

基于 Agent 的建模与仿真概述

廖守亿¹, 陈 坚¹, 陆宏伟², 戴金海³

(1. 第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025;

2. 北京信息高技术研究所, 北京 100085;

3. 国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 基于 Agent 的建模与仿真 (ABMS) 是研究复杂系统的有效途径和建模仿真方法学, 是当前最具有活力、有所突破的仿真方法学, 已经成为系统仿真领域的一个新的研究方向。全面总结和阐述了基于 Agent 的建模与仿真的相关理论基础和概念, 包括 CAS 理论, ABMS 中 Agent 的概念、结构; 阐述了 ABMS 的原理 (简单规则导致复杂的行为) 与研究步骤; 总结了 ABMS 的主要应用领域, 包括经济领域、社会科学领域和军事领域; 概述了 ABMS 软件开发平台和工具包, 给出了 ABMS 开发方法; 给出了互联网上关于 ABMS 的资源链接。因而有利于全面认识、应用和研究 ABMS。

关键词: 复杂系统; 复杂性; 建模与仿真; 主体; 基于主体的建模与仿真

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

Summarization of Agent-Based Modeling and Simulation

LIAO Shou-yi¹, CHEN Jian¹, LU Hong-wei², DAI Jin-hai³

(1. The Second Artillery Engineering College, Xi'an Shanxi 710025, China

2. Beijing Information and High Technology Institute, Beijing 100085, China

3. College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

ABSTRACT Agent-based modeling and simulation (ABMS) is a new approach for modeling systems comprised of autonomous interacting agents and it is an effective method and modeling & simulation (M&S) methodology for complex systems. Some have gone so far as to contend that ABMS is a third way of doing science besides deductive and inductive reasoning. ABMS has become a new research hotspot in M&S domain. The theoretical and practical foundations, the concepts of ABMS such as CAS and agent were summarized wholly and systematically. The principles of ABMS, that is simple rules result in emergent organization and complex behaviors, and the steps which should be followed by ABMS were also presented. The major applications of ABMS range from economy, society, military, etc. were also summarized. After that, the tools and methods for developing ABMS models, why and when to do with ABMS were reviewed. Moreover, some resources of ABMS on Internet were presented with URL. Finally, some thoughts on the relationship between ABMS and traditional modeling techniques were provided.

KEYWORDS Complex systems; Complexity; Modeling and simulation; Agent; Agent-based modeling and simulation (ABMS)

1 引言

自然现象、工程、生物、人工生命、经济、管理、军事、政治和社会等领域复杂系统和复杂性研究的需求, 对传统的建模与仿真方法提出了挑战, 基于 Agent 的建模与仿真 (Agent-Based Modeling and Simulation, ABMS) 方法被认为是研究复

杂系统的有效途径, 是研究复杂系统的建模仿真方法学^[1], 是最具有活力、有所突破的仿真方法学。

ABMS 方法将复杂系统中各个仿真实体用 Agent 的方式 / 思想自底向上对整个系统进行建模, 试图通过对 Agent 的行为及其之间的交互关系、社会性进行刻画, 来描述复杂系统的行为。这种建模仿真技术, 在建模的灵活性、层次性和直观性方面较传统的建模技术都有明显的优势, 很适合于对诸如生态系统、经济系统以及人类组织等系统的建模与仿真。通过从个体到整体、从微观到宏观来研究复杂系统的复

基金项目: 武器装备预研基金项目 (51420010303KG0109)

收稿日期: 2007-05-28 修回日期: 2007-06-07

杂性,从而克服了复杂系统难于自上而下建立传统的数学模型的困难,有利于研究复杂系统具有的涌现性(Emergence)、非线性等特点。ABMS已成为一种思维方式,成为当前系统仿真领域的一个新的研究方向。

鉴于 ABMS 方法应用非常广泛,应用领域跨度很大,因此本文的目的在于总结并给出 ABMS 的完整的描述,系统全面地回答 ABMS 到底是什么的问题,即:① ABMS 是有用的,即在很多场合,ABMS 是非常好的甚至比其它方法更适合的建模与仿真方法;② ABMS 是可用的,即目前 ABMS 所取得的成果(包括软件环境以及应用经验和应用领域),这些成果使得 ABMS 可应用到具体的系统研究中;③ 怎样应用 ABMS,以便为具体的系统服务。

本文的内容包括:一:怎样认识 ABMS,包括 ABMS 的理论背景,需求牵引以及其基本概念;二:怎样进行 ABMS 的研究与应用,包括应用领域、ABMS 开发平台、ABMS 应用开发方法、ABMS 应用实例以及相关资源等。

2 ABMS 的理论基础与相关概念

2.1 ABMS 的理论基础——CAS 理论

ABMS 与复杂性科学、系统科学、系统动力学、计算机科学、管理科学和社会科学,以及传统的建模与仿真领域有着密切的联系。ABMS 从这些领域抽象出了自己的理论基础、建模技巧和术语词汇等,但 ABMS 有其直接的理论背景,那就是复杂适应系统理论(CAS)及其所蕴涵的自底向上的建模方式,这与传统的建模方法所倚重的自顶向下建模方式有所区别。

