

1-8-2019

Cell-DEVS Social Interaction Modeling and Simulation for Emergency Evacuation Systems

Yanhong Wang

1.School of Economy & Management, Tongji University, Shanghai 200092, China;;2. School of Management, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620;;

Wang Xia

1.School of Economy & Management, Tongji University, Shanghai 200092, China;;

Shaowei Wang

3.LIMOS, CNRS 6185, Vichy 03200, France;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Cell-DEVS Social Interaction Modeling and Simulation for Emergency Evacuation Systems

Abstract

Abstract: This paper aims to present a Cell-DEVS model for emergency evacuation systems, which behave uncertainty and are intricately driven by the *social factors*. *The model introduces social interaction factors such as familiarity degrees, individual vision, communication and conduction, and velocity zones as the state variables, describing the relationship between the evacuees and environment, as well as the interactions with each other. The algorithm optimization enhances reality of simulation. The RESTful CD++ is applied as middleware to execute remote simulation.* The results confirm the existence of social interaction. This work benefits to the architecture design, evacuation planning and public safety management.

Keywords

emergency evacuation, social interaction, Cell-DEVS model, RESTful remotely simulation

Recommended Citation

Wang Yanhong, Wang Xia, Wang Shaowei. Cell-DEVS Social Interaction Modeling and Simulation for Emergency Evacuation Systems[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 2928-2941.

改进社会化互动的疏散系统 Cell-DEVS 建模与仿真

王岩红^{1,2}, 王霞^{1*}, 王少伟³(1. 同济大学经济与管理学院, 上海 200092; 2. 上海工程技术大学管理学院, 上海 201620;
3. CNRS 法国国家科学研究院 LIMOS 系统计算与优化实验室, Vichy 03200)

摘要: 针对应急疏散行为受社会化属性驱动而表现出不确定性、互动关系复杂等特征, 基于 Cell-DEVS 语言构建人员疏散系统仿真模型, 模型在强化描述行人运动能力的基础上, 引入环境熟悉程度、个体视野、沟通与引导及速率区块等社会化互动因素, 旨在优化模型算法, 完善个体与环境、个体之间互动关系的描述。RESTful web service 远程仿真结果进一步证实了社会化互动的存在, 提升了模型对疏散系统的描述能力, 仿真结果更为可信。进一步显示了模型驱动理论与计算机仿真技术在建筑设计、应急方案制定、公共安全与危机管理等领域的先进性与可行性。

关键词: 应急疏散; 社会化互动; Cell-DEVS 模型; RESTful 远程仿真

中图分类号: C931; X913.4; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 08-2928-14
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808014

Cell-DEVS Social Interaction Modeling and Simulation for Emergency Evacuation Systems

Wang Yanhong^{1,2}, Wang Xia^{1*}, Wang Shaowei³

(1. School of Economy & Management, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Management, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620; 3. LIMOS, CNRS 6185, Vichy 03200, France)

Abstract: This paper aims to present a Cell-DEVS model for emergency evacuation systems, which behave uncertainty and are intricately driven by the *social factors*. The model introduces social interaction factors such as familiarity degrees, individual vision, communication and conduction, and velocity zones as the state variables, describing the relationship between the evacuees and environment, as well as the interactions with each other. The algorithm optimization enhances reality of simulation. The RESTful CD++ is applied as middleware to execute remote simulation. The results confirm the existence of social interaction. This work benefits to the architecture design, evacuation planning and public safety management.

Keywords: emergency evacuation; social interaction; Cell-DEVS model; RESTful remotely simulation

引言

火灾、地震、恐怖袭击等突发事件往往造成灾难性与毁灭性的结果, 尤其是在人口分布密集

共建筑内, 如图书馆、办公楼、地铁站、社区、酒店等^[1-2]。当前, 人员疏散系统及其系统的有效性研究面临挑战。基于经济性与真实性的考量, 对比疏散演习等方法, 计算机建模与仿真技术在描述与分析该类离散事件系统时成为必然选择。

针对应急疏散系统仿真模型的构建已然经历了流(flow)—个体(individual)—组群(group)三个阶段^[3]。其中, EVACNET4^[4]等 Flow-Based 模型仅仅



收稿日期: 2016-11-02 修回日期: 2017-01-12;
基金项目: 教育部人文社科规划基金(14YJA630061);
作者简介: 王岩红(1986-), 女, 哈尔滨, 博士, 研究方向为系统建模与仿真、公共安全与危机管理等; 王霞(通讯作者 1966-), 女, 河南许昌, 博士后, 教授, 博导, 研究方向为城市发展与管理。

<http://www.china-simulation.com>

• 2928 •

估计疏散中流的形成与变化, 强调疏散中的物理位置及其管理。EGRESS^[5]等元胞自动机(Cellular Automata)模型将空间离散化, 实现对个体移动轨迹的跟踪。Agent-Based 模型^[6], 如 SIMULEX^[7], 允许对个体属性进行评估建模, 尝试将性别、年龄等社会化属性纳入行人运动算法; EXIT89^[8]探索身材、残疾、角色、偏好等趋于社会化互动范畴的个人属性对疏散系统的影响, 更尝试通过时滞来隐晦组群的差异, 但全员疏散路径依然局限于最短路径, 也无法直接诠释社会化互动。此外, 一些仿真模型诸如 MASCIM、FreeWalk、FIRSCAP 等^[9]尝试对恐慌、组群、环境熟悉程度、领导力等影响因素进行建模; EXODUS^[10]对社会化心理的描述可能最为全面, 它定义了走出危险区域的行动列表, 并且允许个体之间进行手势沟通。但至目前仍缺乏有效的仿真模型能够全面地、准确地描述社会化心理、社会化组织等社会化互动因素, 仿真结果通常局限在对瓶颈、拱形分布、羊群效应等的观察。这导致了系统分析的局限性: 诸如从众心理与羊群效应在高密度疏散的情境下已丧失实际意义, 此时个体与群组并无差异, 无法考察个体的心理水平及决策水平; 另外, 仿真中全体疏散人员均匀且同时向某一出口移动的情况与现实也并不相符, 通常的, 不同位置的个体由于信息不对称保持着不同的速率变化。

在建模方法上, DEVS 与 Cell-DEVS 给出了全新的思维, 可以实现行人运动模型与建筑信息模型(BIM)的耦合建模。所谓 DEVS, 即离散事件系统规范(Discrete Event System Specification), 由 Zeigler 提出。它为离散事件系统提供了一种层次化、模块化的仿真建模方法, 该方法不仅服务于离散事件模型, 还为离散时间系统(Discrete Time System Specification, DTSS)及连续时间系统(Differential Equation System Specification, DESS)等系统行为的执行提供计算基础^[11]。简单的说, DEVS 有望作为一种最高普适性的仿真建模方法, 实现对任意复杂系统的建模与仿真。近年来, 包括 Cell-DEVS 在内

的一系列 DEVS-Based 模型作为仿真建模的前沿方法, 越来越多的应用于军事^[12-13]、生物、应急疏散^[14-16]、建筑工程、环境科学、物理与化学、交通运输与网络等领域^[17-18], 其在国内的研究也逐渐起步^[19-20], 但通常局限于通过简单的案例介绍该语言及建模方法的优越性, 尚缺乏应用于较为复杂的混合系统建模, 也缺乏可视化的仿真结果。

本文基于 Cell-DEVS 构建人员疏散系统仿真模型。模型除了引入建筑布局信息、路径选择信息、疏散阶段和行动等描述行人运动所必须的物理性状态变量外, 还通过引入环境熟悉程度、个体视野、沟通与引导及速率区块等变量来改进模型对社会化互动因素的描述。基于上述改进, 定义避障、优先权、出口、独立决策或跟随行动等规则, 尝试用新的建模语言与方法突破以往疏散系统建模忽视社会化因素或者一些已提出的社会化互动假设难以转换为相关属性或算法的难题。模型在 CD++建模与仿真工具中构建和执行, 运用 RESTful CD++^[21]的 web service 技术进行远程仿真, 来观察跟随、环境开发、过道与出口处的运动形态, 分析人员疏散系统中的建筑与灾情信息传播、疏散空间与时间的速率变化以及较高或较低密度时个体的社会化心理与组群变化等社会化互动因素的表现。

