

面向服务的建模与仿真技术综述

鞠儒生, 杨 妹, 钟荣华, 刘晓钺, 周 云, 黄柯棣

(国防科学技术大学信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 复杂系统仿真模型的互操作和可重用性是仿真技术研究的热点和难点之一, 主流仿真技术高层体系结构由于联邦对象模型以及运行支撑框架(runtime infrastructure, RTI)版本的限制也遇到了很大的挑战。面向服务的建模与仿真技术为问题的解决提供了有效的途径, 并已逐渐成为系统仿真研究领域的热点。结合上述背景, 对高层体系结构(high level architecture, HLA)面向服务体系架构(service oriented architecture, SOA)、离散事件描述规范(discrete events systems specification, DEVS)/SOA、模型驱动架构(model driven architecture, MDA)/SOA、云仿真/SOA等主流面向服务的建模与仿真技术进行了系统的论述, 针对 SOA 存在的时效性等问题, 分析了实时 SOA 的研究进展情况, 并指出基于实时 SOA 的建模与仿真技术是一个值得关注的研究方向。

关键词: 建模与仿真; 面向服务; 高层体系结构; 实时面向服务体系结构; 云仿真

中图分类号: TP 391

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2013.07.31

Summary of service oriented modeling and simulation

JU Ru-sheng, YANG Mei, ZHONG Rong-hua, LIU Xiao-cheng, ZHOU Yun, HUANG Ke-di

(School of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The interoperability and reusability of the complex system simulation model is one of most popular and difficult problems in the research field of simulation technology. The popular simulation technology high level architecture (HLA) suffers a great challenge because of the limitation of federation object model and the version of runtime infrastructure (RTI). It is an effective and popular way to solve the problem by the utilization of service oriented modeling and simulation (SOMS). The main SOMS techniques, such as HLA/service oriented architecture (SOA), discrete events systems specification (DEVS)/SOA, model driven architecture (MDA)/SOA, cloud simulation/SOA, are systemically introduced. Towards the timeliness and effectiveness problem of SOA, the real-time SOA research is analyzed. Besides, the real-time SOA based modeling and simulation is put forward as an attractive research field.

Keywords: modeling and simulation; service oriented; high level architecture (HLA); real-time service oriented architecture; cloud simulation

0 引言

复杂系统建模与仿真具有分布式、多学科协同的应用特点, 要求其支持环境具有高度的分布性、良好的互操作性和可扩展性。分布交互仿真(distributed interactive simulation, DIS)、聚集级仿真和高层体系结构(high level architecture, HLA)等为复杂系统的建模与仿真提供了技术支持。HLA 作为目前主流的复杂系统仿真技术, 其目的是提高仿真组件的互操作性和可重用性, 这一目标在很大程度上得到了实现。但是随着应用不断深入, 一些不足之处也暴露了出来: ①系统的可扩展性、互操作性受限于联邦对象

模型(federation object model, FOM), 模型组件的可重用性低, 难以满足仿真多样化的需求; ② HLA 运行支撑框架(runtime infrastructure, RTI)的实现与特定编程语言及计算机平台有关, 不同厂商的 RTI 之间互操作性有限, 难以实现仿真模型及应用在更大规模上的互操作性。这样一来, 随着 DIS、HLA 等各种异构仿真资源(包括仿真模型、数据等)的增加, 如何通过重用这些资源来提高新系统开发的效率, 实现快速构建/重构仿真系统变成了一个很大的难题^[1-2], 而面向服务的建模与仿真提供了很好的解决途径。本文结合上述背景, 对面向服务的建模与仿真主要研究进展、存在的不足以及潜在的研究方向等进行了系统的论述。

1 面向服务的建模与仿真研究进展

1.1 面向服务架构/Web 服务

面向服务架构(service oriented architecture, SOA)是企业构建网络化商业系统的主流解决方案,使用 SOA 能够改进跨厂商和平台进行系统集成的能力,进而极大提高系统按需应变的能力。在 SOA 中,服务是一组良好定义、自包容、不依赖于特定状态或上下文的功能,服务之间通过消息传递或者调用其他服务来协调活动,Web 服务是用于实现 SOA 的最常见技术标准。万维网联盟将 Web 服务定义为一个用以支持网络上机器到机器可互操作交互的软件系统。它具有格式化描述的接口,通常使用 Web 服务描述语言(Web service description language, WSDL),其他系统使用简单对象访问协议(simple object access protocol, SOAP)按照接口描述指定的方式与其交互。随着技术的发展,SOA 已成为当今企业级系统集成的主流架构。

Web 服务在商业领域取得了巨大的成功,而复杂系统仿真领域应用 Web 服务等相关技术已成为必然的趋势。美国国防部指出 SOA 能消除系统建设烟囱,提高软件系统互操作性和可重用性,便于实现网络中心架构。美国国防建模与仿真办公室资助发起的下一代可扩展建模与仿真框架(extensible modeling and simulation framework, XMSF)项目曾在其建议报告中指出,建模和仿真应用需要组织 Web/可扩展标记语言(extensible markup language, XML)以及 Internet/网络等多方面能力,而 Web 服务正是最适合实现这一要求的基础技术^[3]。

1.2 面向服务建模与仿真技术

近几年来,国外对 SOA 在建模与仿真领域的研究已经从简单设计面向服务的仿真组件发展到了对面向服务的组合建模方法、仿真框架以及运行机理的研究和探讨,这里从 HLA/SOA、离散事件描述规范(discrete events systems specification, DEVS)/SOA、模型驱动架构(model driven architecture, MDA)/SOA、云仿真/SOA 等方面对国内外的研究情况进行分析。

