

分布式多 Agent 仿真环境系统体系结构研究^①

郭子明^② 王 坚 凌卫青

(同济大学 CIMS 研究中心 上海 200092)

摘 要 为了提高仿真系统的灵活性和易扩展性,从面向服务的架构(SOA)的角度引入了 Agent 仿真技术,提出了分布式多 Agent 仿真系统的控制功能框架,该框架包括仿真运行支撑系统(SRSS)、主代理(MA)、领域代理(DA)及其子域代理(SA)。描述了该实体内 Agent 的分类和功能,同时,对确保各层次代理之间高效交互的 Agent 间的通信接口和通信过程进行了描述。最后,给出了一个基于上述框架和方法构建的原型系统。研究表明了代理技术的应用有助于加强分布式仿真系统的规范性,提高其重用性和协同互操作性。

关键词 Agent, 多 Agent 仿真, 分布式仿真, 面向服务的架构(SOA), 控制结构

0 引 言

分布式仿真环境是指采用协调一致的结构、标准、协议和数据库,通过计算机网络将分布在各地的各种仿真器互连,使人可参与交互作用的一种综合环境。它的发展经历了分布式交互仿真、聚合级仿真协议、高层体系结构(high level architecture, HLA)以及正在形成的可扩展建模与仿真框架等技术^[1]。文献[2]提出了基于 HLA 的多 Agent 仿真环境,使用中间件技术实现 Agent 联邦与运行时间框架(runtime infrastructure, RTI)间接交互;文献[3]为了提高仿真系统的灵活性和易扩展性,提出了一种基于移动 Agent 的分布式的以 RTI 为中心的仿真体系架构;文献[4]从面向服务的视角对分布式协同 workflow 进行了分析,提出了 workflow 网格资源化的概念,但只是初步实现了 workflow 管理,未对 workflow 复杂模型进行分析;文献[5]提出了一个分布式多 Agent 仿真系统的控制功能框架,分析了各种控制功能的工作原理与机制。虽然在仿真技术方面已有了大量的研究成果,迄今为止还没有一种通用的仿真环境基础设施,使在不需要考虑底层实现的基础上构建协同仿真系统。由于系统所管理的信息量和各类仿真资源的不确定性,需要一种主动的、智能的、能动态反映各类信息变化的新技术,来实现对仿真信息及其实体的管理及监控。本文从面向服务的架构(service

oriented architecture, SOA)的角度,引入 Agent 技术,建立了一种基于 Agent 的分布式仿真系统架构,并在此基础上提供实现多 Agent 仿真系统的一般控制功能。

1 基于 Agent 的仿真体系

在分布的计算资源异构的环境中由于各局部数据库的自治性和异构,使得对信息源难以控制。引入代理技术,将各子系统模型和算法库封装于代理内部,根据用户需求,选择任务分配机制,不同功能 Agent 相互协作,使复杂行为模型结构化,提高系统并行计算能力、灵活性和扩展性。

1.1 基于 Agent 的仿真体系架构

文献[6]针对分布式仿真协同环境中基于 Web 数据库设计目标,提出型号主题、仿真领域、专家和仿真工具结构来支持动态数据管理。文献[7]提出了建立共享的仿真资源池的实现方法,即以网格服务为基础,将仿真资源网格化,但未对体系结构的协同管理机制做分析。本文从面向服务的体系架构角度,提出解决方案由仿真运行支撑系统(simulation running support system, SRSS)、仿真运行系统(simulation running system, SRS)、仿真用户和仿真工具组成,其体系结构如图 1 所示。

SRSS 提供操作员管理界面,实现对仿真过程建模,显示和管理 workflow 应用的运行状态,它通过主代

^① 国家科技支撑计划(2006BAF01A46-1)资助项目。

^② 男,1970 年生,博士;研究方向:系统工程,机械设计;联系人, E-mail: gyiming_scut@126.com
(收稿日期:2009-08-04)

