

基于元胞自动机的对向行人交通流仿真研究^{*}

岳 昊 邵春福[†] 陈晓明 郝合瑞

(北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

(2007 年 7 月 29 日收到, 2008 年 5 月 13 日收到修改稿)

基于元胞自动机对对向行人交通流进行仿真研究. 模型利用四个动态参数反映行人移动区域和其视野范围内的实际情况, 从而决定行人的行为选择. 行人可以根据自身周围的情况选择前进、后退、等待、左右移动、交换位置等行为. 仿真研究不同方向比例与不同系统规模的对向行人流的速度-密度、流量-密度关系. 研究结果表明, 系统存在相位转换和临界密度, 方向比例和系统规模对行人流的速度-密度、流量-密度关系曲线的形状和系统临界密度值有一定的影响.

关键词: 元胞自动机, 对向行人流, 动态参数, 临界密度

PACC: 0550, 0520, 6470

1. 引 言

目前, 元胞自动机(CA)已经被广泛地应用于交通流的研究^[1-8]. 元胞自动机属于人工生命的仿真方法, 通过定义或模拟系统中简单个体的微观行为特征, 在个体间相互作用的条件下, 实现系统整体宏观行为特征的仿真与研究^[9-11]. 文献[10, 12-14]建立了基于 CA 的一维交通流模型; 文献[15-18]建立了基于 CA 的二维交通流模型^[19]; 基于 CA 的机动车交通流仿真已经被大量研究^[20, 21]. 行人交通流作为交通流的组成部分同样是研究的焦点和热点. 行人不同于机动车, 它比机动车更具有灵活性和适应性. 在行人交通流仿真中, 应该考虑行人之间可以接受轻微的碰撞、可以交换双方的位置、可以根据自身周围的情况改变自己的速度、移动方向、变换行走的轨迹等行人的行为特征. 在基于 CA 的行人交通流仿真研究中, 在文献[19, 22]中, 模型引入了行人停止等待前进的行为特征; 在文献[11, 19]中, 模型考虑了行人之间交换位置的行为特征; 文献[23, 24]在仿真模拟中提出了静态域和动态域的概念; 文献[23]引入了参考矩阵的概念; 文献[25]仿真研究了平面交叉口的行人流特征, 并提出了移动收益和动态参数的概念; 文献[26, 27]仿真研究了疏散情况下

的行人流特征.

本文主要利用动态参数模型^[25], 对不同方向比例的对向行人流进行仿真研究: 行人流的方向比例从 0/100(单向行人流)逐步增加到 50/50(均衡对向行人流). 同时在系统规模 $W = 10, 20, 30, 40, 50$ 情况下, 对均衡对向行人流进行仿真研究, 分析研究方向比例和系统规模对行人流宏观特征的影响. 在仿真模型中, 行人能根据自身周围的条件选择前进、原地等待、后退、左右移动、交换行人位置等行为动作. 本文给出了模型的仿真结果, 并进行了分析.

2. 模 型

对向行人流由两类移动方向相反的行人组成, 即上行和下行. 行人移动区域被分割为离散的 $W \times W$ 个空格元胞, W 为系统规模. 每个空格只能容纳一个行人, 每个行人也只能占据一个元胞. 仿真过程被分割为离散的时间步长 t , 在每个时间步内, 行人移动的长度为一个元胞的长度, 即行人以最大速度 $V_{\max} = 1$ 移动. 系统有上、下、左、右四个边界. 左、右边界为封闭性边界, 行人不能穿越. 上、下边界为周期性边界, 上行的行人移动到上边界后可以从下边界重新进入系统, 同理, 下行的行人移动到下边界后, 可以从上边界重新进入系统. 整个对向行

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号: 2006CB705500)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: cfshao@center.njtu.edu.cn

人流就像在一个首尾相连的环形通道上移动,因此在每个时间步内,系统内的行人数量是保持不变的.模型如图 1 所示.

