

基于元胞自动机的人群疏散模型^①

巩青歌, 沈晓飞, 王文骏

(武警工程大学装备与信息技术研究所, 西安 710086)

摘要: 通过分析已有的元胞自动机理论基础, 改进了从众吸引力算法, 简化了复杂空间欧氏距离算法, 真实反映了人员惊慌状态下的从众心理, 并且提高了危险排斥力和出口吸引力的量化效率. 本文重点研究了疏散人群密度、出口宽度、从众心理对疏散时间的影响. 研究表明, 行人疏散时间随行人数量呈线性增加; 随安全出口宽度呈负指数性减少; 盲目从众导致人群疏散效率降低形成局部拥堵.

关键词: 元胞自动机; 从众吸引力; 疏散; 欧氏距离算法

Evacuation Model Based on The Theory of CA

GONG Qing-Ge, SHEN Xiao-Fei, WANG Wen-Jun

(Institute of Equipment and Information Technology under the Chinese Armed Police Force, Engineering University of the Chinese Armed Police Force, Xi'an 710086, China)

Abstract: By analyzing the basic theory of CA and improving the algorithm of occupant psychology, we simplify the complex algorithm of Euclid space distance, which reflect the occupant psychology of crowds and improve the quality efficiency of the rejection of dangers and the appealing of the exits. This paper mainly studies the effect of the density of crowds, the width of the exits, the occupant psychology of the crowds. The results show that the evacuation time grows linearly with the amount of the crowds, and decreases in negative exponent with the width of the exits. Follow the crowds blindly will cause congestion because the low efficiency of evacuation.

Key words: theory of CA; occupant psychology; evacuation; algorithm of Euclid space distance

近年来, 公共场所人群安全疏散问题日益突出并越来越受到我国有关部门研究人员的重视, 对该问题的研究方法计算机数值模拟仿真已取代了大规模的演习和调查统计等传统方法, 成为最重要的一种研究方法. 由著名的数学家 J.Von-Neumann 最早于 1948 年提出来的元胞自动机(Cellular Automaton, CA)模型就是其中一种模拟人员疏散过程的模型, 其实质是定义在一个由具有离散、有限状态的元胞组成的元胞空间上, 并按照一定的局部规则, 在离散的时间维上演化的动力学系统^[1,2].

在基于元胞自动机的人员疏散模型研究方面, 文献[3]基于“地场”重点研究建筑物的出口位置和出口宽度对行人疏散的影响. 文献[4]在“地场”方法的基础上引入了“位置危险度”的概念来确定行人的运动规则.

文献[5]提出了一个新的元胞自动机模型, 考虑了人与人之间相互作用的基础上, 通过量化吸引力、排斥力和摩擦力提高了运算效率, 而且模拟结果与实际行人疏散情况符合较好. 文献[6]采用元胞自动机模型模拟了不同房间结构下人员疏散, 重点研究了人员密度和出口条件对疏散时间的影响. 文献[7, 8]结合行人的实际运动特点根据房间出口的位置来重新定义位置危险度, 并且考虑了行人的并排成对、前后成对、混合成对(同时存在并排成对与前后成对)三种成对方式, 提高了行人运动规则的合理性.

紧急状况下的人员疏散是一个非常复杂的过程, 涉及到环境、心理和生理等多方面因素的影响, 本文改进了从众吸引力算法更加真实地反映人员的从众心理, 简化了在复杂环境中的欧氏距离算法, 提高了危

① 收稿时间:2013-04-12;收到修改稿时间:2013-05-30

险排斥力和出口吸引力的量化效率。通过计算机仿真,重点研究了出口宽度、从众心理对疏散时间的影响。

1 模型建立

1.1 从众吸引力

当生命处于危急情况时,由于惊恐,人员会失去正常的判断能力,产生从众心理,不管有什么人跑动时,都会盲目地跟从其后,跟随大多数人进行疏散。因此 CA 模型必须引入从众吸引力这一因素来反映人员的从众心理,才可能真实再现疏散全过程。

传统的疏散模型大多通过均值法和数值统计法模拟从众现象。均值法通过计算感知区域内所有人员位置坐标的均值来获得目标位置。此方法能够较好地拟合人群在慌乱状态的心理反应,但是在复杂的场景下人员的感知区域很难确定,障碍物的遮挡、人群密度及烟雾等因素都对感知区域有很大的影响,而且此方法具有较高的计算复杂度。数值统计法通过统计相邻元胞经过元胞的人数确定运动目标元胞。其从众吸引概率计算公式为:

$$P_1(i, j) = \frac{N_{ij}}{\sum_{m=1}^k N_m} \quad (1)$$

其中, $P_1(i, j)$ 表示位置为 (i, j) 元胞的从众吸引概率, N_{ij} 表示位置为 (i, j) 元胞截止到当前时刻统计的经过元胞的人数, $\sum_{m=1}^k N_k$ 表示截止到当前时刻统计的相邻元胞经过人数之和。此公式表明经过元胞的人数越多,从众吸引力越大。