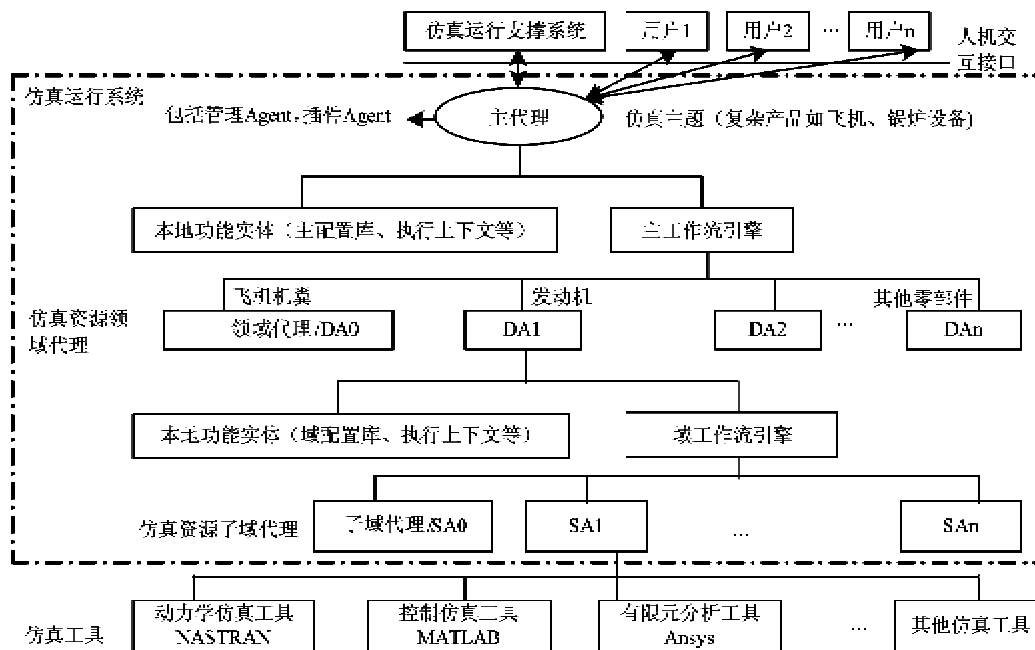


图1 基于 Agent 分布式仿真体系框架

理(master agent, MA)的管理代理与 SRS 实现交互。而仿真用户通过 MA 中的插件代理实现与 SRS 交互。SRS 由三层代理组成,即 MA、领域代理(domain agent, DA)和子域代理(sub-agent, SA)。MA 是代表用户参与活动的主体,完成相关仿真控制信息和模型信息的输入输出控制,在仿真模型运行过程中,介入系统结构变化,改变模型系统的组织状态^[5]。DA 是解释领域仿真过程定义、控制过程实例的执行、任务调度、数据维护和监控等。SA 是子域公共计算资源,当 DA 要访问计算资源时,它向相关的 SA 发送请求,SA 将执行请求和操作结果返回给请求者 DA。一个 MA 包含多个领域 DA,一个 DA 可包含多个 SA,一个 SA 可能同时属于两个以上不同领域的 DA,一个 SA 一般采用一种仿真工具,某仿真工具(如 Ansys)可同时被多个 SA 所采用。

SRS 仿真主题可通过 SRSS 进行配置。MA 表示如飞机、锅炉设备开发设计,产品模型可按树形结构展开^[8],根据其固有特性进行领域划分,分别将领域与各子域绑定,基于计算资源约束完成 SRS 配置。文献[8]在大规模并行分布式仿真语言中应用了 8 类智能体类型如 Master _ Agent、Slave _ Agent 和 Remote _ Agent 等,与之比较,各 SRS 之间亦可基于仿真逻辑进行嵌套分级部署,部署在异地 SRS 可以作为当前 SRS 的一个 DA 而提供服务,SRS 这种分布和集中相结合的结构部署是通过模型库的系统配置来满足系统规模变更的需求。

1.2 相关 Agent 描述

仿真运行支撑系统(SRSS)配置管理可维护模型驱动架构(model driven architecture, MDA)及其版本变更,使服务化仿真资源在概念上具有可装配性和协同性,建模的结果是一个描述应用概念的与平台无关的模型(platform independent model, PIM),PIM 将根据一定的映射规则被转换成平台相关的模型(platform specified model, PSM)^[9],基于 SOA 的 PSM 是 SRS 各类服务和资源管理中间件,包括 Web 服务、工作流引擎和过程管理等。在图 2 中分别划分了 SRSS、MA、DA 和 SA 的各子功能代理。

(1)SRS 各级用户接口代理包括:①仿真用户插件代理(SUPA),②域用户代理(DUA),③子域用户代理(sub-domain user agent, SDUA),分别管理来自用户界面输入的请求、来自 MA 和 DA 的用户请求。