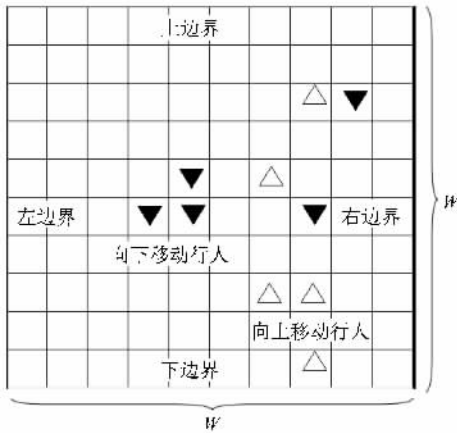


图 1 对向人流的元胞自动机模型

在每个时间步内,行人可以在原地等待或者移动到邻近的四个元胞(如图 2(a)所示).行人根据每个可能目标位置的移动收益来选择自己的下一步行动.为了便于计算,相应的移动收益集合被建立(如图 2(b)所示).移动收益由四个动态参数组成:方向参数(direction-parameter)、空格参数(empty-parameter)、前进参数(forward-parameter)、类别参数(category-parameter).其中,方向参数和空格参数是两个基本参数,前进参数和类别参数是两个修正参数,它们分别反映行人移动区域和视野范围内的动态交通情况.针对每个行人而言,在移动区域内的每个可能位置都拥有自己的四个动态参数及其移动到该位置时的移动收益.

以上行行人为例说明目标元胞位置四个动态参数的计算^[25].

方向参数 D_{ij} 的值为

$$D_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{上行行人前面的元胞,} \\ 0 & \text{与上行行人同行的元胞,} \\ -1 & \text{上行行人后面的元胞.} \end{cases} \quad (1)$$

空格参数 E_{ij} 的值为

$$E_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{未被行人占据的元胞,} \\ 0 & \text{中心位置的元胞,} \\ -1 & \text{有行人占据的元胞.} \end{cases} \quad (2)$$

在计算前进参数 F_{ij} 和同类参数 C_{ij} 时,需要确定行人的视野范围以及目标元胞在视野范围内的位置.本文选定的视野范围为 3×5 元胞的范围和 2×5 元胞的范围,如图 3 所示.

前进参数 F_{ij} 的值为

$$F_{ij} = \begin{cases} \frac{S_1 - S_2}{15} & \text{目标位置不与边界相邻,} \\ \frac{S_1 - S_2}{10} & \text{目标位置与边界相邻.} \end{cases} \quad (3)$$

式中, S_1 为视野范围内未被行人占据的元胞数量; S_2 为视野范围内被行人占据的元胞数量.

类别参数 C_{ij} 的值为

$$C_{ij} = \begin{cases} \frac{S_1 - S_2}{15} & \text{目标位置不与边界相邻,} \\ \frac{S_1 - S_2}{10} & \text{目标位置与边界相邻.} \end{cases} \quad (4)$$

式中, S_1 为视野范围内空格或与中心位置行人类型相同的行人数量; S_2 为视野范围内与中心位置行人类型不同的行人数量.

在每个时间步内,行人首先判断自己移动区域内五个目标位置的四个动态参数,然后计算四个动态参数之和,即每个目标位置的移动收益.移动收益反映了行人在移动过程中移动到该位置时所得到的收益.因此,行人总是在可能的目标位置中,选择移动收益最大的位置作为自己下一时间步的目标位置.与上行行人一样,同样可以计算出下行行人目标位置的四个动态参数及其移动收益.针对行人而言,四个动态参数是随着行人的类型和行人周围交通状况的变化而变化的.

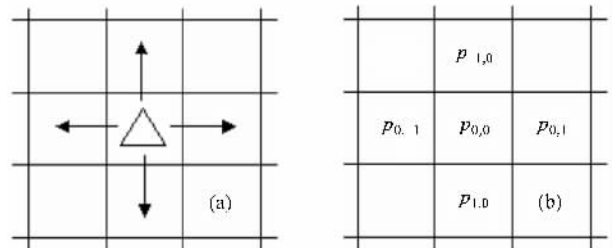


图 2 行人的移动区域及其相应行动选择的移动收益集合 (a) 为移动区域;(b) 相应行动选择的移动收益集合

对向人流仿真模型的演化规则为:

1) 在每一时间步长 t 内,行人只能移动一个元胞的长度,行人有五个可选位置作为自己的下一目标位置,行人可以前进、后退、等待或者左右移动等,如图 2(a)所示.