统计经过元胞的人数只能反映人群容易聚集的位置,而不能反映真正感兴趣的人流运动的方向,因此只采用元胞数值统计法来确定元胞的从众吸引力时存在以下一些问题:

问题一:当人流从窄道向宽道疏散时,或者人流由单道向多个叉道疏散时,由于人群的分流,宽道处的元胞统计值比窄道处的小,叉道处的元胞统计值比单道处的小。因此连接口的元胞会存在与人流运动方向相反的吸引力。

问题二:当目标位置被其他人员占据时,需要沿着人流运动方向绕行,此时可能反方向的元胞统计值相对更大,因此做出不合理的绕行。

为了解决以上问题,本文改进了传统的元胞数值统计模型,通过分别统计元胞向不同方向上的相邻元胞运动的人数,即在元胞的各个运动方向上分别设定一个计数器,当有人员由此元胞向某方向运动时,就触发相应的计数器,比较不同方向上经过的人数,能更好地反映人流运动的趋势。具体的从众吸引概率计算方法如下:

$$P_1(i, j, t) = \frac{C[i][j][t]}{\sum_{m=1}^t C[i][j][m]} \quad (2)$$

式中: $P_1(i, j, t)$ 为元胞在 t 方向上的从众吸引概率; $C[i][j][t]$ 为截止当前时刻元胞向 t 方向运动的人数;

$\sum_{m=1}^t C[i][j][m]$ 为截止当前时刻元胞向 t 个方向运动的总人数。此算法意义在于:朝某方向运动的人越多,则从众吸引越大。较式(1)更能反映人流运动方向,使从众吸引力更加真实准确。

1.2 出口吸引力

在疏散过程中,疏散人员会尽量选择最近路径来向出口运动,距离出口越近的元胞吸引力越大,距离出口越远的元胞吸引力越小,障碍物没有吸引力。因此可以采用元胞位置与出口的欧氏距离衡量该位置的出口吸引力。出口宽度大于一个元胞空间时,取距出口内元胞最小的距离值。当疏散空间拥有多个出口时,在多个安全出口之间取距出口最小的距离值。具体的计算方法为:

$$L_{ij} = \begin{cases} \min_m \left(\min_n \left(\sqrt{(i-i_n^m)^2 + (j-j_n^m)^2} \right) \right) \\ M \end{cases} \quad (3)$$

式中: L_{ij} 为元胞 (i, j) 距离出口最近距离; (i_n^m, j_n^m) 为第 m 个出口中第 n 个元胞的位置坐标; M 为一个大大正数,说明障碍物几乎没有吸引力。

500	500	500	500	500	500	0	0	0	500	500	500	500	500	500
500	51	412	316	224	141	1	1	1	141	224	316	412	51	500
500	539	447	361	283	224	2	2	2	224	283	361	447	539	500
500	583	5	424	361	316	3	3	3	316	361	424	5	583	500
500	64	566	5	447	412	4	4	4	412	447	5	566	64	500
500	707	64	583	539	51	5	5	5	51	539	583	64	707	500
500	781	721	671	632	608	6	6	6	608	632	671	721	781	500
500	86	806	762	728	707	7	7	7	707	728	762	806	86	500
500	943	894	854	825	806	8	8	8	806	825	854	894	943	500
500	103	985	949	922	906	9	9	9	906	922	949	985	103	500
500	1118	1077	1044	102	1005	10	10	10	1005	102	1044	1077	1118	500
500	1208	117	114	1118	1105	11	11	11	1105	1118	114	117	1208	500
500	13	1265	1237	1217	1204	12	12	12	1204	1217	1237	1265	13	500
500	1393	136	1334	1315	1304	13	13	13	1304	1315	1334	136	1393	500
500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500