1.2.1 HLA/SOA

HLA 作为复杂系统研究领域的主流技术,在世界上许多仿真系统中得到成功应用,但在发展过程中也暴露了互操作性与可重用性等问题。针对这些问题,国际上大量专家学者进行了一些有针对性的研究。文献[4]提出了一种扁平化通用离散事件仿真引擎并嵌入到一种 workflow 建模与仿真环境运行,同时定义了一种 workflow 参考模型,通过标准接口组件与 HLA 互联,取得了互操作性、灵活性以及运行效率的提高。文献[5]提出了基于 Web 服务的 HLA 协同仿真框架,提高了系统的交互性。文献[6]针对 HLA 暴露的互操作性等不足,提出基于开放网格服务体系(open grid services architecture, OGSA)的 HLA,并实现了面向服务的服务使能 RTI。文献[7-8]提出一种新的方法来计算 DEVS/广义 DEVS(generalized DEVS, G-DEVS)成员在

HLA 联邦运行过程中的前瞻量,提出 G-DEVS/HLA 的分布式仿真 workflow 环境,定义了 G-DEVS workflow 模型自动处理与转换描述语言,并提供了与 HLA 相适应的 workflow 组件。文献[9]提出基于面向服务的 HLA/RTI,给出了 2 种优化的通信协议,并通过重叠迁移过程来降低联邦成员迁移开销。文献[10]分析了 XMSF 中基于 Web 的 Web 使能 RTI(Web-enabled RTI, WE RTI),WE RTI 能够通过块可扩展交换协议来传输 SOAP 消息。文献[11]利用 OGSA 提出基于 HLA、产品生命周期管理、网格和 Web 服务的仿真网格,促进了 HLA 的动态共享。文献[12]提出动态分布式面向服务仿真框架,使用 HLA-RTI 来提供仿真运行时服务和支持,并通过在 RTI 中引入一些新的服务进行扩展,使其能够根据用户需要动态生成并配置仿真代码。文献[13]提出了层次化分布式体系结构,通过多层中间接口组件,提高了 HLA 等分布仿真系统开发的便利性。文献[14]提出基于网格的 HLA 仿真系统 HLA Grid,通过成员-代理-RTI 体系结构,实现了基于网格服务的资源利用。文献[15]针对 HLA 等分布式仿真中存在的通信与计算负载不平衡的情况,提出一种可扩展的层次式体系结构,并在分布式仿真执行时动态调整通信与计算负载,通过降低通信时延并均衡负载技术,有效地提高了分布式仿真系统的效率。文献[16]提出基于 OGSA 的 HLA 仿真运行策略。

国内方面,文献[17]分析了面向服务的 HLA 研究进展。文献[18]从作战仿真平台的 SOA 架构入手,提出信息交互服务总线概念模型和实际网络拓扑。文献[19]设计了一个软网关程序用来解决不同体系架构的仿真网络之间集成互联的问题。文献[20]针对指控仿真系统体系结构对中心服务器的依赖问题,提出了一种基于 SOA 的分层体系结构。文献[21]讨论了仿真服务总线的实现策略,并通过一个基于广域网的多联邦原型系统实现,验证了该体系结构是现有 HLA/并行 RTI 仿真支撑平台的一种良好的扩展方式。文献[22]借鉴 XMSF,提出了一种基于 Web 服务的 RTI 平台架构,与 WE RTI 方法类似,属于通信层 Web 使能方法。文献[23]为了增强仿真引擎在仿真系统中的开放性、灵活性与可扩展性,提出了一个基于 SOAP/Web Service 的仿真引擎解决方案。文献[24]将领域模型 Web 服务化并使用 HLA/RTI 实现服务集成。文献[25-26]设计了 XMSF 框架下 HLA Web 服务使能 Web-RTI,分析了面向服务的 HLA 最新标准规范 HLA Evolved。

随着 HLA 技术不断发展,一些设计开发积累的经验也反馈到了 HLA 标准中。HLA 在 1996 年 8 月完成了基础定义,1998 年产生了美国国防部 HLA 1.3 标准,2000 年电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)颁布国际标准 IEEE HLA1516,2005 年仿真互操作标准组织成立了 HLA 演化产品开发小组对 HLA 标准进行修订,并于 2010 年通过重新投票修订形成新一代的 IEEE 1516 2010 标准,即 HLA Evolved^[27]。与之前的标准相比,HLA Evolved 中有一些颇具特色的新

增特征:(①模块化的 FOMs 和仿真对象模型(simulation object model,SOM),使维护 HLA 对象模型更灵活,扩展更方便;②能提供基于 WSDL 的应用编程接口(application programming interface,API),为了支持 Web 服务 API,标准要求 RTI 提供一个 Web 服务提供商 RTI 组件(Web services provider RTI component,WSPRC),使一个或多个基于 WSDL 的联邦成员,能通过统一资源定位器进行连接。可以看出,这 2 个特征为提高 HLA 仿真系统的互操作性与可重用性提供了便利,特别是对 Web 服务的支持,显示了分布仿真技术必须具备面向服务能力的必然趋势。目前已有 Pitch 公司 RTI 宣布对 HLA Evolved 的支持。

