

● 本书获得重庆市科学技术协会学术著作资助出版

复杂自适应系统 联合仿真建模理论及应用

FUZA ZISHIYING XITONG
LIANHE FANGZHEN JIANMO LILUN JI YINGYONG

复杂自适应系统通常由许多并行的适应性主体组成，具有多层次的结构，具有智能性和自适应性，并呈现“涌现”的特征，难以对其进行形式化的解析与验证。仿真是研究复杂自适应系统的一个重要途径，通过对系统进行形式化描述，建立分布式协同仿真模型，对于领域专家研究系统行为和特性、预测系统变化范围和发展趋势，领域人员从事系统内的作业活动、进行业务训练和演习等，都具有十分重要的意义。

曹琦 著

CAS



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

• 本书获得重庆市科学技术协会学才

复杂自适应系统 联合仿真建模理论及应用

FUZA ZISHIYING XITONG
LIANHE FANGZHEN JIANMO LILUN JI YINGYONG

曹琦 著



CAS

重庆大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

复杂自适应系统联合仿真建模理论及应用/曹琦
著. —重庆:重庆大学出版社,2012. 12

ISBN 978-7-5624-7172-1

I. 复… II. ①曹… III. ①自适应控制系统—系统
复杂性—系统仿真②自适应控制系统—系统复杂性—系统
模型 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 001942 号

复杂自适应系统联合仿真建模理论及应用

曹琦 著

责任编辑:章可 版式设计:章可
责任校对:邹忌 责任印制:赵晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023)88617183 88617185(中小学)

传真:(023)88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

*

开本:890×1240 1/32 印张:6.75 字数:250千

2012年12月第1版 2012年12月第1次印刷

印数:1—2 000

ISBN 978-7-5624-7172-1 定价:20.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前 言

QIANYAN

复杂自适应系统通常由许多并行的适应性主体组成,具有多层次的结构以及智能性和自适应性,并呈现“涌现”的特征,难以对其进行形式化的解析与验证。仿真是研究复杂自

适应系统的一个重要途径,通过对系统进行形式化描述,建立分布式协同仿真模型,对于领域内的专家研究系统行为和特性、预测系统变化范围和发展趋势,相关人员从事系统内的作业活动、进行业务训练和演习等,都具有十分重要的意义。

目前,国际上基于复杂自适应系统理论的仿真建模,均以 Agent/Swarm 为基本单元,对于小规模的系统建模方便,仿真速度较快。但是,随着系统规模的增大,大量主体间的交互问题对仿真提出了更高的要求,需要进一步实现分布交互式仿真;基于事件队列调度的 Swarm 不能充分仿真主体间事件的随机性,需要采用更为有效的方式实现仿真对象之间的协同性;传统数学模型不能很好地描述系统推进过程中表现出的复杂态势变化与内在的动力学机制,需要进一步刻画系统的动态性;Swarm 中更关注的是主体个体的自主性能,对各群体的中央控制及其相互间的横向联系并没有进行深入描述,需要在层次化、模块化方面进行加强。

针对上述问题,本书在系统概述复杂自适应系统基础理论的基础上,提出了联合仿真建模理论构成与技术框架;将 Agent 建模思想引入到具有层次化、模块化优势的 DEVS 建模规范中,将其扩展为 Agent-DEVS 形式化描述规范;在 HLA 体系结构下,实现了 Agent-DEVS 模型的分布交互式协同仿真;基于 SVM 学习方法,完成了 Agent-DEVS 模型的参数优化;最后构建了抢险救灾物资保障模拟训练原型系统。归纳起来,本书主要的创新性成果包括:

(1) 提出了一种能够对智能性和协作性进行描述的离散事件系统规范 Agent-DEVS。该规范以并行 DEVS 为基础, 状态元组被扩充成为 Agent 特征元组, 增加了体现个体智能性的 Agent 模型元组, 并将模型端口的输入、输出扩展成为体现社会协作性的 Agent 消息类型。书中分析了其原子模型与耦合模型的形式化描述, 证明了 Agent-DEVS 模型的耦合封闭性, 并给出了模型实现算法。仿真试验结果表明: ① Agent-DEVS 规范能够直接描述智能行为。其优势主要体现在建模性能上, 通过将各类参数转化为知识库中的变量, 并建立相应的处理函数集, 可以描述更加复杂的智能行为。② Agent-DEVS 规范能够较好地描述协作行为。通过模型间的相互协作, 可以动态修改知识库中的信息, 提高了模型独立处理事务的能力, 增强了自治性。③ Agent-DEVS 模型实现算法在时间复杂度和执行效率上并不逊色。在计算时间上, 该算法仅在最内层原子模型中增加了 Agent 处理的步骤, 对整体复杂性和运行速度方面的影响不大, 执行效率与 DEVS/CD++ 基本相当。

(2) 研究了基于 HLA 的 Agent-DEVS 协同仿真建模方法。书中提出了基于 HLA 的 Agent-DEVS 联邦模型的形式化描述, 将 Agent-DEVS 模型端口转换为 HLA 数据对象, 确定了 Agent-DEVS 联邦模型结构, 并分析了通信机制, 分别建立了 Agent-DEVS 的知识更新与 HLA 的属性更新, 及 Agent-DEVS 的模型耦合与 HLA 的实例交互间的映射, 设计了 Agent-DEVS 联邦模型在 HLA 中的仿真流程。仿真试验结果表明: ① HLA 体系框架增强了 Agent-DEVS 模型的可重用性。可以同时实现与 Agent-DEVS 模型、非 Agent-DEVS 模型间的分布式交互。② 知识更新机制丰富了 Agent-DEVS 模型的互操作性。将知识库的更新从模型耦合的交互中分离出来, 避免了耦合交互时的密集数据流量, 提高了知识库更新效率。③ 知识库的实时性提高了 Agent-DEVS 模型的独立事务处理能力, 自治性进一步增强。

(3)建立了基于 SVM 的 Agent-DEVS 模型参数优化模型。书中提出了基于 SVM 的 Agent-DEVS 模型参数优化的流程,着重针对抢险救灾物资保障仿真模型中的主要参数建立了优化模型,重点分析了数据提取与预处理、核函数选择、SVM 参数优选等关键技术,并与 BP 神经网络进行了对比试验。仿真试验结果表明:①SVM 学习方法增强了 Agent-DEVS 模型的动态性。通过较少的样本数据较好地预测了模型参数,达到了参数优化的目的。②自学习能力使 Agent-DEVS 模型的智能性进一步提高。机器学习方法可以处理更为复杂的智能行为,随着模型的深入应用和样本累积,预测能力将自动增强,具有较充分的自治性。③优化后的参数使 Agent-DEVS 模型的描述能力更加精细。将优化后的参数作为模型运行的依据,可以提高计算精度,增强描述对象的精细化程度。

(4)以上述研究为基础,形成了复杂自适应系统联合仿真建模理论,并将其应用于抢险救灾领域的模拟训练,构建了抢险救灾物资保障模拟训练原型系统。书中给出了系统建设目标与性能目标,从物资保障业务内容与组织实施过程两方面分析了抢险救灾业务,并由此提出了系统功能需求;阐述了三层系统结构,给出了基于联合仿真建模技术的仿真模型设计流程,并完成了基于 HLA 的分布式系统设计;分别建立了模拟训练系统评估指标体系与模糊综合评估模型,并对原型系统中的抢险救灾野营物资保障模拟训练子系统进行了评估分析。评估结果表明:该子系统的性能质量等级为“良”。

作 者

2012 年 10 月于重庆

目 录

1 绪 论	1
1.1 问题的提出及研究意义	2
1.1.1 问题的提出	2
1.1.2 研究的意义	3
1.2 国内外研究现状	5
1.2.1 基于 HLA 的仿真建模研究	5
1.2.2 基于 Agent 的仿真建模研究	6
1.2.3 基于 DEVS 的仿真建模研究	7
1.2.4 基于 SVM 的仿真建模优化研究	9
1.2.5 结论	10
1.3 研究内容及组织结构	11
1.3.1 主要研究内容	11
1.3.2 组织结构	15
2 复杂自适应系统基础理论概述	17
2.1 引言	18
2.2 复杂自适应系统的由来	18
2.2.1 第一代系统思想	18
2.2.2 第二代系统思想	19
2.2.3 第三代系统思想	20

