灾害应急反应建模与仿真*

尹全军,秦 龙,陈 伟,崔浩浩
(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

摘 要:为了满足多智能体应急反应仿真的需求,首先对构建多智能体应急反应仿真模拟框架的复杂性进行了分析,在此基础上提出并设计了组件式仿真模拟框架。采用本体(Ontology)建模、语义网模型及产生式规则推理等理论方法构建了仿真模拟框架的场景建模模块、人员 Agent 建模模块等组件。最后对依照上述研究内容所开发的原型系统进行了测试,对测试结果进行了分析,结果表明该框架能够有效满足多智能体应急反应仿真的建模需求。

关键词:应急反应;多智能体;本体建模;语义网
中图分类号:TP391.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2012)01-0043-05

Disaster emergency response modeling and simulation

YIN Quanjun, Qin Long, CHEN Wei, CUI Haohao
(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to meet the requirements of multi-agents (MAS) emergency response simulation, the complexity of building a MAS emergency response simulation framework was firstly analyzed. Based on this, the Component Simulation Framework (CSF) was proposed and designed. Through using theories and methods of Ontology, Semantic Net and Production Rules Reasoning, the architecture of scene-modeling and evacuee agents-modeling which work as critical components of CSF were constructed. Finally, the test to the prototype system which is implemented as the framework was carried out, and the result shows that it can efficiently meet the requirements of multi-agents emergency simulation.

Key words: real-time system; energy-efficient scheduling; multi-core; dynamic slack time

对于大型商场、电影院等人员密集区域,能否建立有效的灾害应急反应决策机制,将是灾害发生时能否及时组织人员撤离,最大限度降低生命和财产损失的关键。一个有效的应急反应决策机制应具备决策者和管理者所设定的应急预案、合理的预警传感网络、能够提供导航功能的逃生通道以及行之有效的处理规范。从实现手段上看,其设计和建设一般通过演习或仿真模拟两种途径实现。随着仿真技术的不断发展,后者在耗费比、可重复性等方面的优势日益突出,使用越来越普遍。因此需要设计和构建能够满足决策人员建模、仿真和结果分析的灾害应急仿真模拟框架体系,该框架能够根据用户所预设的应急措施设置灾害发生的想定场景,模拟该场景下的灾害响应效果,通过对仿真结果的记录和分析反过来检验应急方案的优劣,进而对应急方案设计提出有效的改进意见。目前这一问题逐渐成为一个研究热点,Massaguer 等所提出的 DrillSim[1] 是一种将真实场景中预警传感网络等硬件设置与实现了灾害效应、人员 Agent 等模型的仿真环境相结合的框架结构;而 Filippoupplitis 等针对多 Agent 灾害应急响应模拟的运算复杂性提出了 DBES (Distributed Building Evacuation Simulator) 结构[2];Korhonen 等则重点研究人员 Agent 个性、环境交互等因素对决策行为的影响,进而介绍了以 FDS(Fire Dynamics Simulator)为代表的应用工具发展现状[3]。这些研究在混合仿真、模型分类、并行计算、Agent 个性差异及环境要素影响等方面提出了很多值得借鉴的观点和方法。然而对多智能体灾害应急反应仿真模拟框架的功能需求、结构设计、理论依据和技术实现方面没有作更深入的论述。

本文在对多智能体灾害应急反应仿真模拟复杂性分析的基础上提出了组件式仿真模拟框架,设计和实现了相应的场景建模模块、人员 Agent 建模模块等组件。对原型系统的测试结果表明能

* **收稿日期**:2011-07-20
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60904055);国家部委资助项目
作者简介:尹全军(1976—),男,湖南益阳人,副教授,博士,E-mail:yin_quanjun@163.com