“复杂适应系统(CAS)理论”是遗传算法的提出者——霍兰于 1994 年在 SFI 成立十周年时正式提出的,CAS 理论是在他对系统演化规律的思考中得到的,其基本思想可以这样来概括:

系统中的成员称为具有适应能力的主体(Adaptive Agent),简称为主体。所谓具有适应性,就是指它能够与环境以及其它主体进行交互作用。主体在这种持续不断的交互作用的过程中,不断地“学习”或“积累经验”,并根据学到的经验改变自身的结构和行为方式。整个宏观系统的演化,包括新层次的产生、分化和多样性的出现,新的、经聚合而成的更大的主体的出现等等,都是在这个基础上逐步派生出来的。

2.1.1 CAS 理论中的个体及其基本性质

单独用主体这个概念,无法完全表达 CAS 理论的丰富内容。围绕主体这个核心概念,霍兰进一步提出了研究适应和演化过程中特别重要的 7 个有关 CAS 属性和机理^[2]:聚集、非线性、流、多样性、标识、内部模型、构件。通过这些概念,就可把主体的特点充分表现出来:它是多层次的、和外界不断交互的、不断发展和演化的活生生的个体。

这些 CAS 属性和机理为设计基于 Agent 的模型(Agent-Based Models ABMs)提供了一个有用的框架。然而,CAS 理论以及所提出的构建 ABMs 的方法框架具有明显的生物

学痕迹,并不是一个纯粹的建模与仿真框架,也并非完善的建模与仿真框架,需要进行完善与扩展。

2.1.2 适应性造就复杂性

CAS 理论的核心思想是“适应性造就复杂性”。这一点可从以下四个方面来说明:主体是主动的、活的实体;主体与环境之间(包括主体之间)的相互影响和作用,是系统演化的主要动力;把宏观和微观有机地联系起来;引进了随机因素的作用,使它具有更强的描述和表达能力。具体的论述见文献[1][2]。

正是由于以上这些特点,CAS 理论具有了其它理论所没有的、更具特色的新功能,提供了模拟生物、生态、经济、社会、军事等复杂系统的巨大潜力。

2.1.3 CAS 理论的贡献及其方法论基础

CAS 理论的最大贡献在于它提供了一种自底向上建模的研究方法。这种方法赋予组成系统的个体——Agent 以简单的规则和关系,通过计算机仿真来重现真实世界的复杂现象。传统的自顶向下建模方法要求明确给出目标系统的所有规则和关系,包括定性的和定量的、内部的和外部的,这种巨大的任务在实际系统研究中往往是十分艰巨的,因此自顶向下建模方法经常运用简化的方式,但是经常被简化到不能充分反映实际情况的程度;而自底向上建模集中于构造具有相对简单行为的个体 Agent,这些 Agent 可以被描述得很细,而系统的复杂行为来自于 Agent 之间的交互。

CAS 理论的核心概念是 Agent,其方法学基础是基于 Agent 的建模与仿真方法,它既是方法的创新,也是方法论的创新。基于 Agent 的建模与仿真与传统的基于数学模型的分析方法相比,不仅建模方法不同,而且也是方法论的更新,前者是生成论的,后者是构成论的。目前以 CAS 理论为基础的 ABMS 方法在人工生命、经济学、社会学以及军事对抗等领域有着大量的研究成果。

2.2 为什么需要 ABMS——需求牵引

为什么 ABMS 变得越来越广泛呢?其原因在于我们生活在越来越复杂的世界中。首先,需要分析和面对的系统越来越复杂,比如自然现象、工程、生物、人工生命、经济、管理、军事、政治和社会等系统。对这些系统的分析表明,传统的建模与仿真方法,明显地受到还原论和决定论的影响,无论是基于确定性模型的过程仿真还是基于概率模型的统计仿真方法,都不能解决具有预决、自适应、自组织及演化等复杂系统动力学特征的建模与仿真问题。其次,对于传统的建模方法而言,某些系统本身太复杂而不能很好地对它进行建模,例如陆战系统,经济系统,股票市场等。最后,由于计算机技术、信息技术等技术的高速发展,使得现在的计算能力得到了前所未有的提高,从而可以进行大规模的微观仿真计算,而这在以前是不可想象的。这些因素使得我们认识到传统的建模方法是不够的,必须探索新的方法。

2.3 涌现现象的产生——简单规则导致的复杂行为

ABMS 的理论背景的讨论最早开始于数学家康威开发

的基于元胞自动机 (CA) 的“生命的游戏”,可能能够说明 ABMS 的基本思想的最简单的办法就是通过元胞自动机。

基于简单的行为规则和 Agent 之间的交互关系,复杂系统似乎呈现出群体智能性,即使系统中不存在中央决策者的直接影响。复杂系统中的个体不但能够在环境中生存,而且具有自适应性,能够更好地适应环境,优化它们的行为。群体智能性已经催生了实际的优化技巧,比如已经产生的蚁群优化算法,该算法已被用到实际的调度和路径规划中。

Boilds 仿真系统是一个简单规则导致涌现行为的例子,该系统模拟了鸟类或鱼类的群集现象。在 Boilds 模型中,每个 Agent(鸟)具有 3 个简单的规则控制其运动,即:

①粘附规则,每个 Agent 尽量朝邻近 Agent 的中心运动;②分离规则,尽量避免与邻近 Agent 过于拥挤;③排列规则,尽量与邻近 Agent 的平均方向一致。

由于遵循这些简单规则的鸟的相互作用,出现了涌现现象——群集,而这种现象的形成并不需要一个领头者。Reynolds 的研究表明,使用具有简单的行动规则,并能根据一些局部的信息对环境做出反应的多个 Agent 可以完成更加复杂的任务。

2.4 ABMS 中的 Agent

Agent 的概念在不同学科领域具有不同的含义,有着不同的理解,其中文术语五花八门,译名包括“代理”,“自治体”,“主体”,“智能体”或“智能主体”等。由于理解的差异性以及 Agent 内容的丰富性,这些翻译都不能确切表达 Agent 的丰富内涵,特别是不能确切表现 ABMS 中的 Agent 的内涵,因此本文不试图寻找一个中文术语来代替它,而直接取原文“Agent”。

2.4.1 Agent 的概念

关于 Agent 的定义有多种,Stan Franklin, Wooldridge, Shoham 和 Lane 等学者都有着各自的定义。这些定义虽不统一,但 Wooldridge 给出的 Agent 强定义和弱定义,其中关于 Agent 的弱定义得到大多数研究者的认可,即:具有自治性 (Autonomy)、反应性 (Reactivity)、社会性 (Social ability) 和主动性 (Pro-activeness) 的硬件系统或基于软件的计算机系统称为弱概念意义下的 Agent。按照以上定义,最简单的 Agent 就是一个计算机进程。Agent 的弱定义的概念在许多领域被研究人员所接受。但在 AI 领域,许多研究者更强调 Agent 应具有一些人的特质,即人的精神状态,于是提出了 Agent 的强定义:除包括弱定义的四个特性外,Agent 还具有:知识和信念;意图与义务;诚实和理性等特性。

2.4.2 ABMS 中的 Agent

在复杂系统研究中,把组成复杂系统的具有主动性的个体或单元称为 Agent 研究这些 Agent 的个体行为如何导致整个系统的整体“涌现”行为。正如霍兰所说,“复杂适应系统毫不例外地由大量具有主动性的元素组成,为了说明具有主动性的元素,同时不求助于专门的内容,我借用了经济学中的 Agent 一词,这个术语是描述性的。”

● ABMS 中 Agent 的与其它领域 Agent 的区别

ABMS 中的 Agent 与经济学领域中的 Agent 以及计算机领域中的软件 Agent 不同,也不同于典型的移动 Agent (Mobile Agent) 系统中的 Agent。移动 Agent 是一种轻量级的软件 Agent 它为用户完成不同的功能,在一定程度上具有自主性。ABMS 同样不同于面向对象仿真,但面向对象的方法和技术是 ABMS 的一个有用的基础,一个 Agent 可被看成是具有某种动作选择能力的主动对象。鉴于此,大部分的 ABMS 软件工具包基本上都是以面向对象技术开发出来的。

ABMS 与多 Agent 系统 (MAS) 和 AI 中的机器人有着很强的联系,但 ABMS 并不是来设计和理解“人工”Agent。ABMS 的主要目的应该在于对个体的社会行为以及个体的决策行为进行建模^[3]。因此,ABMS 中对社会交互、协作、组织行为以及高阶社会结构的涌现行为是非常必要的。

ABMS 中的 Agent 具有计算机领域中的软件 Agent 人工智能领域中的智能 Agent 以及经济学领域中的 Agent 的特征,如 ABMS 侧重于仿真时,就兼具有软件 Agent 的特征,而建模时产生的 Agent 可能也具有某种智能性,因而具有智能 Agent 的特点。因此,ABMS 中的 Agent 通过计算机科学领域、AI 领域和经济学领域这些学科关于 Agent 的抽象、交叉、融合,共同形成了 ABMS 中关于 Agent 的概念。

● ABMS 中 Agent 的结构

从 Agent 的结构出发,单个 Agent 的结构通常分为慎思型 Agent 反应型 Agent 以及混合型 Agent。

慎思型 Agent 与反应型 Agent 之间的关系,实际上反映了这样一个问题:在 ABMS 中,应当采取何种策略来建立仿真系统,以便有效地满足问题的求解需要?是以少量的具有复杂结构和智能的慎思型 Agent 来解决问题,还是采用大量的具有简单行为的反应型 Agent 通过协作来求解问题,这是涉及到问题求解的有效性和建模结构的问题。

本文主张 ABMS 中的 Agent 采用混合型 Agent 结构,它具有通用性,适合于各种情况下的仿真,比如在卫星系统仿真中,Agent 数量不是很多,但其模型相对复杂;而在生态系统、经济系统、陆战系统的仿真中,单个个体 Agent 行为相对简单,但个体数量众多、交互频繁。