1.2.2 DEVS/SOA

DEVS 是一种离散事件系统形式化描述方法,它具有层次化和模块化的特点,利用该方法可对复杂离散事件系统进行建模、设计、分析和仿真。面向服务的 DEVS 是分布仿真领域研究的另一个热点方向。DEVS/SOA 可允许跨网络中心平台的建模与仿真,同时能够提供耦合系统的运行可组合性^[28-29]。文献[30]在一体化建模与仿真研究中心构建了基于 SOA 的跨平台模型开发和仿真测试环境 DEVS/SOA,用于支持网络中心条件下企业级的基于仿真的模型测试与评估。该框架使用服务器和客户端思想,客户端应用程序与多个具有 DEVS 仿真服务的服务器进行通信。文献[31]应用 SOA 设计了基于 Web 的分布仿真系统实时 DEVS(real time DEVS,RT-DEVS),给出了 RT-DEVS 体系结构,提高了系统的运行效率。文献[30-32]运用 Java 开发平台实现了面向服务的 DEVS 框架,探讨了基于服务的体系结构如何为跨平台分布式仿真提供解决方案。文献[33]基于 DEVS、Cell-DEVS 以及 web 服务技术设计了一种分布式仿真引擎,该仿真引擎利用 Web 服务来传递模型、仿真协议以及消息。文献[34]基于 SOA 和动态结构 DEVS 方法,提出动态结构可调整服务模型组成方法,动态服务具备兼容 DEVS 仿真器的能力。文献[35]提出了与 SOA 相容的 DEVS 仿真框架,设计了针对吞吐量和时效性服务质量(quality of service,QoS)要求的典型试验。文献[36]提出一种面向混合系统仿真的 DEVS 软件工具 PowerDEVS,通过 C++ 语言定义 DEVS 原子模型,并通过层次化模块图来创建更复杂的系统。

1.2.3 MDA/SOA

在 2001 年提出的模型驱动体系结构(object management group,OMG)实现了应用逻辑与平台技术的分离,同时提供了相关的设施来支持模型/组件库的构建、数据结构的描述和模型的转换等^[37]。面向服务与模型驱动是相互统一的,SOA 是目的,MDA 是手段^[38]。SOA 在更为宏观的层面定义了系统间的无缝互联,但它对系统本身从高层次体系结构到底层运行代码的构建过程没有提供方法论的指导,而 MDA 正好在这方面填补了空缺,MDA 提供了应用系统的开发框架。在抽象层上,服务位于业务和技术之间。SOA 通过抽象出服务来隐藏提供这些服务的底层技

术。服务使用者不必了解服务的实现技术,而服务提供者也可以在保持服务接口的前提下改变服务的实现技术,从而增强系统对技术变化的适应性。模型变换是 MDA 的核心问题^[39]。模型变换的实质是将一种描述规范下的模型通过一定的规则映射成另一种,文献[40]对模型变换方法进行了分类。在模型变换中采用的方法有:直接模型操作,中间表示和转换语言支持。实例型模型变换(model transformation by example,MTBE)方法是模型转换的一种创新性方法,用以解决建模人员使用规定的模型转换语言定义模型变换规则的问题,它允许用户自定义一个关于源和目标模型实例之间映射的原型集,通过这些映射,元模型层次的转换规则能被推导并半自动化地生成^[41]。文献[42]提出示范型模型变换方法,简化了 MTBE 方法,使模型用户无需知道模型转换语言或模型定义就能确定所需的模型变换,其核心思想是在建模工具中记录用户的交互并推导出有代表性的模型转换规范。文献[43]将模型自动化技术应用于模型测试和有效性检查,但是这些都是针对特定领域模型变换方法的研究,并不具有通用性,且模型变换本身的有效性也是一个理论上没有解决的问题。

1.2.4 云仿真/SOA

目前,基于云计算的建模和仿真研究还处于起步阶段,是建模仿真领域里的一个比较前沿的研究方向。和云仿真相关的文章或报告并不是很多,而且这些文献大多数都只是针对建模和仿真领域内的某些特殊应用。云计算的目的就是将信息技术相关的各种资源(如中央处理器、内存、硬盘空间等硬件资源,软件开发部署环境,应用软件资源)的生产和使用方式像水电一样集中生产、按需使用、按量付费,而不再需要用户为获得这些资源在软硬件方面进行前期投资^[44]。仿真云以服务的形式向用户提供各种仿真工具,是一种软件即服务类型的云^[45],在仿真领域可以称之为仿真即服务类型的云。文献[46]在网格仿真的基础上,提出了云仿真的设计思路。文献[47-48]提出了将云计算引入建模和仿真的初步设想。文献[49-50]讲述了云计算中如何改进并行离散事件仿真中乐观时间同步算法。文献[51]描述了在政治和经济领域,如何在云计算技术的支持下,通过建模和仿真来辅助决策。文献[52]介绍了云计算在态势显示方面的应用。文献[53]介绍了一种基于网格技术和虚拟化技术的仿真方式。云仿真中,如何规划各种有不同要求(时间,价格限制等)仿真任务的运行是建模和仿真领域内的一个新问题^[54-55]。文献[56]给出了云仿真的定义,指出基于云计算的复杂系统高效能仿真技术是未来仿真发展的必然趋势。文献[57]研究了用于 Web 服务的 RTI 组件、模块化 FOM/SOM 对象模型和 WSDL API 函数等 HLA Evolved 技术,借鉴云计算的思想,提出了一种基于 HLA Evolved 的云仿真体系结构和框架实现方案。文献[58]指出 SOA 是架构模式,而云计算是架构的实例,或者说一种架构的选择。

2 存在的不足

然而,以 Web 服务为主要实现技术的 SOA 也存在着一些不足之处^[59-60]。

(1) Web 服务使用 XML 编码带来过多时空开销,一个 SOAP 消息经过编码后的体积是该消息机器表示的 4~8 倍。而且 XML 解析方法效率较低,解析器必须首先确定解析文档的末尾,而后解析器才能解析文档的内容,这样在大数据量传输下,对运行效率是个很大的挑战,此外数据以美国信息交换标准码文本的方式传输也带来了安全隐患。