够有效满足进行灾害应急仿真模拟的需求。

1 灾害应急反应仿真模拟复杂性分析

多智能体应急反应仿真模拟框架的复杂性主要体现在以下几个方面:1)灾害场景建模方法:为了满足场景建模的可重构、可扩展需求,需要对场景描述要素、建模语言、数据交换格式等相关理论方法进行研究;2)灾害效应建模方法:为了构建真实的灾害效应模型,需要对各种灾害的发生机理、过程演变等运用数学方法进行分析建模,并最终转化为仿真模型;3)人员 Agent 建模方法:需要构建用于模拟灾害环境下的智能体感知、决策和行为过程,人员 Agent 的决策循环,其难点在于智能体的认知表达、具有个体差异性的智能决策行为模拟以及智能体与环境间的感知输入和执行输出的接口设计。此外还包括模型资源管理、仿真引擎、图形用户接口等。

2 组件式灾害应急反应仿真模拟框架

在对多智能体灾害应急反应仿真模拟复杂性分析的基础之上,本文提出了如图 1 所示的仿真模拟框架。

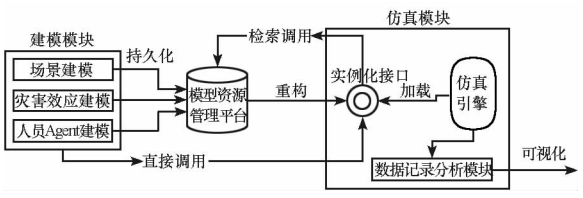


图 1 多智能体应急反应仿真模拟框架

Fig. 1 Multi-agent emergency response simulation framework

如图 1 所示,建模人员通过建模模块所提供的用户接口完成场景、灾害效应以及人员 Agent 模型的设计开发工作;模型资源管理平台实现对不同类型模型资源持久化管理,面向仿真模块提供模型检索,以实现模型资源的重用;仿真模块在仿真引擎的统一管理下实例化模型并进行仿真,记录分析数据并调用接口实现输出。

2.1 场景及灾害效应建模模块的构建

场景建模模块的主要作用是为用户提供一种基本建模要素(如房间、通道、障碍物等)的结构化场景建模方法,同时为了满足模型数据的重用需求,需要给出支持跨平台应用的数据交换格式。本文采用本体论(Ontology)思想构建场景本体[4]来实现获取和分析领域知识,场景本体回答了问题域中以概念(Conception)形式存在的描述要素有哪些,以及概念之间的语义关系(Semantic Relations)是怎样的,能够根据需要验证的应急方案完成如建筑物结构、楼层布局、预警网络、逃生通道网络等基本数据的设置;进一步,以资源描述框架[5](RDF: Resource Description Frame)构建场景本体的模型数据交换格式,RDF 作为由 XML 语法规范定义的本体描述语言,包含本体描述语法模式定义和本体数据两部分,前者按照本体中概念要素种类以及要素之间的语义关系定义语法格式,后者则按照定义来结构化存储用户输入的模型本体数据,以此保证本体表达的完整性。同时 XML 的跨平台性也很好地满足了重用需求。以单层建筑物场景建模为例,图 2 为楼层的数据交换格式略表。

```
<xs:element name="楼层"><xs:complexType><xs:sequence>
        <xs:element name="id" type="xs:int"/> <xs:element name="房间总数"
type="xs:int"/>
    <xs:element name="通道总数" type="xs:int"/> <xs:element name="建筑面
积"/>
        <xs:element name="房间本体" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded">
        …… </xs:element>
        <xs:element name="通道本体" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded">
        …… </xs:element>
        <xs:element name="楼层平均高度" type="xs:int"/>
    </xs:sequence> </xs:complexType> </xs:element> </xs:schema>
```

图 2 楼层本体数据交换格式

Fig. 2 Data interchange format of single floor ontology

如图 2 所示,楼层本体以结构化形式表达了类概念(楼层、房间、通道)、属性概念(楼层的 ID、所包含房间)及概念之间的语义关系(包含关系、类属关系)等,而这些要素都遵循楼层本体的描述要素约束,用户可以通过扩展楼层本体来丰富领域描述,满足仿真模块对场景实例化的数据需求。