图 1 元胞空间欧氏距离

在现实的疏散环境中，疏散空间内常常存在影响疏散的障碍物，行人不得不避让和绕行。存在障碍物的疏散空间计算出口吸引力就比较复杂，传统模型中大多采用 Dijkstra 算法来计算疏散空间内的元胞位置距安全出口的最短准欧氏距离。存在一个假想流从安全出口出发，在元胞位置与安全出口之间的距离在采用欧氏距离的基础上，以恒定速度逐渐向外沿任何可能的元胞方向扩散蔓延；当假想流遇到障碍物的时候，假想流将会改变方向后继续沿任何可能的元胞方向扩散和蔓延。在假想流扩散和蔓延的过程中，元胞与安全出口之间的距离采用欧氏距离，假想流的扩散采用相邻的四个元胞位置向外扩散。假想流首先到达的元胞位置与安全出口之间的准欧氏距离将是安全出口到元胞位置之间的最短距离。此算法精确度较高，但是计算复杂度太大，影响仿真效率。因此本文提出了切割法：将疏散空间切割为多个独立的没有障碍物的疏散子空间，设立多级子出口，并且本级子出口位于上级子空间中，在子空间中计算元胞对应子出口的欧氏距离，根据上级子出口计算本级距父出口的欧氏距离，最终得到所有元胞的欧氏距离。显然在具有较浅空间层次和较大子空间的疏散空间上，切割法具有更高的计算效率，在一定程度上弥补了 Dijkstra 算法的不足。

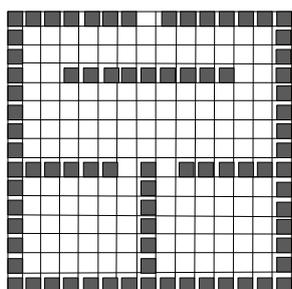


图 2 疏散空间障碍物分布示意图

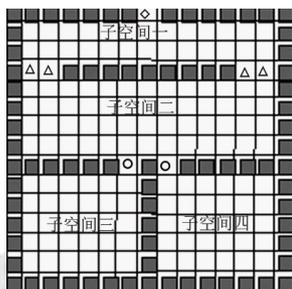


图 3 疏散空间分割示意图

图 2 为疏散空间的障碍物分布示意图，图 3 是对疏散空间分割后的示意图，其中◇表示父出口，△表示一级子出口，○表示三级子出口，从而将疏散空间分割为四个无障碍物的子空间。通过式 3 分别计算每个子空间中元胞空间到子出口的欧氏距离，最后通过加上相应子出口距父出口的欧氏距离，得到整个疏散空间距父出口的欧氏距离如图 4。

根据元胞空间距出口的欧氏距离计算元胞出口吸

500	500	500	500	500	500	500	0	500	500	500	500	500	500	500	500
500	641	541	441	341	241	141	1	141	241	341	441	541	641	500	500
500	651	554	458	365	283	224	2	224	283	365	458	554	651	500	500
500	68	589	500	500	500	500	500	500	500	500	500	589	68	500	500
500	725	689	73	83	93	103	113	103	93	83	73	689	725	500	500
500	812	789	812	871	954	1046	1142	1046	954	871	812	789	812	500	500
500	905	889	905	949	1013	1091	1177	1091	1013	949	905	889	905	500	500
500	1001	989	1001	1036	1089	1154	123	1154	1089	1036	1001	989	1001	500	500
500	500	500	500	500	500	1229	500	1229	500	500	500	500	500	500	500
500	177	167	157	147	137	1329	500	1329	137	147	157	167	177	500	500
500	1783	1687	1594	1512	1453	1429	500	1429	1453	1512	1594	1687	1783	500	500
500	1818	1731	1653	159	1545	1529	500	1529	1545	159	1653	1731	1818	500	500
500	188	1795	1729	1676	1641	1629	500	1629	1641	1676	1729	1795	188	500	500
500	1936	1869	1812	1767	1739	1729	500	1729	1739	1767	1812	1869	1936	500	500
500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500

图 4 障碍物疏散空间的欧氏距离

引概率的具体公式为：

$$P'(i, j, t) = \frac{L_{\max} - L_{ij}^t}{L_{\max} - L_{\min}} \quad (4)$$

式中： $P'(i, j, t)$ 为元胞 (i, j) 在 t 方向上的出口吸引概率； L_{\max} 为相邻元胞中距出口的最远欧氏距离； L_{\min} 为相邻元胞中距出口的最近欧氏距离； L_{ij}^t 为元胞在 t 方向上相邻元胞距出口的欧氏距离。此公式的意义在于：距离出口越近的元胞，其出口吸引力越大，反之距离出口越远，其出口吸引力越小。

1.3 危险排斥力

危险排斥力主要表现为人员远离危险源的愿望。为了定量描述排斥力，根据 2.2 节提出的分割法以及欧氏距离计算公式，计算元胞空间距危险源的欧氏距离，从而引入排斥力概率：

$$P''(i, j, t) = \frac{S_{ij}^t - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \quad (5)$$