(2) Web 服务采用 SOAP 消息进行交互,虽然 SOAP 消息可以采用任何传输协议,但默认采用超文本传输通信协议(hypertext transfer protocol,Http)传输协议,而 Http 是请求响应型同步交互协议,通信效率不高,同时也难以适应存在异步消息交互的情况,而且在 Web 服务中,缺乏对消息的优先级管理调度机制。

(3) 由于 Web 服务定义在隔离层来响应用户请求并传输给底层组件,而增加的隔离层显然会降低整个系统运行的效率。

(4) 与传统分布/并行仿真具有相对成熟的保守及乐观的时间同步管理策略不同,SOA 中各种服务计算除非与时间相关,往往不需要严格的时间同步机制,SOA 服务之间的与逻辑可以看成是一种简单的保守时间同步机制,难以满足模型之间各种复杂的时间同步约束条件。

(5) SOA 主要采用面向消息的中间件等技术完成事件存储/转发、优先级控制,难以实现过滤、聚集等事件处理,

而复杂系统仿真往往会海量交互事件,这对面向服务的仿真运行是一个极大的挑战。

这些不足使得基于 SOA 的复杂仿真系统难以完全满足实时仿真系统的要求,特别是对时间控制有严格要求的系统。以作战复杂系统为例,一些基于 SOA 的作战仿真系统往往局限于装备论证、指挥训练、预案推演等实时性要求不强的领域。而为了满足网络中心战等未来战场的需要,往往需要快速、有效地组合/重构作战仿真系统,并通过实时/超实时运行军事人员提供在线辅助决策支持。显然现有的基于 SOA 的作战仿真系统难以满足这样的需求。

3 值得关注的研究方向

3.1 实时 SOA

幸运的是实时 SOA 的提出为问题的解决开辟了途径。美国实时创新公司首席执行官 Stan Schneider 博士指出,实时 SOA 与传统 SOA 类似,其体系结构可以有效地整合和集成各大系统,其优势是可以处理对时间要求极高的实时系统,并利用服务集成技术将它们相互连接起来^[61]。

实时 SOA 的提出对转变目前科学和工程研究领域的研究方式,构建新型的具有增强功能的应用系统,产生许多有益的影响,也使得基于 SOA 的复杂系统仿真应用从推演、训练等实时性要求较弱的领域扩展到控制、预测和决策等具有明确实时性和可靠性要求的领域,同时在应急决策、危机管理和医学、制造/商业等领域都将具有良好的应用前景。

实时 SOA 与传统 SOA 的区别如表 1 所示^[62]。

表 1 实时 SOA 和传统 SOA 比较

类别	条目	传统 SOA	实时 SOA
SOA 基础	本体论	服务本体	包含实时属性的服务本体
	发现	通用描述、发现和集成规范(universal description discovery and integration, UDDI)	UDDI(只有实时性能通过验证的服务才能被发现)
	消息交互	SOAP	实时 SOAP 及类似消息交互协议
	部署	通用服务部署	实时动态部署
SOA 管理	聚合	运行前必须完成聚合	运行时需要进行实时聚合
	策略	在服务期间执行	在服务运行期间实时执行,出现违约情况能实时恢复
	建模	对通用信息进行服务建模	在对通用信息进行服务建模的基础上必须考虑实时服务属性
面向服务系统工程	组合	基于服务本体的服务组合	必须达到实时服务组合(被验证有效的服务)
	校核/验证	服务部署前必须被校核和验证	服务通过离线校核/验证加入服务资源库,在缺乏可用服务的情况下需要实时校核/验证,实时校核/验证也用于服务时间的兼容性验证
	仿真	通过在线和离线进行服务行为评估	行为通过验证的服务加入到服务资源库,需要提供动态组合的实时仿真评估手段
	执行	组合服务经过评估才能执行	服务执行前满足实时属性要求,运行时符合时间约束条件并要求收集数据
	重构	在确保可靠性与性能的情况下进行服务重构	服务重构必须能实时进行以满足时间约束条件

3.2 实时 SOA 研究进展

实时 SOA 在国外已掀起了一股研究热潮。

(1) 在基础研究方面:文献[63]分析了实时 SOA 体系结构及其应用。文献[64]提出一种实时 SOA 的中间件框架,框架采用服务预留算法调用预先计算好的服务,并对于预留数据管理、预留机制(包括顺序与并发情况的处理)进行了分析,通过试验对负载因子、预算成功率、平均尝试次数等进行了对比分析。文献[65]比较了 HLA 与 SOA 的异同,指出 SOA 与 HLA 都关注于分布式软件系统,SOA 比 HLA 具有更多的灵活性但缺乏仿真管理等技术,而综合 SOA 与 HLA 各自的优点并吸收其他技术能够应用于实时系统领域。文献[66]分析了 SOA 仿真与传统仿真在可重用性、协同性方面的特点。文献[67]提出了自适应面向服务软件系统,给出活动状态 QoS 模型规范,分析了如何建立模型来获取服务活动的动态因果关系。