与场景模型的结构化描述特点不同,灾害效

应模型具有时变连续的特点,其建模方法一般遵循数学建模→仿真建模的技术路径,以火灾效应建模为例,钟茂华[6]、McGrattan[7]等分别在其著作中列出了建筑物中压力、温度、气体浓度等要素的空间分布随时间 t 变化的动力学方程表达式,主要可以由以下公式(1)~(5)的数值求解得到:

连续方程:其中 ρ 为密度,t 为时间,$\boldsymbol{u}$ 为速度矢量。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla g\rho\boldsymbol{u} = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程:其中 $\boldsymbol{f}$ 为作用于流体上的外力矢量,p 为压力,τ 为黏性力张量,ω 为涡度,g 为重力加速度。

$$\rho\left(\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \frac{1}{2}\nabla g|\boldsymbol{u}|^2 - \boldsymbol{u}\times\omega\right) + \nabla p - \rho g = \boldsymbol{f} + \nabla g\tau \tag{2}$$

组分守恒方程:其中 i 是第 i 种组分,Y_i 是第 i 种组分的浓度,D_i 是第 i 种组分的扩散系数,$\boldsymbol{m}_i$ 是第 i 种组分的质量产生速率。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla g(\rho Y_i\boldsymbol{u}) = \nabla(\rho D_i \nabla Y_i) + \boldsymbol{m}_i \tag{3}$$

能量守恒方程:其中 h 为比焓,q_r 为热辐射通量,T 为温度,k 为导热系数。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla g(\rho h\boldsymbol{u}) = \frac{\partial p}{\partial t} + \boldsymbol{u}g\nabla p - \nabla \boldsymbol{q}_r + \nabla g(k\nabla T) + \sum_i \nabla(h_i\rho D_i \nabla Y_i) \tag{4}$$

状态方程:其中 R 为气体常数,M 为混合气体的分子质量。

$$p_0 = \rho TR\sum(Y_i/M_i) = \rho TR/M \tag{5}$$

灾害效应建模模块负责在仿真开始前根据用户选择的灾害类型调用并实例化相应的数学模型,根据仿真时间的推进在每个人员 Agent 决策周期的开始,输出当前时刻的灾害模型变量值,如烟雾浓度、温度、CO 浓度等,这些灾害效应信息被感知决策模型获取并构建相应的语义网陈述,以支持人员 Agent 的智能决策行为。

2.2　人员 Agent 建模模块的构建

作为应急仿真模拟框架中的基本智能行为单元,如图 3 所示,在每个决策周期,人员 Agent 的行为可分为认知行为和物理行为两部分,前者负责感知环境模型在当前时刻的输出并基于决策知识库进行决策推理,这些感知信息应该被有效地组织起来以短期知识的形式存入工作存储器(Working Memory),短期知识的描述方式要能够有效支持长期知识库实现数据驱动的推理决策。决策结果再通过接口以行为命令的形式交付给对应的物理行为模型执行,以改变世界状态。

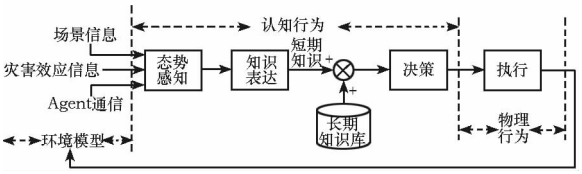


图 3　人员 Agent 决策行为过程

Fig. 3　Evacuee Agent decision-making procedure

2.2.1　语义网实现态势感知和知识表达

人员 Agent 对态势的感知行为体现为构建当前时刻的语义网[8]认知模型,该模型由认知单元——陈述(statement)组成,每个陈述包含:主语(subject)、谓词(predication)、客体(object)。客体可以是一个表达具体语义的值,也可以是另一个陈述的主语。如图 4 为仿真时间 T 时某人员 Agent 的语义网感知模型示意图:

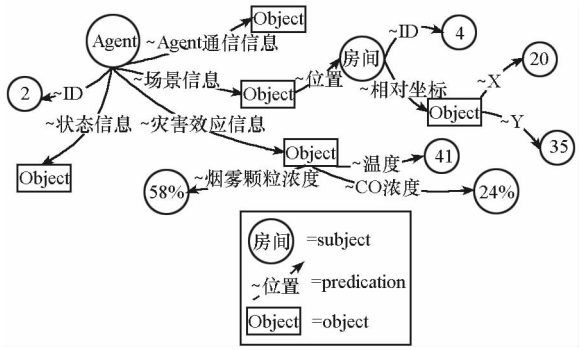


图 4　人员 Agent 语义网感知模型

Fig. 4　Cognitive semantic net of evacuee agent model

该图直观体现了 T 时刻某智能体对客观世界的认知,在具体实现时需要将其转化为资源描述框架(RDF)的格式化文档以供图 1 中的模型实例化接口读取和解析,文献[9]对语义网本体的 RDF 描述作了较为全面的研究和论述。

2.2.2　基于产生式规则的推理决策

态势感知被表达为如图 4 所示的语义网模型,进而被实例化为树型数据结构,此时智能体开始进行推理决策。如图 3 所示,智能体推理的依据是长期知识库中存储的产生式规则,每一条规则由前件(condition)和行为(action)组成,规则项可以包含值、数学逻辑表达式、变量等。智能体在每一个决策周期首先将认知树转化为以陈述为单元的命题集合,然后依据产生式规则推理的合一算法[10]与规则进行匹配,在完成优先级比较或冲突消解之后得到下一步行为,该行为将通过输出接口控制行为模型执行。如表 1 为简单的规则集合,可知当语义网模型中存在温度或 CO 浓度或

烟雾浓度的陈述,并且域值超过经验值时,规则匹配成功,智能体行为模型的移动速度、视线距离将会被改变。

表 1 人员 Agent 行为规则示例

Tab. 1 Rule instance for evacuee agent

规则前件	规则后件
Condition: {(Agent ~ 灾害效应信息 O)(O ~ 温度 > 40 ~ CO 浓度 > 20% ~ 烟雾颗粒度 > 30%)}	→Action {(Agent 行为模型 ~ 速度 V ~ 视线距离 D)(V ~ value 正常速度 * 2/3)(D ~ value 正常距离/2)}

本文所构建的人员 Agent 和智能管理系统 Agent 的感知决策模型在技术实现上采用了 Soar 体系结构[11],该结构提供了支持多种编程语言的通用智能体建模接口,能够根据待验证的应急预案的需求设计构建相应的规则文件并进行动态加载。

2.2.3 决策模型与行为模型相分离的思想

由图 3 可以看出,人员 Agent 模型实现了感知决策和物理行为的分离,这是因为人的状态属性和行为可以采用面向对象建模,而感知决策模型通过加载不同的规则,可以使人员 Agent 的智能体现个体差异性,如消防队员和撤离者、成年人和儿童等在应急反应能力上的差别等。这种分离思想可以规范行为模型的设计,所有人员按照继承关系具备大致相同的状态属性和行为接口,而人员之间的差异则通过作为其"大脑"的感知决策模型来体现。

3 原型系统设计实现及仿真实例分析

为验证本框架的有效性,设计开发了原型系统,本文以大型 KTV 楼层火灾应急反应仿真为例对原型系统的功能和实验结果进行了测试。原型系统首先通过场景建模模块为用户提供了构建建筑物场景的本体,其描述语言为 XML Schema,用户基于该本体创建如图 2 所示的自定义建筑物模型文档。所构建的楼层模型包含了建筑物基本结构信息,基于该模型的三维模型效果如图 5(a)所示。