2.4.3 Agent 多 Agent 系统和建模与仿真技术的结合

目前,关于 Agent, MAS 和建模与仿真技术的结合有多种形式,术语也有所不同。例如有基于 Agent 的建模 (Agent-based Modeling, ABM)^[4] 或基于 Agent 的模型 ABMs^[5] 或基于个体的建模 IBM (Individual-based Modeling); 基于 Agent 的仿真 (Agent-based Simulation, ABS)^[6]、多 Agent 仿真 (Multi-Agent Simulation)^[7]、基于多 Agent 的仿真 (Multi-Agent Based Simulation, MABS)^[8]、基于 Agent 的建模与仿真 ABMS^[9] 等。其中,ABM、ABMs、ABS 和 ABMS 侧重于对系统的建模方法上采用 Agent 的形式,并与离散事件仿真、面向对象仿真以及微观动力学仿真等方法结合;而多 Agent 仿真和 MABS 则侧重于从分布式人工智能领域内的 MAS 出发,

以 MAS 作为系统建模的方法, 并与离散事件仿真、面向对象仿真以及微观动力学仿真相结合。即使是这样, 多 Agent 仿真、MABS 中的 Agent 的概念与 DAI 与 MAS 中的 Agent 概念也是不同的, 二者之间的 Agent 概念与范围、目的并不是简单的包容关系。在本文中, 统一用一个名词术语来表述上述有关 Agent 和建模与仿真技术结合的概念, 称为 ABMS。这样, ABMS 的研究内容就可能包括 Agent MAS 以及与之相关的建模与仿真技术。

3 ABMS 的应用

目前, 基于 Agent 的建模与仿真在很多领域得到应用, 包括社会领域、经济领域、人工生命、地理与生态领域、工业过程和军事领域等, 见表 1。但大部分研究还处于初级阶段, 属于实验室中的“思想实验”, 具有学术研究的性质, 离真正的实际复杂系统的仿真分析与控制还有一定距离。但这些关于复杂系统的 ABMS 的研究与探索, 正在使实际应用成为可能。

表 1 ABMS 的应用

商业与组织机构	基础设施	社会与文化
<ul style="list-style-type: none"> ● 制造 ● 消费者市场 ● 供应链 ● 保险 	<ul style="list-style-type: none"> ● 电力市场 ● 水利市场 ● 交通 ● 群体流动 ● 人群流动 ● 安全撤退建模 ● 群集行为 	<ul style="list-style-type: none"> ● 古文明的兴起 ● 文化的消退 ● 军事 ● 指挥与控制 ● 作战对抗 ● 生物 ● 生态 ● 动物群体行为 ● 细胞、子细胞 / 分子行为
经济 <ul style="list-style-type: none"> ● 人工股市 ● 贸易网络 ● 计算经济学 ● 国家经济模型 ● 虚拟金融市场 	地理 <ul style="list-style-type: none"> ● 地震的形成 ● 火山的爆发 	

3.1 社会领域

社会领域是 ABMS 应用最为广泛和活跃的领域之一, 其研究的重点是人类系统的涌现行为与自组织, 而 ABMS 是最适合于捕捉这些现象的方法学, 这一点得到很多社会科学家的共识。社会系统中的“人”与 ABMS 中的 Agent 具有本质相似性, “人”被抽象成一个具有自主决策、学习、记忆以及协调、组织能力的 Agent Agent 因此可能需要采用神经网络、进化计算或者其它学习技巧来描述“人”的学习与自适应能力。

社会领域中的 ABMS 研究应用包括: 流 (Flow), 如交通流 (Traffic)、紧急情况下的人员撤退 (Evacuation) 以及消费群流动管理 (Customer Flow Management); 组织形成 (Organization) 及政治交互等。

例如, 洛斯阿莫斯国家实验室开发了一个交通分析仿真系统 (TRANSPORTATION ANALYSIS SIMULATION SYSTEM, TRAMSIS)。该软件通过创建一个虚拟城市环境, 可对其中的人及其日常活动 (上下班、购物与娱乐等) 以及交通工具在交通网络中的运动进行建模与仿真, 通过个体交通工具之间的交互来观察实际的交通流的动态特性, 进而评估整个城市的交通系统的性能, 并可估计由于交通工具尾气排放产生的空气污染等情况。该软件目前被用来仿真波特兰市 (Portland) 的

交通状况, 仿真案例中包括 120000 条交通链路、150 万个个体 Agent 类似的研究还包括圣塔菲研究所的 C. Barnett 对阿尔布开克市的交通和环境状况的仿真, Bryan Raney 等人对瑞士国内的交通问题的研究。

另外, Axtell 和 Epstein 开发了一个基于 Agent 模型的仿真软件 ResortScape 可用于对停车场的管理及决策; Bilge 等人开发了基于 Agent 模型软件 SM STORE, 用于超市的管理与监控, 并实际运用到英国的几家超市的运行管理中。Darren Schreiber 运用基于 Agent 的仿真对政党的形成进行了研究; Amamo Siblijnov^[10] 等人运用基于 Agent 的建模方法, 在 Swam 的基础上研究了前南斯拉夫的种族迁移——社会冲突问题。Derek 等人^[6] 基于 Agent 的仿真研究了英格兰和威尔士的电力市场交易模型。Xuwei Chen 用基于 Agent 的仿真研究了不同道路网络结构条件下的安全撤退策略。

