i', j') 可能是同伴所占据的元胞, 也可能是“误差元胞”. 确定目标元胞的步骤如下:

第1步 分别计算行人所在元胞 (x, y) 与同伴所在元胞的 8 个相邻元胞 (x_k, y_k) 的距离 $D_k (k = 1, 2, \dots, 8)$, 计算公式如下:

$$D_k = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}. \quad (2)$$

第2步 将所有 D_k 按照从小到大的顺序排列. 如果 $D_m = D_n (m = 1, 2, \dots, 8, n = 1, 2, \dots, 8$ 且 $m \neq n)$, 则随机排序.

第3步 设置同伴所占据元胞具有最大的偏好强度 α_0 , 第 k 小的 D_k 所对应的元胞 (x_k, y_k) 具有第 k 大的偏好强度 α_k , $\alpha_k \neq 0$.

第4步 目标元胞 (i', j') 的确定由 $p_{(i', j')}$ 决定, $p_{(i', j')}$ 的计算公式如下:

$$p_{(i', j')} = \alpha_d / \sum_{d=0}^8 \alpha_d, \quad (3)$$

其中, $d = 0, 1, 2, \dots, 8$.

上述算法考虑行人根据声音信息判断同伴位置时产生的误差, 通过“误差元胞”来表示行人因听觉误差选择的目的地, 能够模拟结伴行为完成前阶段中行人依靠听觉引导行为判断同伴位置的过程.

行人主要依靠声音信息寻找同伴, 能够对彼此之间的距离做出判断. 因此, 模型中元胞的势能值由两行人之间的距离决定. $f_{(i, j)}$ 代表元胞 (i, j) 的势能值, $f_{(i', j')}$ 代表目标元胞 (i', j') 的势能值, $f_{(i, j)}$ 和 $f_{(i', j')}$ 是无量纲的参数, 计算结伴完成前疏散阶段中行人使用的元胞势能值的步骤如下:

第1步 当元胞被墙壁或障碍物占据时, $f_{(i, j)} = +\infty$; 当元胞被确定为目标元胞时, $f_{(i', j')} = 0$.

第2步 将目标元胞 (i', j') 放进一个有序队列中, 该队列的顺序按元胞的势能值升序排列.

第3步 选择有序队列中势能值最小的元胞 (i_0, j_0) , 并将其从有序队列中移除, 检查其相邻的 4 个元胞, 若元胞的势能值还未计算, 则该元胞的势能值计算公式如下:

$$f_{(i, j)} = f_{(i_0, j_0)} + d_{i, j}, \quad (4)$$

第4步 将第3步计算得到势能值的元胞 (i, j) 添加到有序队列之中.

第5步 若所有元胞的势能值均已计算完毕, 则停止计算, 否则, 执行第3步.

以上算法中, $d_{i, j}$ 表示相邻元胞 (i, j) 与 (i_0, j_0) 的距离, $d_{i, j} = 1$. 模型中利用该算法得到的元胞势能值计算行人的转移概率, 行人在选择运动方向时综合考虑与同伴之间的距离和结伴过程中通过声音判断同伴位置时所产生的误差的影响. 在每个时间步, 以上算法执行一次, 元胞势能值可以根据行人的运动状态进行动态更新.

4.3 结伴完成后疏散行为建模

行人结伴后, 形成一个整体, 继续寻找出口, 直到从出口 2 离开. 图 12 给出了两人小组结伴完成后的结伴形态. 模型中假设结伴行人在运动过程中具有整体性, 且不会变换结伴形态. 在图 12 中, 灰色圆和浅蓝色圆分别代表领导者和跟随者.

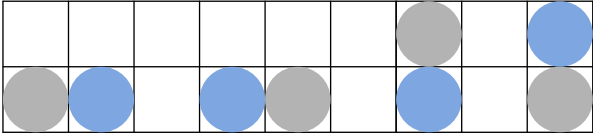


图 12 行人的结伴形态

Fig. 12. Group shapes of pedestrians.

