

探索分布仿真应用中广义时空域层级一致性*

范林军¹, 凌云翔¹, 王涛², 燕厚仪¹

¹(国防科学技术大学 信息系统工程重点实验室, 湖南 长沙 410073)

²(Faculty of Mathematics and Computer Science, University of Bremen, Germany)

通讯作者: 范林军, E-mail: ljfan_nudt@163.com, http://www.nudt.edu.cn/ArticleShow.asp?ID=39

摘要: 时空一致(time-space consistency, 简称 TSC)是面向服务分布仿真应用(service-oriented distributed simulation application, 简称 SODSA)中关键的基础性问题, 目前的研究侧重于考虑狭义的时间和空间概念, 难以实现建模与仿真全过程的整体一致性。通过分析 SODSA 的广义时空一致性需求及其不一致的影响因素, 引入了系统的全局时空一致性轴概念。在此基础上, 提出了广义时空层级一致性构想, 包括形式化定义、一致性四域模型、一致性时空成熟度和一致性层级框架。该研究成果深化了对 SODSA 全局一致性时空需求的理解, 有助于解决整个仿真系统的不一致问题, 为分布仿真应用全局 TSC 量化评价奠定了基础。

关键词: 分布仿真应用; 广义时空; 层级一致性; 形式化方法; 面向服务架构

中图法分类号: TP302 **文献标识码:** A

中文引用格式: 范林军, 凌云翔, 王涛, 燕厚仪. 探索分布仿真应用中广义时空域层级一致性. 软件学报, 2013, 24(2): 317-330. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4328.htm>

英文引用格式: Fan LJ, Ling YX, Wang T, Yan HY. Exploring hierarchical consistency based on generalized time-space field in distributed simulation application. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2013, 24(2): 317-330 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4328.htm>

Exploring Hierarchical Consistency Based on Generalized Time-Space Field in Distributed Simulation Application

FAN Lin-Jun¹, LING Yun-Xiang¹, WANG Tao², YAN Hou-Yi¹

¹(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

²(Faculty of Mathematics and Computer Science, University of Bremen, Germany)

Corresponding author: FAN Lin-Jun, E-mail: ljfan_nudt@163.com, http://www.nudt.edu.cn/ArticleShow.asp?ID=39

Abstract: Time-Space consistency (TSC) is a crucial and fundamental problem in service-oriented distributed simulation application (SODSA), but current researches have been inclined to consider the concepts of special time and space and have been unable to achieve the global TSC in whole modeling and simulation. By analyzing requirements of generalized TSC and its inconsistent factors, the study presents the global axis of TSC. The notion generalized time-space hierarchical consistency is proposed, consisting of formal definition, of the consistency-resource-model-service-perceive model (C-RMSP), consistency-time-space maturity (C-TSM), and consistency-hierarchical framework (C-HF). The research achievements in this paper reinforce the understanding of global time-space demands of consistency and support global quantitative evaluation on TSC of distributed simulation applications in the future, which are beneficial to resolving inconsistent issues in the whole simulation system.

Key words: distributed simulation application (DSA); generalized time-space; hierarchical consistency; formal method; service-oriented architecture (SOA)

* 基金项目: 国家自然科学基金(61272336); 国家科技支撑计划(2009BAG12A05)

收稿时间: 2012-06-13; 修改时间: 2012-08-20; 定稿时间: 2012-10-19

当前,面向服务仿真和组合仿真已成为复杂系统仿真与分布仿真领域的研究热点^[1].分布仿真应用(distributed simulation application,简称 DSA)的大规模趋势^[2]、融合服务的分布架构环境^[3]、模型和服务的动态组装与重用^[4,5]等使得仿真系统的不确定性、不一致问题更为突出.TSC 问题是 DSA 系统中一个经典的、目前仍具挑战性的技术难题^[6].系统力求时空一致,其根本目的在于获得逼真(可信)的虚拟现实环境及正确的仿真结果,这不仅需要系统内保持一致的时间顺序关系^[7],更需要确保模型与服务组件的一致性状态^[8,9](包括组件的实现、接口及描述等),甚至人的认知一致^[10].但目前的研究一般只考虑狭义的时间和空间概念.