3.2 经济领域

经济领域是 ABMS 应用较为广泛的一个领域。Sandia 国家实验室的研究人员开发了一种基于 Agent 的美国经济仿真模型 Aspen, 它融合了 Sandia 实验室的进化学习和并行计算的最新技术, 与传统的经济模型相比有许多明显优势, 在一个单一的、一致的、一致的计算环境中模拟经济, 允许变化的法律、规则和政策的影响。Aspen 以个人、居民和企业等微观单位作为描述和模拟对象, 以分析政策对微观单位的影响及引起的宏观效果。通过对特征变量的统计、分析、推断、综合, 可以得到政策变化对微观个体的影响, 进而得到宏观以及各层次的政策实施效果。Sandia 国家实验室目前已完成了简单市场经济的一个原形模型 (美国经济的简单仿真), 并致力于一个更详细的模型, 同时完成了一个过渡经济的仿真模型 (过渡经济仿真)。

另外, 圣塔菲研究所 Arthur 领导的 Bids 小组开发的虚拟股市, 已成功地运用到 NASDAQ 股市的仿真中。基于 Agent 的 NASDAQ 仿真模型成功地将 Agent 的建模思想与神经网络、加强学习等人工智能技术结合起来, 股市中的 Agent 通过采用不同的策略, 从简单的到复杂的策略来进行交互。通过 Agent 间的交互, 来表现整个股市的动态行为。

经济领域还有 Leigh Tesfatsion 教授进行的基于 Agent 的计算经济学方面的研究。

3.3 军事作战对抗领域

军事领域是 ABMS 应用的一个新领域。军事对抗、陆战系统是一个复杂适应系统^{[4][11]}, 具有复杂适应系统的主要特征, 这一点得到研究人员的共识, 因而可用 ABMS 来研究军事对抗等战场行为。现有的研究成果表明 ABMS 具有强大的生命力, 比基于兰切斯特方程的作战模型更有效, 它为人们提供了很好的模拟战场的手段。

美国国防部 (DoD) 希望能在未来的战场中能够具有对信息的实时全方位获取能力, 为了能使 C⁴ISR 真正有用, 必须采用先进的实时分布建模与仿真工具, 而复杂性科学可以帮助 C⁴ISR 的开发。作为复杂性科学方法论的 ABMS 方法,

自然成了 DoD 的先进建模与仿真方法论。DoD 关于 ABMS 的应用包括: 美国海军作战开发司令部 MCCDC 开发的 I-SAAC(Irreducible Semi- Autonomous Adaptive Combat)^[11]、ENSTein(Enhanced SAAC Neural Simulation Toolkit)和 Swarrior 美国陆军情报与安全司令部开发的 ACME(Adaptive Collection Management Environment) 以及海军战场开发司令部 NWDC 与 Argonne 国家实验室复杂适应系统仿真中心 CCA-SS 合作开发的 TSUNAMI(The Tactical Sensor and Ubiquitous Network Agent- Modeling Initiative)。

ABMS 的其它研究应用领域还包括人工生命、生态以及工业过程中的供应链管理、自然现象的仿真等。

3.4 国内的应用情况

国内对于 ABMS 的应用研究也较多, 但基于自主开发的 ABMS 平台进行研究的较少, 大部分是基于国外仿真平台的研究。关于应用情况, 主要有:

股票证券、金融市场方面, 有国防科技大学的李宏亮、金士尧^[12]在自行开发的基于 Agent 的分布仿真平台 Jcass 上建立的金融证券市场模型; 天津大学的刘豹、上海交通大学的胡代平等建立了基于 Agent 模型的股票预测支持系统; 中国人民大学陈禹^[13]等人在 Swam 平台下建立了阿克洛夫模型、Aspen 的 Swam 模型、国会山保姆公司模型以及任务分配等模型, 对经济领域中的 ABMS 进行了有益的探索。

军事领域, 国防大学训练模拟中心将 ABMS 应用到作战对抗^{[14][15]}、危机决策对抗和民意走势^[16]等的研究中; 国防科技大学迟妍^[17]等对作战模型的研究。类似的研究还较多, 这里不再赘述。

4 怎样进行 ABMS 研究

建立 Agent 模型的方法与建立其它模型或仿真的方法类似。首先, 获取仿真的目标、模型所要回答的问题以及潜在的用户。然后, 系统地分析所要研究的系统, 区分组成系统的实体、组件以及之间的交互关系、相关的数据源等。然后运用一般的模型建立的步骤来进行基于 Agent 的建模。除了一般的建模步骤外, ABMS 的研究步骤还包括: ① Agent 划分并找到相关的 Agent 行为理论; ② Agent 间交互关系的划分并找到 Agent 交互的相关理论; ③ 选用相关的 ABMS 平台和 Agent 开发策略; ④ 获取必须的 Agent 的相关数据; ⑤ 验证 Agent 模型的行为; ⑥ 运行模型, 分析输出结果, 分析 Agent 的微观行为和系统的宏观行为。

4.1 识别 Agent

识别 Agent 精确地规范 Agent 的行为、适当描述 Agent 间的交互是开发 Agent 模型的关键步骤。Agent 通常是系统中的决策者, 包括传统的决策者例如管理者以及非传统的决策者, 例如具有自身行为的复杂的计算机系统。甚至于一组个体组成的集合, 对于特定的建模目标, 它们都可以被抽象成 Agent。因此, Agent 可以使一个层次、嵌套的结构。

Agent 被定义之后, 下一个具有挑战性的工作便是发现

Agent 的关键的行为。怎样发现 Agent 的行为呢?