2) 行人移动区域内的五个备选位置都拥有自己的动态参数和移动收益.移动收益是四个动态参数值的总和,由(5)式表示.动态参数和移动收益随着移动区域中心位置行人的类型、移动区域和行人视

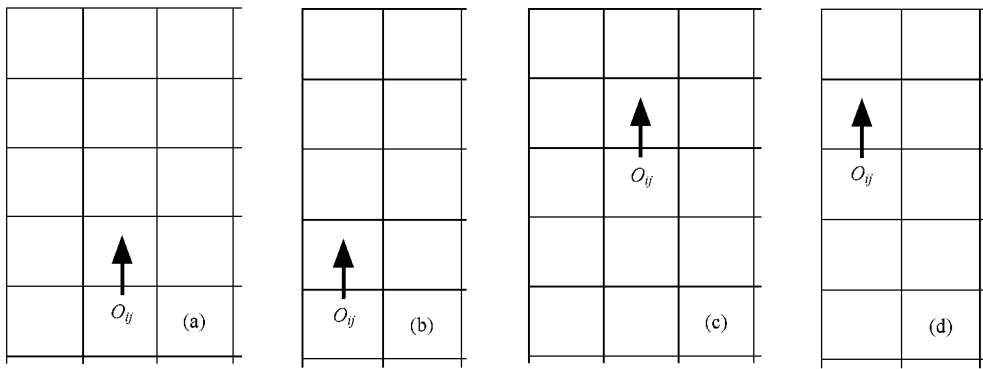


图3 计算前进参数 F_{ij} 和同类参数 C_{ij} 时的视野范围(O_{ij} 为目标位置)(a)(b)计算前进参数 F_{ij} 时的视野范围；(c)(d)计算同类参数 C_{ij} 时的视野范围

野范围内元胞被占据情况的变化而变化。

$$P_{ij} = D_{ij} + E_{ij} + F_{ij} + C_{ij}. \quad (5)$$

3)行人在选择自己的下一目标位置时,首先计算和判断自己移动区域内五个备选位置的移动收益.选择拥有最大收益值的位置作为下一步的目标位置.但多个位置同时拥有相同的最大值时,在这些位置中以相同的概率随机选择一个位置作为下一个目标位置.

4)由于一个元胞仅仅能容纳一个行人,所以多个行人选择同一个元胞作为下一时间步的目标位置时,在多个行人之间将会发生位置冲突.此时以等概率随机选择一个行人占据该元胞.下一时间步,被选择的行人移动到目标位置,没被选中的行人将留在原来的位置,保持不动.

5)由于行人可能选择被其他行人占据的元胞作为下一时间步的目标位置,因此可能存在两个行人相互交换位置的情况.只有当两个行人同时选择对方目前的位置作为自己下一时间步的目标位置时,行人之间才会交换彼此的位置.且位置交换一定会成功完成.

6)仿真系统采用并行更新算法,在每个时间步长内重复执行以上的仿真步骤.

3. 仿真分析

在仿真研究中,行人流的密度 K 定义为系统内行人数量与系统元胞总数 $W \times W$ 的比例;行人流的平均速度 V 定义为时间步内移动行人的数量与总的行人数量的比例;行人流的平均流量 Q 定义由(6)式表示,反映了在单位时间内通过系统单位边界

的行人数量.

$$Q = \frac{(U_1 + D_1) - (U_2 + D_2)}{2W \times T}, \quad (6)$$

式中, U_1 为上行行人通过上边界的人数; U_2 为上行行人从下边界后退进入系统的人数; D_1 为下行行人通过下边界的人数; D_2 为下行行人从上边界后退进入系统的人数; W 为系统规模; T 为统计时间步的总和.

文章仿真研究 $W = 60$ 时上行行人与下行行人的方向比例 $r = 0/100, 10/90, 20/80, 30/70, 40/60, 50/50$ 的对向行人流.方向比例 $r = 0/100$ 时,行人为单向行人流;当方向比例 $r = 50/50$ 时,行人流为均衡双向流.同时也仿真研究系统规模 $W = 10, 20, 30, 40, 50$ 的方向比例 $r = 50/50$ 的均衡对向行人流.仿真过程共分为 15000 个时间步,在初始时刻,所有行人被均匀地分布在系统里,前 10000 个时间步长用来开始仿真,后 5000 个时间步长用来统计数据.

仿真研究发现,对向行人流系统存在相位转换现象,系统存在临界密度 K_c .在 K_c 附近系统由自由流相位突然转变为阻塞流相位.行人密度 K 小于临界密度 K_c 时,系统处于自由流状态;当行人密度 K 大于临界密度 K_c 时,行人流处于拥堵状态.