学者们在狭义时空一致研究方面取得了大量的成果.典型的时间同步协议与算法有 NTP 协议、GPS 同步、WSN、FTSP 等^[11].TSC 控制技术有本地滞后技术、推算定位技术、时间扭曲技术、实体迁移技术等^[10,12].但上述研究主要侧重于具体时钟同步技术和 TSC 维护技术^[6,11,13],较少论及广义时空一致性问题.

大规模分布仿真的发展趋势使得单一的 TSC 同步与控制技术应用受限^[10],且整个系统的不一致状态不是仅通过时钟同步就能解决的.状态一致性、感知一致性等其他因素也是需要考虑的范畴.文献[14]从仿真对象的因果顺序一致和状态一致性的角度研究分布虚拟环境(distributed virtual environment,简称 DVE)的一致性,将 TSC 概念模型分成两个层次:感知一致性和仿真正确性.文献[15]指出,计算系统的日益复杂化趋势,要求其具有更高的可信性,从某种意义上讲,也是系统一致性问题的反映.文献[16]从仿真节点的行为属性出发(包括发现策略、同步交互与防止欺骗)定义了 3 个 TSC 模型,这表明节点的行为亦影响仿真时空属性.文献[17,18]除了考虑时钟同步、信息传输延迟、推算定位算法精度、实体迁移等因素以外,还将人的认知因素考虑进 DVEs 时空一致性研究中.文献[19]指出,TSC 问题不仅包括因果顺序一致、时间空间一致,而且包括虚拟场景一致.从广义上来说,分布仿真系统里的 TSC 问题还应包括影响系统状态一致性和仿真结果正确性的服务行为和质量一致性^[20]、模型一致性^[8,21]、数据一致性^[22]、认知一致性^[14,23]等内容.上述研究试图从更广泛的一致性视角来研究 TSC,但没有将各种因素综合考虑,也只是部分地解决了某些时空不一致问题.

本文通过分析 SODSA 的广义时空一致性需求及其不一致的影响因素,阐述了系统从底层资源、仿真模型、仿真服务到用户认知的全局时空一致性轴概念.在此基础上,结合先前学者们的研究成果,提出了广义时空层级一致性构想,包括一致性相关定义、一致性四域模型、一致性时空成熟度和一致性层级框架,全面而系统地阐述了 SODSA 中广义时空层级一致性的内涵,为 DSA 时空一致性量化评价奠定了基础.

1 广义时空一致性需求分析

面向服务架构(service-oriented architecture,简称 SOA)为 DSA 提供了全新的模式,当前不乏关于面向服务的分布建模仿真框架(service-oriented distributed M&S framework,简称 SODMSF)与平台的研究^[1,3,24,25].TSC 问题也是 SODMSF 需重点关注与解决的基本问题.从上述研究可以看出,SODSA 体系结构大致分为支撑平台层、资源层、模型层、仿真服务层、仿真应用层和用户层等,而任何 DSA 都是在特定的时间和空间内进行,可以预知,分布式仿真系统的设计、开发、运行等各个阶段都始终贯穿时空主线,有狭义时空一致性要求,也有广义时空一致性约束,时空不一致问题或仿真不一致问题遍布于整个 DSA 层次结构.我们用一条时空轴来描绘 SODSA 架构下最底层的支撑平台(时钟)、仿真模型、服务组件到最上层的用户认知层的全局广义时空一致性需求,如图 1 所示.本文所述时空应包含狭义和广义两个层面.

在上述一致性时空轴的基础上,我们从时空逻辑顺序关系(不发生与现实世界矛盾的现象)、仿真过程时空演化的正确性(仿真模型构建、仿真服务的封装与调用等过程)和仿真结果的正确性(结果展示和用户认知)来分析 SODSA 框架下广义时空一致性需求.

时空逻辑顺序关系主要是指确保仿真事件在同一时空平台执行的序列关系,具体活动包括时钟同步、时序逻辑维持及空间坐标校准等.时钟同步需要解决网络传输延迟、计算机晶振频率的跳变等问题;时序逻辑维持需要良好的仿真时钟推进机制支撑;统一的空间坐标体系保证仿真节点能够在同一虚拟平台环境中共存与交互.为了确保 DSA 的正确性,仅考虑时空逻辑顺序是远远不够的,它只是仿真正确性的必要条件.