1 Cell-DEVS 仿真建模规范

Cell-DEVS^[22]是 Wainer 基于 DEVS, 结合元胞自动机, 引入 delay(时滞函数)提出的高级仿真建模规范(formalism)。其实质是一个耦合的 DEVS 模型, 元胞空间中的单个元胞即一个 DEVS 原子模型(atomic model)。因此, Cell-DEVS 既保持了元胞自动机制制定规则定义复杂离散空间动力系统的功能^[23], 又借助 DEVS 实现离散时间与离散事件混合系统的模型构建。与 DEVS 语言类似, Cell-DEVS 有其数学规范(specification)形式:

$$TDC = \langle X, Y, S, N, type, d, \tau, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, D \rangle$$

其中: X 表示外部事件(external event)的输入集

(input set); Y 表示外部事件的输出集(output set); S 表示系统状态(state)集; $N \in X^n$ 为输入值(input value)的集合, 表示为一个数组(n_1, \dots, n_k), η 表示邻居的度, 即个体邻居的个数; $type$ 是时滞的种类, 一般有 transport 和 inertial 两种; $d \in R_0^+$ 为元胞的时滞(delay); $\tau: N \rightarrow S$ 为本地计算函数(local computing function); $\delta_{int}: S \rightarrow S$ 是内部转移函数(internal transition function); $\delta_{ext}: Q \times X \rightarrow S$ 是外部转移函数(external transition function); $\lambda: S \rightarrow Y$ 是输出函数(output function); $ta: S \rightarrow R_0^+ \cup \infty$ 是时间渐进函数(time advance function)。

Cell-DEVS 将元胞自动机的本地演化函数 ($\tau: C_C \times N \times q \cdot Z_0^+ \rightarrow C_C$) 引入一般的 DEVS 规范。DEVS 定义外部事件(external event)发生时, 模型通过输入端口(input ports)接收此输入, 外部转移函数 δ_{ext} 被执行, 引起状态转移, 即 $S \rightarrow S'$ 。因此, 当一个元胞(cell)作为 DEVS 原子模型接收到邻居元胞发出的外部输入时, 首先触发函数 τ , Cell-DEVS 中函数 τ 的功能为计算该元胞下一个状态 S' 并且与 S 比较: 如果 $S \neq S'$, 则 δ_{ext} 被执行, 同时预定一个内部转移函数 δ_{int} , 并且该函数在给定的时滞函数 delay 后执行, 并在该内部转移发生前根据输出函数 λ 产生输出 S' , 同时将 S' 发送给元胞的其他邻居; 相反的, 如果 $S = S'$, 该元胞则恢复到静默状态(passive state), 既不会预定内部转移也不会有任何输出, 即 $ta(s') \rightarrow +\infty$ 。

对比其他语言, Cell-DEVS 优势明显: 首先, 元胞空间(Cell Space)在描述建筑内的离散空间上具有相当的适用性, 特别是结合 BIM(Building Information Modeling, 建筑信息建模)将建筑布局要素数据以变量的形式嵌入 Cell-DEVS 模型, 实现模块化建模, 即通过调整相关变量值转换仿真实验环境, 而无需针对特定的建筑物(如住宅、公共场所等)重复建模工作; 其次, DEVS 原子模型能够规范系统中的个体行为, 并且根据本地演化函数定义单个元胞的行为规则, 特别是系统内的元胞可以通过多端口(multi-ports)及多变量(multi-variables)

进行信息沟通, 实现元胞空间由 n 维到一维的简化; 第三, 耦合后的 Cell-DEVS 模型可规范疏散系统的整体结构, Cell-DEVS 模型之间可以通过给定的元胞实现耦合, Cell-DEVS 与 DEVS 模型之间亦可以实现耦合建模, 这有利于疏散系统中水平疏散与垂直疏散的完整建模, 建筑平面与楼梯、电梯等垂直空间的耦合建模等。

2 社会化互动因素与模型改进

社会化互动因素可能引发疏散人员的自组织(self-organization)行为^[24], 即在外部干预的情况下, 隐藏在疏散人员决策与行为背后的内在机制。应急疏散系统中的社会化互动总体上可归为三类: 个体与环境互动、个体间互动、组群间互动, 本文聚焦于前两者。

应急疏散系统的描述以 Wang 和 Wainer 等提出的行人运动仿真模型作为基础^[25-27], 即引入 *phase* 与 *movement* 两个变量描述行人运动系统, 同时引入 *layout* 变量来描述仿真实验环境的建筑信息系统, *pathway* 变量将上述两个系统耦合, 实现行人与物理位置的互动关系描述。然而, 该模型与其他行人疏散模型均在社会化互动因素方面的描述存在一定缺陷, 因此做出如下 3 个方面的改进: (1) 熟悉程度(*familiarity*)变量的引入, 差异化个体处理环境信息的能力, 改进以往模型中路径选择局限于最短路径的运动算法; (2) 基于熟悉程度的差异, 赋予疏散人员视野(*vision*)、沟通与引导等社会化属性, 建立个体间有关建筑信息的传播和行动选择机制, 使得模型不局限于寻找疏散瓶颈、识别“羊群效应”等基本假设; (3) 设计速率区块(*velocity*), 区分不同位置的疏散人员与事件源之间的关系, 建立速度调节与速率匹配机制, 改进事件信息不对称所导致的预疏散时间差异, 为决策转变等系统行为增加社会化互动因素的指导。

具体地, 社会化互动方式取决于系统中的个体所携带的社会化属性。例如, 疏散人员是否接受过培训(出入建筑的频次/疏散演练/示意图学习)是个

体的关键社会化属性,与其相关的个体与环境的互动方式则表现在人员对建筑信息的掌握情况,即不同的熟悉程度对疏散路径的选择可能有显著差异。如果加入沟通与引导(言语或手势/外向型人格)等社会化属性,与其相关的个体间互动会复杂化疏散行为,对建筑更熟悉的人员可能传播建筑信息(follow-direction)或带领同伴(follow-me)疏散,因此个体间互动也会致使个体与环境互动的复杂化。建模时通过一系列的规则来定义上述互动方式。

表 1 总结了模型改进所涉及的社会化属性^[28]与互动方式。Cell-DEVS 模型将通过定义这些因素所映射的行为规则来描述系统行为。

3 Cell-DEVS 人员疏散系统建模

Cell-DEVS 人员疏散系统建模与仿真包括数据收集、CD++建模、RESTful web service 远程仿真和可视化 4 步。完整过程如图 1 所示。

表 1 应急疏散系统中的社会化属性、互动方式及规则

Tab. 1 Personality parameters and social interaction

分类	属性	互动方式	相关规则
个体与环境间互动	速率	据灾情信息调整	
	培训	环境信息处理	预疏散①/ 路径选择⑤
	偏好	遇障碍后行进倾向	
	等待半径	移动前空间需求	
	机动性	视环境动态调整	避障⑨
个体之间互动	恐慌	提速与破坏规则	速率匹配②
	引导	帮助他人路径选择	follow-me④⑦
	沟通	传递建筑环境信息	follow-direction④⑦
	推挤	尊重他人或排队	优先权③
	冲突	同移动倾向下妥协	冲突解决机制③
环境开发	探索新路线	孤立决策④⑧	