在自由流状态,当行人密度 K 比较低时,行人很容易到达自由流状态,此时在每个时间步内行人的移动步长为一个元胞,即行人以最大速度 $V_{\max} = 1$ 前进.随着密度的增加,系统发生自组织现象,系统自组织地形成一些行人通道,在每个行人通道内,行人的类型是一致的,如图 4(a)(b)所示.在阻塞流状态下,系统内有拥堵区域形成.行人的拥堵模式如图 4(c)-(f)所示,行人面向他们各自的目标边

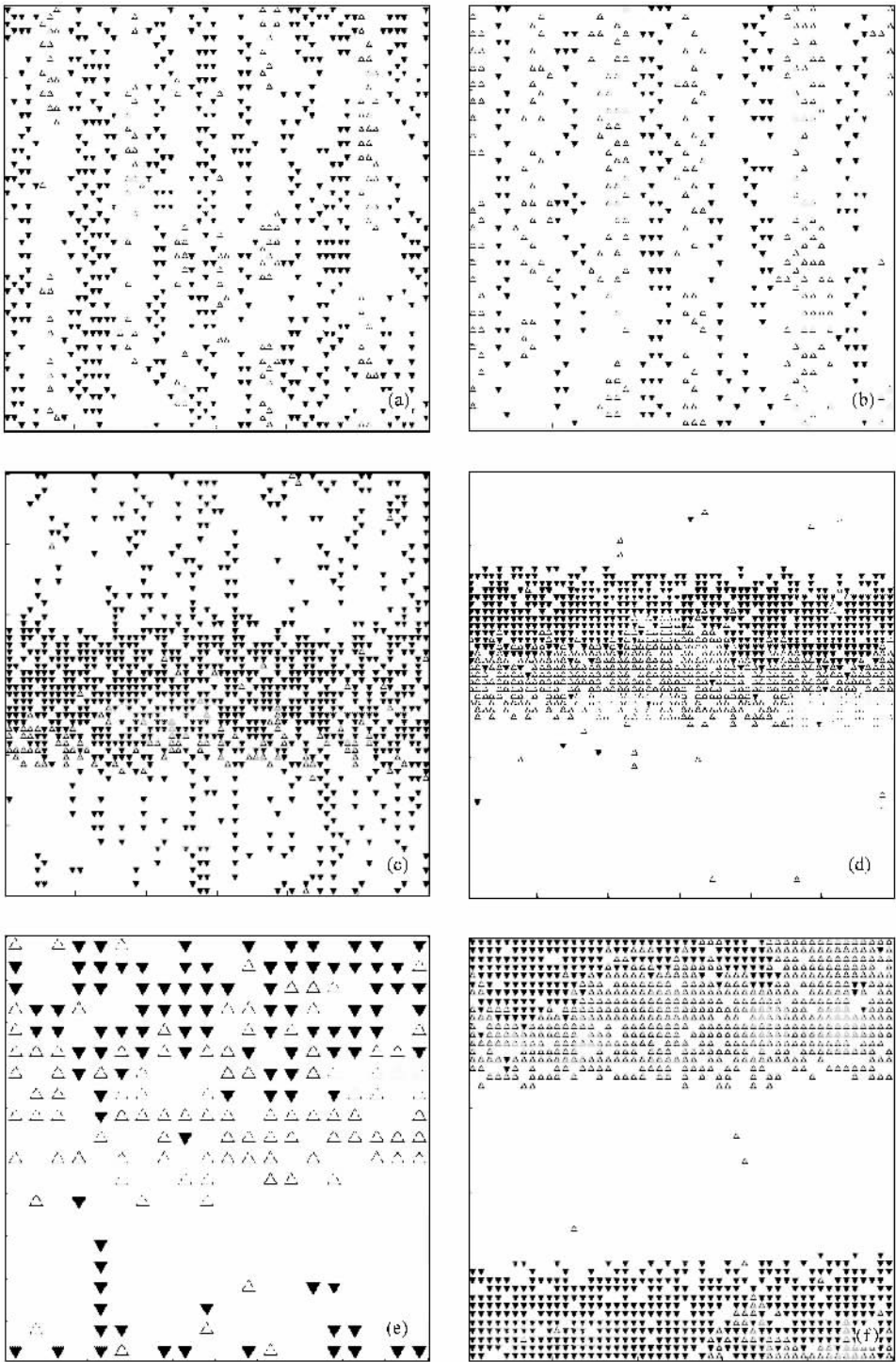


图4 $t = 15000$ 时,不同系统规模、密度、方向比例的对向人流空间图 (a) $W = 60, K = 0.2, r = 20/80$; (b) $W = 50, K = 0.2, r = 50/50$; (c) $W = 60, K = 0.3, r = 10/90$; (d) $W = 60, K = 0.3, r = 50/50$; (e) $W = 20, K = 0.5, r = 50/50$; (f) $W = 50, K = 0.5, r = 50/50$

