

基于元胞自动机的多自主体人员行为模型 及其在性能化设计中的应用

方伟峰, 杨立中, 黄锐

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

[摘要] 目前性能化设计规范一个最主要的特点是从强调财产保护转变到强调生命安全保护, 因此对建筑物内人员行为特征和运动规律的研究正越来越受到人们的重视。元胞自动机模型在交通流研究中的应用已经开展多年并取得了很多有用的成果, 但涉及人的行为特征的研究往往十分复杂, 在这方面利用自主体来研究具有较大的优势。给出的模型结合了这两方面各自的优势, 是在元胞自动机交通流、行人流基本框架上建立起的多自主体人员行为模型, 它对评估建筑物的设计方案具有很好的参考作用。

[关键词] 元胞自动机模型; 多自主体; 人员行为; 性能化设计

[中图分类号] TU20 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)03-0067-05

近20年来, 建立以建筑物内消防安全为目标的性能化规范和法规已成为全球的发展趋势, 其作为代替传统的“处方式”规范模式已经越来越受各国的重视。自1985年英国发布了第一部性能化的建筑规范之后, 日本、澳大利亚、美国、加拿大、新西兰以及北欧等发达国家政府相继投入大量研究经费, 积极开展了消防安全工程学和性能化安全设计方法理论及技术的研究, 取得了一批具有实用价值的研究成果。在我国这方面的研究工作还刚刚起步。目前性能化设计规范一个最主要的特点是从强调财产保护转变到强调生命安全保护。而建筑物的设计人员往往面对这样的问题: 如何评价已经存在或者设计中的建筑物对人员行为的影响以及发生火灾之后建筑物结构对人员疏散效率的影响。其中一个很重要的方法就是通过建立描述人员运动过程细节的模型来研究建筑物参数对人员行为的影响。笔者介绍的基于元胞自动机的多自主体人员行为模型就是以人员个体为研究单位, 利用自主体来模拟具有基本智能的人员, 通过制定简单的局部行为规则来描述建筑物内人员的整体复杂行为, 可以为评价建筑物设计性能提供参考。

元胞自动机作为对复杂行为的一种有效的模拟手段目前在交通流模型中的应用正备受人们的关注^[1~6]。但是同车辆运动不同, 人的运动更具有主观性和随机性。因此, 单依靠元胞自动机模型来模拟行人运动存在一定的难度, 而利用自主体技术则可以实现较好的模拟。

1 元胞自动机介绍

元胞自动机是在均匀一致的网格上由有限状态的元胞构成的离散的动力系统^[7]。其特点是空间、时间和状态都离散。其运行规则主要有: 所有元胞的状态是同时发生变化的; 并且在 $t+1$ 时刻, 第 i 个元胞的状态由时刻 t 的第 i 个元胞以及相邻的有限个元胞的状态共同决定。图1给出了Von Neumann和Moore两种邻域的定义。

元胞自动机在流体力学中最重要的应用包括交通流模型和行人流模型。在交通流模型中比较经典的要数德国学者Nagel和Schreckenberg于1992年提出的N-S一维交通流模型^[1], 二维行人流的模拟则较为复杂。较为重要的有Victor J. Blue和Jeffrey L. Adler提出的双向行人流模型^[8]。而在建

[收稿日期] 2002-07-31; **[修回日期]** 2002-11-05

[作者简介] 国家自然科学基金资助项目(50006012, 50276058); 国家重点基础研究专项经费资助项目(2001CB409600)