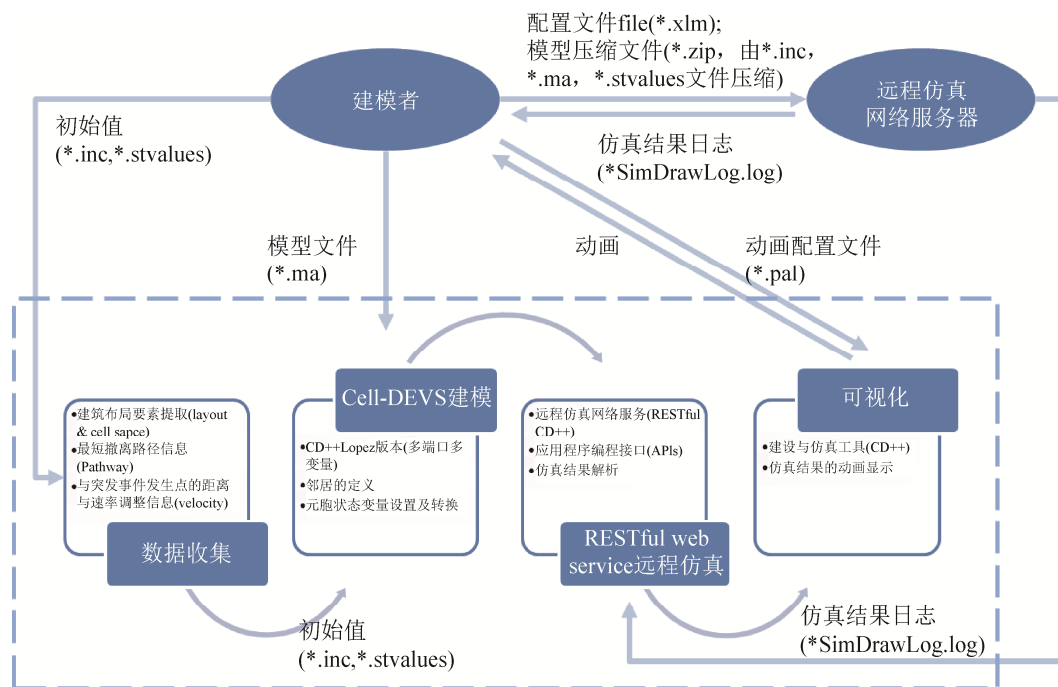


图 1 Cell-DEVS 建模与仿真过程

Fig. 1 Cell-DEVS modeling and simulation process

<http://www.china-simulation.com>

• 2931 •

3.1 数据收集

借助 CD++ 仿真工具建模, 需要获取相关变量的原始值数据并存储于 *.stvalues 文件中。

该类数据包括: (1) 建筑布局要素信息, 比如墙壁、家具、景观植物等障碍物, 出口、楼梯间、电梯间等撤离目标, 走廊、过道、座位等可移动区域的坐标。本文选用同济大学图书馆第9层作为仿真实验的背景, 单层建筑面积约 2 308 m², 长宽分别为 48 m, 包括 1 个主楼梯间、3 个应急楼梯间, 其座位可容纳约 360 人。该平面被划分为 53×53 的元胞空间, 单个元胞面积为 0.9×0.9 m² 如图 2 所示。(2) 建筑内任意位置到最近出口的最短路径。模型通过在元胞空间绘制泰森多边形(Voronoi diagram)来计算每个元胞最高效率撤离方向见图 3(a)。(3) 速率区块。与突发事件发生点的距离可

能导致撤离前准备时间与启动撤离行动的速率差异, 以事件源为中心, 依不同半径划分区块见图 3(b)。上述初始值数据在 *.stvalues 文件以 $(x,y)=(m,n,k)$ 的形式储存, m,n,k 分别表示 *layout*, *velocity* 和 *pathway* 取值。

例如, $(9,30)=(2,0,0)$ 表示在建筑内 $(9,30)$ 坐标位置的布局要素为墙壁、书柜或桌子等疏散人员无法进入的障碍区域, 因此, *layout*=2, 同时 *velocity*=0, *pathway*=0。再如, $(21,50)=(1,2,8)$ 表示该坐标位置是可供疏散人员占据并移动的座位, 同时在此坐标位置所在的区块内移动的速率适中, 并且如想通过最短路径达至出口, 下一步的移动方向为↓如表 2 所示。此外, 如果有宏变量(#Macro)则需储存在 *.inc 文件中。

