

大型商场人员安全疏散的计算机仿真研究

陈育,陶平,张小英

(华南理工大学电力学院,广东广州 510640)

摘要:大型商场潜藏着很大的安全隐患。为此,在基本元胞自动机的基础上建立了人员安全疏散的二维随机元胞自动机模型,模型中考虑了人员距出口的距离、局部吸引力、绕行、墙壁和障碍物的排斥力等因素。用该模型对广州某大型商场一层平面内人员疏散进行了仿真研究,开发了人员疏散演示系统。该系统可动态演示人员疏散全过程,每个人员每步时都有确定的位置,为找出建筑结构中的不合理之处提供了依据。对比分析了元胞邻域选取不同时的疏散情况,发现 Moore 型邻域比 Von. Neumann 型邻域有更高的疏散效率。

关键词:元胞自动机;安全疏散;仿真;“瓶颈”效应;局部吸引力;绕行

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2010)10-0211-04

Computer Simulation Research of Safety Evacuation Property in Super Shopping Mall

CHEN Yu, TAO Ping, ZHANG Xiao-ying

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Shopping malls has a lot of potential security risks. To this end, the randomly two-dimensional cellular automaton model is developed based on the basic automaton model. In that model, the distance between one person and the exit, the local attraction force, detour behavior and repulsion force of the wall and barrier have been considered. The first floor of a super market in Guangzhou is chosen as example. The personnel safety evacuation property of that building is simulated, and an evacuation demonstration system is developed. This system can demonstrate the whole process of evacuation dynamically, and every people has an exact position of every time-step, so as to identify the unreasonable place of this structure. In addition, the Moore neighbor is more efficient than the Von. Neumann neighbor during the simulation.

Key words: cellular automaton; safety evacuation; simulation; bottleneck effects; local attraction force; detour

0 引言

现代化的大型商场的人员密集,流量大。许多大型商场每天接待的顾客人数高达几十万,高峰时每平方米可达 5~6 人,每逢节假日,人数会更多。广州“天河城”是一座规模宏大、功能齐全的现代型综合购物中心,经过十年的经营,被誉为“中国第一商城”。天河城的人流量从 1996 年开业以来至 2004 年 5 月 6 日止,累计客流量突破 8 亿人次,相当于全广东 7733 万人每人到天河城来了 10 次以上。2004 年 10 月 1 日,天河城创日客流量 83 万人次新高。如此人气,使得由

于人的因素引起的火灾危险性大。此外,大型商场经营的商品大部分是可燃物品,数量众多。不仅容易引发火灾事故,而且一旦发生火灾事故往往产生大量有毒烟雾、蔓延迅速,增加了人员疏散的困难,会造成重大的人员伤亡和财产损失。近年来国内外大型商场、超市的火灾事故呈现迅猛抬头之势,群死群伤恶性火灾事故屡见报端^[1],如唐山市的林西百货大楼、北京的隆福商业大厦、河南的洛阳东都商厦火灾(死亡 309 人)、沈阳商城特大火灾、吉林的中百商厦等火灾都造成了严重的人员伤亡和巨大的经济损失。据统计,火灾中人员伤亡的主要原因是不能及时进行人员疏散而被有毒烟雾侵害所致。

在人员安全疏散的研究中,以疏散模型的开发为多。至今,国内外已开发的疏散模型达 22 种之多^[2]。按物理空间的模化方法来分类,目前常见的人员疏散模型(行人流模型)可分为离散化模型和连续性模型,离散化模型以格子气模型^[3]和元胞自动机模型^[4-13]

收稿日期:2010-01-23;修回日期:2010-04-19

基金项目:广东省科技计划项目(2008B030303058);华南理工大学中央高校基本科研业务项目(20092M0279)

作者简介:陈育(1985-),男,河南信阳人,硕士研究生,研究方向为冲击式水轮机、公共场所的人员疏散;张小英,博士,副研究员,研究方向为民用建筑的节能设计与评价、核电站安全、建筑火灾的智能预警与人员疏散方面。

使用较多,连续性模型最为著名的是 Helbing 等提出的社会力模型。离散化模型运行速度快,但很难考虑到各种社会力等因素,计算误差较大;连续性模型具有较高的精度,但运行速度较慢。其中元胞自动机(Cellular Automaton, CA)模型应用最为广泛,该模型在均匀一致的网格上由有限状态的变量(或称元胞)构成离散、分散及空间可扩展的动力系统^[14]。