式中： $P''(i, j, t)$ 为元胞 (i, j) 在 t 方向上的排斥概率； S_{\max} 为相邻元胞中距危险源的最远欧氏距离； S_{\min} 为相邻元胞中距危险源的最近欧氏距离； S_{ij}^t 为元胞在 t 方向上相邻元胞距危险源的欧氏距离。此公式的意义在于：距离危险源越远的元胞，向此元胞运动的概率越大，反之距离危险源越近，向此元胞运动的概率越小。

1.4 综合效益评估

人员在理智状态时，会向远离危险靠近出口的最优元胞运动，即综合出口吸引概率及危险源排斥概率

得到理智状态的最优选择概率 p_2 , 从而选择效益最高的目标元胞.

$$P_2 = (P' + P'')/2$$

人员处于慌乱状态时的从众心理则会干扰人员判断, 违反最高效益的原则而趋向人流方向. 根据从众心理的干扰, 可以得到综合选择概率的计算方法:

$$P = (1-\alpha) P_2 + \alpha P_1 \quad (6)$$

式中: P 为综合选择概率; P_1 为从众吸引概率; P_2 为最优选择概率; $\alpha(1 \geq \alpha \geq 0)$ 为从众干扰因子, 由人员的慌乱程度、对疏散空间的熟悉度等因素决定. 此公式的意义在于: 从众干扰因子 α 越大, 对人员正确判断的干扰越大; 相反 α 越小, 人员做出正确判断的概率越大.

1.5 规则演化

本模型采用并行更新机制, 疏散人员都必须遵守如下运动规则:

(1) 在每一时间步长 t 内, 疏散人员只能向上、下、左、右四个方向移动一个元胞的长度或者选择原地等待, 如图 5 所示.

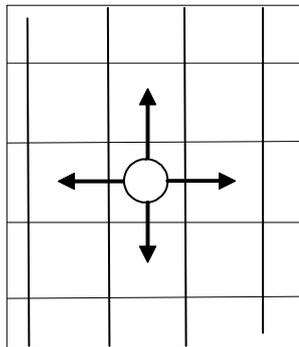


图 5 疏散人员运动方向

(2) 疏散人员通过计算综合选择概率 P (如图 6), 选择拥有最大选择概率的位置作为自己的下一步目标位置. 当在多个运动方向上拥有相同的选择概率, 且为最大选择概率时, 在这些元胞中以相同的概率随机选择一个元胞作为自己的下一步目标位置.

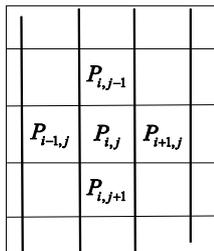


图 6 综合选择概率

(3) 当多个人同时竞争一个空闲位置时, 彼此之间会存在位置冲突. 当行人之间存在位置冲突时, 系统将会以综合选择概率最大的人员占据该位置, 此人员进入该位置的意愿最强烈. 其余人员选择向相对综合选择概率较高的位置运动. 人员所有运动向上的位置都被其他人员占或者障碍物占据时, 将留在原地等待. 当两个疏散人员同时选择对方当前的位置作为自己下一步的目标位置时, 彼此交换位置.

(4) 当疏散人员移动到安全出口内时, 在下一时间步长内, 行人将移出系统. 疏散空间内的所有疏散人员都移出系统后, 仿真过程结束.

2 仿真分析

应用本文建立的元胞自动机人员疏散模型, 按照每个元胞对应 $0.4m \times 0.4m$ 空间的网格划分, 对一个超市火灾疏散模型进行模拟, 如图 7. 程序运行编译环境: Windows XP SP3, Visual Studio2008, 使用 C#.NET 开发语言.

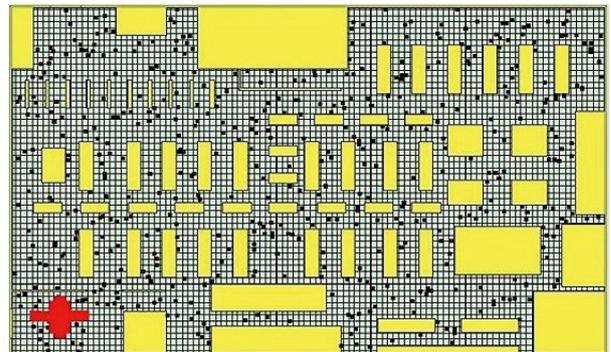


图 7 仿真界面

仿真实验中主要从以下几种情形进行分析: 一是建筑内出口宽度对疏散时间的影响; 二是从众干扰因子权重设定对疏散时间的影响. 表 1 为不同的出口宽度疏散一定人群密度人员的所需时间步长表(设定从众干扰因子 $\alpha=0.2$).