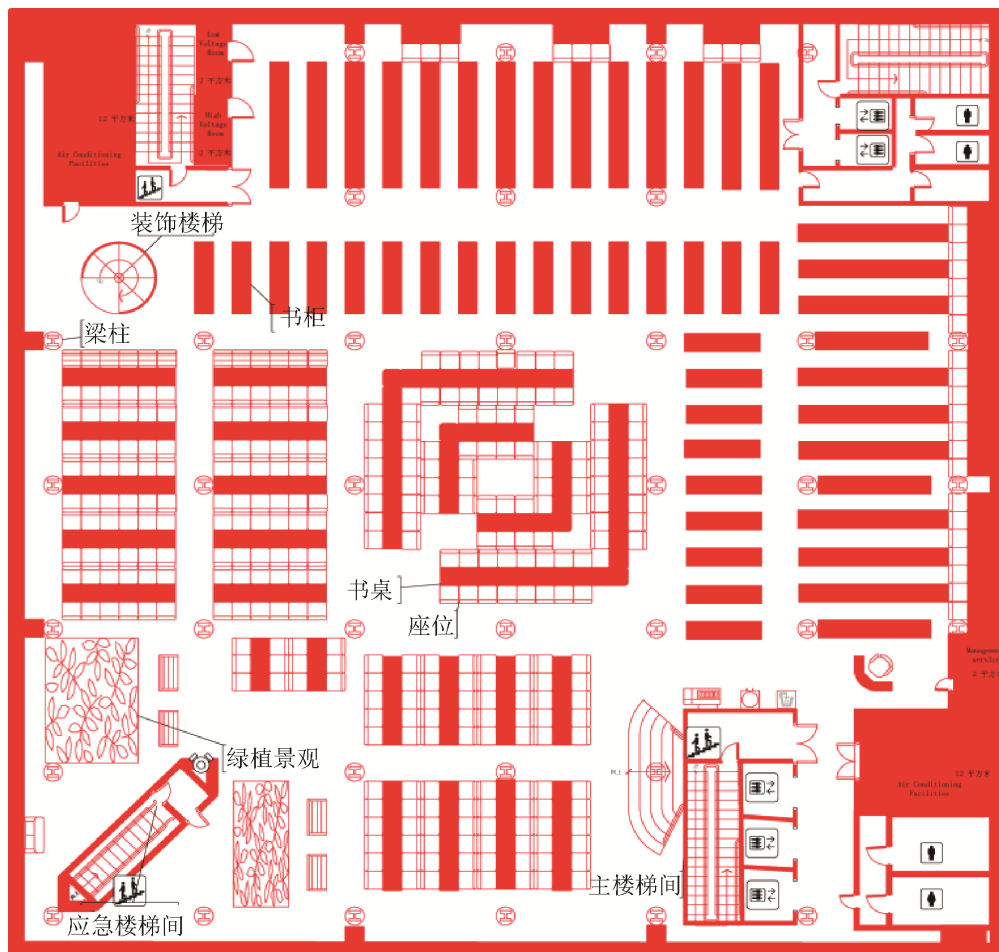


图2 仿真实验建筑布局平面图

Fig. 2 Architecture layout for modeling and simulation

<http://www.china-simulation.com>

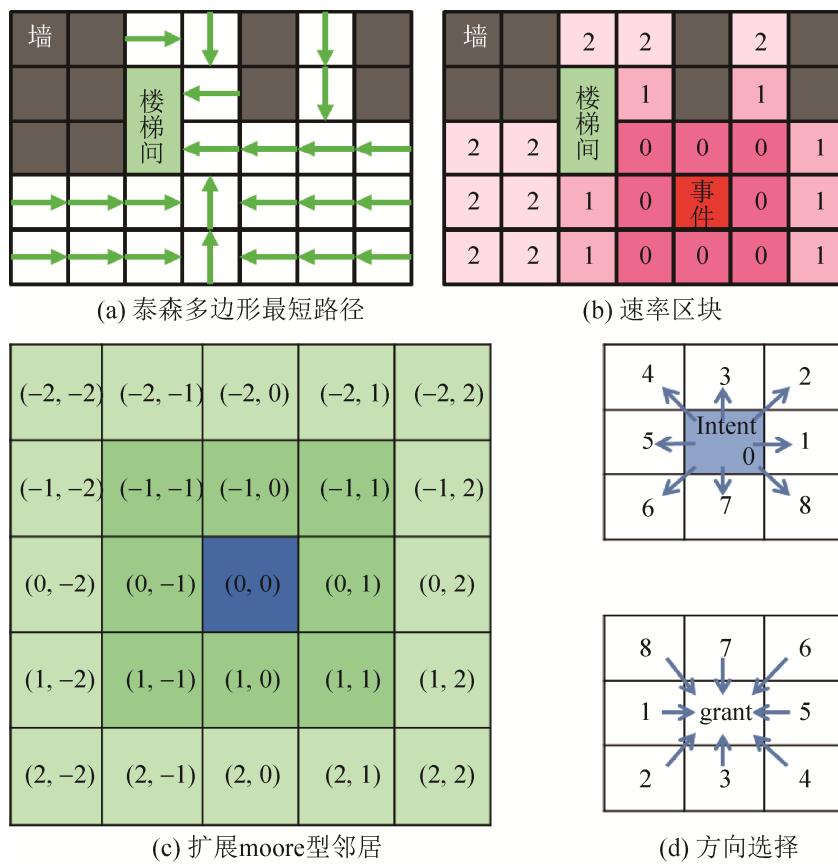


图 3 个体移动路径、速率、邻居与方向定义
Fig. 3 Voronoi diagram, velocity zone, neighborhood and direction

表 2 状态变量及定义

Tab. 2 Cell state & definition

初始值变量	值	定义	端口变量	值	定义
Layout	0	空间	Phase	1	方向选择
	1	座位		2	授权询问
	2	障碍		3	等待移动
	3	出口		4	移入/离开
Velocity	0	高速	Familiarity	0	空元胞
	1	中速		1	高级
	2	低速		2	中级
Pathway				3	低级
	5	→		0	空元胞
	6	↑		1	被占据
	7	←	Movement	10-18	选择方向
	8	↓		20-28	询问授权
				31-38	取得授权
		39		授权被拒	
		40-48	发出授权		

3.2 变量定义与行为规则

在 eclipse 平台上, 使用 CD++ 的 López^[25] 版本构建 Cell-DEVS 模型。该模型定义元胞数为 5×5 的扩展 moore 型邻居, 坐标为 (-2, 2), (-2, -1), ..., (0, 0), ..., (2, 2), 如图 3(c) 所示。每个元胞被赋予 6 个状态变量(定义见表 2): *phase*(阶段), *familiarity*(熟悉程度), *movement*(移动) 3 个为输入/输出端口 (input/output ports), 模型中以 “~” 符号引出, 邻居元胞通过 3 个端口互通, 变量值可变; *layout*(布局), *velocity*(速率区块), *pathway*(路径) 为初始值变量(initial value), 以 “\$” 符号引出, 变量值不可变。

变量 *movement* 与 *phase* 相互配合在 1~3 个周期内的转移诠释个体移入一个空元胞或移出一个元胞的基本过程^[23]。如图 4 所示。

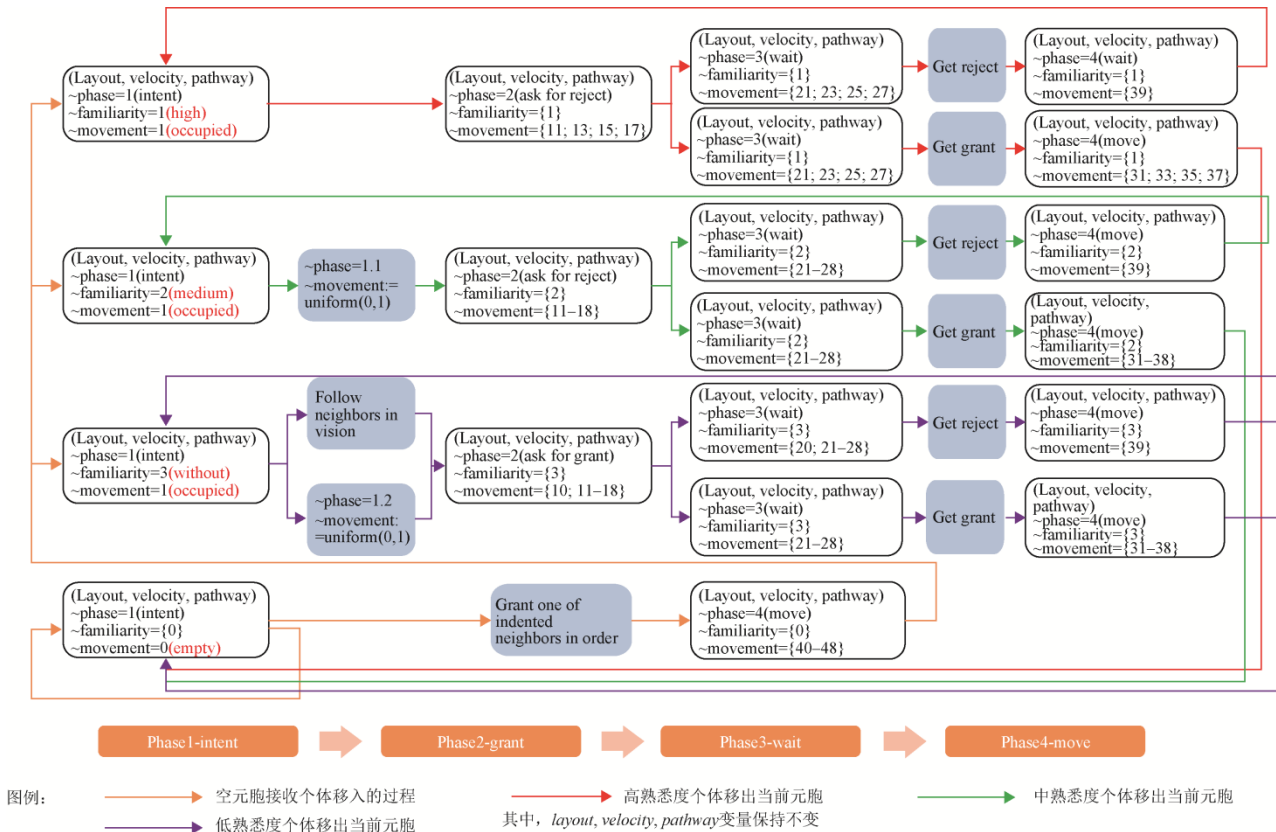


图4 个体移动周期示意
Fig. 4 Individual movement cycle

1 个移动周期由 4 个 delay 时间步长组成, 并完成 phase 变量值由 1~4 的转变。个体移动的基本过程为: 个体首先依据其物理及社会化属性有目的或随机地选择一个邻居元胞作为目标发出移动请求, 在取得目标元胞的授权后立即或等待 1~2 个周期后移出所在元胞, 等待时长取决于所在的速率区块与疏散的进程, 如果在冲突解决机制下移动请求被拒绝, 则保持原有元胞占位并进入新一轮的决策与行动周期; 而空元胞的算法是被询问时依据优先权规则发出移动授权并接纳新个体移入。

应急疏散行为的具体规则描述如下:

(1) 预疏散(pre-preparation): 事件突发时, 灾情信息不对称导致距离事件源越近的人员疏散准备时间越短、启动疏散越快。

(2) 速率匹配(velocity matching): 随疏散进程发展, 各速率区块中的个体非均匀提速, 其移动速率与周围群组逐渐趋同。

(3) 优先权与冲突解决机制(priority order & conflict solution): 如果有两个或以上个体对同一个空元胞发出移动请求, 该目标元胞依顺序解决该冲突, 即赋予→方向移动最高优先权, 其次是↗、↑、↖、←、↙、↓、↘等方向如图 3(d)所示。