文中模化了复杂的建筑平面结构,忽略人群中次要因素,并引入“社会力”的思想,考虑了建筑结构的吸引力、排斥力,在基本元胞自动机的基础上建立了基于出口距离最近的二维随机元胞自动机模型。利用该模型对广州天河城一层平面进行了人员疏散仿真模拟研究,体现了建筑物的几何结构对人员疏散的影响,并对比分析了元胞邻域选取的不同带来的疏散效果。

1 理论模型

1.1 元胞自动机

“元胞自动机”产生于 20 世纪 60 年代,最早是由 Von Neuman 和 Ulam 提出来的,起初主要用于生命自复制功能。近年来,人们对元胞自动机的研究兴趣大增,因为其简单的微观局部规则能演译出复杂的宏观自然现象。元胞自动机被广泛应用到行人流、交通流、星系等方面。元胞自动机的组成元素有元胞(cell)、网格(lattice)、邻域(neighborhood)、时间步(time-step)及人员行走规则(rule)等。在人员疏散方面的运行机理如图 1 所示。

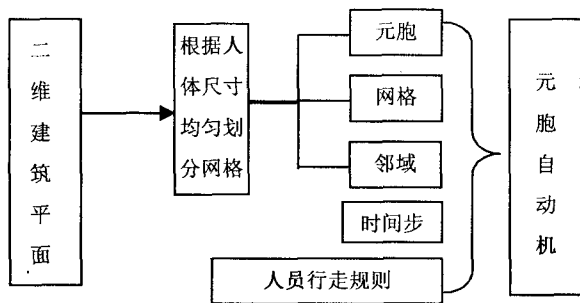


图 1 人员疏散的元胞自动机模型

1.2 基于距出口距离最近的元胞自动机模型

1.2.1 建筑几何平面与人体的建模

将所要考虑的二维建筑平面根据尺寸放入一个恰当的矩形平面(A)内,并将矩形平面按人体平均大小均匀划分为 $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$ 各个网格(元胞)。实际建筑平面的墙壁和障碍物等一般不可能刚好占据每个网格的大小,这时需将建筑平面近似模化处理,使得墙壁和障碍物等占据完整的特定网格。由此,每个网格都有确定的状态,网格要么为空,要么被人员占据,要么被墙壁或障碍物占据,三者必选其一。忽略次要因素,将

公共建筑平面内人员视为具有相同特征的个体,这样网格的三种可能状态可分别用数值“0”、“1”、“11”来表示。状态值为“11”的网格随疏散步时状态值固定不变,代表固定物;状态值为“0”或“1”的网格随疏散步时可能随时转换状态,代表人员的位置变更。按元胞行(i)、列(j)递增方向建立二维平面坐标系 $x-y$,则任一元胞 $A(i, j)$ 中心坐标 (x, y) 的计算式为:

$$x(i, j) = 0.4i - 0.2; y(i, j) = 0.4j - 0.2 \quad (1)$$

重大公共场所不仅各房间单元众多,而且中庭空间及过道面积大、出口多。为确定人员下步时的行走路线,可将二维建筑平面局部范围内人员行走路线基本一致的区域看作一个小单元(凸多边形区域)。例如,各个凸多边形房间可看成一个小单元,凹多边形房间可划分为多个凸多边形区域来处理。对每个小单元区域进行编号,确定每个小单元角点坐标,并建立一个矩阵来存放数据。第一列为各小单元序列号,每一行为各个小单元的角点坐标。以最多角点数的小单元为准,角点数小于最大角点数的补充该单元第一个角点坐标,以形成一个完整的周期以方便按顺序来计算夹角。最后两列为对应小单元的吸引点(局部吸引力)坐标。如果元胞与此单元各角点连线的夹角之和为 2π ,则此人位于此小单元内;如果夹角之和小于 2π ,则此人位于此单元外。两向量 a 与 b 间夹角 α 计算式为:

$$a \cdot b = |a| |b| \cos \alpha \quad (2)$$

每个小单元都设有一个吸引点,此吸引点在疏散路线上的下一个小单元内的适当位置。吸引点类似疏散指示点的作用,将人员引向正确的方向。

1.2.2 人与障碍物或墙壁间的排斥力

在人员疏散过程中,人们趋向于人员稀少、阻力小的活跃地区。另外,墙壁坚固,易形成死区,存在潜在的危险性。引入固定障碍物的排斥作用以体现这种无形的作用力,对靠近障碍物或墙壁某范围内引入行走概率 R , R 可视人员离障碍物或墙壁距离的不同而取不同的值,越远的地方 R 就越小。