模拟结伴行人寻墙行为和沿墙行为的步骤与模拟单人寻墙行为和沿墙行为的步骤类似,但在判断相邻元胞被占据状态时不同.在结伴完成后,结伴行人占据两个元胞,有 10 个相邻元胞;单个行人占据一个元胞,有 8 个相邻元胞.在判断行人触墙状态时,结伴行人需要判断 10 个方向上的相邻元胞是否被障碍物占据,单个行人需要判断 8 个方向上的相邻元胞是否被障碍物占据.完成结伴的行人在疏散过程中不需要再判断同伴的位置,单个行人在寻墙过程和沿墙过程中需要判断同伴的位置是否在结伴感知距离内,来确定是否与同伴进行结伴.

5 仿真分析

不同结伴模式下行人在不同空间位置的平均运动速度不同.根据 3 种结伴模式下不同空间位置处行人的平均运动速度计算模型中时间步的大小.结伴模式 m 下的时间步 Δt_m 的计算公式如下:

$$\Delta t_m = l/v_{\max}^m, \quad (5)$$

其中, l 代表元胞的实际长度, v_{\max}^m 代表结伴模式 m 下行人在不同空间位置的最大速度.为了便于模拟结伴行人在不同空间位置处的速度差异,在空间位置 I、空间位置 II、空间位置 III 和区域 2, 将结

伴模式 I 下行人的平均运动速度分别设置为 0.25, 0.10, 0.30, 0.40 m/s; 将结伴模式 II 下行人的平均运动速度分别设置为 0.30, 0.15, 0.35, 0.45 m/s; 将结伴模式 I 下行人的平均运动速度分别设置为 0.20, 0.15, 0.35, 0.45 m/s. 因此, $\Delta t_1 = 1.25$ s, $\Delta t_2 = 1.11$ s, $\Delta t_3 = 1.11$ s. 对于其他参数, 设置 $\alpha_0 = 9$, $\alpha_k = \alpha_0 - k$ ($k = 1, 2, \dots, 8$), $P_f = 0.25$, $P_w = 0.5$, 行人之间的结伴感知距离 $\gamma = 8$. 仿真结果取 30 次仿真结果的平均值.

5.1 听觉引导行为

通过行人在结伴过程中的运动轨迹验证模型可以刻画零视野条件下听觉引导误差对行人结伴过程影响.图 13(a) 给出了考虑听觉引导误差时行人结伴过程的运动轨迹, 图 13(b) 给出了不考虑听觉引导误差时行人结伴过程的运动轨迹.在图 13 中, 箭头表示行人在下一个时间步的移动方向.由图 13 可知: 不考虑听觉引导误差时, 行人的运动路线比较流畅; 考虑听觉引导误差时, 行人的运动路线出现徘徊现象.这是因为在模型中考虑听觉引导误差后, 行人在寻找同伴的过程中可能会错误地判断同伴的位置, 导致行人的运动方向发生改变.

5.2 平均停留时间步

图 14—图 16 分别给出了不同结伴模式下行人在每一个元胞的平均停留时间步数.由图 14—图 16 可知:

1) 在结伴模式 I 的疏散过程中, 行人在边界和障碍物附近以及中心区域停留步数较多 (见图 14).这是因为在结伴模式 I 中, 疏散开始后行人先去寻

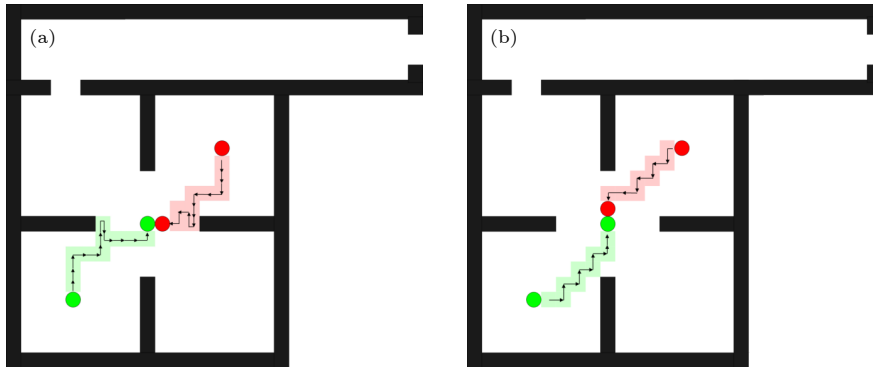


图 13 仿真中的行人运动轨迹 (a) 考虑听觉引导误差; (b) 不考虑听觉引导误差

Fig. 13. Pedestrian trajectories in the simulation: (a) Considering auditory guidance error; (b) without considering auditory guidance error.