仿真过程时空演化主要涉及到仿真模型和服务开发运行全过程中与一致性相关的活动.就模型而言,与真

实客观存在是否一致、不同节点对同一模型的理解偏差、模型描述是否规范合理、接口是否简单易用等都对仿真过程时空演化正确性具有重要影响.即便仿真模型达到一致,也很难保证整个仿真应用是客观真实的.在 SODSA 中,基于模型而封装的服务是否具有良好的一致性也不容忽视.DSA 的基本前提是获得与现实世界一致的高逼真模拟,而这涉及到各种模型组件、服务组件等仿真资源的一致性问题.仿真过程时空演化不仅包括仿真模型的行为活动,还包括基于模型的仿真服务活动.

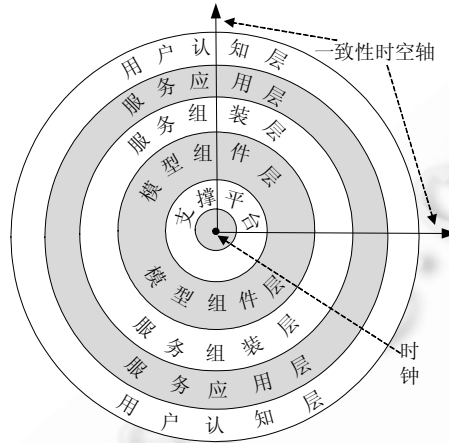


Fig.1 Axis of global TSC in SODMSF

图 1 SODMSF 框架下全局时空一致性轴

仿真结果的正确性包括用户认知的一致性和仿真结果可视化的一致性.即使确保底层平台时序逻辑和仿真过程时空演化的一致性,仿真结果的可视化、态势显现等是否与真实情况一致,或者态势是否是对仿真结果的正确展示仍需评估,这与采用的态势显示技术与手段有关.从用户的角度来看,主要是通过视觉、听觉和触觉来辨别仿真结果的正确性,用户对仿真过程和结果的观测与认知直接影响对仿真一致性的理解.

DSA 的多源、异构、大规模特性,使其 TSC 需求不仅仅是局限于仿真系统的某些方面,如时钟同步、一致性模型、一致性保持技术、坐标系对准等,而是全方位、多层次地研究整个仿真系统内的全局时空一致性,涵盖底层通信、仿真模型、仿真服务和用户认知的各个层面.时空逻辑顺序关系是 DSA 时空一致性的基本需求,仿真过程时空演化一致是广义时空一致的核心构成,仿真结果的正确性是时空一致性控制的最终目标.

2 广义时空不一致影响因素

基于 SODMSF 框架的层次模型如图 2 所示,分别从底层平台、仿真模型、应用服务、仿真结果显现和用户认知层面来具体考虑影响时空不一致的因素.



Fig.2 Hierarchical model of SODMSF

图 2 SODMSF 的层次模型

底层平台层.该层是 SODSA 保持时空一致的根本,主要从基础平台层与信息传输层影响时空一致性.在基础平台层.首先,由于计算机晶振频率误差造成仿真节点间的物理时钟不同步;其次,因采用不同的坐标系导致

各仿真节点空间域各异.在信息传输层面,底层网络传输层的不确定延迟、中间件(如 HLA/RTI,KD-RTI 等)的管理开销等,使得时空一致性控制具有不确定性.异构环境下传输协议(如 TCP/IP,UDP 等)不一致、信息交换标准与格式(如 XML,HTTP,SOAP 等)各异,也可能导致数据偏差.网络传输方式(如单播、组播、广播等)以及数据传输的可靠性(如面向连接的服务和无连接的服务)也影响时钟同步的效率、精度和可靠性.各种中间件的通信架构方式(如 P2P 对等结构、C/S 结构和层级网络结构等)对 DSA 的平台支撑各有优缺点,所采用的时钟同步技术各不相同.如,P2P 对等网络虽然性能优越,负载分配均衡,但在节点时钟同步方面尚存不足;C/S 结构在大规模联邦仿真中由于服务器瓶颈,仿真时效性降低等.