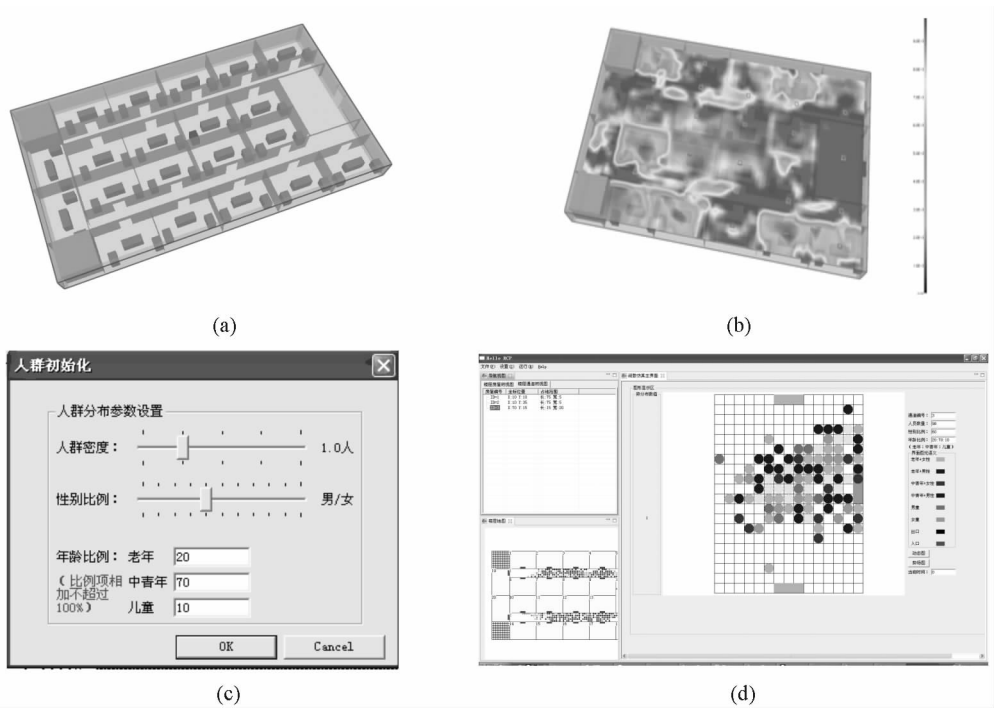


图 5 原型系统仿真效果示意图

Fig. 5 Prototype system simulation snapshot

模型采用基于 Soar[10] 智能引擎结构的行为建模环境进行设计和开发,在 steam[11] 协同行为模型的基础上增加了基于辩论的分层协商模型,用于对冲突情况的处理。模型的测试在课题组已有的仿真运行与测试环境上进行,并根据上述想定进行模型初始化。

仿真模块的模型实例化接口随着仿真时间的推进计算出灾害效应建模模块所提供的温度、烟雾浓度、一氧化物浓度等模型数据,进而通过实例化接口组装成语义网模型,供人员 Agent 进行感知。火源点产生的实时数据和利用 FDS 构建的楼层三维模型效果分别如表 2 及图 5(b)所示。可见随着时间的推进,烟雾浓度、温度及一氧化物浓度呈现上升趋势,火势从火源点沿通道扩散。

人员 Agent 模型模块为用户提供的人群初始化接口如图 5(c)所示,用户可对人群密度、性别比例、年龄比例等进行设置,系统根据设置的类型按照概率分布随机产生智能体并加载与之类型匹配的行为规则配置文件,由此产生的个体差异性将导致人员 Agent 的路径选择能力、移动速度、应急反应能力等的不同。用户可以在仿真运行的过程中调取如图 5(d)某个房间的实时二维监测画面。

表 2　火灾效应模型仿真数据略表

Tab. 2　Fire simulate data table

仿真时间 (min)	烟雾浓度 (kg 颗粒/kg 空气)	温度 (℃)	一氧化物浓度 (kg/kg 空气)
0	0	20	0
4.7005205	3.9619261E－68	19.999301	1.57048E－67
9.7162018	1.1547089E－40	19.998222	3.4641841E－40
14.707346	1.272829E－20	19.997622	3.8184869E－20
19.713068	0.0000051698112	20.410909	0.000015509433
24.709322	0.000096778699	26.745562	0.0002903361
29.710047	0.00055505074	54.098193	0.0016651522
34.724113	0.00037473329	43.698777	0.0011241999