(2)SRS 各级管理接口代理包括:①系统仿真管理代理(SSMA),②域仿真管理代理(DSMA),③子域仿真管理代理(SDSMA)。SSMA 执行全局仿真监控定义(包括过程管理、仿真模板配置和故障)的实例,将消息转发给对应的管理进程。DSMA 与 SDSMA 分别接受来自 SSMA 和 DSMA 服务管理请求,在领域和子域内执行管理任务。

(3)仿真过程管理代理(SPMA):SPMA 是分布式仿真系统的核心功能之一,控制整个仿真过程的执行,如创建、监控和中断仿真过程实例。

(4)故障管理代理(FMA):FMA 管理特定条件下



图 2 Agent 体系结构

触发的事件告警,事件告警如错误消息数,仿真服务在特定的时间内未完成分析计算等。

(5)配置管理代理(CMA):在仿真运行支撑系统中构建面向各类应用的仿真服务元模型、系统结构元模型和系统行为元模型。

(6)数据管理代理(DMA):基于元数据配置模

型,对分布式仿真运行环境数据动态管理,确保仿真数据在传递和交换过程中获得语义理解的一致性。

(7)工作流引擎代理(WFEA):根据配置模型库中仿真模板,分别在 MA、DA 和 SA 进行分级激活驱动。工作流引擎是根据应用实例数据文件判断后继节点的活动,包括顺序路由、并行路由、选择路由和同步路由。

(8)仿真过程资源代理(SFRA):基于仿真模板,通过查找资源配置库,获得最佳资源路由信息,实现仿真服务调用。

(9)Web 服务封装代理(WSEA):对仿真业务过程进行 Web 封装,并可在用户交互过程中,按照 Web 协议栈进行解包。

(10)服务管理代理(SMA):SMA 从 DMA 获取 CAE 结果文档,并进行审批和归档。CAE 文档如求解结果、分析报告和有限元网格等。

2 仿真应用通信接口及其通信机制

2.1 通信接口

文献[10]采用 IDL 将各 Agent 封装成 CORBA 对象,各 Agent 通过 CORBA 的互操作机制来传递消息。文献[11]研究了协同 CAE 系统层次结构模型,采用常见的组件技术、ASP 技术、WEB 技术等,对协同 CAE 系统进行了开发。以此研究为基础,在分布式仿真体系中,Agent 间采用基于松散耦合和异步或同步消息传输模式的网络通信机制。使用 SOAP 消息作为 Agent 之间的通信体,通信接口如图 3 所示。应用 Agent 之间(服务提供者与服务请求者)通过 Put message 与 Get message 函数提供消息服务。

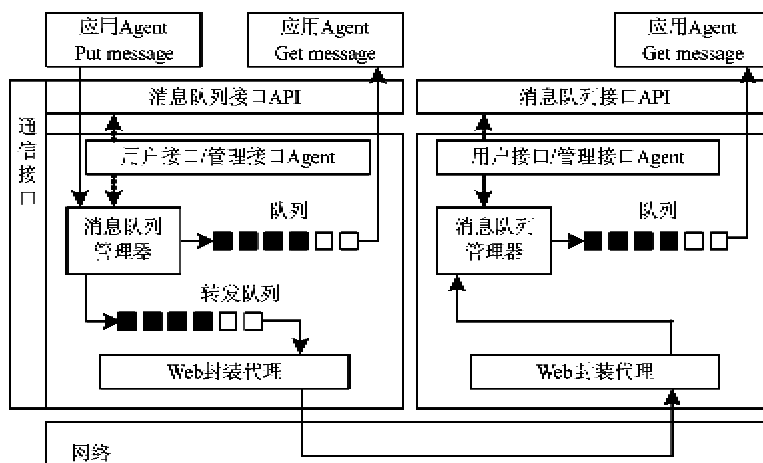


图 3 Agent 间消息通信接口模型

图3中消息队列管理器提供消息队列、消息触发器和消息事务管理等功能。在通信时,仿真应用将调用消息发送给用户接口或管理接口 Agent 的消息队列管理器,然后通过转发队列,发送给 Web 封装代理,Web 封装代理实现消息在网络中的路由管理。仿真服务消息采用 SOAP 消息格式,它是一个 XML 文档,由一个必需的 SOAP 封装、一个可选的 SOAP Header 和一个必需的 SOAP Body 组成。SOAP 封装定义了描述消息中包含什么内容以及如何处理它们的框架;SOAP Header 是支持在松散环境下,为 SOAP 消息增加处理特性的通用机制,如身份验证、会话等;SOAP Body 提供一个简单用于和消息最终接收者交换信息的机制,其应用包含数据和错误消息。按照 SOAP 消息传输模式又可以分为两类:点对点(PTP)方式和发布/订阅(Pub/Sub)方式,两者主要区别是在 PTP 模式中,每条消息只能有一位接收方,而 Pub/Sub 模式中的每条消息可以有多个接收方。