2.3	复杂自适应系统的基本概念	21
2.3.1	复杂自适应系统的基本思想	21
2.3.2	复杂自适应系统的基本特性	21
2.3.3	复杂自适应系统的主要特点	23
2.4	复杂自适应系统的结构模型	25
2.4.1	适应性主体的刺激反应模型	25
2.4.2	复杂自适应系统的回声模型	27
2.5	复杂自适应系统的应用领域	30
2.5.1	复杂自适应系统在经济领域的应用	30
2.5.2	复杂自适应系统在管理领域的应用	32
2.5.3	复杂自适应系统在社会系统领域的应用	34
2.5.4	复杂自适应系统在生命科学领域的应用	35
2.5.5	抢险救灾是典型的复杂自适应系统	36
2.6	本章小结	39
3	复杂自适应系统联合仿真建模理论构成与技术框架	41
3.1	引言	42
3.2	复杂系统的研究策略	42
3.2.1	复杂系统的研究路线	43
3.2.2	复杂系统的研究方法	44
3.3	基于 MAS 的复杂自适应系统研究方法	47
3.3.1	Agent 与 MAS	47
3.3.2	基于 MAS 的仿真建模方法	49
3.4	复杂自适应系统联合仿真建模理论构成	52
3.4.1	动态性与智能性	53
3.4.2	层次化与模块化	54
3.4.3	分布式交互与协同性	54

3.4.4	自学习与参数优化	55
3.5	复杂自适应系统联合仿真建模技术框架	55
3.5.1	主要仿真建模技术的分项联合策略	55
3.5.2	联合仿真建模总体技术框架	58
3.6	本章小结	60
4	一种扩展的离散事件系统规范: Agent-DEVS	63
4.1	引言	64
4.2	DEVS 形式化描述规范	65
4.2.1	经典 DEVS 模型	65
4.2.2	图形化扩展模型	67
4.2.3	并行 DEVS 模型	67
4.3	抢险救灾物资保障 DEVS 模型实例	68
4.3.1	仿真实体分析	68
4.3.2	仿真流程与耦合模型	69
4.3.3	原子模型示例	71
4.3.4	仿真试验	74
4.4	Agent-DEVS 形式化描述规范	76
4.4.1	原子模型的形式化描述	76
4.4.2	耦合模型的形式化描述	79
4.4.3	模型的耦合封闭性	80
4.5	Agent-DEVS 模型实现算法	82
4.5.1	实现算法描述	82
4.5.2	时间复杂度分析	85
4.6	抢险救灾物资保障 Agent-DEVS 模型实例	87
4.6.1	原子模型示例	87
4.6.2	典型消息示例	89

4.6.3	仿真试验	91
4.6.4	结果分析	94
4.7	本章小结	95
5	Agent-DEVS 模型的协同仿真:HLA 方法	97
5.1	引言	98
5.2	HLA 高层体系结构	99
5.2.1	基于 HLA 的协同仿真体系结构	99
5.2.2	基于 RTI 的协同仿真工作机制	101
5.3	Agent-DEVS 联邦模型的形式化描述	104
5.3.1	原子模型的形式化描述	104
5.3.2	耦合模型的形式化描述	105
5.4	Agent-DEVS 联邦模型的通信机制	106
5.4.1	Agent-DEVS 联邦模型结构	106
5.4.2	Agent-DEVS 联邦模型接口映射方法	108
5.5	Agent-DEVS 联邦模型的仿真流程	110
5.6	抢险救灾物资保障协同仿真实例	112
5.6.1	联邦结构	112
5.6.2	对象类与交互类设计	113
5.6.3	仿真试验	115
5.6.4	结果分析	119
5.7	本章小结	120
6	Agent-DEVS 模型的参数优化:SVM 方法	121
6.1	引言	122
6.2	SVM 支持向量机	122
6.2.1	结构风险最小化	122