首先, 找到有关 Agent 的行为的相关理论。例如, 首先以一个标准化的 Agent 模型为出发点, 在此基础上进行优化, 进而开发出简单的、启发式的描述性的行为模型。也可以以某种合适的行为理论为基础建立行为模型, 比如, 对消费者的购物行为进行建模有大量的理论可供参考。

其次, 选取合适的 Agent 形式逻辑框架作为 Agent 模型的基础。这些框架包括 BDI (Belief- Desire- Intent) 和 BOD (Behavior- Oriented Design) 等, 运用复合模态和时态逻辑作为反应式规划和动作选择的基础。当个体的行为是已存在的或假定的系统的 Agent 模型的基础的时候, 知识工程尤其是仿真是可以被采用的技巧之一。

4.2 ABMS 开发工具

ABMS 可以在桌面上进行小规模的应用, 也可以在分布式集群上进行大规模的分布式仿真, 或者是介于二者之间的任意规模。

4.2.1 桌面应用级 ABMS

桌面应用级 ABMS 可能是比较简单的应用, 其设计和开发周期比较短, 运用 ABMS 建模工具, 通过学习这些工具的使用, 短时间内即可开发出来在单机上运行。桌面级 ABMS 应用用来学习怎样进行基于 Agent 的建模与仿真, 检验基于 Agent 的建模设计的概念和进行建模与仿真分析。

桌面级 ABMS 系统甚至可以是解释型系统, 不需要象通用程序语言或基于 Agent 的建模工具包那样需要编译或链接。例如 Mathematica 和 MATLAB 都可以用来建立 Agent 模型, 尽管它们并没有提供专门的 Agent 构建工具。它们能够提供较好的数学建模库、可视化、统计分析以及数据库子程序。桌面级 ABMS 系统通常其处理能力有限, Agent 的数量一般不能太多, 数量级在几十个到几百个 Agent 之间。

4.2.2 大规模应用级 ABMS 和 ABMS 平台

大规模应用级 ABMS 扩展了桌面级 Agent 建模的环境, 可以允许 Agent 数量从几千到百万级。大规模 Agent 建模通常在计算机辅助的 Agent 仿真环境中进行。该环境具有支持 Agent 建模与仿真特有的几种特征, 例如提供时间调度、通信机理、柔性的交互拓扑结构、可供选择的 Agent 体系结构、方便地显示和存储 Agent 的状态、大规模的开发支持以及其它一些专用的功能。大规模 Agent 的模型可以运行在桌面平台计算机上, 也可以运行在高性能计算机上。当然, 大规模的 Agent 模型需要更多的专业技巧和更多的开发资源。

有几种 Agent 软件的标准已经影响到 ABMS 软件包的开发, 这些标准包括 FIPA 体系结构规范, 对象管理组织的 Agent 平台特殊兴趣小组的 Agent UML, 以及面向 Agent 的知识系统体系结构 KAoS 等。

现在用很多免费或开放源代码的 ABMS 软件开发环境, 这些平台包括: Repast, Swam, StarLogo, Aspen, AgentSheets, Ascape, MAML, GEAMAS, GALATEA, Sim_Agent and MASON 等^[18]。文献 [19] 总结和比较了当前的一些基于 Java 语言的

Agent建模工具包。

Repast是一个支持开发大规模 Agent模型的软件环境,其特征包括:完全的离散事件调度方法,模型可视化环境,与地理信息系统集成来对 Agent进行建模,自适应的行为建模工具(例如神经网络、遗传算法等),它支持 Java、C++、C#、VB、Lisp和 Prolog等语言。Repast具有可选的时间调度机制,支持时间片推进方式和事件调度法,并且保持时钟的全局或局部视点。

Swarm是一个基于 Agent的复杂系统仿真的通用平台。当前最新版本为 2.2 它可以在 Unix/Linux 以及 Windows 环境下运行。Swarm 是用 Objective C 语言开发的,在早期版本中,编写 Swarm 的应用程序也使用 Objective C;从 2.0 版开始,提供了对 Java 的支持;将来的版本可能支持 JavaScript、C++ 和 Perl 等语言。

Swarm 提供了实现建立基于 Agent 仿真模型的、可共享的基本对象类库以及运行基于 Agent 的仿真模型的控制引擎或虚拟机,同时提供了建模者观察与操作模型运行的用户接口,以及一些相关的工具,例如随机数生成器等。Swarm 仿真调度的基本单元是 swam,用户通过与 Swarm 库相结合的方式来进行仿真应用的开发。

Swarm 是应用最广、开发最早的基于 Agent 的建模与仿真通用平台,已被全世界范围的多个研究机构和个人应用于多个学科领域的众多研究课题。

StaLogo 最初用来探索以个人计算机进行大规模并行计算以帮助学生通过仿真来理解复杂系统,它后来的几个变种主要用来进行社会领域的仿真。Aspen 主要用于美国经济的仿真。GEAMAS 是一个复杂系统的虚拟仿真环境,目前运用于火山爆发的预测、地震的仿真等自然现象的仿真研究。Sim_Agent^[20]是一种串行的、集中式的、时间驱动的基于 Agent 的仿真平台,开发语言为 Pop-11。Agent 的调度采用集中的时间片推进的方式。目前,Sim_Agent 正在向分布式仿真扩展,技术方案是与 HLA/RTI 结合。Sim_Agent 的应用领域包括在计算机生成兵力领域的应用,如虚拟战场的仿真。但总的说来,仿真应用较少。