(4) 个体视野(individual vision): 疏散人员的视野为其潜在移动方向上包括 8 个邻居元胞在内的扇形范围如图 5(b)中绿色元胞部分所示。

(5) 独立决策(independent decision making): 高熟悉度个体依最短路径撤离, 包括→、↑、←、↓等 4 个方向如图 3(a)所示。

(6) 随机决策(random decision making): 中熟悉度个体依概率在 8 个方向上选择移动, 例如 pathway=5 时, 个体选择向→、↗、↘、↑、↓、↙、↖、←等方向移动的概率分别为 70%、10%、10%、3%、3%、2%、1%、1%, 即耗时较少可寻到高效率路径如图 5(a)所示。

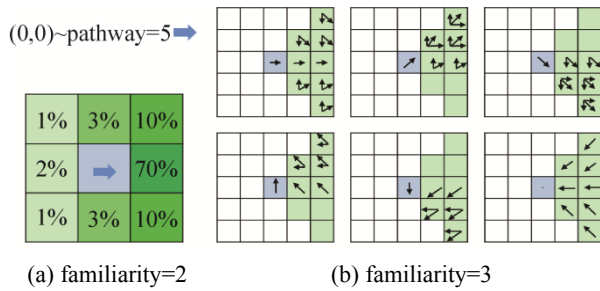


图 5 随机决策规则与跟随决策规则

Fig. 5 Route selecting by random & following

(7) “follow-me/follow-direction”: 个体不熟悉环境且在视野内有较高级熟悉度的邻居存在, 则接收该邻居的建筑信息传递并跟随行动, 距离越近的个体间具有更强的信息沟通能力, 具体跟随规则见图 5(b)。

(8) 孤立决策(isolated decision making): 个体不熟悉环境且在视野内没有更高级熟悉度的邻居存在, 可在 8 个方向依概率随机选择移动, 但耗时较多且直至出口附近才可顺利撤离。

(9) 避障规则(obstacle avoidance): 当个体向障碍所在元胞发出移动请求时即遭拒绝, 个体需重新选择目标并发出请求。

(10) 出口规则: 首先, 当个体移动至出口元胞, 立即清空该元胞, 个体消失于仿真环境; 其次, 主出口较应急出口覆盖范围大, 即更多的疏散人员优先选择主出口作为撤离目标; 第三, 无论何种熟悉程度, 在可见出口位置只能向出口(楼梯间)元胞方向请求移动。

图 6 是元胞的状态转移 $S \rightarrow S'$ 举例, 其中 $S=(layout, velocity, pathway, phase, familiarity, movement)$ 。该图描述了一个元胞清空当前个体 ($S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow S_5$) 到接纳另一个体 ($S_5 \rightarrow S_6 \rightarrow S_0$), 或者维持当前个体不变 ($S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_4 \rightarrow S_0$) 等过程。元胞被一个不熟悉建筑环境($familiarity=3$)的个体占据, 该元胞属于高速率区块($velocity=0$)且指向出口的最短路径方向为 \rightarrow , (即 $pathway=5$), 端口 $familiarity$ 可以输入视野中较高熟悉度邻居是否存在的信息, 端口 $movement$ 和 $phase$ 可以输入邻居行动方向的信息,

元胞在接收到来自邻居元胞的外部事件(external event)输入后实现状态转换, 并将新的元胞状态值通过上述 3 个端口输出给所有邻居元胞。

3.3 模型构建

在 CD++ 仿真工具中构建 Cell-DEVS 模型并存储于 *.ma 文件。

元胞的状态转移、社会化互动关系等由系统行为的规则定义, 规则范式如下:

$\langle value \rangle \langle delay \rangle \langle precondition \rangle$

以图 6 所描述的状态转移过程为例, 撰写疏散行为规则:

(1) 空元胞发出授权(Phase1 \rightarrow Phase4):

rule: { $\sim movement := 41$; $\sim phase := 4$; $\sim familiarity := 0$;} 100 {(0,0) $\sim movement = 0$ and (0,0) $\sim phase = 1$ and (0,-1) $\sim movement=11$ and \$layout != 2 and (0,0) $\sim familiarity = 0$ }

即元胞(0, 0)授权(0, -1)以 \rightarrow 方向移动至本元胞见图 7(a)。

(2) 方向选择(Phase1 \rightarrow Phase2):

rule: { $\sim movement := 11$; $\sim phase := 2$; $\sim familiarity := 3$;} 0 {(0,0) $\sim movement = 1$ and (0,0) $\sim phase = 1$ and (0,0) $\sim familiarity=3$ and \$pathway=5 and (0,1) $\sim familiarity \leq 2$ and (0,1) $\sim familiarity > 0$ and ((0,1) $\sim movement=11$ or (0,0) $\sim movement=21$ or (0,0) $\sim movement=31$) and \$layout < 3}

即元胞(0, 0)跟随(0, 1)的路径选择确定移动方向 \rightarrow , 如图 7(b)所示。

(3) 授权询问(Phase2 \rightarrow Phase3):

rule: { $\sim movement := ((0,0)\sim movement + 10)$; $\sim phase := 3$; $\sim familiarity := 3$;} 100 {(0,0) $\sim movement \geq 10$ and (0,0) $\sim movement \leq 18$ and (0,0) $\sim familiarity = 3$ }

即元胞(0, 0)向(0, 1)方向发出移动请求, 并询问移动授权见图 7(c)。

(4) 等待移动(Phase3 \rightarrow Phase4):

rule: { $\sim movement := 31$; $\sim phase := 4$; $\sim familiarity := (0,0)\sim familiarity$;} 100 {(0,0) $\sim movement = 21$ and (0,0) $\sim phase = 3$ and (0,1) $\sim movement=41$ and \$velocity = 0}