2.2 Agent 通信机制实现

在通信机制的选择上,文献[3]按照通信接口 Agent 的公共父类继承关系,通过消息匹配预定相关主题,实现 Agent 之间交互。文献[12]提出一个基于 Agent 的分布仿真的通信系统,通过配置 Server Agent,提供基础仿真服务,包括消息转发、功能查询等。文献[13]利用协同 Agent 的信念意图体系结构,有效实现了协同过程各阶段的感知、控制功能。本文在已有的研究基础上,结合分布式 Agent 仿真体系结构,提出一种可靠、高效的通信机制。

基于元数据配置,DMA 支持仿真环境的数据动态维护,分别封装在 MA、DA 和 SA 中。MA/DA-DMA 的主要功能实体有:(1)全局/领域元数据维护:维护全局/领域元数据配置目录,元数据结构包括类型、数据、参数值及其描述、版本跟踪、仿真脚本和位置等^[14],根据元数据信息从信息源中抽取数据,按照特定的格式和方法提供给数据请求者使用,并且从仿真平台获取所需要的信息;(2)事务协调:控制和协调分布式事务即一个应用的操作序列,进行事务的启动、提交和终止处理;(3)全局/领域数据处理:定位和查找用户请求的数据,与事务协调交互,通过检索全局/领域元数据配置目录,实现全局/领域数据转换等。SA-DMA 的主要功能实体有:(1)子域元数据维护:接收 DA-DMA 元数据配置,检测局部数据结构的变化,并同步更新 DA-DMA 元数据;(2)子域数据处理:更新局部数据库、查询数据转换等。分别用 A1、A2 和 A3 代表元数据维护、事务协

调和数据处理,分布式仿真系统 Agent 间协同数据管理过程框架流程如图4所示。

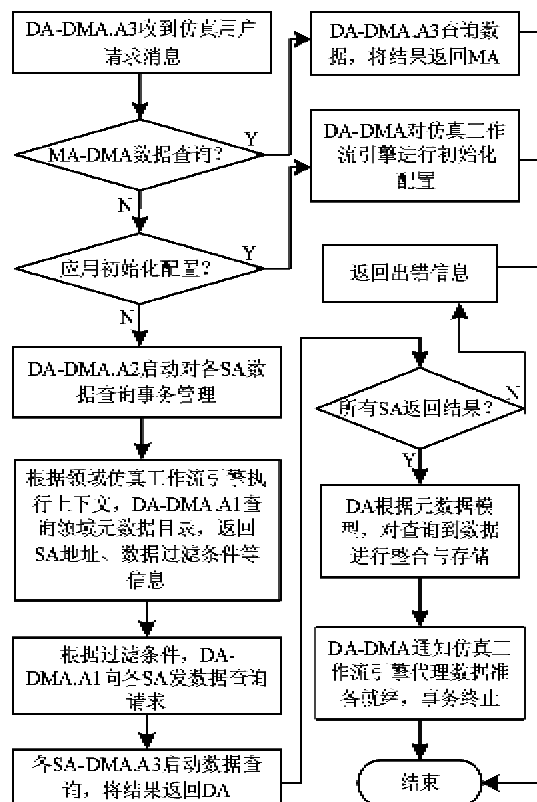


图4 Agent 协同通信机制

由图4可知,Agent 通信机制执行流程的主要步骤如下:

步骤1:MA 向 DA 请求数据:请求分为两类,一是在主 workflow 引擎向 DA 发送数据查询,二是 MA 向 DA 发送的数据管理请求。

步骤2:如果 DA 已经完成领域相关步仿真,则根据查询条件返回领域数据库查询结果;如果是数据管理请求,则进行 DA 运行前数据初始化配置;否则转步骤3。

步骤3:DA-DMA.A3 接收 DA-WFEA 请求:DA 领域 workflow 推进中,为下一步仿真任务启动数据查询事务管理,提取该步任务启动所需分析数据。