找同伴而不是寻找依附物, 结伴行为多发生在区域 1 的中间区域. 结伴完成后, 两个行人寻找墙壁并沿墙行走, 最终从出口 2 离开. 从实验中结伴模式 I 下行人的运动轨迹 (见图 2) 可以看出, 两个行人的运动轨迹在区域 1 的中心区域汇合, 然后两个行人在墙壁和障碍物附近的运动轨迹几乎重叠在一起. 通过对比仿真和实验中行人的运动轨迹, 可以验证该模型能够再现结伴模式 I 下行人的结伴疏散行为.

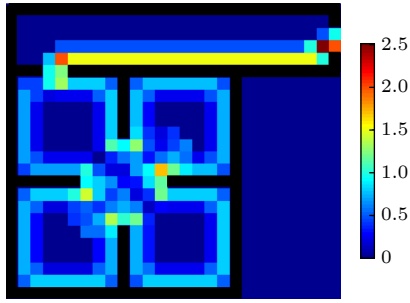


图 14 结伴模式 I 下行人在元胞中的平均停留时间步数
Fig. 14. Average number of time steps pedestrians stayed in cells under group mode I.

2) 在结伴模式 II 的疏散过程中, 行人在门口 1 附近的平均停留步数显著大于其他区域的平均停留步数 (见图 15(a)). 这是因为在结伴模式 II 中, 行人分别寻找出口, 当其中一个行人找到出口 1 后, 会在原地等待同伴, 导致等待位置的平均停留步数值较高. 图 15(b) 给出了去除等待位置后其他位置的停留步数. 由图 15(b) 可知, 行人在区域 1 内的轨迹主要分布在与边界与障碍物相邻的第一层元胞和出口附近. 这是因为在疏散过程中, 两个行人先去寻找墙壁并沿墙行走, 当其中一人到达出口 1 后向同伴传递出口位置信息, 此时同伴会停止寻找墙壁或者沿墙行走的过程, 开始向同伴行进, 最终在出口 1 附近完成结伴过程. 从实验中结伴模式 II 下行人的运动轨迹 (见图 3) 可以看出, 两个行人在区域 1 内的运动轨迹都是单独沿障碍物和墙壁行走, 并且其中一个行人存在直接前往出口 1 的运动轨迹. 在区域 2 内, 两个行人在墙壁附近的运动轨迹同时存在, 结伴前往出口 2. 通过对比仿真和实验中行人的运动轨迹, 可以验证该模型能够再现结伴模式 II 下行人的结伴疏散行为.

3) 在结伴模式 III 的疏散过程中, 行人除了在边界和障碍物附近停留步数较多, 在区域 1 其他位

置的平均停留步数也比较多. 这是因为在结伴模式 III 中, 两个行人首先单独寻找边界和出口, 行人的沿墙行为使边界相邻元胞平均停留时间步数增加. 在疏散过程中, 如果分离的两个行人处于结伴感知距离内, 行人会脱离依附物发生结伴行为, 使得边界和障碍物等依附物之间的轨迹较为明显. 从实验中结伴模式 III 下行人的运动轨迹 (见图 4) 可以看出, 两个行人在运动轨迹开始阶段就存在沿墙行走过程. 当运动轨迹比较接近后, 两条运动轨迹在墙壁和障碍物附近同时出现, 两个行人结伴前往出口 2. 通过对比仿真和实验中行人的运动轨迹, 可以验证该模型能够再现结伴模式 III 下行人的结伴疏散行为.