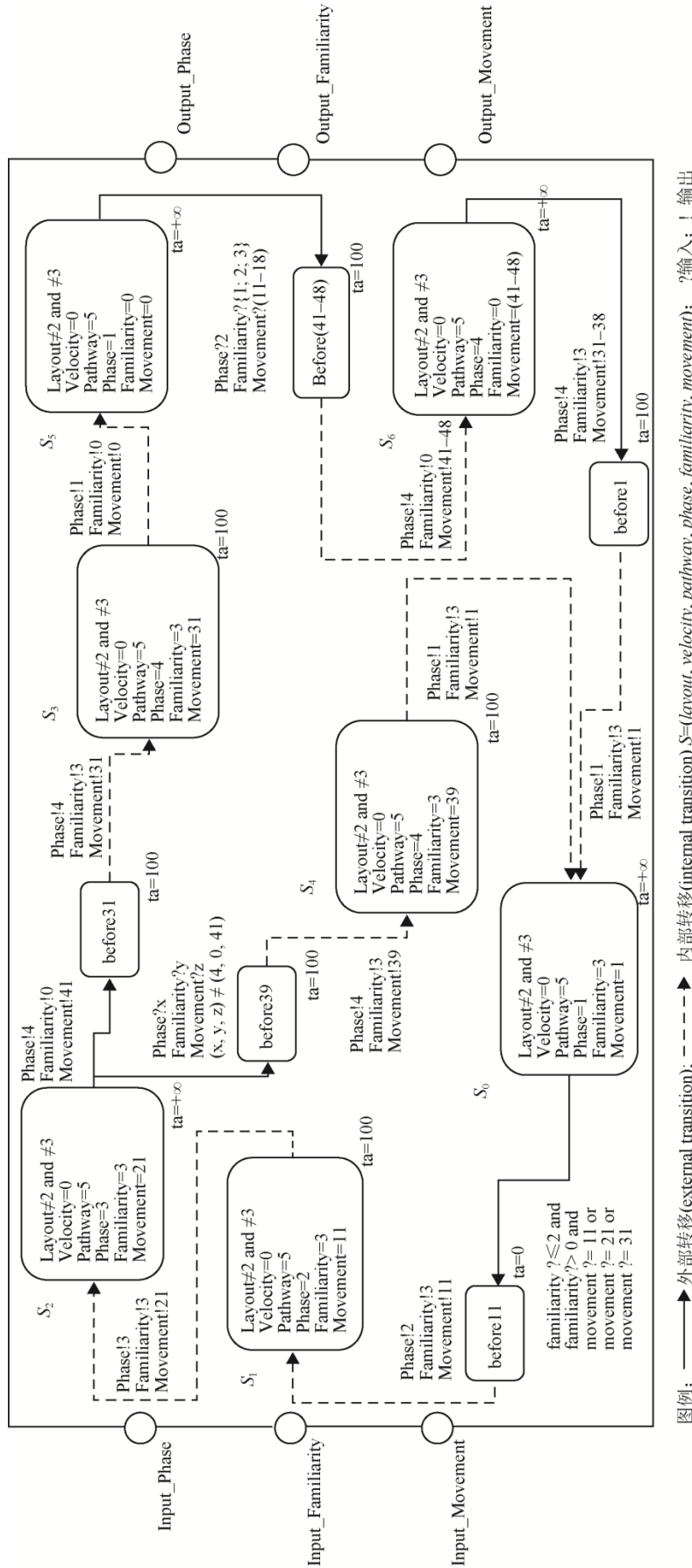


图 6 状态转移示例(familiarity=3, velocity=0, pathway=5)
Fig. 6 Diagram of state transition (familiarity=3, velocity=0, pathway=5)

即元胞(0, 0)取得(0, 1)发出的移动授权许可见图 7(d)。

rule: { \sim movement:= 39; \sim phase: = 4; \sim familiarity:= (0,0) \sim familiarity;} 100 {(0,0) \sim movement \geq 20 and (0,0) \sim phase =3 and (0,0) \sim movement \leq 28}

即元胞(0, 0)未取得(0, 1)发出的移动授权许可见图 7(e)。

(5) 移入/离开(Phase4 \rightarrow Phase1):

rule: { \sim movement:= 1; \sim phase := 1; \sim familiarity:= (0,-1) \sim familiarity;}100 {(0,0) \sim movement= 41 and (0,0) \sim phase = 4 and (0,-1) \sim movement = 31}

即元胞(0, 0)移入空元胞(0, 1), 如图 7(f)所示。
rule: { \sim movement:=0; \sim phase := 1; \sim familiarity := 0;} 100 {(0,0) \sim movement = 31 and (0,0) \sim phase = 4 and (0,1) \sim movement = 41}

即元胞(0, 0)离开当前元胞见图 7(g)。

rule: { \sim movement := 1; \sim phase := 1; \sim familiarity := (0,0) \sim familiarity;} 100 {(0,0) \sim movement = 39 and (0,0) \sim phase = 4}

即元胞(0, 0)移动遭拒后留在当前元胞开始新的移动循环见图 7(h)。

上述规则示例中, $\langle value \rangle$ 的实质是定义输出函数 λ ; $\langle delay \rangle$ 是定义时间渐进函数 ta ; $\langle precondition \rangle$ 则是定义本地计算函数 τ 。

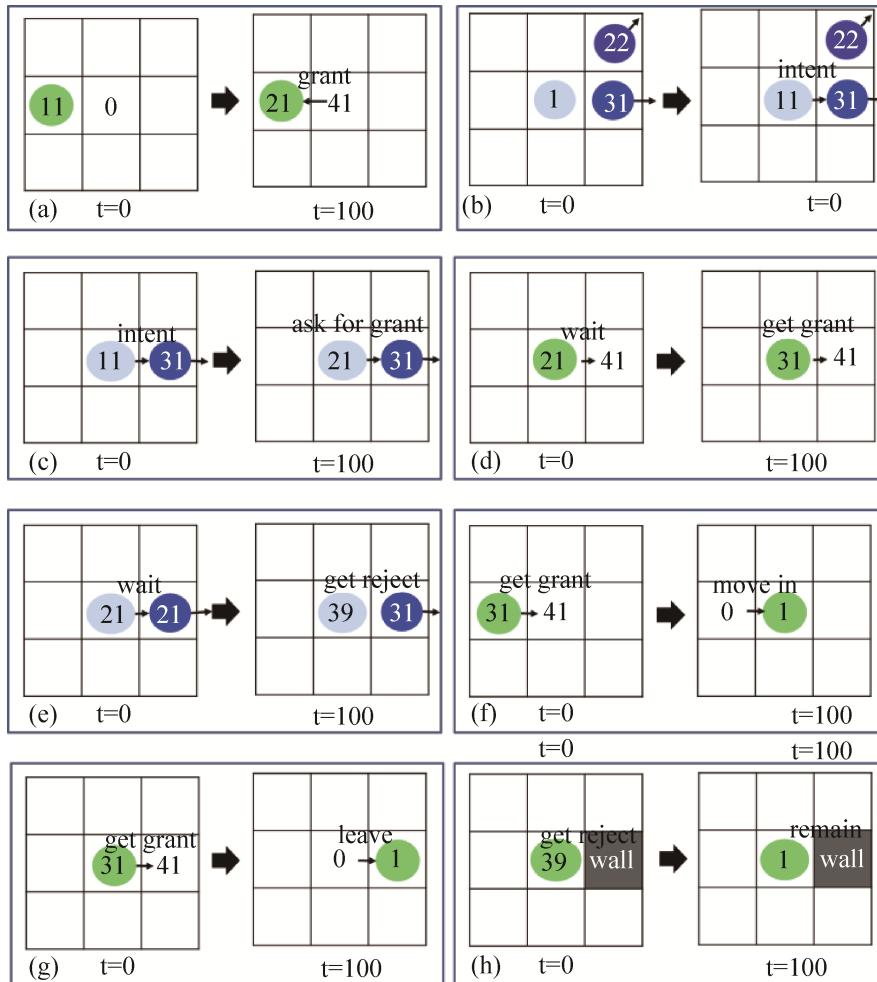


图 7 行为规则的定义
Fig. 7 Behavioral rules

4 仿真结果

仿真实验在2种情境下运行:

(1) 疏散人员同质(见图8(a)), 黑色表示墙壁等个体无法移动的障碍物, 绿色表示疏散人员, 深绿色元胞表示出口, 假设所有个体无熟悉度差异, 且遵循规则⑥进行随机决策;

(2) 赋予疏散人员熟悉程度属性(图8(b)), 色块越深表示熟悉度越高), 设置高熟悉度的人员比例为30%, 中熟悉度50%, 不熟悉的占20%。

另外, 对于(a)与(b)都有: (1) 根据经验, 设置期望行进速率为1.5 m/s, 即1 s等于1.5个周期、600个仿真时间步长。(2) 参考图书馆日常上座率, 设置座位上的初始人员分布密度为60%, 其余位置为10%。(3) 设置事件源的坐标为(25, 11), 事件源所在速率区块($velocity=0$)不设置预疏散时间, 应急事件发生即刻开始撤离行动, 且保持期望速率; 其余两个区块以距离事件源的远近区分, 较近区块($velocity=1$)设置预疏散时间8 s, 较远区块($velocity=2$)预疏散时间16 s, 即疏散开始8 s后两区块中个体分别提速, 16 s后全员期望速率趋于相同。