步骤3.1:根据仿真分析执行上下文,DA-DMA.A3 激活 DA-DMA.A1 查询元数据配置目录,返回 SA 地址、数据过滤条件等信息。DA-DMA.A1 向各 SA 发送查询请求。

步骤3.2:各 SA-DMA.A3 根据查询条件返回结果给 DA。

步骤3.3:DA-DMA 根据元数据模型,对查询到数据进行整合,存储至数据库,为下一步仿真任务准备数据条件。

步骤 3.4: DA-DMA 通知 workflow 引擎代理数据就绪, 事务终止。

workflow 引擎初始化后, SA 向所属的 DA 主动上报管理消息, 包括故障检测、告警、位置和能力关键字(元数据)登记。以上描述的领域仿真数据管理流程, MA 数据管理流程逻辑与此相同, 只是消息(数据)交互层在仿真支撑系统和 MA、MA 和 DA 之间, 且 MA 是唯一的。

在上述协同消息机制基础上再利用引擎提供对应用实例的任务项路由控制便实现仿真服务间的协同, 保证了 workflow 仿真应用实例的顺利执行。

3 基于 Agent 的协同仿真系统的实现

目前的仿真环境系统主要是建立在 HLA 或组件(代理)加上 CORBA 或 Web 服务架构上。文献[15]提出了一种基于组件的开放式复杂机电系统多学科设计与仿真集成框架, 实现设计与仿真应用在集成框架中的即插即用。文献[16]提出将 Web 服

务与 HLA 结合构建支持广域网环境下的基于组件的协同仿真平台框架, 分析了两种组件的运行管理和优化机制。文献[17]为多学科虚拟样机开发构建了协同建模与仿真平台, 组件信息交互通过分布中间件如 HLA、CORBA 等实现。文献[18]使用分布式策略, 设计并实现了基于 Web 服务的 RTI。本文提出另一种途径解决分布式协同仿真问题, 即采用 Agent 与 SOA 技术组建分布式仿真三层代理模型, 将外部交互层如设计分析工具资源与仿真环境进行动态绑定, 构建基于 Agent 的分布式仿真环境系统。建立系统的主要步骤是: (1) 使用 AgentBuilder 平台实现 SRS 内多代理创建与管理。(2) 建立仿真模型配置库。(3) 将以 XML 定义的仿真过程以 Web 服务方式封装, 并通过仿真管理系统操作界面在模型库中进行声明。(4) 仿真管理系统中创建仿真故障和过程监控。(5) 建立代理间基于 SOAP 的消息交互。(6) 使用 PDM 实现对 CAE 文档管理(服务管理代理)。基于 Agent 的分布式仿真系统环境应用框架如图 5 所示。