表 1 出口宽度对疏散时间影响的统计表

出口宽度 \ 人群密度	0.1	0.2	0.5	0.8
1	386	784	2106	3422
5	104	156	403	1237
10	96	123	245	551

表 1 的实验数据表明: 当人群密度在出口疏散能力范围内时, 增大出口的宽度对疏散效率的提高作用并不明显; 相反当出口疏散负担超过其疏散能力时, 疏散效率将大幅降低. 行人疏散时间随行人数量呈线性增加, 随安全出口宽度呈负指数性减少. 并且当出口相对狭窄, 人数相对较多且都疏散到出口附近时, 出口旁的人大部分无法运动, 后面的人绕行加剧, 由于堵塞在瓶颈位置会出现明显的扇形结构. 因此, 建议根据建筑物的人流量大小, 合理设置出口大小. 表 2 为设定不同从众干扰因子权重时所用疏散时间步长对照表(人群密度 $K=0.5$, 出口宽度 $L=5$).

表 2 从众干扰因子对疏散时间影响的统计表

从众干扰因子权重 (α)	最优选择概率权重 ($1-\alpha$)	疏散时间步长
0	1	426
0.2	0.8	403
0.5	0.5	392
0.7	0.3	418
0.8	0.2	514

表 2 的实验数据表明 $\alpha=0$ 时, 根据效益最优原则运动其疏散时间较长, 通过增大从众行为权重 α 疏散时间减小, 疏散效率提高, 当 $\alpha=0.8$ 时, 由于大多数人员的盲目从众, 导致人群分流效率降低, 形成局部拥堵, 疏散时间变长. 试验结果表明从众行为在疏散仿真中是必须考虑的主要因素之一, 合理设置从众干扰因子权重可真实再现人员疏散的全过程.

通过仿真实验可知本模型能使疏散时间有效收敛, 并且在从众因子的对比分析中, 所得数据能较好地耦合实际疏散规律且没有发现畸形数据, 因此本文提出的从众吸引力算法正确有效, 较好克服了传统从众吸引力算法的不足.

3 结束语

本文提出的基于元胞自动机的人员疏散模型, 改

进了从众吸引力算法, 简化了存在障碍物的复杂空间欧氏距离计算方法, 使得模型在人员疏散路径的选择上更具合理性和真实性, 并且提高了仿真效率. 但本模型没有考虑人与人之间、人与障碍物之间的摩擦拥挤排斥等因素, 也没有考虑环境、心理和生理等多方面因素的影响, 这些问题都需要更深层次的探讨和完善. 研究结果表明: 出口宽度设置应与人流流量相适应; 适当从众能提高疏散效率, 盲目从众则降低疏散效率. 此外, 在行人疏散仿真过程中, 能观察到在出口前形成拱形的行人拥挤状态, 以及离危险源近或者从众心理强烈的人员移动意愿更强, 表现出更强的位置竞争力.

参考文献

- 1 Chopard B, Droz M. 祝玉学, 赵学龙译, 物理系统的元胞自动机模拟. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- 2 肖双喜. 拥挤人群疏散数学模型的研究现状探讨. 中国安全生产科学技术, 2007-4, 3(2).
- 3 Zhao DL, Yang LZ, Li J. Exit dynamics of occupant evacuation in an emergency. *Physical A*, 2006, 363: 501-511.
- 4 杨立中, 方伟峰, 黄锐. 基于元胞自动机的火灾中人员逃生的模型. 科学通报, 2002, 47(12): 896-901.
- 5 宋卫国, 于彦飞, 范维澄, 等. 一种考虑摩擦与排斥的人员疏散元胞自动机模型. 中国科学 E 辑工程科学 & 材料科学, 2005, 35(7): 725-736.
- 6 朱艺. 不同房间结构下人员疏散的 CA 模拟研究. 火灾科学, 2007, 7, 16(3).
- 7 周金旺, 邝华, 刘慕仁, 孔令江. 成对行为对行人疏散动力学的影响研究. 物理学报, 2009, 58(5): 3001-3007.
- 8 Chen RH, Qiu B, Zhang CY. A study on the evacuation of people in a hall using the cellular automaton model. *International Journal of Modern Physics C*, 2007, 18(3): 359-367.