[作者简介] 方伟峰(1977-), 男, 福建莆田市人, 中国科技大学硕士研究生

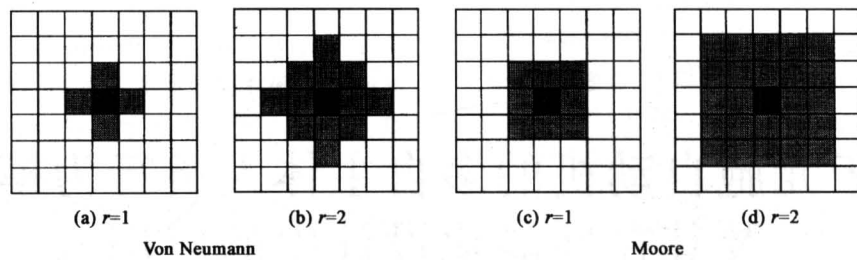


图1 元胞自动机邻域的定义

Fig.1 Definition of neighborhood

建筑物中人员的运动则更为复杂一些,如在购物中心,人们的运动更多的是散漫的,并容易受周围环境的影响,如遇到喜欢的东西会停下来等,至于发生火灾或其他突发事件之后的人员运动则更是以寻找安全出口离开建筑物为主要目的。在这方面参考文献[9]引入的“危险度”等级的概念基本上解决了人们运动路线的选择问题,即该疏散模型中所有的规则都是以“人员将希望以最快速度到达最安全的位置”为基本原则而建立的。

虽然这些模型都较成功地解决了各自领域内的基本问题,但应该看到特别是在行人运动和疏散模型中元胞的智能性还比较欠缺。元胞自动机模型的一个重要优点是局部规则简单,然而现实生活中涉及到人的行为的运动往往是比较复杂的。例如,在行人运动和疏散中常常存在不清楚目的地和出口的情况,这时应如何来描述行人探索、记忆以及根据周围情况作出合理的行为选择等等。在这方面就有必要借助于自主体的一些特性来模拟人的智能。

2 自主体的介绍

对自主体(agent)定义有很多种,其中的一个定义如下:自主体是存在于一些复杂动态环境下的计算系统,它们可以自主的感知周围环境并作出相应的行动以完成一系列给定的任务或实现一定的目标^[10]。通常,自主体是指一个基于硬件或软件(在更多情况下)的计算机系统并且具有以下的一些特性:自主性、社会能力、反应性、能动性^[11]。在一些特定的应用中,除了以上这些特性之外,我们还可以赋予自主体一些人类所具有的特性,如知识、动机、义务甚至感情。多自主体模拟的研究根据各自主体之间的关系可以分成以下几种:合作型自主体系统(即一群自主体共同的为一个公共目标而工作)、非合作型自主体系统(指一

群有各自利益追求的自主体在一个公共的环境中相互作用的系统)^[12]。对于行人运动的多自主体系统,可以认为是属于非对抗非合作型系统;而对于紧急情况下的人员疏散过程,可以看作是具有一定合作性的系统,但这种合作往往是较为松散的。

3 模型

笔者之所以提出基于元胞自动机的多自主体行为模型主要是因为:一方面,元胞自动机模型在研究交通流和行人流问题上已经比较成熟,发展出了很多有用的模型和相应的理论分析;另一方面,自主体在处理人工智能问题上比元胞自动机更加灵活,方便。所以作者的模型思路是以元胞自动机交通流、行人流模型的规则为基础,引入自主体以实现模型的智能化,增强模型的真实性和实用性。

3.1 模型描述

模型的基本框架仍然是将建筑物平面进行均匀的网格划分,行人的运动将遵循一定的局部规则。这里的行人用自主体表示,他们的行为会因为周围环境的变化作出相应的调整。他们可以有一定的兴趣,如遇到喜欢的橱窗会停下来;也可以有一定的感情,如熟人之间会聚集在一起;也可以有一定的目标,如发生火灾或其他意外会寻求逃生出口,等等。

模型中每个元胞对应 $0.40 \times 0.40 \text{ m}^2$ 的空间,是密集人流中典型的人员空间分配^[13]。另据观察发现,人在正常情况下行走速度为 1.0 m/s 左右,而紧张情况下可达 1.5 m/s 左右^[14]。因为模型中所有人员是并行变更位置的,这样就引入了反应时间问题,如果规定每个时间步每个人只能移动一格,则在紧急情况下每个时间步为 $0.40/1.5 \approx 0.27 \text{ s}$ 。