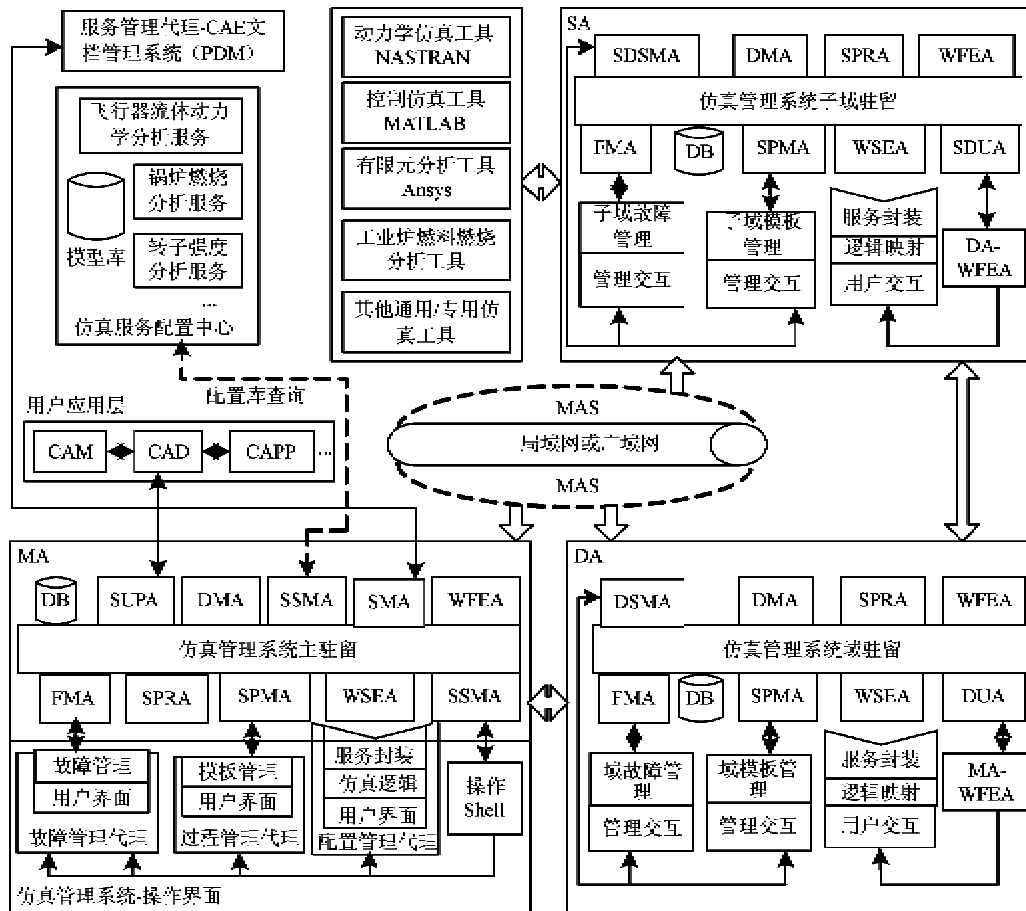
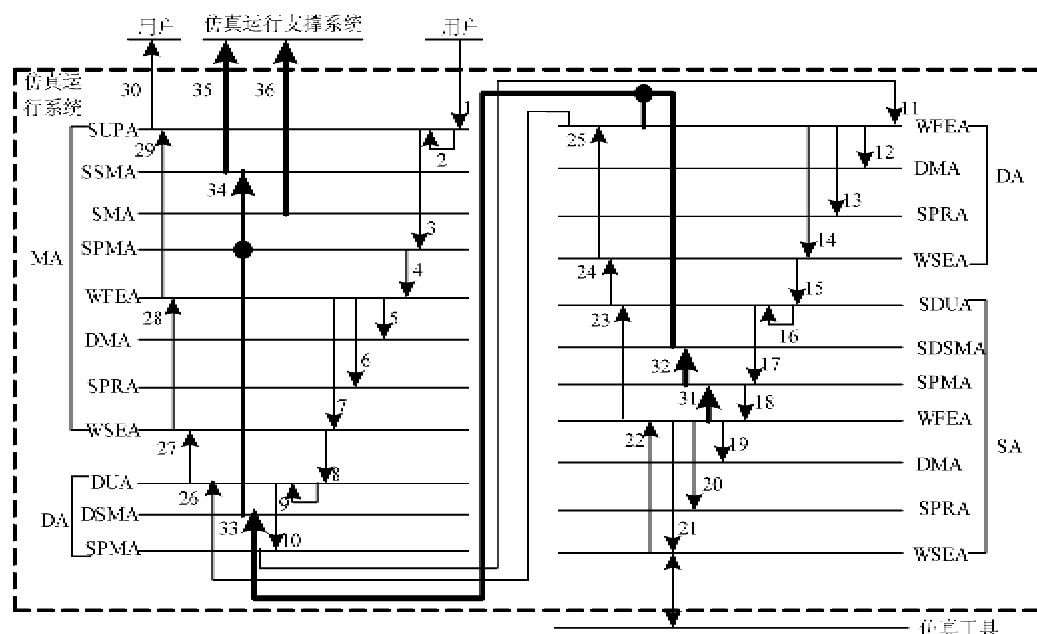


图 5 分布式多 Agent 仿真系统环境应用框架

在图 5 中,仿真管理系统驻留是指 SRS 内各代理及其子代理之间进行仿真管理信息交互的平台,面向服务的一个基本原则是分散式管理,如果一个方法,由它得到的架构不需要对所有模块进行集中管理,该方法符合分散式管理^[19]。MA、DA 和 SA 的实现结构类似,它们之间主要是仿真业务逻辑和 Web 服务实现上的区别。在仿真管理系统操作界面中配置管理代理负责系统分析,列出仿真服务清单,分解服务得到操作集,与 MA-WSEA 交互,完成 Web 服务配置。MA-WSEA 通过 DA/SA-WSEA 存取数据和请求操作,DA/SA 用户代理接收外 WSEA 传出的服务请求,并送本领域 WSEA,由它与本查询领域配置库将仿真服务请求分解为操作集。SSMA、DSMA 和 SDSMA 分别级联,它们分发信息至对应的仿真管理进程。DB 存储仿真分析结果。