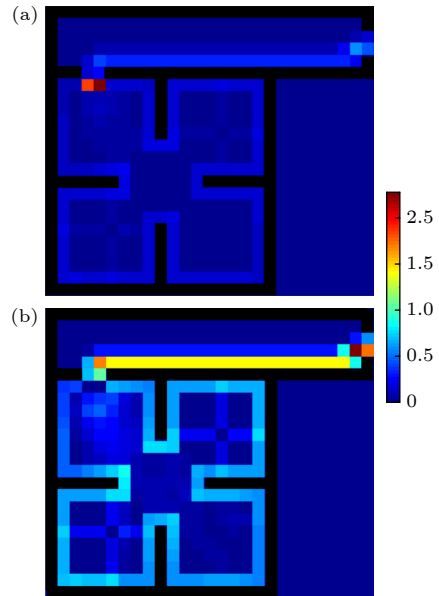


图 15 结伴模式 II 下行人在元胞中的平均停留时间步数 (a) 包含等待位置; (b) 去除等待位置

Fig. 15. Average number of time steps pedestrians spend in cells in group mode II: (a) With waiting positions; (b) without waiting positions.

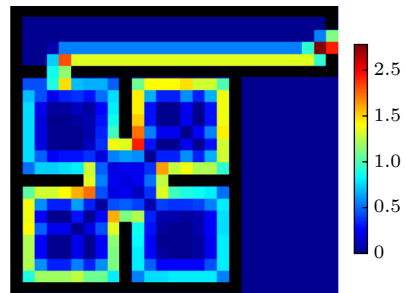


图 16 结伴模式 III 下行人在元胞中的平均停留时间步数
Fig. 16. Average number of time steps pedestrians stayed in cells under group mode III.

5.3 疏散时间

首先, 通过对比仿真和实验中不同结伴模式下行人的疏散时间验证该模型具有刻画零视野条件下结伴行人疏散过程的能力. 图 17 给出了仿真和实验中不同结伴模式下行人的疏散时间. 由图 17 可知, 在结伴模式 I 下行人的疏散时间最长, 在结伴模式 III 下行人的疏散时间最短. 这与实验中行人疏散时间变化趋势一致. 此外, 我们可以发现仿真中得到的疏散时间与实验中得到的疏散时间有一定差异. 这主要是因为行人的疏散行为非常复杂, 单一的模型无法完全刻画行人的疏散行为.

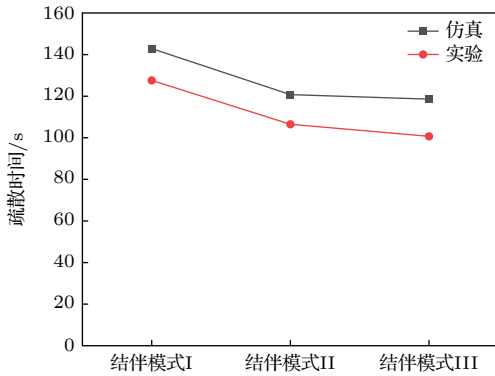


图 17 仿真和实验中不同结伴模式下行人的疏散时间
Fig. 17. Evacuation times of pedestrians under different group modes in simulations and experiments.

然后, 分析结伴感知距离 γ 对疏散时间的影响. 图 18 给出了在结伴模式 III 下结伴感知距离对行人疏散时间的影响. 由图 18 可知, 随着 γ 的增大, 行人的疏散时间逐渐上升. 这是因为当结伴感知距离较小时, 行人在障碍物之间不能感知到同伴位置, 两个行人在出口附近或沿墙行走相遇时才发

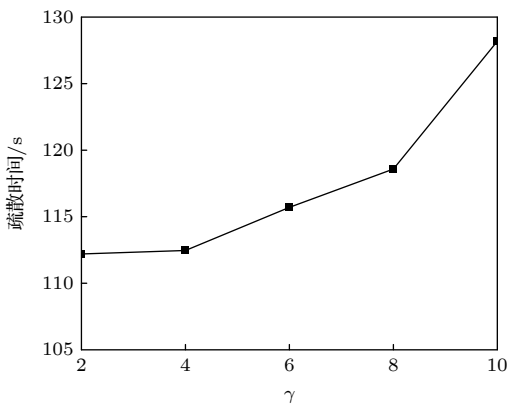


图 18 结伴感知距离对行人疏散时间的影响
Fig. 18. Effect of grouping perceived distance on pedestrian evacuation time.

生结伴行为, 受到同伴发出声音信息的影响较小. 当 γ 逐渐增大时, 行人能够感知同伴的距离增大, 受到同伴发出声音信息的影响增大, 结伴行为发生的概率上升. 行人结伴行为会增加两人小组的疏散时间. 如果结伴完成时两个行人所处位置不在边界或者障碍物处, 两人小组还将重新寻找边界进行沿墙行走, 这也进一步增加了行人疏散时间.

