

基于元胞自动机和模糊理论的人群疏散仿真

崔晓松,李文举,冯宇,吴贝贝,周峰

(辽宁师范大学 计算机与信息技术学院,辽宁 大连 116081)

摘要: 基于元胞自动机和模糊理论建立了人群疏散模型,对教学楼内的人群疏散过程进行了模拟。该模型根据人员对建筑物的熟悉程度、周围人员的吸引力设计元胞行为准则,并且采用模糊隶属度定义人员的体能状态及人员对环境的熟悉程度。实验结果表明,该仿真模型能够较好地模拟紧急状况下的人群疏散过程。

关键词: 人群疏散;疏散仿真;元胞自动机;模糊理论

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)12-0074-03

Crowd evacuation simulation based on cellular automata and fuzzy theory

Cui Xiaosong, Li Wenju, Feng Yu, Wu Beibei, Zhou Feng

(School of Computer & Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116081, China)

Abstract: This paper proposes a crowd evacuation simulation model based on cellular automata and fuzzy theory, and then crowd evacuation process from a teaching building is simulated. The cellular automata is designed according to people's familiarity grade about the building and the attraction between people. And fuzzy membership is adopted to define people's physical state and their familiarity grade for the building. The experimental results show that the evacuation simulation model can simulate the emergency evacuation process in buildings correctly.

Key words: crowd evacuation; evacuation simulation; cellular automata; fuzzy theory

伴随着我国城市化进程不断加快,高层建筑已经越来越普及。而高层建筑具有火势蔓延快,垂直距离长,疏散、扑救困难等特点,所以一旦发生火灾,极易造成巨大的财产损失和大量的人员伤亡,所引发的巨大安全隐患也引起了人们的普遍关注。近年来,如何有效地预防和减少火灾及其他突发事件造成的人员伤亡,尤其是群死群伤事故,已成为国内外公共安全工作的重心。

人员疏散作为紧急情况下降低人员伤亡的重要措施之一,日益得到了国内外学者关注,其研究内容也在不断拓展和深化。人员疏散研究的目的是寻找一种良好的疏散预案,给实际中发生的突发状况提供指导性和前瞻性意见,以减少人员伤亡。

疏散模型则是疏散研究中的主要工具,通过疏散模型能够预测人员走出建筑的疏散时间和模拟人员疏散时的行走过程,以便寻找实际疏散时所需的最优路径等。将这些模型有机应用到疏散设计中,能够模拟出火灾场景中人员所面临的情景。

国内外的研究学者从研究方法上对人员疏散进行

了划分:宏观模型和微观模型。

宏观模型理论最早由 Henderson 提出,他认为人群行为的运动类似于液体的流动,行人行为的气态动力学方程与 Boltzmann 方程相似,不过它考虑了行人之间的相互影响和行人的目的。宏观模型的不足之处在于没有考虑人员之间的相互作用,因而在紧急情况下其不能如实反映人流运动轨迹。

微观模型可以对行人流的具体行为进行描述,能够更加真实、准确、动态地模拟人员疏散的整个流程,近年来引起了科学界的广泛关注。微观模型的研究方法主要有连续型和离散型两种。经典的代表性模型为社会力模型、磁场力模型和元胞自动机模型。

元胞自动机 CA(Cellular Automaton)模型就是其中一种模拟离散过程的模型,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。在人员行为的模拟中,元胞自动机模型的离散性、简单性、灵活性、非线性特征在模拟方面显示了强大的优越性,近年来得到了广泛的研究与应用。

技术与方法 Technique and Method

模糊数学理论近年来广泛应用于计算机仿真领域。模糊数学提供了一种处理不精确性问题的新方法,是描述人脑思维处理模糊信息的有力工具。

本文根据元胞自动机理论,重新对以往的一些概念进行合理的整合,并且结合模糊集的概念描述模型中的不确定因素,建立了一种二维元胞自动机模型,对教学楼内发生火灾时人员疏散过程进行了计算机模拟。