基于该平台,综合运用各类仿真工具分析强项对飞行器进行结构设计和多领域仿真分析,用来预测飞行器的结构力学、热力学、动力学、飞行控制等诸方面的特性及其相互之间的关系。在一个飞行器

计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)仿真过程中,系统收到用户仿真请求消息时,根据请求信息,MA 在主配置库中查找相应的分析模型,启动主 workflow 引擎后,DA-DUA 收到 MA 调用请求,由 DA-SPMA 初始化负责 CFD 分析域的 WFEA 来执行仿真任务。DA-WFEA 将驱动 SA 调用 IDEAS 建立飞行器结构总体模型后,即可对模型生成 CFD 分析网格,但需将单元体参数及边界条件等形成数据文件,以便进入 NASTRAN 作 CFD 分析。在 DA-DMA 中配置元数据,用来实现将 IDEAS 的输出数据转换成 NASTRAN 中分析的输入文件,以便 NASTRAN 进行 CFD 分析;并将由 NASTRAN-CFD 分析得到的压力与温度场分布作为整体结构的动力学载荷输入到结构有限元模型,以便进行飞行器结构的有限元分析与仿真。用户通过 MA 可获取机翼 CFD 网格和飞行器表面压力等分析结果信息。其一般工作流程如图 6 所示。其中粗线表示分布式仿真过程监控、分析结果主动上报至仿真运行支撑系统。



1-用户仿真请求; 2-查询主配置库; 3-创建主仿真过程; 4-主仿真过程实例化; 5-数据模型; 6-资源请求; 7-调用服务; 8-用户请求(MA-FA); 9-查询域配置库; 10-创建域仿真过程; 11-域仿真过程实例化; 12-数据模型; 13-资源请求; 14-调用服务; 15-用户请求(DA-SA); 16-查询子域配置库; 17-创建子域仿真过程; 18-子域仿真过程实例化; 19-数据模型; 20-资源请求; 21-调用服务; 22-返回结果; 23-返回结果; 24-返回结果(SA-DA); 25-返回结果; 26-返回结果; 27-返回结果(DA-MA); 28-返回结果; 29-返回结果; 30-返回结果; 31-子域过程监控结果; 32-返回监控结果; 33-返回监控结果(SA-DA); 34-返回监控结果(DA-MA); 35-返回监控结果; 36-CAE结果文件

图 6 分布式仿真系统 Agent 序列图

随着仿真系统的不断复杂化,通过多个组织共同协作、整合智力资源来完成仿真,已经成为迫切的需求。该系统实际实现的复杂性体现在:需实现虚拟组织之间的资源动态共享与互操作,避免仿真资

源静态绑定,缺乏有效的资源共享和按需的动态调度机制以及仿真资源利用率差;需实现跨部门、跨组织的仿真资源不同粒度、不同层次的协同互操作与可重用,防止仿真资源协同操作与重用性不足;需在

系统节点较多,且运行在大规模、分布、异构环境条件下,实现系统的运行监控、性能故障监测和控制管理功能,克服仿真运行系统在线管理不足的缺点。

4 结论

基于 Agent 的分布式仿真技术能够增强仿真系统性能,实现仿真资源的优化管理和综合利用,同时促进仿真技术的集成和组织机构间的协作。本文提出的分布式多 Agent 仿真环境系统体系架构,对于复杂综合系统研究和功能验证都具有重要意义。在仿真实体管理、监控、跟踪方面,分布式仿真网络的工程系统快速构造、开发、协同仿真和实时互操作以及性能评估等,都具有广阔的应用前景。以产品设计为线索,跨组织的组件开发集成,能够发挥各个组织的专业优势,整合各种资源,大大提高设计能力。Web 服务与代理技术为这种需求提供了解决途径,它们为应用系统在分布式环境下的集成提供了支持,新涌现的面向服务的体系结构也为企业的业务定制和应用集成提供了新的参考架构。可以构建一个基于局域网或广域网的协同仿真环境,从而有利于解决企业内部网或因特网范围内的分布式产品开发与分析。该框架在实际应用中具有开放性、动态性和可扩展性,用户可根据具体的系统特征和仿真需求确定合适的控制功能结构。下一步将逐步完善仿真环境系统功能,用工作流语言描述不同的 Agent 组件模型,这不仅涉及到技术层面上的事情,还将涉及到诸多组织方面的因素,如标准规范的开放、制定和实施等。