系统的数据记录分析模块在仿真运行过程中记录的楼层人员逃逸情况如图 6 所示:仿真时间为 30min,以 5min 为间隔采样仿真数据,在不考虑智能体间协同能力的前提下,成年群组逃逸情况最好(74.12%),老年其次(62.22%),儿童速度最慢(36.92%)。在最初的预警区间人员逃逸缓慢,主要原因是火灾效应未达到感知域值,人员 Agent 语义网感知模型没有读入相应的陈述,从而无法匹配逃生规则,此阶段人员多做随机移动;制动区间里随着仿真时间推移,人员 Agent 逃逸能力受到温度、CO 浓度及烟雾浓度影响而逐渐减缓;危险区间人员数量基本维持不变,可视为逃逸失败。

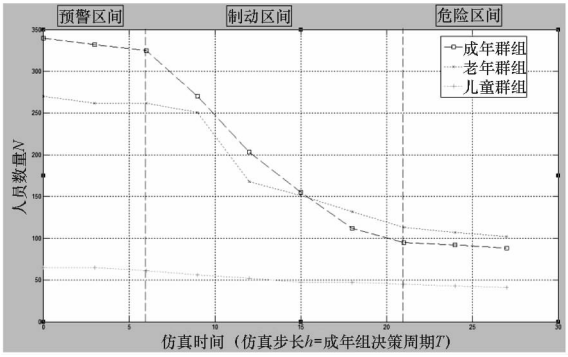


图 6　人员逃逸情况统计表

Fig. 6　Statistics diagram for evacuees

4　结　论

组件式多智能体应急反应仿真模拟框架基本满足了应急反应建模与仿真的需求,以本体建模、语义网模型、规则推理等理论和方法的运用,较为全面地论述了该框架的重要模块的设计构造思想。在下一步的工作中可就以下问题进一步展开:1) 对人员 Agent 的应急反应心理及行为建模的研究,构建逼真的人类行为模型;2) 群体效应模型研究,特别是人员 Agent 之间存在协同行为的情况下逃逸人群的整体行为特性研究。

参考文献(References)

[1] Massaguer D, Balasubramanian V, Mehrotra S, et al. Multi-agent simulation of disaster response[J]. U. S. Information Proceeding and Management, 2006: 35－42.

[2] Filippoupplitis A, Gelenbe E, Gianni D, et al. Distributed Agent-based building evacuation simulator[J]. U. S. Oxford Journals, Mathematics & Physical Science, Computer Journal, 2011,53(9):1384－1400.

[3] Korhonen T, Hostikka S, Heliövaara S, et al. Integration of an Agent based evacuation simulation and the state-of-the-art fire simulation[C]//7th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Sep, 2007:20－22.

[4] 冯志勇, 李文杰, 李晓红. 本体论工程及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
FEN Zhiyong, LI Wenjie, LI Xiaohong. Ontology engineering and implementation[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)

[5] Decker S, Melnik S, Harmelen F V, et al. The Semantic Web: the Roles of XML and RDF[M]. Springer-Verlag, 2001: 17－37.

[6] 钟茂华. 火灾过程动力学特性分析[M]. 北京:科学出版社, 2007.
ZHONG Maohua. Analysis on fire dynamical procedure[M]. Beijing:Science Press, 2007. (in Chinese)

[7] McGrattan K, Hostikka S, Floyd J, et al. Fire dynamics simulator (Version 5) technical reference guide[M]. Washington: U. S. Government Printing Office, 2009.

[8] Berners-Lee T, Hendler J, Lassila O. The semantic web[J]. Scientific American, 2001, 284 (5): 34－43.

[9] Davies J, Fensel D, Harmelen F V. Towards the semantic web ontology-driven knowledge management[M]. John Wiley & Sons Ltd,2003.

[10] Nerode A, Shore R A. Logic for applications[M]. New York: U. S. Springer-Verlag, 1997.

[11] Laird J E, Congdon C B. The soar user's manual (Version 9.0)[EB/OL]. [201-10-08]. http://www.laird@umich.edu. 2008.