RESTful CD++ web service 远程仿真的结果表明: 302人的撤离行动a实验需要304 s, b实验则

约为371 s。

如图9所示, 从趋势上来看, 首先, a、b实验在疏散初始阶段约50 s内的曲线拟合程度较高, 其单位时间成功撤离人员较多, 考虑预疏散期间个体行进速率较低, 个体间距离较大, 冲突、瓶颈等尚未形成等因素, 此时疏散效率较高。其次, a、b实验在疏散中后期均有撤离放缓的趋势, a实验的演变较为均匀, b实验在疏散中期则呈现明显的延宕。考虑在疏散中期, 瓶颈的出现迫使行人等待、突破瓶颈或不断调整行动路线以抵达目标等情况, b实验在“越快越慢”、“加热冻结”等基本人群疏散现象的诠释更为可信, 即在预疏散阶段后, 随着个体行进的期望速率提高, 个体与其周围人员的速率相匹配, 整体疏散效率反而下降。

2个实验在100 s、200 s、300 s的仿真结果如图10所示, 对仿真结果分析的主要发现包括:

(1) 启动时间差异: 受环境影响, 疏散人员存在灾情信息不对称的情况, 距离事件源较近的个体启动较快, 距离事件源较远的个体并不会即刻行动, 因此在疏散初期, 并非全员同时、匀速地聚集并向目标出口移动, 而是存在启动时间、速率上的差异。

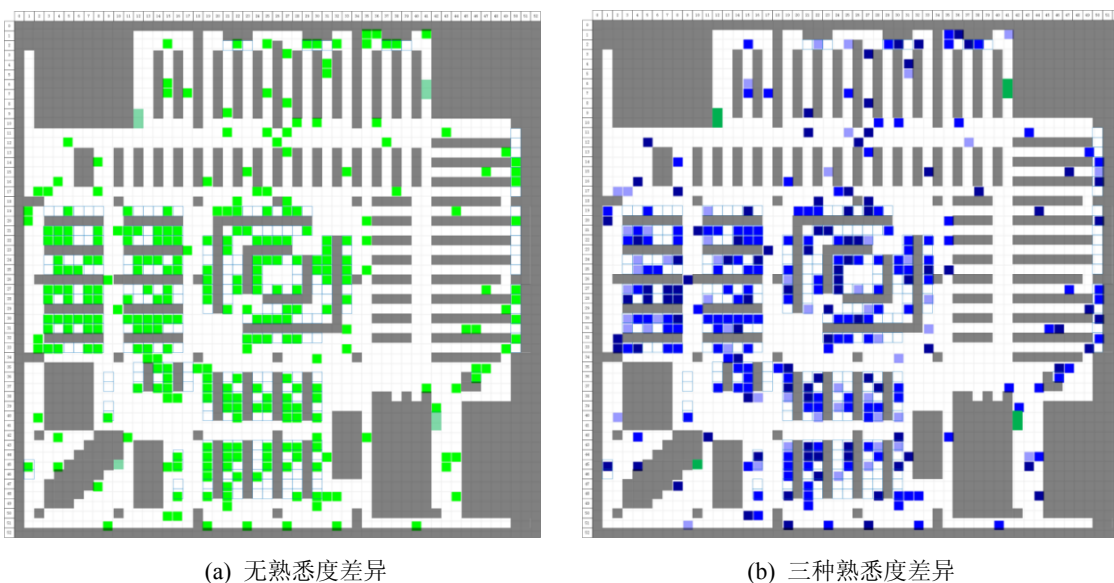


图8 t=0时疏散人员初始分布
Fig. 8 Initialization for simulation

<http://www.china-simulation.com>

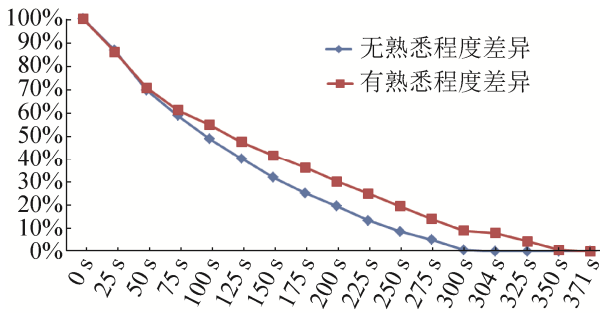


图 9 疏散进程对比

Fig. 9 Comparison of evacuation processes

(2) 形态差异: 如图 10(a)所示的实验中, 个体同质, 较少的社会化互动因素影响疏散行为, 人群呈现更为无序的“拱形”分布, 表现出相互“挤压”、排队规则的破坏等现象; 如图 10(b)所示实验则呈现明显的“排队”现象, 仅在空间相对宽阔的拐角处出现“拱形”分布。

(3) 路径差异: 如图 10(a)所示实验中的个体均试图从最短路径撤离, 但由于冲突与竞争导致其在最短路径附近迂回; 如图 10(b)所示的实验中高熟悉度群体可占据最短路径, 中熟悉度个体间存在明

显的竞争, 低熟悉度个体的跟随目标会随着相对位置的变化而发生转移, 即始终跟随着视野中离自己最近的邻居, 而非锁定于某个特定个体。

(4) 目标调整: 如图 10(a)所示实验中的个体一旦确定某个出口为目标后则不会更换目标, 直至消失在仿真环境中; 如图 10(b)所示的实验中向主出口移动的个体一旦进入应急出口标识覆盖范围, 存在离开人群转向应急出口方向的情况, 如果该个体具备较高熟悉度, 对周围的较低熟悉度个体有导向作用。

(5) 路径开发: 如图 10(a)~(b)所示的实验中均出现遇到瓶颈且移动请求屡遭拒绝的个体脱离人群尝试开发新路径的行为。

(6) 行为延宕: 如图 10(b)所示的实验中, 低熟悉度个体无法从外部接收环境信息需要孤立决策时, 会耗费相当长的时间“徘徊”, 直至视野中出现出口, 从而延长了整体疏散时间, 尤其是在有障碍物阻挡的情况下此现象更为明显。

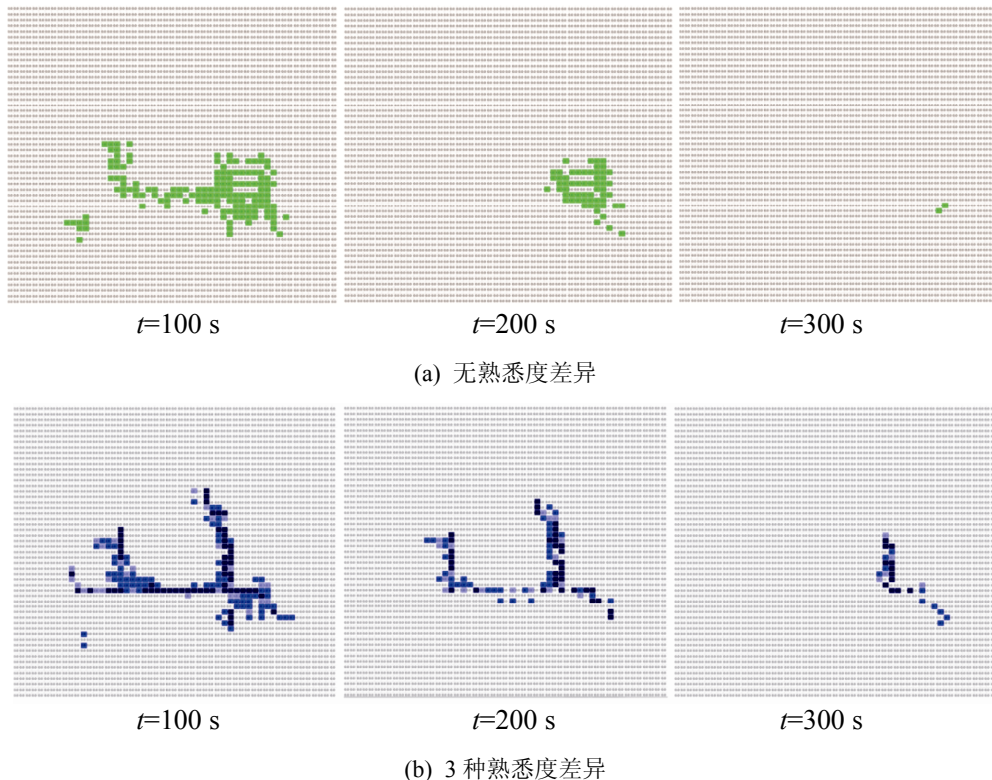


图 10 仿真结果对比图

Fig. 10 Comparison of simulation results

<http://www.china-simulation.com>

• 2939 •

5 结论

Cell-DEVS 能够胜任离散空间、离散时间与离散事件混合系统的建模与仿真,模型允许引入多变量(multi-variables)与多端口(multi-ports),实现多维系统的集成与建模过程的简化。本文构建的人员疏散系统中,初始值变量 layout 可以定义建筑布局环境, velocity 调控人员流动速率, pathway 铺设最短路径;端口变量 phase 与 movement 定义行人移动规则, familiarity 赋予个体社会化属性。通过状态转移规则的定义将“建筑环境—个体移动—社会化互动”3个子系统耦合,使复杂的物理行为、个体与环境间互动、个体间互动的描述更加深入,提升模型中个体行为的智能化,使仿真结果更加贴近现实。