6.2.2	回归型 SVM	124
6.2.3	SVR 参数选择	126
6.3	基于 SVM 的 Agent-DEVS 模型参数优化流程	127
6.4	基于 SVM 的参数优化模型示例	130
6.4.1	数据提取与预处理	130
6.4.2	模型建立与核函数选择	133
6.4.3	SVM 模型参数优选	134
6.4.4	训练与测试	138
6.4.5	与 ANN 的比较	139
6.5	抢险救灾物资保障模型参数优化实例	141
6.5.1	仿真试验	141
6.5.2	结果分析	143
6.6	本章小结	144
7	抢险救灾物资保障模拟训练原型系统	145
7.1	引言	146
7.2	抢险救灾物资保障模拟训练原型系统分析	147
7.2.1	系统目标分析	147
7.2.2	保障业务分析	148
7.2.3	系统功能分析	154
7.3	抢险救灾物资保障模拟训练原型系统设计	155
7.3.1	系统结构设计	155
7.3.2	仿真模型设计	157
7.3.3	分布式设计	161
7.4	抢险救灾物资保障模拟训练原型系统评估	166
7.4.1	模拟训练系统评估指标体系	166
7.4.2	模拟训练系统模糊综合评估模型	167

7.4.3 野营物资保障模拟训练子系统评估实例	172
7.5 本章小结	175
8 总结与展望	177
8.1 主要工作	177
8.2 主要创新	180
8.3 后续研究工作的展望	181
参考文献	183

1

绪 论

复杂自适应系统 (Complex Adaptive System, CAS) 是指在特定的外部条件下, 可以通过自组织形成特定时空结构的有序状态, 在环境的影响下能够自组织、自学习、自适应, 不断演化形态而生存、繁衍和发展的系统。通常由许多并行的适应性主体 (Adaptive Agent) 组成, 具有多层次的结构以及智能性和自适应性, 每个主体会和其他主体或者环境相互交互而获取信息, 具有“涌现” (Emergency) 的特征。正是由于这类系统的复杂性, 对它们的行为、特性难以进行形式化的验证。因此, 仿真建模成为研究复杂自适应系统的一个重要途径。

1.1 问题的提出及研究意义

1.1.1 问题的提出

目前,国际上已经有多种基于复杂自适应系统理论的仿真建模系统^[1-2],具有代表性的有美国桑塔菲研究所的 Swarm、SourceForge 的 Repast、芝加哥大学社会与经济动态性研究中心的 Ascape、Sandia 国家实验室的 Aspen 等。在这些系统中,Swarm、Repast 和 Ascape 都采用相类似的结构和基于下一事件法的离散事件调度算法(Swarm-like),适合于规模不大、结构简单的复杂自适应系统,如糖料模型、蚂蚁寻食模型以及简单的股市模型等;Aspen 主要用于对美国经济进行微观分析。这些仿真建模系统中的基本单元为 Agent/Swarm;允许用户显式建造和测试对象模型,便于描述“涌现”现象;支持多种平台,模型可重用性较强;技术成熟,对于小规模复杂自适应系统建模方便,仿真速度快。但是,随着系统规模的增大,还需在以下方面进一步完善:

(1) 分布式交互

复杂自适应系统中 Agent 的数量非常大,交互问题是关键,随着系统研究的逐步深入,以及网络和 Internet 的普及,系统本身分布的特点和系统研究人员的分布性对仿真提出了更高的要求。因此,需要进一步实现分布式交互仿真。

(2) 协同性

Swarm 把各个仿真事件放到队列中进行调度,不能充分仿真 Agent 之间事件的随机性,难以反映 Agent 之间的关系。因此,需要采

用更为有效的方式,充分实现仿真对象之间的协同性。

(3) 动态性

传统数学模型把复杂自适应系统视为一个确定性过程,不能很好地描述系统推进过程中表现出的复杂态势变化与内在的动力学机制,需要进一步刻画系统的动态性。因此,需要采用更好的方法来刻画系统更为复杂的动态过程。

(4) 层次化

复杂自适应系统具有层次化的结构,但 Swarm 中更关注的是 Agent 个体的自主性能,及其小范围群体内的“涌现”特征,对各群体的中央控制及其相互间的横向联系并没有进行深入描述。因此,在层次化、模块化方面需要进行加强。