仿真模型层.为使分布仿真模型组件最大限度地重用,达到提高开发效率、降低开发成本的目的,要求各仿真节点根据模型资源的特点,拥有各自的本地时空(亦称作局部时空)描述方法;另一方面,分布仿真节点的信息交互、数据交换等要求基于局部时空描述的仿真成员在一个统一的虚拟环境中进行互操作,实现一致的时空理解(亦称作全局时空).因此,模型组件的可重用与互操作的相互作用、同构或异构的仿真成员对时间和空间的认知会有差异,对同一事件的理解和处理也会各异,这就导致背离期望、因果混乱、存在歧义等 TSC 问题.而针对具体仿真模型,其设计与实现与真实情形存在偏离、各自模型的接口标准尚难统一、模型构件的动态演化具有不确定性^[8]等都增加了时空不一致程度.

应用服务层.服务的封装、发布与调用是 SODSA 的核心模块.各仿真节点的元服务采用合适的描述规范有助于避免静态时空不一致现象的产生.服务的共享与可重用机制是否完备合理、能否保证同一版本服务的全局一致性等对仿真结果的正确性具有重要影响.此外,诸如领域服务的描述逻辑语言和应用服务的互操作标准,对于正确理解与有效运用服务至关重要,有力地保证了仿真的正确性.

仿真门户层.仿真门户层是 DSA 的人机交互视窗与仿真结果展示模块,涉及到 Web 应用程序、ASP 技术、桌面应用程序、态势显现技术等,合理开发人机交互界面并正确展示仿真结果,包括各种图型、表格、数据文件、视频画面等,是用户理解仿真结果正确性的基础.仿真门户是对仿真过程与结果的剖析,由于技术与开发人员理解的缺陷,很难实现高度吻合的展示,这就导致了态势显现的时空不一致的出现.

用户认知层.从仿真层面上讲,分布异构的仿真环境中涉及大量实体,不同领域开发人员对概念的认知存在一定的差异,即使是相同领域也会出现对概念的语义约束认知的不一致^[9].从态势展示层面上看,不同用户因各自知识、思维、受教育程度等各不相同,对同一事物的认识与理解存在差异,如视觉、听觉、触觉等^[10],这就导致分布仿真态势显现结果的个体认知差异.仿真层面和态势层面的感知差异导致认知层面的时空不一致.

以上各个层面内与时空相关的仿真资源与行为导致了全局时空不一致,影响仿真系统的可靠性和有效性以及仿真结果的正确性.图 3 基本概括了影响全局时空不一致的各个层面的因素.