1.2.3 人员行走算法

疏散开始时刻,假定疏散人员是理智的,都能识别出口,都能及时向最近出口方向疏散,即每个元胞的状态是并行变化的。当元胞紧贴前一个元胞时,要想进入前一个元胞需延缓步时。每个元胞状态的变化由其邻域状态和周围环境决定。文中取元胞自动机的 Moore 型邻域(见图 2),则元胞 $A(i, j)$ 只能以自身周围的八个领域方向或自身为下一时刻的目标网格。图 3 为 Von. Neumann 型邻域,只有四个方向可供选择,灵活性较小。假设与元胞 $A(i, j)$ 对应的吸引点坐标为 $O(x, y)$,用元胞中心坐标来计算元胞至吸引点的距

离,则可得 $A(i, j)$ 与 O 点的距离:

$$D(i, j) = \sqrt{(0.4i - x - 0.2)^2 + (0.4j - y - 0.2)^2} \quad (3)$$

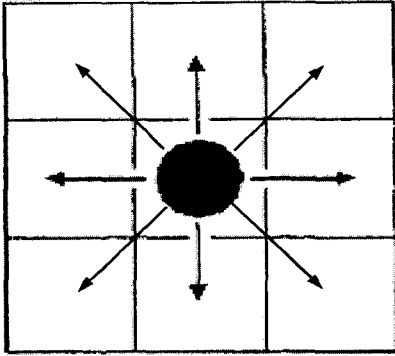


图 2 Moore 型邻域

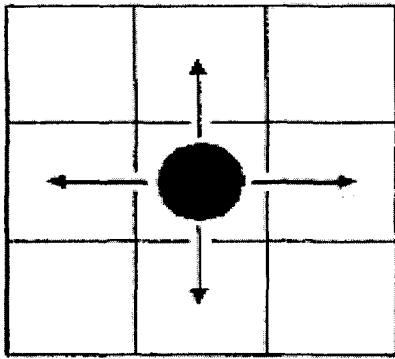


图 3 Von. Neumann 型邻域

$A(i, j)$ 的八个邻域与 O 点的距离分别为:

$$D(i-1, j) = \sqrt{(0.4i - x - 0.6)^2 + (0.4j - y - 0.2)^2} \quad (4)$$

$$D(i+1, j) = \sqrt{(0.4i - x + 0.2)^2 + (0.4j - y - 0.2)^2} \quad (5)$$

$$D(i, j-1) = \sqrt{(0.4i - x - 0.2)^2 + (0.4j - y - 0.6)^2} \quad (6)$$

$$D(i, j+1) = \sqrt{(0.4i - x - 0.2)^2 + (0.4j - y + 0.2)^2} \quad (7)$$

$$D(i-1, j-1) = \sqrt{(0.4i - x - 0.6)^2 + (0.4j - y - 0.6)^2} \quad (8)$$

$$D(i+1, j-1) = \sqrt{(0.4i - x + 0.2)^2 + (0.4j - y - 0.6)^2} \quad (9)$$

$$D(i-1, j+1) = \sqrt{(0.4i - x - 0.6)^2 + (0.4j - y + 0.2)^2} \quad (10)$$

$$D(i+1, j+1) = \sqrt{(0.4i - x + 0.2)^2 + (0.4j - y + 0.2)^2} \quad (11)$$

比较 $D(i-1, j)$ 、 $D(i+1, j)$ 、 $D(i, j-1)$ 、 $D(i, j+1)$ 、 $D(i-1, j-1)$ 、 $D(i+1, j-1)$ 、 $D(i-1, j+1)$ 、 $D(i+1, j+1)$ 与 $D(i, j)$ 的相对大小,由距离远近和网格状态决定下一步时目标网格。假如近距离目标网格不可选取,文中考虑以一定的概率(取 $R < 0.5$)绕行,以体现人员习惯于避开人员拥挤的区域行为特征。可能存在多个元胞竞争相同网格的情形,多个人同时竞争同一个空位目标网格时,将该空位网格的状态值按竞争人员数目进行累加。因此,该网格中将会出现状态值为“2”、“3”、“4”、“5”的情况,分别表示 2 个、3 个、4 个、5 个人竞争同一目标网格。利用随机概率对状态值为“2”、“3”、“4”、“5”的网格选取一个人员进入该空位网格,其它人员则退回原地。此时,完成了网格状态的一次更新,保存数据进入循环计算阶段,直到所有疏散人员全部离开出口为止。因此每时刻每步时所有人员都有确定的位置,可动态显示出来观察,以找出疏散过程中不合理之处。

2 计算结果及分析

以结构复杂的广州天河城第一层为例,其结构及分区划分共 146 个小单元区域。初始状态随机分布 896 人在各个房间、过道及中庭内未分布人员,假设只有东南西北四个大门为可用疏散通道,多次计算得平均疏散步时为 180 步,其中第 100 步时疏散图如图 4 所示。

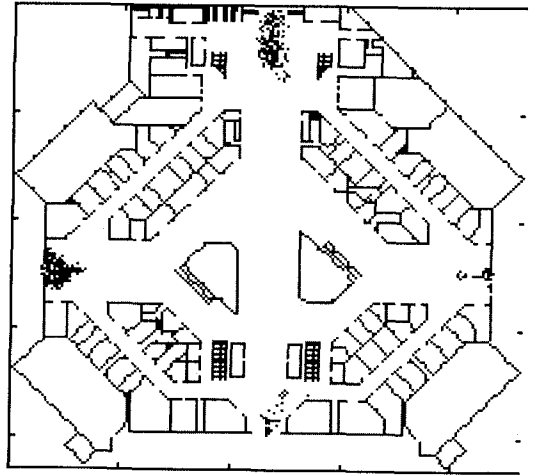


图 4 Moore 型邻域第 100 步时

由图 4 可知,如果人员对应出口分布不合理,在出口处人员过于集中易形成人员分布的仿锥形,出口处十分明显,此时由于人员间的恐慌、焦虑等容易引发相互践踏等严重后果。若其它条件相同,考虑元胞的 Von. Neumann 型邻域时,得到的平均疏散步时为 317 步时,相应的第 100 步时的疏散图如图 5 所示。

相比之下,可知考虑八方向行走的疏散效率远高于四方向行走。这主要是由其建筑内部结构决定的,天河城一楼各房间及过道相对于坐标系 $x-y$ 大部分

是成45度角斜向的,而人员在疏散过程一般走正对吸引点的直线,即 Moore 型邻域中的斜对角线。如只考虑 Von. Neumann 型邻域时,大部分人员将走“之”字型路线,路线长;另一方面,走斜对角线的速度是走其它方向速度的 $\sqrt{2}$ 倍;此外,四方向行走规则下,近距离往往走不通,人员绕行过多;而考虑八方向行走时,可选择近距离网格要多于四方向行走的,人员绕行的可能性较小。文中计算结果中后者比前者超出 $317 - 180 = 137$ 步时,两者疏散效率的高低是十分明显的。图6为两者待疏散人数随时间步的变化曲线,由图可知,疏散前期和后期人数随时间步的减少缓慢,这也说明了疏散前期与后期出口利用率低。