1 模型的分析与建立

1.1 元胞自动机

元胞自动机模型(CA)是通过模拟大量简单的个体运动来复制系统的复杂行为模式的数学模型。人员疏散的元胞自动机模型是二维CA模型,其原理是将疏散区域离散成微小被元胞占据的平面,每个元胞分别可以代表建筑物内的空地、物品、需要疏散的人员等,所有元胞必须按照已制定的CA规则同时运动(人员移动可以看成是一个元胞到另一个元胞的移动)从而模拟出人员的疏散行为。

1.2 模糊隶属度函数

若对论域 U 中的任一元素 x ,都有一个数 $A(x) \in [0, 1]$ 与之对应,则称 A 为 U 上的模糊集, $A(x)$ 称为 x 对 A 的隶属度。当 x 在 U 中变动时, $A(x)$ 就是一个函数,称为 A 的隶属函数。隶属度 $A(x)$ 越接近于1,表示 x 属于 A 的程度越高; $A(x)$ 越接近于0,表示 x 属于 A 的程度越低。用取值于区间 $[0, 1]$ 的隶属函数 $A(x)$ 表征 x 属于 A 的程度。

1.3 模型设定

根据元胞自动机原理,本文模型的基本框架是将发生火灾的疏散区域设定为一个二维平面,将该二维平面均匀地划分为精细网格,每一个网格代表一个元胞,所有元胞组成元胞空间。

每一个元胞可以存在以下几种状态:

- (1)被建筑物或者障碍物占据;
- (2)被人员占据;
- (3)空。

为了描述火灾的蔓延情况,设定某一个元胞的烟雾浓度达到将对人体产生危害的时候,取消该元胞作为候选元胞的资格。

走廊和房间的疏散情况具有各自的特点,为了更好地描述人员疏散过程,本模型将走廊和房间分别作为两个元胞自动机考虑。

1.3.1 疏散空间

参考密集人流中典型的人员空间分配,每个元胞对应为 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的空间,人员疏散的速度 1.3 m/s 。

1.3.2 人员模型

(1)模型中采用 Von Neumann 型邻域确定人员可能的运动方向,如图1所示,即人员只能向前、后、左、右4个方向运动。

(2)当模型中出现多个人员竞争同一个候选元胞时,则需要冲突检测。引入个人竞争能力 C 来解决冲突问题:

$$C = \frac{H+P}{D} \quad (1)$$

其中, H 代表人员对环境的熟悉程度, P 代表人员的身体体能状态, D 为当前元胞与前后左右候选元胞的距离, $D=2R$ (R 为元胞半径)。

竞争能力只与环境熟悉程度和体能状态有关。把环境熟悉程度分为不了解、了解、熟悉三种情况。体能状态分为弱、中、好。它们之间的模糊规则如表1所示。

表1 模糊规则表

个人竞争能力	环境熟悉程度		
	不了解	了解	熟悉
弱	弱	弱	一般
中	一般	一般	强
好	一般	强	强

1.4 模糊隶属函数的确定

根据实际情况选取高斯隶属函数分别如下。

(1)环境熟悉程度的隶属函数

$$f(x) = \begin{cases} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{15}\right)^2\right] & \text{不熟悉} \\ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-20}{15}\right)^2\right] & \text{一般} \\ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-30}{15}\right)^2\right] & \text{熟悉} \end{cases} \quad (2)$$

(2)人员体能状态的隶属函数

$$g(x) = \begin{cases} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{20}\right)^2\right] & \text{短} \\ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-30}{10}\right)^2\right] & \text{中} \\ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-60}{20}\right)^2\right] & \text{长} \end{cases} \quad (3)$$

1.5 人员疏散基本行为准则

首先采用下面的公式来确定人员疏散路线的选择:

$$P_{ij} = N \exp(K_S S_{ij}) \exp(K_F F_{ij}) \exp(K_R R_{ij}) (1 - n_{ij}) \quad (4)$$