参考文献

[1] 张卫,查亚兵.基于网格的先进分布式仿真综述.系统仿真学报,2008,20(5):1089-1093

- [2] Zhuang Y, Zhang Z X, Cheng J M, et al. Research on multi-agent simulation environment based on HLA. In: Proceedings of the 5th International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Dalian, China, 2006. 154-159
- [3] 孙知信,宫婧,程媛等.基于移动 Agent 的分布式仿真系统体系结构研究.计算机集成制造系统,2006,12(3):395-400
- [4] 颜洪梅,战守义,杨方廷.一种基于工作流面向服务的分布式远程协同仿真系统.北京理工大学学报,2006,26(5):425-428
- [5] 曹军海,熊光楞,徐宗昌.分布式多 Agent 仿真系统的控制结构研究.系统仿真学报,2005,17(3):627-630
- [6] 苟凌怡,熊光楞.分布交互仿真应用中基于 WEB 技术的协同数据管理.系统仿真学报,2002,14(1):67-74
- [7] 燕雪峰,李凤霞,战守义等.仿真网格资源共享池关键技术研究.计算机集成制造系统,2005,11(8):1174-1178
- [8] 吕志,吕毅,高展.开放网格计算环境中的先进制造仿真.计算机集成制造系统,2005,11(5):706-714
- [9] Adel Torkaman R, Vahid R, Saeed S, et al. An MDA-based modeling and design of service oriented architecture. In: Proceedings of the 6th International Conference on Computational Science, Reading, United Kingdom, 2006. 578-585
- [10] 张和明,曹军海,范文慧等.虚拟样机多学科协同设计与仿真平台实现技术.计算机集成制造系统,2003,12(12):1105-1111
- [11] 倪晓宇,刘英.协同 CAE 系统及其实现方法.机械工程学报,2006,42(8):71-77
- [12] 廖守亿,戴金海.基于 Agent 的分布仿真中的通信系统设计与实现.系统仿真学报,2006,18(4):1006-1010
- [13] 王龙,冯玉强,黄福玉.基于 Agent 的协同感知控制体系与通信机制.南京理工大学学报(自然科学版),2009,33(2):183-187
- [14] Dragan S, Matevz P, Francesco P. A tool for packaging and exchanging simulation results. In: Proceedings of the 1st International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools, Pisa, Italy, 2006. 1190-1172
- [15] 毕鲁雁,焦宗夏,范圣韬.复杂机电系统多学科设计与仿真集成框架.系统仿真学报,2008,20(12):3265-3269
- [16] 王宏伟,张和明.面向广域网环境的协同仿真平台的设计与实现.计算机集成制造系统,2009,15(1):12-19
- [17] 邸彦强,李伯虎,柴旭东等.多学科虚拟样机协同建模与仿真平台及其关键技术研究.计算机集成制造系统,2005,11(7):901-908
- [18] 周辛,卫军胡,李鹏等.基于 Web 服务的分布式 RTI 设计与实现.系统仿真学报,2008,20(8):2064-2067
- [19] Krishnan D. Loose Coupling in SOA Defined. <http://www.infoq.com/news/2008/06/loose-coupling-soa>. InfoQ, 2008

Research on architecture of distributed multi-agent simulation environment systems

Guo Yuming, Wang Jian, Ling Weiqing
(CIMS Research Center, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract

In order to enhance the agility and expansibility of simulation systems, a control function framework for distributed multi-agent simulation systems was proposed based on the introduction of the Agent technique from the angle of the service oriented architecture. The framework included the simulation running support system, the master agent, the domain agent and its sub-agent. The agent classifications and the functions inside these entities were described. At the same time, the agent communication interfaces and procedures that could guarantee the high efficacy of interactions among agents of different levels were discussed. Finally, a prototype system was created based on the above mentioned infrastructure and method. The research result indicated that the application of agent techniques could help to strengthen the criterion of distributed simulation systems and improve their reusability and collaboration interoperability.

Key words: Agent, multi-agent simulation, distributed simulation, service oriented architecture (SOA), control framework