4.3 ABMS 全生命周期

ABMS 的开发是一个通用的软件开发和模型建立的过程,通常也包括概念设计阶段、需求定义阶段、详细设计阶段以及实现阶段、运行阶段等。概念开发和细化阶段定义了项目的目标。需求定义阶段使目标具体化。设计阶段定义模型结构和功能。实现阶段运用前面的设计来构造模型。可操作阶段把模型来进行应用。实际过程中,一个成功的 ABMS 项目往往进行了以上阶段的多次迭代,通常从小规模的桌面应用级 ABMS 开始,并逐步增大到大规模的 ABMS 工具包应用阶段。

5 ABMS 与传统的建模与仿真方法的结合

ABMS 可以提供一个完整的模型组件框架,同时也能够

提供可以嵌入到更大的系统中的 Agent 模型组件。当前所有的建模技巧都是为解决某类特定的问题而出现的,比如优化技巧,离散事件系统仿真,系统动力学 (SD),风险分析,统计方法等等,而 ABMS 可以创造性地结合这些传统的建模与仿真方法,可以解决传统建模与仿真不能解决的问题,代表了建模与仿真的发展前沿。例如,离散事件系统仿真提供了对系统动态过程的仿真以及解决随机不确定性的手段,在 Agent 参与系统的动态演化以及运动的过程中,利用 DES 技术来开发 ABMS 是非常重要的。

6 ABMS 的应用范围

ABMS 的应用范围从最初的生物学领域不断扩展,通过 ABMS,人们可以研究系统的微观个体所不具有的宏观涌现性。在下列情况下,运用 ABMS 来进行研究将非常合适^[18]。

1) 目标系统存在潜在的涌现现象。例如:

- 个体行为具有非线性、临界值、规则和非线性耦合等特征,很难用微分方程来描述个体行为的非连续性特征;

- 个体行为存在记忆性、路径相关,以及滞后作用、非马尔科夫行为,或者时间相关性,包括学习与自适应过程;

- 个体之间的交互是异构的并可能产生网络效应。例如,微分方程通常假设个体行为的同一性,但是交互网络的拓扑结构经常导致与预测的聚集行为有巨大偏差;

- 平均、统计的方法不起作用。以微分方程描述的系统行为趋向于使状态和行为“平滑”,过滤掉任何“波动”,实际上这种波动对于系统行为的演化是非常重要的;

2) 以系统的组成元素来进行描述更自然,例如:

- 个体行为不能通过总体的变化规律来清晰地描述;

- 个体行为很复杂,不能用微分方程来描述。即使可以用微分方程来描述,但是随着个体行为的复杂度增加,微分方程的复杂性呈指数增长,从而用微分方程来描述个体的行为变得不可行;

- 个体具有离散形式的决策和行为;

- 个体之间具有动态的关联关系;

- 个体之间通过某种关系形成上层组织并且在组织一级具有学习和自适应功能。

- 运用活动 (Activity) 来描述系统比用过程 (Process) 来描述更自然;

- 个体行为的随机性。运用 ABMS 随机性 (随机因素) 可方便地添加到模型中。

7 ABMS 相关资源

互联网上有相当多的 ABMS 资源,并且有几个学术团体提供 ABMS 开发工具包和应用实例。这些资源包括:北美计算社会科学和组织科学协会 NAACSOS,它是一个致力于深化计算社会科学 ABMS 研究的组织 (<http://www.naacsos.org>)。年度会议包括:NAACSOS 会议 (<http://www.casos.cs.cmu.edu>) 包括计算社会科学和组织科学方面的内容; Agent

200X 会议 (<http://www.agent2005.anl.gov>), 主要关注计算社会科学及相关理论、软件工具包及应用; SwamFest (<http://www.sdg.org>) 关注 ABMS 的所有方面, 特别是基于 Swam 的应用。其它的关注 ABMS 的主要会议包括 IEEE、NFORMS 和各种不同的仿真会议 (WSC, SCSC)。例如, 2005 IEEE Swam 智能座谈会 (<http://www.ieeeswam.org>)。

不同的组织也致力于推进 ABMS 和复杂性科学的研究, 包括圣塔菲研究所 (<http://www.santafe.edu>)、密歇根大学的复杂系统研究中心 (<http://www.cscs.umich.edu>)。侧重于 ABMS 理论、应用、方法或教育培训方面的组织包括: Argonne 的复杂适应 Agent 系统仿真中心 (<http://www.cas.anl.gov>), Carnegie Mellon 大学的社会组织系统分析计算中心 (<http://www.casos.cs.cmu.edu>) 以及 George Mason 大学的社会复杂性研究中心 (<http://socialcomplexity.gmu.edu>) 等。