6 结论

本文针对零视野条件下结伴行人的疏散过程展开深入研究, 采用可控实验的研究方法, 提取零视野条件下行人结伴疏散过程中的运动行为特征, 建立可以有效刻画零视野条件下考虑结伴行为的行人疏散模型, 揭示了各种自组织现象的形成机理, 分析了结伴行为对零视野条件下行人疏散效率的影响. 本文的主要结论如下:

1) 通过行人疏散实验, 发现了零视野环境中行人的结伴行为、听觉引导行为和沿墙行为等典型疏散行为特征. 在结伴过程中, 行人之间依靠声音信息来相互引导同伴进行结伴.

2) 行人结伴行为可以分为 3 种模式. 通过对比分析不同结伴模式下行人的运动速度和疏散时间, 发现零视野条件下结伴行为会降低疏散效率, 沿墙行走行为可以提高疏散效率.

3) 考虑不同结伴模式下行人的疏散行为特征以及沿墙行为、听觉引导行为在结伴疏散过程中的影响机制, 构建了零视野条件下考虑结伴行为的行人疏散模型. 通过对比分析仿真过程和实验过程的行人运动轨迹和疏散时间, 验证了该模型能够有效再现零视野条件下行人的结伴疏散过程.

4) 在疏散过程中, 行人结伴感知距离越大, 行人发生结伴行为的概率越高, 行人形成结伴群体的时间越早, 疏散效率降低, 即零视野条件下结伴行为对行人的疏散过程具有负面影响. 但是, 在文献 [14, 18] 中零视野条件下的行人疏散实验中, 结伴行为可以提高行人的疏散效率. 这是因为本研究与文献 [14, 18] 的实验目的和研究对象不同. 本研究以分离的结伴行人为研究对象, 探讨结伴行人分开时的结伴过程对疏散过程的影响. 当发生结伴行为时, 行人需要在零视野条件下与同伴汇合, 结伴过程会消耗大量时间, 并且结伴完成后行人才会继续开始寻找出口的过程. 当行人结伴感知距离越小

时,行人发生结伴行为的概率越低,行人形成结伴群体的时间越晚,两个行人分别寻找出口的时间越多,在结伴完成后越容易判断出出口位置,进而提升疏散效率.文献[14, 18]以结伴群体为研究对象,主要研究结伴行人作为整体的疏散过程.当结伴群体中的行人发现出口后,其他结伴行人便获悉了出口所在位置,整个群体的疏散效率也随之提高.

以上研究结果可为类似场景中行人疏散策略和方案的制定提供科学依据.但是,本文未考虑结伴行人对密集人群疏散过程的影响.下一步研究工作将致力于扩大结伴行人数量,考虑疏散过程中不同结伴行人之间的冲突行为,提高模型的泛化能力.此外,现实中的疏散场景里有限视野的情况更多,有限视野条件下的疏散实验可以更接近现实场景.因此,未来的研究将继续扩展至有限视野的实验,进一步探讨不同能见度条件下行人结伴行为对疏散过程的影响.