行人运动和疏散模型中需要解决的一个重要问

题就是人员行动路线的选择，引入自主体将有助于使这种选择更加智能和合理。因为在实际的人群运动中人员具有很强的自主能力，他们会根据自身周围的环境作出相应的判断和决策。而生活习惯、心理和生理上的差异会导致人员的行为也存在较大差异，所以在模拟中一般只要抓住其主要特征就可以了。在模型中自主体的主要行为就是根据它所感知到的周围环境对下一步的行动路线作出合理的选择。这里每个自主体只能感知到一定范围内的情况，即存在一定的视野。在模型中我们选择了 Von Neumann 型邻域作为每个自主体的视野，每个自主体当前的行为完全由其视野内的环境决定。这种规定的合理性还在于：通常人员在建筑物内运动过程中更多是根据建筑物的局部结构特征而非地理方向来作出判断的。此外在模型中还认为人员总是希望能在最短时间内到达目的地，这在现实中也具有普遍意义的，因为人员在紧急疏散过程中总是希望以最快速度离开建筑物。另外，人员在运动时总是尽量避开拥挤的地方，但通常会与选择最短路径产生矛盾，这时自主体应该能够对这两者进行权衡以便作出合理的选择。在模型中我们采用了一个简单的假设，即如果自主体经过初步判断认为某一格点将同时有超过 2 个人（包括他自己）竞争时，则会以一定的概率放弃竞争而选择其他次优格点。除此之外，我们还可以对自主体的行为作其他的规定，例如人员在迷失位置时会以多大概率跟随人群运动或者是沿着墙壁摸索前进；自主体可以通过交流信息将最新的情况传达给其他自主体等等。图 2 给出了单个自主体的结构及其在该模型中的功能图。

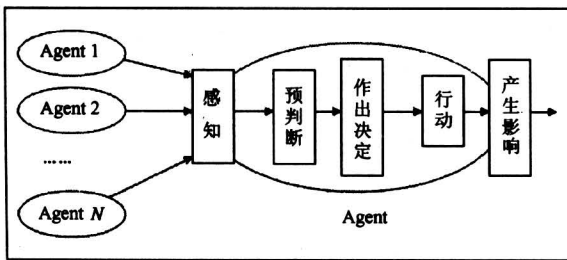


图 2 单个自主体结构及其功能图

Fig.2 Architecture of an agent and its function in model

模型的局部的运动规则在每个时间步有 2 个基本问题需要解决，包括路线的选择和当多于 1 人同时竞争 1 个空格点时产生的冲突。一般说局部的路

线选择和各自主体的目的和兴趣相关。这里将赋予每个自主体一张吸引力等级图，它是每个元胞的对各自主体的吸引力强度分布图。例如在正常情况下超市中的货柜对顾客的吸引力是较大的，所以在吸引力等级图上货柜附近的等级是较高的，而在紧急疏散的情况下，出口处对人们的吸引力是最大的。在模拟过程中，假设所有自主体选择周围某一元胞作为运动方向的概率同该元胞的吸引力值成正比。需要指出的是每个自主体的元胞吸引力等级图随着时间的变化可以由自主体对其进行相应的修改，例如当人们发现新的感兴趣的东西时，该位置的元胞吸引力便随着增大。通过以上这些合理的设定就可以使路线的选择变得较为简便。

此外，现有的很多模型在模拟复杂建筑结构的人员运动或疏散时往往难度很大。作者的模型从人工生命的角度出发，将整个模拟过程分为熟悉阶段和疏散阶段。熟悉阶段指人们在正常情况下在建筑物内的运动过程，由于人是有记忆能力的，所以该过程也是人们对建筑物的熟悉过程。当然不同的人运动的路线可能不同，对建筑物的熟悉程度也会不同，这样模型就能够比较真实地反映实际过程中的情况。在熟悉结构的过程中，每个自主体根据已有的知识对所处元胞的吸引力或危险度等级的进行修改。这样一般熟悉阶段的时间越长，自主体对建筑物的结构就越了解，在疏散阶段中的路线选择也会更加合理。疏散阶段是指在紧急疏散的情况下建筑物内人员的运动过程。这时候人们将根据自己对建筑物结构的熟悉程度选择他认为最优的路线进行疏散。模拟结果表示，通过这样的处理该模型可以模拟任何复杂结构建筑物内的人员运动和疏散过程。