界,面对面地拥挤在一起。

图5显示了系统规模 $W = 60$ 时,不同方向比例的对向人流的速度-密度关系曲线和流量-密度关

系曲线;图6显示了方向比例 $r = 50/50$ 时,不同系统规模的对向人流的速度-密度关系曲线和流量-密度关系曲线。

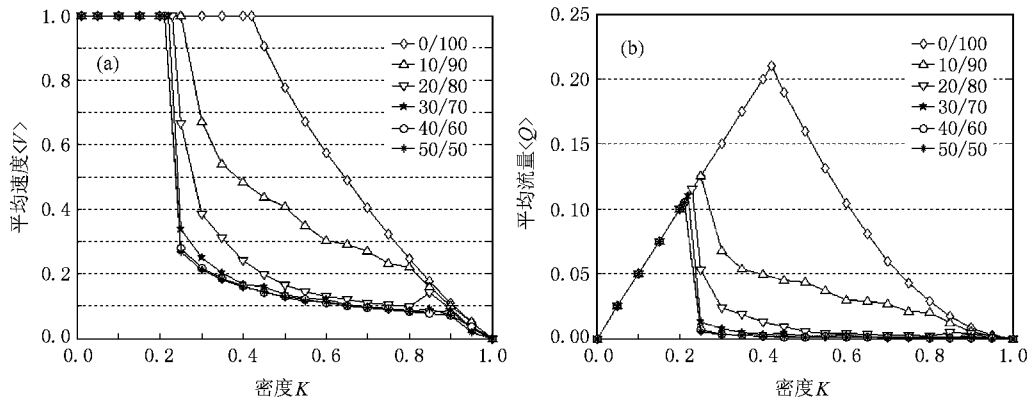


图5 系统规模 $W = 60$ 时,不同方向比例的对向人流的速度-密度关系曲线与流量-密度关系曲线 (a)速度-密度关系曲线;(b)流量-密度关系曲线

$K \leq K_c$ 时,行人的平均速度 V 保持不变, $V = 1$ 行人平均流量 Q 随密度的增而增加, $Q = K \times V \times a$ 且 $a = 1/2$. 流量-密度关系曲线和速度-密度关系曲线都是线性的,当密度 K 增加到临界密度 K_c 时,行人平均流量达到最大值.

而是小于最大值 V_{max} ,行人的平均速度将会随密度的增加而减小,行人的平均流量也会随密度的增加而减小. 在临界密度点 K_c 附近,行人的平均流量 Q 和平均速度 V 都将剧烈下降.

$K > K_c$ 时,行人的平均速度 V 不再保持不变,

$K = 1$ 时,行人的平均流量 $Q = 0$;平均速度 $V = 0$.