然而,影响应急疏散系统的社会化互动因素十分丰富,接下来的研究将探讨情绪蔓延、领导力等影响组群间互动的社会化因素的引入及建模仿真,深化模型驱动理论与计算机仿真技术在社会科学领域的应用。

参考文献:

- [1] 李勇建, 乔晓娇, 孙晓晨, 等. 基于系统动力学的突发事件演化模型[J]. 系统工程学报, 2015, 30(3): 306-318. Li Yongjian, Qiao Xiaojiao, Sun Xiaochen, et al. Modeling the evolution of emergency based on system dynamics [J]. Journal of System Engineering, 2015, 30(3): 306-318.
- [2] Shi X, Ye Z, Shiwakoti N, et al. Empirical investigation on safety constraints of merging pedestrian crowd through macroscopic and microscopic analysis[J]. Accident Analysis & Prevention (S0001-4575), 2015, 95(Pt B): 405-416.
- [3] Santos G, Aguirre B E. A critical review of emergency evacuation simulation models[J]. Proceedings of M Massink, 2004.
- [4] Kisko T M, Francis R L, Nobel C R. Evacnet4 user's guide[J]. University of Florida, 1998.
- [5] Authority U K A E. A technical summary of the AEA Egress Code[R]. Technical report AET/NOIL/27812001/002(2), 2002.
- [6] Fu L, Song W, Lv W, et al. Multi-grid simulation of counter flow pedestrian dynamics with emotion propagation[J]. Simulation Modelling Practice & Theory (S1569-190X), 2016, 60: 1-14.
- [7] Thompson P A, Marchant E W. Testing and application of the computer model 'SIMULEX'[J]. Fire Safety Journal (S0379-7112), 1995, 24(2): 149-166.
- [8] Fahy R F. User's Manual, EXIT89 v 1.01, An evacuation model for high-rise buildings[K]. Quincy, Ma, National Fire Protection Association, 1999.
- [9] Feinberg W E, Firescap: A computer simulation model of reaction to a fire alarm[J]. Journal of Mathematical Sociology (S0022-250X), 1995, 20(2/3): 247-269.
- [10] Galea E R, Lawrence P J, Gwynne S. Building EXODUS V4. 06 user guide and technical manual ver. 1.2[K]. University of Greenwich, England, 2006.
- [11] Zeigler B P, Praehofer H, Kim T G. Theory of modeling and simulation: integrating discrete event and continuous complex dynamic systems[M]. Academic press, 2000.
- [12] 张建春, 康凤举. 面向可组合的基于混合 DEVS 的鱼雷仿真本体[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(10): 2232-2238. Zhang Jianchun, Kang Fengju. HDEVS-based torpedo simulation ontology towards composability[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(10): 2232-2238.
- [13] 胡建鹏, 黄林鹏. 基于 P-DEVS 的可执行体系结构建模与仿真方法[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(2): 283-291. Hu Jianpeng, Huang Linpeng. Modeling and simulation of executable architecture based on P-DEVS[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(2): 283-291.
- [14] Wang S, Van Schyndel M, Wainer G, et al. Devs-based building information modeling and simulation for emergency evacuation[C]//Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, 2012: 1-12.
- [15] Al-Habashna A, Wainer G. Modeling pedestrian behavior with Cell-DEVS[J]. Simulation (S0037-5497), 2016, 92(2): 117-139.
- [16] Bouanan Y, El Alaoui M B, Zacharewicz G. Using devs and cell-devs for modelling of information impact on individuals in social network[C]//IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems. Springer Berlin Heidelberg, 2014: 409-416.
- [17] Moallemi M, Arya A, Wainer G. Simulation of three dimensional elevator system using cell-DEVS formalism [C]//Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference. Society for Computer Simulation International, 2010: 156.
- [18] Aliyu H O, Maïga O, Traoré M K. The high level

- language for system specification: A model-driven approach to systems engineering[J]. *International Journal of Modeling Simulation & Scientific Computing* (S1793-9623), 2016, 7(1): 1641003.
- [19] 邱晓刚, 段伟. DEVS 研究进展及其对建模与仿真学科建立的作用[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(21): 6697-6704.
Qiu Xiaogang, Duan Wei. On research development of DEVS and its function to modeling and simulation discipline[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(21): 6697-6704.
- [20] 荣冈, 肖俊, 胡云莘, 等. 一种基于本体的 DEVS 建模方法[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(12): 2878-2890.
Rong Gang, Xiao Jun, Hu Yunping, et al. Ontology based DEVS modeling method[J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(12): 2878-2890.
- [21] Al-Zoubi K, Wainer G. Distributed simulation of DEVS and Cell-DEVS models using the RISE middleware[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*(S1569-190X), 2015, 55: 27-45.
- [22] Wainer G A. *Discrete-event modeling and simulation: a practitioner's approach*[M]. CRC Press, 2009.
- [23] 赵宜宾, 黄猛, 张鹤翔. 基于元胞自动机的多出口人员疏散模型的研究[J]. *系统工程学报*, 2012, 27(4): 439-445.
Zhao Yibin, Huang Meng, Zhang Hexiang. On multi-exit occupant evacuation model based on cellular automaton [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2012, 27(4): 439-445.
- [24] Bejan A. Constructal law: Pleasure, golden ratio, animal locomotion and the design of pedestrian evacuation: Comment on “The emergence of design in pedestrian dynamics: Locomotion, self-organization, walking paths and the constructal law” by A. Miguel[J]. *Physics of life reviews*(S1571-0645), 2013, 10(2): 199-201.
- [25] López A, Wainer G. Improved Cell-DEVS model definition in CD++[C]//*International Conference on Cellular Automata*. Springer Berlin Heidelberg, 2004: 803-812.
- [26] Wang S, Wainer G, Rajus V S. Occupancy analysis using building information modeling and Cell-DEVS simulation[C]//*Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation-DEVS Integrative M&S Symposium*. Society for Computer Simulation International, 2013: 26.
- [27] Wang S, Wainer G. A simulation as a service methodology with application for crowd modeling, simulation and visualization[J]. *Simulation*(S0037-5497), 2015, 91(1): 71-95.
- [28] Durupinar F. *From audiences to mobs: Crowd simulation with psychological factors*[D]. Bilkent University, 2010.

《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心,发布了 2017 版《中国学术期刊国际引证年报》,《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”。

《年报》(2017 版)采用的统计源期刊为 20192 种,涵盖 WoS 收录的 SCI 期刊 8874 种、SSCI 和 A&HCI 期刊 4645 种,ESCI 期刊 5578 种;增补期刊 1762 种。参照中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标,计算期刊影响力指数(CI),对国内 6210 种学术期刊排序,遴选了人文社科、自然科学与工程技术两个类别的 TOP10%为国际影响力品牌学术期刊。TOP5%以内的期刊为“最具国际影响力学术期刊”、TOP5-10%之间的为“国际影响力优秀学术期刊”。