这样模拟时，在每一个时间步，所有自主体按以下规则进行同步更新：

1) 所有自主体将根据其视野内的所有元胞的状态和前面给出的规则作出判断并在其周围 4 个相邻的元胞中选择 1 个空的对它吸引力最强的元胞作为下一时间步的目标格点；

2) 由于模型假设在每一时间步 1 个格点最多只能由 1 个自主体占领。这样如果存在有多个自主体竞争同一个格点，即发生冲突时，只能有 1 个自主体留下，其他的将回到原来格点，并且在通常情况下每个自主体的机会是均等的；此外，如果某一格点已被障碍物占据，如桌椅或墙壁等，则自主体不能进入该格点；

3) 随机慢化, 即对于要移动的自主体, 以某一给定的概率留在原位, 这一步主要是用来模拟现实生活中出现的一些意外情况如遇到熟人或者喜欢的东西等等;

4) 处在新位置上的自主体根据已有的元胞吸引力等级图对新位置元胞的吸引力进行重新评价, 并确定其吸引力值。

3.2 模型算例

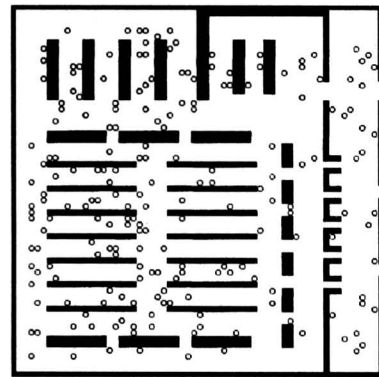
下面利用该模型作一个简单的模拟, 根据模拟的场景——一个小型超市得出示意图。模拟开始时, 将所有 200 个人员 (自主体) 从超市的各个进口引入, 随后这些人员将作随机运动以熟悉超市的结构。在某一时刻, 假设超市发生火灾或其他意外事件必须紧急疏散, 这时所有的自主体都可以按自己熟悉的路线进行疏散。模拟中假设自主体视野为 $r=3$ 的 Von Neumann 型的邻域, 由于人员在疏散过程中都将尽可能以最快的速度前进, 随机慢化通常发生在亲朋之间互相帮助的情况下。根据经验, 随机慢化概率取 0.05。

图 3 给出了疏散刚开始时和 60 个时间步之后建筑物内人员分布情况。熟悉阶段的总时间步为 10 000 步, 并且在熟悉阶段人们总是更偏向于往未走过的地方运动。模拟过程中发现在这种情况下熟悉过程结束时, 人们对房间结构的熟悉度是较高的。从图 3 可以看出该模型能够方便地模拟复杂结构建筑物内人员的疏散情况。

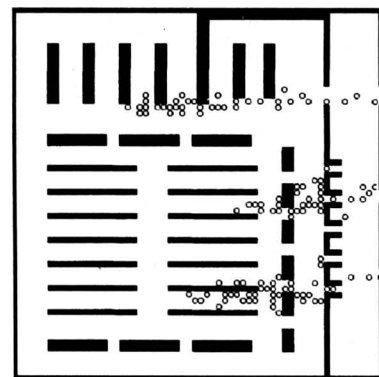
还可以通过对疏散过程的可视化演示来评估建筑物的设计以及内部布局结构的合理性。通过图 3 人员在疏散过程的分布情况, 可以找出影响疏散效率的瓶颈。由于人群特别拥挤的地方往往容易造成人员的伤亡, 所以我们在设计建筑物结构时应尽量避免这种情况的出现。此外, 通过对建筑物内部结构的调整可以对各个设计方案进行对比以选出最合理的方案。在现实生活中往往很难做到通过实验来比较不同方案的优劣, 但通过模拟的模型我们可以很容易做到这一点。

4 讨论

结合元胞自动机在交通流和行人流中的成熟应用经验以及自主体在模拟人的行为方面的优点, 建立了一个基于元胞自动机框架和基本规则的自主体人员运动模型。利用该模型的可视化动态演示, 我们可以对建筑物设计以及内部布局结构的合理性进