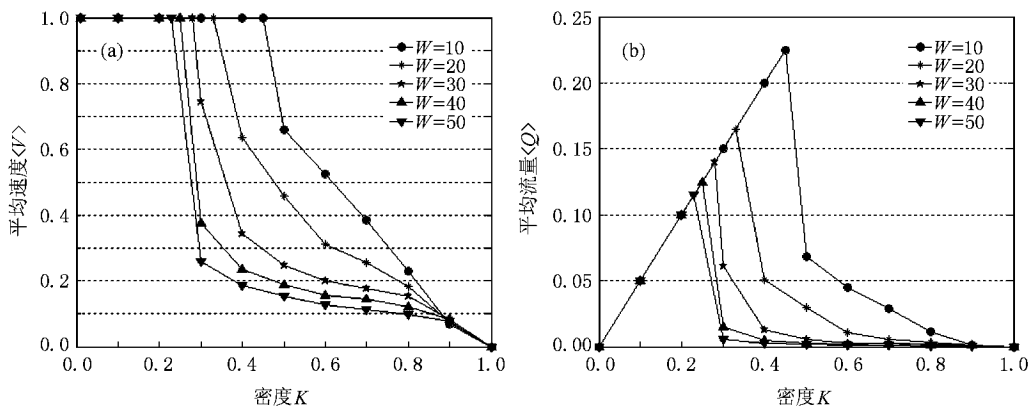


图6 方向比例 $r = 50/50$ 时,不同系统规模的对向人流的速度-密度关系曲线与流量-密度关系曲线 (a)速度-密度关系曲线;(b)流量-密度关系曲线

方向比例 $r = 0/100$ (单向行人流)时,系统存在理论的最佳临界密度 $K_c = 0.5$. 当系统内行人数量与空格数量相等,并且每个行人正前方都保留有一个空位时,每个时间步内行人占据前方目标位置,像阅兵方队一样向前移动,此时行人的平均速度 $V = 1$,行人流维持在自由流状态. 当行人的密度大于 0.5 时,由于行人数量大于空格位置的数量,空格位置不能满足所有行人的移动,因此在时间步内,存在行人停止不前的现象. 随着行人密度的增加,系统内行人停止不前的现象将越来越严重,从而导致行

人拥堵现象. 由于在行人的移动过程中存在位置冲突和目标位置被占据的现象,位置冲突或目标被占据的情况必将导致行人停止移动,因此在行人密度到达理论的最佳临界密度前,行人的平均速度和流量将会发生剧烈地下降,从而系统仿真的临界密度要低于最佳临界密度 0.5 .

时间步 $t = 15000$ 时,当 $K \leq K_c$ 时,行人被均匀随机地分布在系统内. $K > K_c$ 时,未被占据的元胞,即空的元胞被随机均匀地分布在系统内,如图7所示.

当方向比例 $r = 30/70, 40/60, 50/50$ 时,流量-密

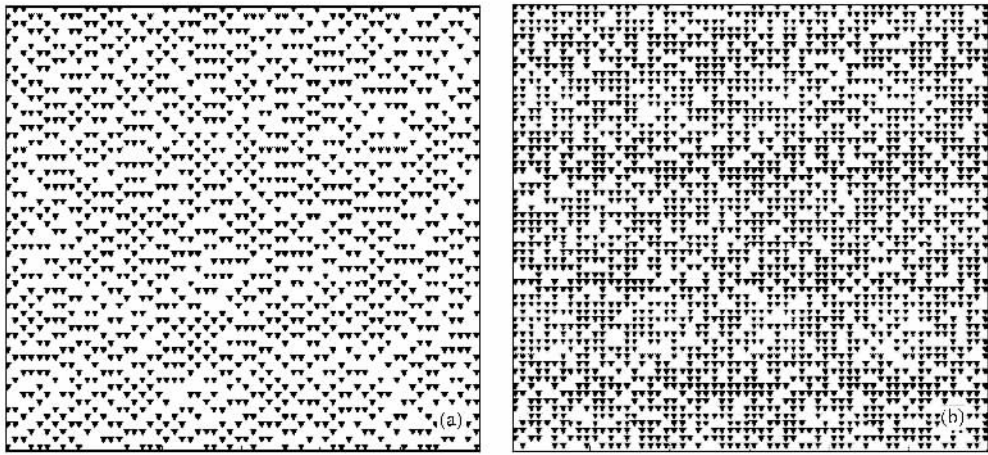


图 7 $t = 15000, W = 60, r = 0/100$ 不同密度的对向行人流空间图 (a) $W = 60, K = 0.4, r = 0/100$; (b) $W = 60, K = 0.7, r = 0/100$

度曲线以及速度-密度曲线几乎重合,当 $K > K_c$ 时,在方向比例 $r = 10/90, 20/80, 30/70$ 的双向行人流中,相同密度条件下,平均流量 Q 和平均速度 V 将随方向比例 r 增加而降低,如图 5 所示. 如图 8 所示,方向比例 r 的大小影响临界密度 K_c 的值,随方向比例 r 的增加,临界密度值将轻微地下降.

如图 6 所示,随系统规模 W 的增加,速度-密度关系曲线的弯曲程度将增加. 当 $0.3 < K < 0.8$ 时,相同密度条件下,随系统 W 的增加,平均速度和流量值将减小. $K = 0.9$ 时,行人速度和流量将几乎不再随系统规模的变化而变化,此时速度和流量将保持一个很小的值,如图 9 所示.