参考文献

- [1] Ren J Q, Ni S J 2024 *J. Tsinghua Univ. (Sci. Technol.)* **64** 471 (in Chinese) [任建强, 倪顺江 2024 清华大学学报(自然科学版) **64** 471]
- [2] Moussaïd M, Perozo N, Garnier S, Dirk H, Guy T 2010 *PLoS One* **5** e10047
- [3] Yue H, Shao C F, Guan H Z, Duan L M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4499 (in Chinese) [岳昊, 邵春福, 关宏志, 段龙梅 2010 物理学报 **59** 4499]
- [4] Huo F Z, Fan D D, Liu C, Ma Y P, Lv Z H, Li M L 2023 *CSSJ* **33** 126 (in Chinese) [霍非舟, 范丹丹, 刘昶, 马亚萍, 吕紫含, 李梦令 2023 中国安全科学学报 **33** 126]
- [5] Fu L B, Cao S C, Shi Y Q, Chen S, Yang P, Fang J 2019 *Saf. Sci.* **117** 447
- [6] Zhang R, Yang J, Yang C W, Dai S X 2019 *TSEIT* **19** 163 (in Chinese) [张蕊, 杨静, 杨晨威, 代盛旭 2019 交通运输系统工程与信息 **19** 163]
- [7] Wu X S, Yue H, Liu Q M, Zhang X, Shao C F 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 148901 (in Chinese) [武鑫森, 岳昊, 刘秋梅, 张旭, 邵春福 2021 物理学报 **70** 148901]
- [8] Zhou J W, Kuang H, Liu M R, Kong L J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3001 (in Chinese) [周金旺, 邝华, 刘慕仁, 孔令江 2009 物理学报 **58** 3001]
- [9] Wei X G, Lv W, Song W G, Li X 2015 *Complexity* **20** 87
- [10] Gorrini A, Vizzari G, Bandini S 2016 *Collective Dyn.* **1** 1
- [11] Chen L, Tang T Q, Song Z Q, Song Ziqi, Huang H J, Guo R Y 2019 *Simul. Model. Pract. Theory* **90** 31
- [12] Cuesta A, Abreu O, Balboa A, Daniel A 2021 *Fire Saf. J.* **120** 103018
- [13] Ren J X, Mao Z L, Zhang D, Gong M, Zuo S 2022 *Int. J. Disaster Risk Reduct.* **80** 103228
- [14] Xie W, Zhang Y C, Cheng Y Y, Chen S M, Liang X W, Zhang W B 2018 *Procedia Eng.* **211** 830
- [15] Xie W, Lee E W M, Li T, Shi M, Cao R F, Zhang Y C 2021 *Saf. Sci.* **133** 105029
- [16] Was J, Porzycki J, Schmidt-Polończyk N 2020 *Collective Dyn.* **5** 93
- [17] Xue S Q, Jiang R, Wong S C 2020 *Transportmetrica A* **16** 626
- [18] Zeng G, Li Z, Ye R, Cao S 2024 *Tunn. Undergr. Space Technol.* **146** 105661
- [19] Tong W P, Cheng L 2014 *Systems Eng. Theory Practice* **34** 2386 (in Chinese) [童蔚苹, 程琳 2014 系统工程理论与实践 **34** 2386]
- [20] Guo C L, Huo F Z, Li C, Li Y 2023 *Physica A* **615** 128602
- [21] Zhou Y, Zhou Z P, Pu Z Y, Qi Y, Xu Y N 2019 *Transp. Res. Rec.* **2673** 851
- [22] National Library of Standards of China National Institute of Standardization <https://www.nssi.org.cn/nssi/front/124378676.html> [2024-7-11]
- [23] Lei W J, Li A G, Gao R, Hao X P, Deng B S 2012 *Physica A* **391** 5355
- [24] Wu Y, Kang J 2016 *UA* **16** 121 (in Chinese) [武悦, 康健 2016 城市建筑 **16** 121]

Research on pedestrian evacuation considering group behavior under zero-visibility condition*

Chen Liang¹⁾ Guo Zhi-Liang²⁾ Li Yong-Xing¹⁾ Zhang Jian^{1)†}
Tang Tie-Qiao³⁾ Chen Yan-Yan¹⁾

1) (Beijing Key Laboratory of Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

2) (Army Military Transportation University, Tianjin 300161, China)

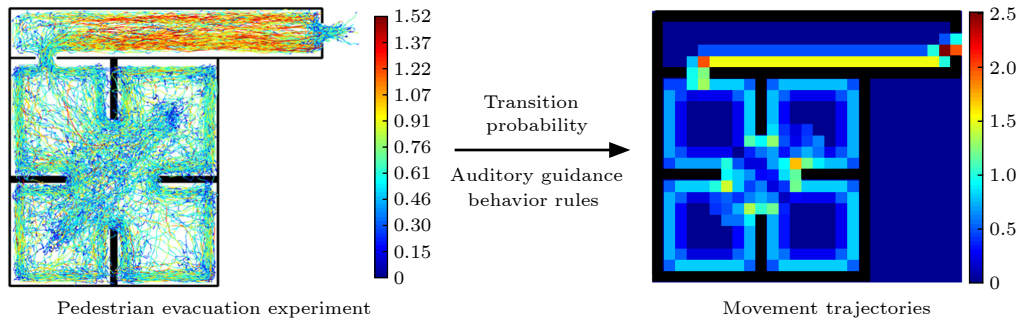
3) (School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(Received 19 July 2024; revised manuscript received 22 August 2024)