(2) 在关键技术研究方面:文献[62]分析了 XML Web 服务在时间效率与性能方面的不足,提出了采用优化的数据解析器、二进制 XML、数据压缩技术、数据序列化技术、并行处理技术、XML 专用处理芯片、高速传输网络等改进措施。文献[65]比较了实时 SOA 与企业级 SOA 的异同,通过实例说明军事领域是实时 SOA 应用的重要方向,同时指出 OMG 的数据分发服务标准为实时 SOA 提供了合适的框架,其关键技术包括实时路由技术、实时服务总线等支撑技术。文献[68]基于传统 Web 服务对实时 SOA 技术实现进行了探索,包括实时服务注册与调用、消息传输与处理以及线程优化等技术,实验数据表明实时 SOA 能够通过改进传统 Web 服务来集成相关实时系统。文献[69]研究了实时 SOA 中服务缓存技术的设计与实现。文献[70]分析了一种针对实时 SOA 企业服务总线的消息处理中间件技术。

(3) 在应用研究方面:文献[71]分析了实时 SOA 在美国国防部决策分析中的重要性,并对其进一步的研究发展策略进行了分析。文献[72]对众多 SOA 应用进行分析,归纳出未来 SOA 的发展是基于事件驱动的 SOA,并提出通过复杂事件处理原则来构建分层事件驱动 SOA 结构,从而促进 SOA 的发展以及在实时系统领域的应用。文献[73]分析了基于 SOA 的针对应急医疗的实时信息交换系统,方便为各种用户及时提供有价值的信息。文献[74]对 SOA 应用方面存在的不足进行了分析,并对数据模型、建模粒度、时间效率、可靠性、安全性等提出了相应的改进措施。文献[75]设计了一种新型面向服务计算仿真器。

国内对实时 SOA 的研究较少,不少学者对传统 SOA 优化技术进行了一些研究。文献[76]提出了一种新颖的 Web 服务性能优化策略,它为每个 Web 服务生成一个特定的 SOAP 消息处理器,通过对 SOAP 消息的一遍扫描,高效地生成服务业务逻辑调用所需的参数对象,有效地提高了 Web 服务的性能。文献[77]提出在系统总体设计中加入缓存、在本地配置 Web 服务的访问策略等,较好地解决了

Web 服务的时间效率问题。文献[78]对常用 SOA 优化策略进行了分析,提出了一种基于爬山聚类算法的 SOA 性能优化策略。文献[79]针对 SOA 优化问题,提出面向服务对象的动态演化机制。

4 总结与展望

目前国外对面向服务建模与仿真研究较多,从模型变换、框架结构、仿真运行等方面进行了深入的探索与分析,取得了不少理论与应用成果。但 Web 服务等 SOA 实现技术自身还存在着一些不足,而实时 SOA 一些关键使能技术也还没有突破,面向服务建模与仿真在模型构建与管理、运行时间效率等方面还存在着许多问题亟需解决。因此,基于实时 SOA 的建模与仿真技术是一个值得关注的研究方向。

建模与仿真已成为继理论研究和实验研究之后,人类认识和改变客观世界的重要手段。随着计算机技术、信息技术等相关技术的发展与进步,仿真的应用范围得到了极大的扩展,从单机、单系统到多机、多系统、异地同步仿真,仿真的能力与规模在逐渐加大,仿真所研究的对象日趋复杂化,仿真资源也在趋于异构化,建模与仿真技术面临着更高的挑战。特别是在军事等复杂系统仿真领域,新军事变革的快速发展对仿真系统的实时性与互操作性提出了更高的要求。

在这样的背景下,研究基于实时 SOA 的复杂系统建模与仿真技术,一方面探索实时 SOA 的使能方法,另一方面突破实时 SOA 在复杂系统仿真领域应用的关键技术,可以使复杂仿真系统在不改变模型的情况下,支持模型运行的仿真框架能够适用于不同的仿真协议,能使模型的校核和验证在框架内更易于进行,并易于对仿真模型进行推理和保证模型行为执行的正确性,并可以使军事人员的关注点转移到系统的应用设计上而不是模型的构建与运行上,从而能更好地为军事人员提供作战辅助决策支持,具有深刻的理论意义和显著的工程价值。

参考文献:

- [1] He Q, Hao J G, Huang J. A simulation service system based on SOA[J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(5):98-102. (何强, 郝建国, 黄健. 基于 SOA 的仿真服务系统[J]. 计算机仿真, 2007, 24(5):98-102.)
- [2] Han C, Ju R S, Huang K D. HLA simulation system extension based on Web services[J]. *Computer Engineering*, 2006, 32(24):20-22. (韩超, 鞠儒生, 黄柯棣. 基于 Web 服务的 HLA 仿真系统扩展[J]. 计算机工程, 2006, 32(24):20-22.)
- [3] Brutzman D, Zyda M, Pullen M, et al. Extensible modeling and simulation framework (XMSF): challenges for Web based modeling and simulation[EB/OL]. [2002-10-22]. <http://www.movesInstitute.org/xmsf>.
- [4] Gregory Z, Maamar H, Claudia F, et al. A generalized discrete event system (G-DEVS) flattened simulation structure; applica-