1.1.2 研究的意义

复杂自适应系统遍及很广,如金融领域中的市场规律、城市交通的流动模式、生态系统中的物种演化以及军事领域中的作战模拟等。通过对这些领域进行建模描述,建立分布交互式仿真框架,开发模拟仿真系统,对于领域内的专家研究复杂自适应系统的行为和特性、预测系统变化范围和发展趋势,领域内相关人员从事系统内的作业活动、进行业务训练和演习等,都具有十分重要的意义。

(1) 金融领域

金融领域作为一个复杂自适应系统,是由众多投资个体与机构,采用各自的投资策略进行博弈而形成的一个整体。影响金融领域的外部因素较多,从政治经济到社会心理,无一不对其产生各种微妙而深刻的影响,而预测金融系统的未来趋势,则是每位金融投资者孜孜以求的目标。通过仿真建立金融模型,则可以模拟该系统的行为,对仿真结果进行统计分析,综合预测市场的演化趋势,以取得较好的预

测效果。

(2) 交通领域

随着城市规模不断扩大,交通需求量不断增加,道路交通堵塞、拥挤、事故频发等现象显得越来越突出。在现有的条件下,单纯依靠拓宽、新建道路等途径来解决交通问题是不现实的。因此,只有通过研究城市交通系统的内在规律,建立智能交通系统,才能从根本上解决问题。交通仿真是智能交通系统的主要研究方法,通过它可以再现实际交通系统的特性,分析交通系统在各种设定条件下的行为。基于仿真模型试验的结果,去寻求现实交通问题的最优解,评价各类运输设计方案的效果等。

(3) 生态领域

生态领域也是一个复杂自适应系统,存在大量传统方法很难解决的问题。生态领域中小尺度的局部机制如何在大尺度下影响物种演化和生态景观,从而出现“涌现”行为的问题成为目前生态学研究中的一个重要课题。通过生态系统仿真,各个生态主体具有认知与自适应、自学习的能力,简单个体行为组成了复杂多变的生态景象,可以较好地理解生命活动行为、分析生态发展规律、预测物种演化结果,有助于生态系统的科学管理。

(4) 军事领域

军事领域是典型的复杂自适应系统,它涉及作战指挥、后勤保障、武器装备等众多子系统,还同时受气候、地理、政治、经济等内外部环境因素的制约,很难对其要素及活动进行量化分析和描述,再加上战场环境的复杂多变,具有许多不可预见性和不可再现性,难以开展大规模的实战演习与训练。通过军事仿真与建模,则可以建立起逼真的虚拟战场环境,对作战过程、毁伤效果、指挥决策等进行“实验”,达到训练军事人员、检验策略缺陷、预测计划效果、评估装备效能、启发军事思想的目的。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 基于 HLA 的仿真建模研究

美国国防部建模与仿真办公室(Defense Modeling and Simulation Office, DMSO)于1995年首先提出了用于解决军事仿真中异构仿真器间互操作和仿真对象可重用问题的接口标准 HLA (High Level Architecture)。作为新一代分布交互式仿真体系结构,HLA 是在综合了支持基于网络的、实时的、平台级的分布交互式仿真(DIS)协议和支持分布式的、逻辑时间的、构造性仿真的聚合级仿真协议(ALSP)的基础上提出来的,具有较高的起点。它明确定义了各类仿真模型的描述规范和接口规范,其核心由 HLA 框架与规则、运行时间支撑系统 RTI (Run Time Infrastructure) 接口规范和对象模型样板 OMT (Object Model Template) 组成^[3-5], 这为开发和执行协同分布式仿真应用提供了高层体系框架。美国国防部提出要建立一个全美国防领域的综合建模与仿真环境^[6]。一方面可以使整个国防领域的建模与仿真资源共享;另一方面可以创建大型虚拟世界。在一个前所未有的逼真环境中训练大规模的部队,进行作战任务的规划和演习,开发新的战术和作战概念,在新武器系统开发中对其效能进行虚拟测试和训练。目前,DMSO 已将工作重点从技术开发转向全面实施,并已成功开发出一些基于 HLA 的仿真应用^[7-8]。

作为分布仿真的 IEEE 标准^[9-12],HLA 已经开始从军事领域的应用转向其他领域(经济、交通、生物等)的应用。但 HLA 标准中没有涉及有关 HLA 联邦的建模方法,因此,如何高效、合理地建立基于