8 结束语

复杂系统与复杂性科学被誉为 21 世纪的科学, 已被列为国家基础研究发展规划。复杂系统由于其固有的特点, 使得采用传统的建模与仿真方法无能为力, 需要采用新的建模与仿真方法, 而基于 Agent 的建模与仿真是当前最具有活力的建模与仿真方法学。本文全面总结和阐述了 ABMS 的方方面面, 包括 ABMS 的理论基础、基本概念, ABMS 的应用领域以及软件平台, ABMS 的应用范围以及开发步骤等。对于全面认识与研究、应用 ABMS 具有较大的参考价值。

注: 本文参考文献超过百篇, 由于篇幅限制, 论文只列出了主要的参考文献。

参考文献:

- [1] 廖守亿, 戴金海. 复杂适应系统及基于 Agent 的建模与仿真方法 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1): 113-117.
- [2] 约翰·霍兰著. 周晓牧等译. 隐秩序——适应性造就复杂性 [M]. 上海科技教育出版社, 2001.
- [3] E Bonabeau. Agent-based modeling methods and techniques for simulating human systems [C]. In Proc National Academy of Sciences 2001, 99(3): 7280-7287.
- [4] E Bonabeau, L C Hunt, P Gaudiano. Agent-Based Modeling for Testing and Designing Novel Decentralized Command and Control System Paradigms [C]. the 8th International Command and Control Research and Technology Symposium, June 17-19, 2003 National Defense University Washington, DC.
- [5] R C Jeffrey. The Use of Agent-based Models in Military Concept Development [C]. Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference. E. Y. Cesañ, C. H. Chen, J. L. Snowdon, and J. M. Chames, eds 2002.
- [6] W B Derek, F S Oliveira. Agent-based Simulation: An Application to the New Electricity Trading Arrangements of England and Wales [J]. IEEE - TEC, special issue Agent Based Computational Economics 2001.
- [7] S Cakraborty, P Marcenac. Emergence of Earthquakes by Multi-agent Simulation [C]. in Proceedings of European Simulation Multi-Conference ESM'97, Istanbul Turkey, SCS Int Publishers

1997. 665-669.

- [8] P Davidsson. Multi Agent Based Simulation: Beyond Social Simulation [C]. In Moss S. and Davidsson P. (Eds). Multi-Agent-Based Simulation: Second International Workshop MABS 2000 Boston M. A.: 97-107.
- [9] C Baydar. Agent-Based Modeling and Simulation of Store Performance for Personalized Pricing [C]. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference 1759-1764.
- [10] A Srdjijnović, D Penz, P Rodik, K Karlov. Agent-Based Modeling of Ethnic Mobilization: The Former Yugoslavia Case [C]. 1st LA Conference on Computational Social Science and Social Complexity: AB Modeling in Social Sciences 2002.
- [11] A Ilchinski. Irreducible Semi-Autonomous Adaptive Combat (ISAAC): An Artificial-Life Approach to Land Combat [M]. Center for Naval Analyses Research Memorandum CRM 97-61. 1997.
- [12] 李宏亮. 基于 Agent 的复杂系统分布仿真 [D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2001.
- [13] 陈禹. 复杂适应系统 (CAS) 理论及其应用、由来、内容与启示 [J]. 系统辩证学学报, 2001, 9(4): 35-39.
- [14] 胡晓峰, 等. 战争模拟: 复杂性的问题与思考 [J]. 系统仿真学报, 2003, 15(12): 1659-1666, 1686.
- [15] 黄谦. 危机决策对抗模拟及其智能求解框架研究 [D]. 北京: 国防大学, 2001.
- [16] 罗批, 司光亚, 胡晓峰. 战争系统多 Agent 民意模型的研究 [J]. 系统仿真学报, 2003, 15(12): 1691-1693.
- [17] 迟妍. 基于复杂适应系统理论的作战模型研究 [D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2004.
- [18] 廖守亿. 复杂系统基于 Agent 的建模与仿真方法研究及应用 [D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2005.
- [19] Tobias Robert and Carol Hofmann. Evaluation of free Java-libraries for social-scientific agent based simulation [J]. Journal of Artificial Societies and Social Simulation Jan. 31, 2004 7(1).
- [20] A Sisman, R Poli. SM_AGENT: A toolkit for exploring agent designs in Intelligent Agents—II Agent Theories Architectures and Languages (ATAL-95) [M]. M. Wooldridge, J Mueller and M. Tambe, Eds New York Springer-Verlag 1996 392-407.

[作者简介]



廖守亿 (1974-), 男 (汉族), 重庆人, 博士, 讲师, 研究方向为飞行器系统建模与仿真, 复杂系统建模与仿真, 计算机应用与软件系统集成。

陈坚 (1969-), 男 (汉族), 湖北赤壁人, 副教授, 研究方向为导航、制导与控制。

陆宏伟 (1975-), 男, 山西人, 博士, 助理研究员, 研究方向为图像处理。

戴金海 (1943-), 男 (汉族), 河北昌黎人, 教授, 博士生导师, 中国计算机用户协会仿真应用分会副理事长, 《计算机仿真》编委会副主任, 研究方向为飞行器设计、虚拟飞行试验、系统建模与仿真、实时系统与计算机控制、产品数据管理 (PDM) 及企业信息化。