- tion to high-level architecture (HLA) compliant simulation of workflow[J]. *Simulation*, 2010, 86(3):181-197.
- [5] Zhu H, Li G, Yuan L. WSHLA: web service-based HLA collaborative simulation framework[C]//*Proc. of the 4th International Conference on Cooperative Design, Visualization, and Engineering*, 2007:272-279.
- [6] Huang J, Li B, Chai X, et al. Web-HLA and service-enabled RTI in the simulation grid[C]//*Proc. of the Asia Simulation Conference*, 2007:195-204.
- [7] Zacharewicz G, Giambiasi N, Frydman C. Lookahead computation in G-DEVS/HLA environment[J]. *Simulation News Europe*, 2006, 16(2):15-24.
- [8] Zacharewicz G, Frydman C, Giambiasi N. G-DEVS/HLA environment for distributed simulations of workflows[J]. *Simulation*, 2008, 84(5):197-213.
- [9] Li Z, Cai W, Turner S, et al. Federate migration in a service oriented HLA RTI[C]//*Proc. of the 11th IEEE International Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications*, 2007: 113-121.
- [10] Brutzman D, Zyda M, Pullen J M, et al. Extensible modeling and simulation framework (XMSF) challenges for Web-based modeling and simulation[R]. Monterey: Findings and Recommendations Report, 2002.
- [11] Li B, Chai X, Di Y, et al. Research on service oriented simulation grid[C]//*Proc. of the 8th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems*, 2005:7-14.
- [12] Tsai W T, Fan C, Chen Y, et al. DDSOS: a dynamic distributed service-oriented simulation framework[C]//*Proc. of the 39th Annual Simulation Symposium*, 2006:160-167.
- [13] Gianni D, Andrea D A, Giuseppe L. A software architecture to ease the development of distributed simulation systems[J]. *Simulation*, 2011, 87(9):819-836.
- [14] Xie Y, Teo Y M, Cai W, et al. Service provisioning for HLA-based distributed simulation on the grid[C]//*Proc. of the Principles of Advanced and Distributed Simulation*, 2005: 282-291.
- [15] Robson E, Azzedine B. Dynamic balancing of communication and computation load for HLA-based simulations on large-scale distributed systems[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2011, 71(1): 40-52.
- [16] Zajac K, Bubak M, Malawski M, et al. Towards a grid management system for HLA based interactive simulations[C]//*Proc. of the 7th International Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications*, 2003:4-11.
- [17] Wang W G, Liu X C, Wang W P, et al. Evolution of service-oriented high level architecture[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2008, 14(9): 1665-1675. (王文广, 刘喜春, 王维平, 等. 面向服务的高层体系结构研究进展[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(9): 1665-1675.)
- [18] Wen R, Chen X Q, Ma Y P. Research on information exchanging service bus (IESB) of SOA-based integrative simulation platform of joint warfare(ISPoJW)[J]. *Computer Engineering and Design*, 2009, 30(23):5451-5457. (温睿, 陈小青, 马亚平. 基于 SOA 的作战仿真平台信息交互服务总线研究[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(23):5451-5457.)
- [19] Xin H S, Gao B, Li L C. Simulation integration based on HLA and DDS[J]. *Communications Technology*, 2011, 44(7):33-36. (辛怀声, 高斌, 李力超. 基于 HLA 与 DDS 技术的仿真集成方法[J]. 通信技术, 2011, 44(7):33-36.)
- [20] Zeng Y Y, Kang F J, Zhang J C. Layered command and control simulation system architecture based on SOA[J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(8):1714-1718. (曾艳阳, 康凤举, 张建春. 一种基于 SOA 的指控仿真系统的分层体系结构[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(8):1714-1718.)
- [21] Xu L J, Peng X Y. HLA-based simulation service bus research[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(z2):347-349. (徐丽娟, 彭晓源. 基于 HLA 的仿真服务总线研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(z2):347-349.)
- [22] Huang X D. Research and implementation of RTI simulation platform architecture[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006. (黄显东. RTI 仿真平台的体系结构研究与实现[D]. 北京:北京邮电大学, 2006.)
- [23] Chen C, Wang W F. Research of the common simulation engine based on SOAP/Web service[J]. *Microcomputer Information*, 2009, 25(7):219-221. (陈忱, 王维锋. 基于 SOAP/Web Service 的仿真引擎研究[J]. 微计算机信息, 2009, 25(7):219-221.)
- [24] Jia L, Zhang H M. Research on service oriented distributed M&S framework[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(20):4680-4684. (贾丽, 张和明. 面向服务的分布式建模仿真框架研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(20):4680-4684.)
- [25] Zhong W, Gong J X, Hao J G, et al. Web enabling HLA: research and developing of Web-RTI on XMSF[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(18):5749-5753. (钟蔚, 龚建兴, 郝建国, 等. Web Enabling HLA: XMSF 下 Web-RTI 的研究与开发[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(18):5749-5753.)
- [26] Zhong W, Gong J X, Hao J G, et al. Research and analysis of HLA evolved specification [J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(4):691-696. (钟蔚, 龚建兴, 郝建国, 等. HLA Evolved 规范研究分析[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(4):691-696.)
- [27] Bjorn M. Summary of key techniques of HLA Evolved[EB/OL]. [2009-02-05]. <http://www.appsoft.com.cn/UploadFile/>. (Bjorn M. HLA Evolved 关键技术综述[EB/OL]. [2009-02-05]. <http://www.appsoft.com.cn/UploadFile/>.)
- [28] Hessam S. DEVSJAVA[EB/OL]. [2009-02-05]. <http://www.acims.arizona.edu>.
- [29] Seo C. Interoperability between DEVS simulators using service oriented architecture and DEVS namespace[C]//*Proc. of the Spring Simulation Multiconference*, 2009.
- [30] Mittal S, Risco-Martin J, Zeigler B P. DEVS/SOA: a cross-platform framework for net-centric modeling and simulation in DEVS unified process[J]. *Simulation*, 2009, 85(7):419-450.
- [31] Kim T, Seo C, Zeigler B P. Web-based distributed network analyzer using a system entity structure over a service-oriented architecture[J]. *Simulation*, 2010, 86(3):155-180.
- [32] Mittal S, Zeigler B P, Risco-Martin J L. Implementation of formal standard for interoperability in M&S/systems of sys-