Abstract

The influences of group behavior on pedestrian evacuation under zero-visibility conditions are analyzed in depth by combining controlled experiments with modeling and simulation in this work. Initially, by experiments

on pedestrian evacuation under zero-visibility conditions, typical evacuation behaviors are identified such as group behavior, auditory guidance behavior, and wall-following behavior. The pedestrians rely on auditory information to guide their companions in the process of forming groups. Pedestrian group behavior can be divided into three modes, the walking speeds of grouped pedestrians greatly depending on their spatial positions. By comparing and analyzing the walking speeds and evacuation times of pedestrians under different grouping modes, it is found that group behavior under zero-visibility condition reduces evacuation efficiency, while walking along the walls can improve evacuation efficiency. Subsequently, considering the movement characteristics of pedestrians in different group behavior modes, the influence mechanisms of auditory guidance and wall-following behavior on the evacuation process, a pedestrian evacuation model based on cellular automata under zero-visibility conditions is developed. Finally, the proposed model is validated by using experimental results, and simulations are conducted to analyze the influences of group behavior on the evacuation process under zero-visibility conditions. By comparing and analyzing the pedestrian movement trajectories and evacuation times during both the simulation and experiment, it is verified that the model can effectively reproduce the group evacuation processes of pedestrians under zero-visibility conditions. When auditory guidance errors are considered, pedestrians exhibit wandering behaviors in their movement trajectories. In the evacuation process, the greater the distance that pedestrians can perceive each other for grouping, the higher the probability of group formation is. As a result, groups are formed earlier, which will reduce the evacuation efficiency. This indicates that under zero-visibility conditions, group behavior exerts a negative influence on the evacuation process. This research lays a scientific foundation for formulating pedestrian evacuation strategies and schemes in similar scenarios.



Keywords: evacuation experiments, zero-visibility conditions, group behavior, cellular automaton model

PACS: 05.50.+q, 45.70.Mg, 05.65.+b

DOI: [10.7498/aps.73.20241007](https://doi.org/10.7498/aps.73.20241007)

CSTR: [32037.14.aps.73.20241007](https://cstr.cn/32037.14.aps.73.20241007)

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 72001009) and the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 72231001).

† Corresponding author. E-mail: jian.zhang@bjut.edu.cn



零视野条件下考虑结伴行为的行人疏散研究

陈亮 郭志良 李永行 张健 唐铁桥 陈艳艳

Research on pedestrian evacuation considering group behavior under zero-visibility condition

Chen Liang Guo Zhi-Liang Li Yong-Xing Zhang Jian Tang Tie-Qiao Chen Yan-Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 210502 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20241007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241007>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于介观元胞自动机的城市区域人员疏散模拟方法

Simulation method of urban evacuation based on mesoscopic cellular automata

物理学报. 2021, 70(10): 100706 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210018>

基于元胞自动机-格子玻尔兹曼模型的枝晶碰撞行为模拟

Simulation of dendrite collision behavior based on cellular automata-lattice Boltzmann model

物理学报. 2021, 70(23): 238101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211292>

蚁群元胞优化算法在人群疏散路径规划中的应用

Application research of ant colony cellular optimization algorithm in population evacuation path planning

物理学报. 2020, 69(8): 080504 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191774>

基于元胞自动机的气动光学光线追迹算法

Cellular automata ray tracing in two-dimensional aero-optical flow fields

物理学报. 2020, 69(19): 194201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200532>

高Cr铸铁中 M_7C_3 碳化物与奥氏体共生长的元胞自动机模拟

Cellular automaton simulation on cooperative growth of M_7C_3 carbide and austenite in high Cr cast irons

物理学报. 2021, 70(21): 218102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210725>

基于前摄效应的不耐烦行为建模与双向行人流动态

Impatient behavior modelling and simulation of bidirectional pedestrian flow dynamics based on proactive effect

物理学报. 2022, 71(7): 070502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211537>