(a) $t=0$



(b) $t=60(\text{time-step})$

图 3 对超市疏散过程的模拟

Fig.3 Simulation of occupant evacuating from a supermarket

行评估, 并可以比较不同设计方案的优缺点, 为建筑物的性能化设计提供有用的参考。此外, 该模型的扩展性较好, 我们可以期望它将有更广泛的应用前景。其一, 我们需要收集更多的人的行为资料包括人在遇到各种突发事件的反应数据等并将其应用到模型中, 使自主体的行为更接近于人类的行为; 其二, 需要研究如何使自主体具有更多的人类特性, 包括感情、兴趣等等, 这样就可以模拟更加丰富的真实事件; 其三, 由于火灾引起的有毒烟气会对建筑物内的人员产生影响, 所以需要研究这些影响造成的后果, 如速度减慢和视野受限等对疏散结果的影响, 这些都是今后的工作目标。

参考文献

- [1] Kai N, Michael S. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. J Phys I, 1992, 2(12): 2221 ~

- 2229
- [2] Fukui M, Ishibashi Y. Traffic flow in 1D cellular automaton model including cars moving with high speed [J]. J Phys Soc Jpn, 1996, 65(6): 1868~1870
- [3] Rickert M, Nagel K, Schreckenberg M, et al. Two-lane traffic simulations using cellular automata [J]. Physica A, 1996, 231(4): 534~550
- [4] Simon P M, Gutowitz H A. Cellular automaton model for bi-directional traffic[J]. Physical Review E, 1998, 57(2): 2441~2444
- [5] Biham O, Middleton A A, Levine D. Self-organization and dynamical transition in traffic-flow models [J]. Physical Review A, 1992, 46(10): 6124~6127
- [6] Chowdhury A D, Schadschneider A. Self-organization of traffic jams in cities: effects of stochastic dynamics and signal periods [J]. Physical Review E: Rapid Communications (AIP, USA), 1999, 59(2): 1311~1314
- [7] 谢惠民. 复杂性与动力系统[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 1994
- [8] Blue V J, Adler J L. Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways [J]. Forthcoming in Transportation Research B-METH, 2001, 35(3): 293~312
- [9] Yang Lizhong, Fang Weifeng et al. Study on occupant evacuation in fire based on cellular automata model[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47 (17):1484~1488
- [10] Maes P. Agents that reduce work and information overload[J]. Communications of the ACM, 1994, 37 (7): 31~40
- [11] Wooldridge M J, Jennings N R. Intelligent agents: theory and practice [J]. Knowledge Engineering Review. 1995, 10(2): 115~152
- [12] Sandip S. Multiagent systems: milestones and new horizons[J]. Trends in Cognitive Sciences. 1997, 1 (9): 334~340
- [13] Burstedde C, Klauck K, Schadschneider A et al. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton[J]. Physica A, 2001, 295(3-4): 507~525
- [14] Helbing D, Farkas L and Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. Nature, 2000, 407(28): 487~490

A Multi-agent Model Based on Cellular Automata for Simulating Human Behavior to Assess Building Design Performance

Fang Weifeng, Yang Lizhong, Huang Rui

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

[Abstract] In recent years, Cellular Automata (CA) micro-simulation has emerged as an effective technique for modeling traffic flow and achieved a lot of success. But the human movement and occupant evacuation are much more complex than traffic flow. It is necessary for us to consider more human behavior characteristics if try to apply the model in practice. For the advantages of agent in simulating human intelligence, a multi-agent model based on CA is presented which focuses on simulating the human behavior and the effect on human by building structure. In the model, people are represented by agents and they move over the network which is represented by a lattice of cells. Agents can perceive the local environment and choose their moving direction autonomously. In order to simulate human movement in very complex structure building the acquainting and evacuating states based on the ideas of artificial life are introduced and that is proved successful in simulation. Using this model the effect of the building structure on human behavior can be studied and the performance of building design can be assessed.

[Key words] Cellular automata model; multi-agent; human behavior; performance-based design