- tems integration with DEVS/SOA[J]. *International Command and Control C2 Journal*, 2009, 3(1):1-27.
- [33] Wainer G A, Liu Q, Chazal J, et al. Performance analysis of web-based distributed simulation in DCD++: a case study across the Atlantic Ocean[C]//*Proc. of the Spring Simulation Multiconference*, 2008: 413-420.
- [34] Muqsith M A, Sarjoughian H S, Huang D, et al. Simulating adaptive service-oriented software systems[J]. *Simulation*, 2011, 87(11): 915-931.
- [35] Sarjoughian H S, Kim S, Ramaswamy M, et al. A simulation framework for service-oriented computing systems[C]//*Proc. of the Winter Simulation Conference*, 2008: 845-853.
- [36] Bergero F, Kofman E. PowerDEVS: a tool for hybrid system modeling and real-time simulation[J]. *Simulation*, 2010, 87(1/2):113-132.
- [37] Open Management Group. Model driven architecture[EB/OL]. [2001-04-07]. <http://www.omg.org/mda/>.
- [38] Zhang D F, Li S X, Gu S S. Overview of model transformation technology in MDA[J]. *Computer Science*, 2006, 33(10): 228-230. (张德芬, 李师贤, 古思山. MDA 中的模型转换技术综述[J]. *计算机科学*, 2006, 33(10):228-230.)
- [39] Sendall S, Kozaczynski W. Model transformation: the heart and soul of model-driven software development[J]. *IEEE Software*, 2003, 20(5):42-45.
- [40] Czarnecki K, Helsen S. Classification of model transformation approaches[EB/OL]. [2003-05-12]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary>.
- [41] Wimmer M, Strommer M, Kargl H, et al. Towards model transformation generation by-example[C]//*Proc. of the 40th Hawaii International Conference on Systems Science*, 2007:285b.
- [42] Sun Y, White J, Gray J. Model transformation by demonstration[C]//*Proc. of the 12th International Conference on Model Driven Engineering Languages and System*, 2009:712-726.
- [43] Kuster J M. Systematic validation of model transformations[EB/OL]. [2004-11-02]. http://www.cs.uni-paderbor.de/uploads/tx_sibibtex/Systematic_Validation_Model_Transformations.pdf.
- [44] Armbrust M, Fox A, Griffith R, et al. Above the clouds: a berkeley view of cloud computing[EB/OL]. [2009-02-04]. <http://d1smfj0g31zqek.cloudfront.net/abovetheclouds.pdf>.
- [45] President's Information Technology Advisory Committee. Computational science: ensuring America's competitiveness[R]. USA: National Coordination Office for Information Technology Research & Development, 2005.
- [46] Li B H, Chai X D, Hou B C, et al. Networked modeling & simulation platform based on concept of cloud computing-cloud simulation platform[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(17):5292-5299. (李伯虎, 柴旭东, 侯宝存, 等. 一种基于云计算理念的网络化建模与仿真平台[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(17):5292-5299.)
- [47] Du J. The application research of cloud computing in military simulation[J]. *Computer Knowledge and Technology (Academic Exchange)*, 2010, 6(9):6995-6997. (杜瑾. 云计算在军事仿真中的应用研究[J]. *电脑知识与技术:学术交流*, 2010, 6(9):6995-6997.)
- [48] CIMdata. Using the cloud for simulation and analysis: a new approach[EB/OL]. [2010-10-22]. http://www.cimdata.com/publication/pdf/Commentary_Autodesk.
- [49] Fujimoto R M, Malik A W, Park A J. Parallel and distributed simulation in the cloud[J]. *Computer and Information Science*, 2010, 3(3):1-10.
- [50] Malik A W, Park A J, Fujimoto R M. An optimistic parallel simulation protocol for cloud computing environments[EB/OL]. [2010-10-22]. http://www.scs.org/magazines/2010-10/index_file/files/Fujimoto.pdf.
- [51] Kato Y, Yamaki H, Asai Y. GPGCloud: model sharing and execution environment service for simulation of international politics and economics[C]//*Proc. of the 12th International Conference on Principles of Practice in Multi-Agent Systems*, 2009:616-623.
- [52] Pajorova E, Hluchy L. Complicated simulation visualization based on grid and cloud computing[C]//*Proc. of the 7th International Conference on Cooperative Design, Visualization, and Engineering*, 2010:211-217.
- [53] Liu H, Su H, Zhang Y, et al. Study on virtualization-based simulation grid[C]//*Proc. of the Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 2010:685-689.
- [54] Garg S K, Yeo C S, Anandasivam A, et al. Energy-efficient scheduling of HPC applications in cloud computing environments environments[EB/OL]. [2009-05-18]. <http://www.cloudbus.org/reports/EE-SchedulingAcrossClouds-2009.pdf>.
- [55] Kondo D, Javadi B, Malecot P, et al. Cost-benefit analysis of cloud computing versus desktop grids[C]//*Proc. of the IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing*, 2009:1-12.
- [56] Li B H. Case analysis: the discussion of cloud computing simulation of academician LI Bohu[EB/OL]. [2011-07-15]. <http://www.enicn.com/article/2009-10-22/10225S2R009.shtml>. (李伯虎. 案例解读:李伯虎院士谈云计算仿真[EB/OL]. [2011-07-15]. <http://www.enicn.com/article/2009-10-22/10225S2R009.shtml>.)
- [57] Gao W Q, Kang F J, Zhong L J, et al. Cloud simulation technology based on HLA evolved[J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(8):1643-1647. (高武奇, 康凤举, 钟联炯, 等. 一种基于 HLA Evolved 的云仿真技术研究[J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(8):1643-1647.)
- [58] David S. *Cloud computing and SOA*[M]. Ma G Y, trans. Beijing: The People Post and Telecommunications Press, 2010. (David S. 云计算与 SOA[M]. 马国耀, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2010.)
- [59] El-Bakry H M, Mastorakis N. Performance evaluation of XML Web services for real-time applications[J]. *International Journal of Communications*, 2009, 3(2):25-33.
- [60] Deng X C. Research and implementation of the massive data transmission based on web service[J]. *Journal of Guizhou*