系统的临界密度值将强烈地依赖于系统规模 W ,如图 10 所示,随系统规模 W 值的增加,临界密

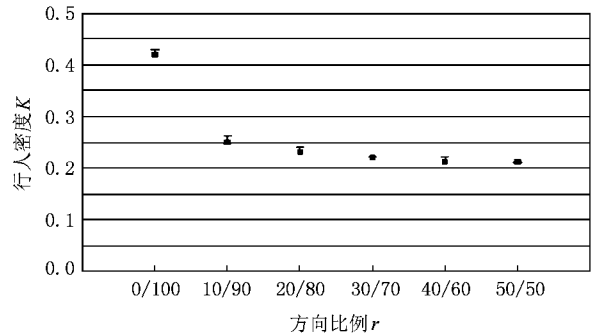


图 8 $W = 60$ 时,不同方向比例下的临界密度 K_c 值

度 K_c 值将减小,本文认为行人的视野范围被固定为 3×5 个元胞的范围,随着系统 W 的增加,行人的视野范围相对于系统将越来越小,从而行人对系统

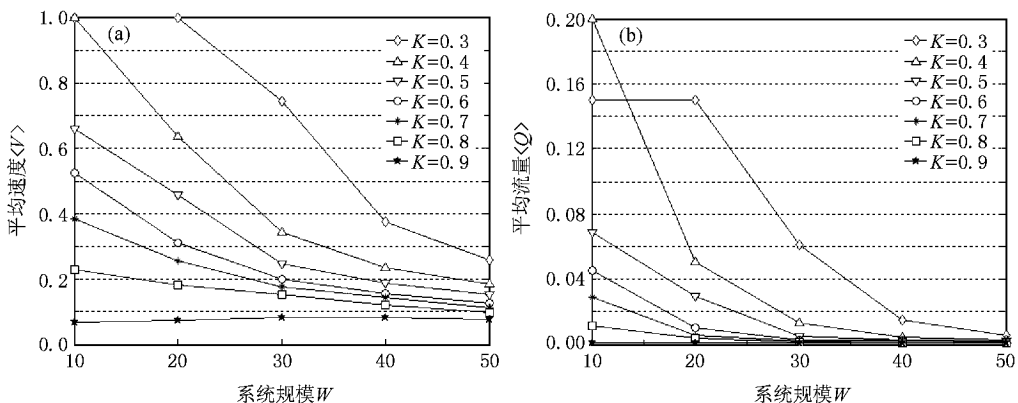


图 9 不同密度的条件下,平均速度和流量对系统规模的变化曲线 (a) 速度对系统 W 的变化曲线;(b) 流量对系统 W 的变化曲线

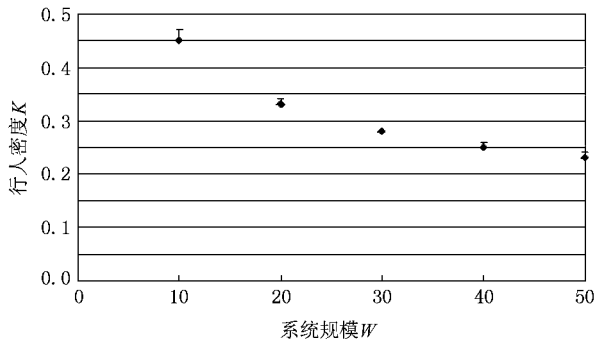


图 10 不同系统规模下的系统临界密度 K_c 值

内实时行人流情况的掌握越来越模糊,从而导致自己的行为判断越来越武断,因此导致系统的临界密度 K_c 的值越来越小。

在仿真过程中,能观察到行人作为一个群体移动的现象,也能观察到单个行人穿越拥挤区域的现象。

4. 结 论

基于元胞自动机对行人流的仿真研究越来越受到人们的重视. 本文利用动态参数模型对不同方向比例和不同系统规模的对向行人流进行仿真研究,在模型中行人可以根据自身周围的情况前进、后退、左右移动、原地等待、交换位置等. 研究结果表明,系统存在相位转换,在临界密度点附近,行人由自由流相位转换为阻塞流相位. 行人的平均流量和平均速度在临界密度 K_c 附近将发生急剧下降. 在自由流相位,每个行人都能保持最大的速度,行人平均流量随密度的增加而增加;在阻塞流相位,速度-密度关系曲线呈负指数模型,平均速度和平均流量都将随密度的增加而减小. 此外,临界密度值 K_c 依赖于对向行人流的方向比例和系统规模,同时方向比例和系统规模也影响着速度-密度和流量-密度关系曲线的弯曲程度。