式中, P_{ij} 表示人员向候选元胞 (i, j) 运动的概率; n_{ij} 表示候选元胞 (i, j) 在 t 时刻的人数, $n_{ij}=1$ 表示该元胞目前被占用。这样在寻找到当前元胞的所有候选元胞后,利用上面的公式计算各候选元胞的概率值,选取具有概率最大值的元胞作为当前元胞的移动方向。

在上面公式中,引入参数,使得:

$$N = \left[\sum_{(i,j)} \exp(K_S S_{ij}) \exp(K_F F_{ij}) \exp(K_R R_{ij}) (1 - n_{ij}) \right]^{-1} \quad (5)$$

式中, S_{ij} 和 K_S 表示元胞 (i, j) 网格位置吸引因子及其影响系数, F_{ij} 和 K_F 表示元胞 (i, j) 上由火灾场景引发的排

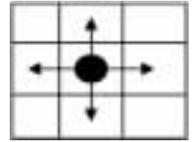


图1 模型中人员可能的运动方向

技术与方法 Technique and Method

斥力和影响系数, R_{ij} 和 K_F 表示元胞 (i, j) 处的周围人员运动方向产生的吸引因子及其影响系数, 其中, $K_S, K_F \geq 0$ 且 $K_F \leq 0$ 。

下面对这些因素进行具体描述。

位置吸引因子 S_{ij} :

$$S_{ij} = \max_{i,j} \{ \sqrt{(te_k - i)^2 + (je_k - j)^2} \} - \min_{ie_k, je_k} \{ \sqrt{(te_k - i)^2 + (je_k - j)^2} \} \quad (6)$$

式中 (ie_k, je_k) 表示各出口的坐标值, 等式右边第 2 项是指建筑物中元胞 (i, j) 到各出口的最小值, 等式右边第 1 项是指所有元胞到各出口的最大值。这样使得距离疏散出口越近的网格, 其位置吸引因子越大, 反之距离疏散出口越远, 其位置吸引力越小。

运动方向吸引因子 R_{ij} :

$$R_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_{k=1}^m N_k} \quad (7)$$

式中, N_{ij} 表示截止到当前时刻有多少人经过候选元胞中位置为 (i, j) 的元胞, m 表示候选元胞数量, $\sum_{k=1}^m N_k$ 表示截止到当前时刻该人员的所有候选元胞所经过的人数之和。这样就使得元胞空间经过的人越多, 则运动方向吸引因子越大。

火灾场景排斥力 F_{ij} :

$$F_{ij} = \begin{cases} 0 & (i, j \notin fire) \\ F_{i-1(j), j} \times S_i & (i, j \in fire) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $fire$ 表示当前火场区域, 如果该网格不在火场区域, 则排斥力为 0; 如果该网格处于火场之内, 则其排斥力与上一时刻的排斥力有关。

2 简易计算流程

简易计算流程如图 2 所示。

3 仿真结果

用计算机模拟人员疏散整个过程。在模拟中, 教室长度为 10 m, 宽度为 8 m; 走廊长度为 33 m, 宽度为 2 m; 楼梯长度为 18 m, 宽度为 3 m。可以通过仿真界面输入需要疏散的人数、起火位置以及可利用的逃生时间, 其中疏散人数最多不超过 600 人, 每个时间步单位 50 ms。

以 100 人为例, 设着火点在楼层中间。仿真结果统计数据如表 2 所示。

从仿真结果得知, 由于初始状态人员分布均匀、空位多, 大部分人都可以找到自己目标区域。随着人流不

表 2 疏散人数对照表

时间步长/50 ms	教室	走廊(双出口)
0	200	200
5	127	181
10	98	147
15	57	115
20	46	81
25	35	66
30	13	51
34	疏散完毕	40
36		27
40		11
49		0

断向出口方向前进, 人流的形式逐渐形成仿锥形。这就是出口吸引力作用的结果。此模型充分体现了出口最近原则的特点。

通过利用出口宽度、出口位置以及走廊宽度等因素, 得到了速度与流量和时间 t 的关系:

$$\text{平均速度公式: } \langle v \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i(t) \quad (9)$$

$$\text{平均流量公式: } \langle J \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n v_i(t) \quad (10)$$