- Normal University (Natural Sciences)*, 2008, 26(4): 104 - 108. (邓昕才. 基于 Web Service 的海量数据传输技术研究与实现[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2008, 26(4): 104 - 108.)
- [61] Stan S. What is SOA[EB/OL]. [2010-06-07]. <http://blog.csdn.net/yangstudio>.
- [62] Tsai W T, Lee Y H, Cao Z, et al. RTSOA: real-time service-oriented architecture[C]// *Proc. of the 2nd IEEE International Symposium on Service-Oriented System Engineering*, 2006: 49 - 56.
- [63] Jeng J J. Guest editorial: special section on real-time service-oriented architecture and applications[EB/OL]. [2010 - 06 - 07]. <http://www.springerlink.com/index/>.
- [64] Panahi M, Nie W, Lin K J. A framework for real-time service-oriented architecture[C]// *Proc. of the IEEE Conference on Commerce and Enterprise Computing*, 2009:460 - 467.
- [65] Unterschiede G, Schnittstellen M. HLA and SOA[EB/OL]. [2007 - 08 - 22]. <http://www.kompetenzzentrum-hla.de/docs/hlaforum>.
- [66] Tsai W T, Cao Z, Wei X, et al. Modeling and simulation in service-oriented software development[J]. *Simulation*, 2007, 83(1):17 - 32.
- [67] Yau S S, Ye N, Sarjoughian H S, et al. Towards development of adaptive service-based software systems[J]. *IEEE Trans. on Services Computing*, 2009, 2(3):247 - 260.
- [68] Weindelmayer F. An evaluation of a real-time SOA implementation for the U. S. surface navy[EB/OL]. [2008 - 09 - 28]. <http://www.omg.org/news/meeting/>.
- [69] Panahi M, Nie W, Lin K J. The design and implementation of service reservations in real-time SOA[EB/OL]. [2008 - 09 - 28]. <http://www.techrepublic.com/whitepapers/>.
- [70] Garcés-Erice L. Building an enterprise service bus for real-time SOA: a messaging middleware stack[C]// *Proc. of the Computer Software and Applications Conference*, 2009:79 - 84.
- [71] Kille C. Can real-time operate in an SOA environment[EB/OL]. [2007 - 05 - 06]. http://www.dtic.mil/ndia/2007psa_psts.html.
- [72] Luckham D. SOA, EDA, BPM and CEP are all complementary[EB/OL]. [2007 - 05 - 06]. <http://complexevents.com/wp-content/uploads>.
- [73] Hauenstein L, Gao T, Sze T W, et al. A cross-functional service-oriented architecture to support real-time information exchange in emergency medical response[EB/OL]. [2006 - 11 - 23]. http://embc2006.njit.edu/pdf/991_Hauenstein.
- [74] Zhou W. Post SOA: use coherence to implement better SOA solutions[EB/OL]. [2010 - 05 - 11]. <http://www.itsp-inc.com>.
- [75] Muqith M A, Sarjoughian H S. A simulator for service-based software system co-design[C]// *Proc. of the 3rd International Conference on Simulation Tools and Techniques*, 2010:1 - 9.
- [76] Li L, Niu C L, Chen N J, et al. A high-performance strategy for optimizing web services[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2007, 44(7):1191 - 1198. (李磊, 牛春雷, 陈宁江, 等. 一种高效的 Web 服务性能优化策略[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(7): 1191 - 1198.)
- [77] Bian X F, Guo H. Research on the improvement of web services access performance in EAI[J]. *Computer Applications and Software*, 2008, 25(9):118 - 121. (边小凡, 郭恒. EAI 中对 Web 服务的访问性能的改进研究[J]. 计算机应用与软件, 2008, 25(9):118 - 121.)
- [78] Yang X H, Li Y F. Optimizing SOA performance in multi-network environment based on hill-climbing clustering algorithm[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(4): 738 - 742. (杨小虎, 李珏峰. 多网络环境下基于爬山聚类算法的 SOA 性能优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(4):738 - 742.)
- [79] Chen H L, Li R F. Dynamic evolution mechanism oriented to service-object[J]. *Journal of Computer Application*, 2010, 30(7): 1974 - 1977. (陈洪龙, 李仁发. 面向服务对象的动态演化机制. 计算机应用[J]. 2010, 30(7): 1974 - 1977.)

作者简介:

鞠儒生(1976-),男,讲师,博士,主要研究方向为作战效能评估,面向服务建模与仿真。

E-mail: jrscy@sina.com

杨 妹(1985-),女,博士研究生,主要研究方向为分布式仿真。

E-mail: yangmei@nudt.edu.cn

钟荣华(1985-),男,博士研究生,主要研究方向为分布式仿真。

E-mail: nudtzrh@163.com

刘晓铖(1984-),男,博士研究生,主要研究方向为云仿真。

E-mail: nudt200203012007xcl@gmail.com

周 云(1965-),女,副教授,博士,主要研究方向为动态数据驱动。

E-mail: zhouyun8007@126.com

黄柯棣(1940-),男,教授,学士,主要研究方向为复杂系统仿真。

E-mail: jrscy@hotmail.com