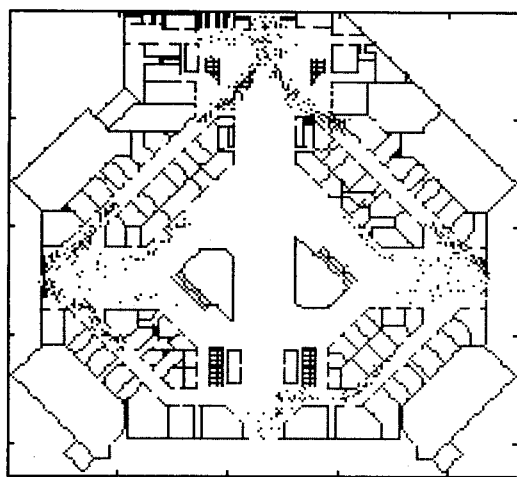


图5 Von. Neumann 型邻域第100步时

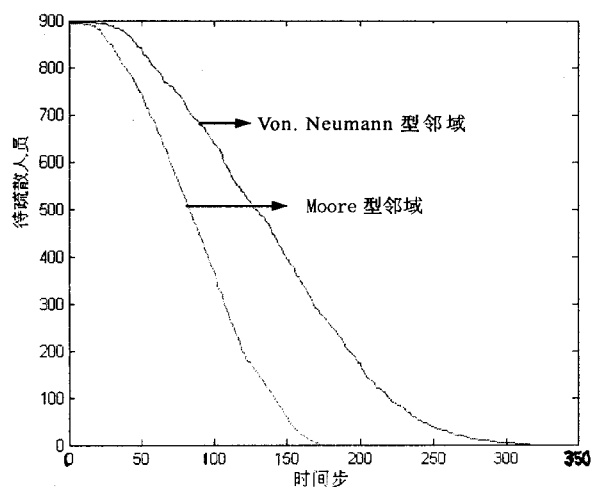


图6 待疏散人员与时间步的关系

3 结束语

将元胞自动机模型进行扩展,并引入社会力的作用,建立了基于出口距离最近的二维随机元胞自动机模型。以结构复杂的广州天河城第一层平面为例,利

用计算机对其人员安全疏散性能进行了仿真研究,得到的结论如下:

- 1)模型能动态演示人员疏散全过程,得到了各个时刻人员分布图和疏散步时。
- 2)如果出口承担的疏散人员过多,将出现“瓶颈”效应,人员聚集在门口成“仿锥形”,具有潜在的危险性。
- 3)在复杂的建筑平面中 Moore 型邻域比 Von. Neumann 型邻域更具灵活性、有效性。
- 4)各区域间的吸引力类似疏散指示灯的作用,能为疏散人群提供正确的方向。

参考文献:

- [1] 王旭东,韩 燮,姜岩峰.大型场馆人员疏散仿真预测的研究[J].计算机工程与设计,2009,30(2):455-459.
- [2] 崔喜红,李 强,陈 晋,等.基于多智能体技术的公共场所人员疏散模型研究[J].系统仿真学报,2008,20(4):1006-1010.
- [3] 宋卫国,张 俊,胥 旋,等.一种考虑人数分布特性的人员疏散格子气模型[J].自然科学进展,2008,18(5):552-558.
- [4] 孟俊仙,周淑秋,饶 敏.基于元胞自动机的人员疏散仿真研究[J].计算机工程与设计,2009,30(1):241-246.
- [5] 曾 胜,马晓茜,廖艳芬.城市地下商业建筑中人员疏散模型的研究[J].建筑科学,2008,4(5):27-32.
- [6] 李 强,崔喜红,陈 晋.大型公共场所人员疏散过程及引导作用研究[J].自然灾害学报,2006,15(4):92-99.
- [7] 吕春杉,翁文国,杨 锐,等.基于运动模式和元胞自动机的火灾下环境下人员疏散模型[J].清华大学学报:自然科学版,2007,47(12):2163-2167.
- [8] 杨立中,方伟峰,黄 锐,等.基于元胞自动机的火灾中人员逃生的模型[J].科学通报,2002,47(12):896-901.
- [9] 王佳佳,李 青,周美莲.基于元胞自动机的股票市场价格行为的研究[J].计算机技术与发展,2008,18(9):187-190.
- [10] 郭占军,秦文虎,舒 鑫.紧急状态下虚拟人群行为仿真[J].计算机技术与发展,2009,19(6):47-50.
- [11] 孙 强,戴志军.用元胞自动机求最短路径的一种新算法[J].计算机技术与发展,2009,19(2):42-45.
- [12] 赵姝颖,宿国军,贺 云,等.基于元胞自动机的应急疏散系统仿真研究[J].小型微型计算机系统,2007,28(12):2220-2224.
- [13] 陶 平,张小英.中庭式建筑紧急情况下人员安全疏散性能研究[J].中国安全科学学报,2009,19(6):41-46.
- [14] 范维澄,孙金华,陆守香.火灾风险评估方法学[M].北京:科学出版社,2004:322-331.