通过公式可知, 疏散的初始阶段, 由于走廊人数较少, 行人运动较快, 平均速度较大。随着房间内的人员走入走廊, 走廊的人数增多, 速度减缓。当到达人数峰值时, 平均速度到达最低值, 这是因为走廊人数激增, 导致走廊出现阻塞现象。随着人员不断逃离火场, 走廊内的人数又开始不断减少, 阻塞现象逐渐消失, 平均速度又开始逐渐增大, 直到人员全部疏散完毕, 整个疏散过程完成。

基于出口最近原则并利用元胞自动机理论模拟了人员疏散的过程。利用该模型模拟了北甸小学教学楼发生火灾的疏散过程, 达到了预期的仿真效果。但是本模型所考虑的条件是井然有序的理想疏散条件, 所以疏散所用时间应乘以 1.3 左右的修正因子。如何更加真实地模拟真实灾难现场, 寻求更正确的疏散方法, 仍需进一步研究。

参考文献

- [1] 周淑秋, 孟俊仙, 刘真. 大型建筑物人员疏散仿真系统及实现[J]. 计算机仿真, 2009, 26(6):191-194.
- [2] 李英辉, 张倩, 李永刚. 某大型商业建筑火灾危险性评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(2):118-1920.
- [3] 陶平, 张小英, 马恒亮. 基于元胞自动机模型的人员疏散仿真研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(10):319-322.
- [4] 赵道亮, 刘英学. 人员疏散的二维元胞自动机随机模型研究[J]. 安全与环境学报, 2009, 9(5):179-181.
- [5] 章志刚, 李青. 基于元胞自动机的人员疏散过程研究[J].

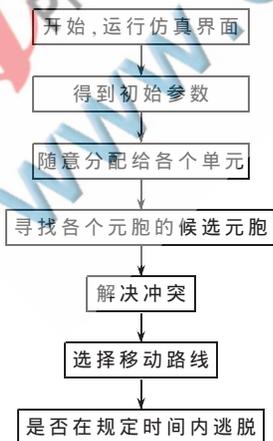


图 2 计算流程图

- 计算机工程与设计, 2009, 30(8):1991-1993.
- [6] 刘真余, 芮小平, 董承玮, 等. 元胞自动机地铁人员疏散模型仿真[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(27):203-205.
- [7] 陈曦. 人员疏散速度模型综述[J]. 安防科技. 2010, 3, 46-48.
- [8] 周金旺, 陈秀丽, 孔令江, 等. 基于元胞自动机的行人流疏散模拟研究[J]. 广西师范大学学报, 2008, 26(4):14-17.
- [9] 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):241-243.
- [10] 薛鹏, 周金旺, 白克钊, 等. 多房间中人员在走廊疏散的元胞自动机模拟研究[J]. 广东师范大学学报, 2009, 27(3):1-4.
- [11] 张海卿, 闫明仁. 安全疏散中人的行为及模糊综合评价[J]. 消防科学与技术, 2010, 29(3):252-254.
- [12] 李琳, 程远平, 吴蕾, 等. 高校学生宿舍消防安全疏散[J]. 消防科学与技术, 2010, 2(29):122-125.
- [13] 王林. 高层建筑火灾中人员疏散研究[J]. 现代商贸工业, 2009, 3:275-276.
- [14] 黄伟, 董力. 高层建筑人员疏散问题的分析与对策[J]. 科协论坛, 2009, 12:125-126.
- [15] 陈锦昌, 詹伟杰, 姜立军. 基于 2.5 维元胞自动机的人群疏散模型[J]. 工程图学学报, 2009, 30(5):242-246.

(收稿日期: 2011-01-19)

作者简介:

崔晓松, 女, 1973年生, 讲师, 硕士, 主要研究方向: 计算机仿真、图像处理。

李文举, 男, 1964年生, 教授, 博士, 主要研究方向: 图像处理与模式识别、计算机仿真。

冯宇, 女, 1986年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像处理与模式识别、计算机仿真。