- [1] Xiao R J , Kong L J , Liu M R 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 740 (in Chinese) [肖瑞杰、孔令江、刘慕仁 2007 物理学报 **56** 740]
- [2] Tang T Q , Huang H J , Xue Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4026 (in Chinese) [唐铁桥、黄海军、薛 郁 2006 物理学报 **55** 4026]
- [3] Fu C J , Wang B H , Yin C Y , Gao K 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4032 (in Chinese) [付传技、汪秉宏、殷传洋、高 坤 2006 物理学报 **55** 4032]
- [4] Lei L , Dong L Y , Song T , Dai S Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1711 (in Chinese) [雷 丽、董力耘、宋 涛、戴世强 2006 物理学报 **55** 1711]
- [5] Wu K F , Kong L J , Liu M R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6275 (in Chinese) [吴可非、孔令江、刘慕仁 2006 物理学报 **55** 6275]
- [6] Mou Y B , Zhong C W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5597 (in Chinese) [牟勇颀、钟诚文 2005 物理学报 **54** 5597]
- [7] Zheng R S , Tan H L , Kong L J , Liu M R 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4614 (in Chinese) [郑容森、谭惠丽、孔令江、刘慕仁 2005 物理学报 **54** 4614]
- [8] Ge H X , Zhu H X , Dai S Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4621 (in Chinese) [葛红霞、祝会兵、戴世强 2005 物理学报 **54** 4621]
- [9] Blue V J , Embrechts M J , Adler J L 1997 *IEEE International Conference on Systems , Man , and Cybernetics* **3** 2320
- [10] Wolfram S 1986 *Theory and Applications of Cellular Automata* (World Scientific , Singapore)
- [11] Blue V J , Adler J L 2001 *Transp. Res. B* **35** 293
- [12] Wolfram S 1994 *Cellular Automata and Complexity* (Addison-Wesley , Reading , MA)
- [13] Nagel K , Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I (Fr.)* **2** 2221
- [14] Fukui M , Ishibashi Y 1996 *J. Phys. Soc. Japan.* **65** 1868
- [15] Biham O , Middleton A A , Levine DA 1992 *Phys. Rev. A* **46** R6124
- [16] Cuesta J A , Matinez F C , Molera J M , Sanchez A 1993 *Phys. Rev. E* **48** 4175
- [17] Nagatani T 1993 *Phys. Rev. E* **48** 3290
- [18] Chung K H , Hui P M , Gu G Q 1995 *Phys. Rev. E* **51** 772
- [19] Li J , Yang L Z , Zhao D L 2005 *Physica A* **354** 619
- [20] Schadschneider A 2002 *Physica A* **313** 153
- [21] Maerivoet S , Moor B D 2005 *Phys. Rep.* **419** 1
- [22] Fang W F , Yang L Z , Fan W C 2003 *Physica A* **321** 633
- [23] Burstedde C , Klauck K , Schadschneider A , Zittartz J 2001 *Physica A* **295** 507
- [24] Kirchner A , Schadschneider A 2002 *Physica A* **312** 260
- [25] Yue H , Hao H R , Chen X M , Shao C F 2007 *Physica A* **384** 567
- [26] Song W G , Xu X , Wang B H , Ni S J 2006 *Physica A* **363** 492
- [27] Song W G , Yu Y F , Wang B H , Fan W C 2006 *Physica A* **371** 658



Simulation of bi-directional pedestrian flow based on cellular automata model^{*}

Yue Hao Shao Chun-Fu[†] Chen Xiao-Ming Hao He-Rui

(*School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

(Received 29 July 2007; revised manuscript received 13 May 2008)

Abstract

Simulations of bi-directional pedestrian flow with different direction splits and system sizes are presented based on cellular automata (CA) in this paper. It is well known that pedestrian movement is more flexible and adaptive to the dynamic conditions than vehicular flow, so four dynamic parameters are formulated to simplify tactically the decision-making process of pedestrians, which can reflect the pedestrian's judgment on the surrounding conditions and decide his/her choice of action. The relationships of velocity-density and volume-density at different direction splits and on the different size system are studied and analyzed. It is found that there are phase transitions and a critical density point in the model and the relationships of velocity-density and volume-density are different in different phases. And the ratio of direction splits and system size affect the shapes of velocity-density curve, volume-density curve and the value of critical density point.

Keywords : cellular automata, bi-directional pedestrian flow, dynamic parameters, critical density

PACC : 0550, 0520, 6470

^{*} Project sponsored by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB705500).

[†] Corresponding author. E-mail : cfshao@center.njtu.edu.cn