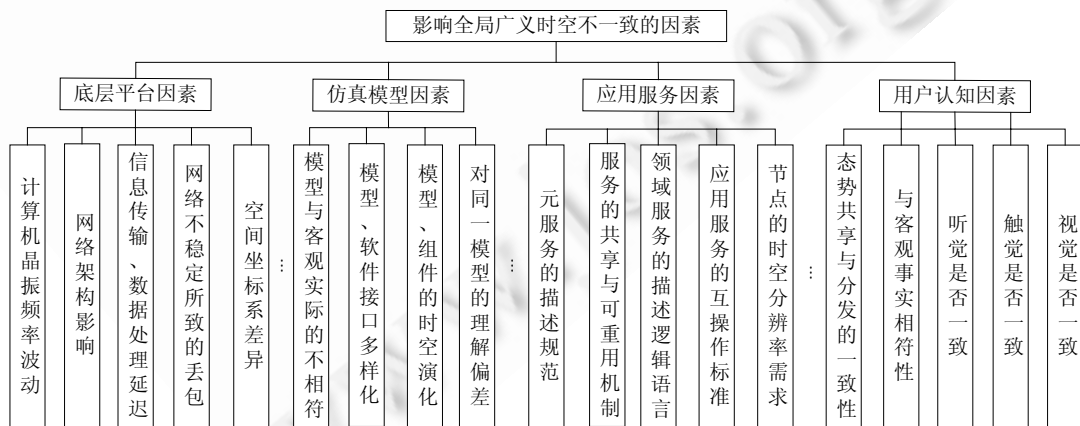


Fig.3 Factors on generalized time-space inconsistency

图 3 导致广义时空不一致的因素

3 广义时空一致性构想

在 SODMSF 架构下,通过分析广义时空一致性需求及其不一致的影响因素,我们提出广义时空四域一致模型(consistency-resource model service perceive,简称 C-RMSP)、一致性时空成熟度(consistency-time-space maturity,简称 C-TSM)和一致性层级框架(consistency-hierarchical framework,简称 C-HF).上述概念、模型及框架主要是提供一种形式化的分析方法与评价准则,方便后续构建广义时空一致量化评估模型,有助于分析并验证分布仿真系统的一致性程度,从而有针对性地提高仿真世界与现实情形的一致性程度,确保整个建模仿真过程及其仿真结果与真实世界相符.

与其他一致性思想或理论相比(如狭义时空一致、模型一致、服务一致、认知一致等)^[8,14,20,21,22,23],该构想将目前被研究的狭义时空概念推广到全局广义时空一致性轴概念.它不是只考虑上述某一方面的一致性问题,而是从 DSA 整体出发,分析建模与仿真实施各阶段内的影响仿真不一致的所有约束变元,考虑整个仿真过程和结果正确性的一致性问题的集合,涵盖了狭义时空一致、模型一致、服务一致和认知一致等范畴,在统一的广义时空视角下,重新度量 DSA 的一致性.其内部各时空域具有层级递进的一致性顺序关联关系.该构想为 DSA 的全局时空一致性量化评估奠定了基础.

3.1 形式化定义与描述

为了描述 DSA 中的仿真活动(包括平台资源、模型、实体、事件、服务、认知等),引入相关概念与定义.形式化主要便于后续的涉及整个 DSA 的时空一致多层次指标量化评价模型的构建、广义时空一致性问题的形式化分析及其一致性验证等.

记法 1(资源域(resource field)). 资源域是指 DSA 涉及到的时钟、网络拓扑架构、空间坐标、信息传输等底层支撑资源内容,用 R 来描述.

记法 2(模型域(model field)). 模型域是指与仿真模型的设计与实现、模型的接口规范、动态演化、模型认知等建模相关的范畴,用 M 来表示.

记法 3(服务域(service field)). 服务域是 SODSA 的核心模块,包括元服务、领域服务、应用服务、服务共享与可重用机制、服务粒度等范畴,用 S 来表示.

记法 4(认知域(perceive field)). 认知域是由仿真态势显现和用户对其的感知活动组成的认知范畴,用 P 来表示.

记法 5(仿真域(simulation field)). 在 SODMSF 仿真建模框架下,把分布仿真全过程涉及到的资源域 R 、模型域 M 、服务域 S 和认知域 P 统称作仿真域,用 sf 来表示, $sf = \{\sigma | \sigma \in \{R, M, S, P\}\}$.

定义 1(仿真狭义时空). 仿真狭义时空是由一个时间轴和资源域内三维空间坐标来描述仿真对象的多维状态时空,用 $I(T, x, y, z)$ 来表示, T 为仿真时间, x, y, z 为三维空间坐标,简记为 I . $I_j^O(T, x, y, z)$ 表示仿真对象 O 在节点 j 处的狭义时空坐标,简记为 I_j^O .

定义 2(仿真广义时空). 仿真广义时空是由仿真域 sf 和一个时间坐标来描述仿真对象的多域状态时空.用 $\Omega = (\Theta, T)$, $\Theta \subseteq sf$ 来表示,简记为 Ω . Θ 是仿真域 sf 的一个子集, T 为时间轴值.用 $\Omega_j^O = (\Theta_j, T)$ 表示仿真对象 O 在节点 j 处的广义时空状态,简记为 Ω_j^O . Θ_j 表示在仿真节点 j 处,仿真对象 O 涉及的仿真域 sf 子集.当且仅当满足下列条件时,我们称 $\bar{\Omega}$ 为广义局域时空,称 $\bar{\bar{\Omega}}$ 为广义全域时空:

$$\forall O, 1 \leq j \leq n, \exists \Omega = \begin{cases} \bar{\Omega}, & \text{iff } \Theta \subset sf \text{ and } \Theta \neq sf \\ \bar{\bar{\Omega}}, & \text{iff } \Theta = sf \end{cases}$$

定义 3(活动). 在 SODSA 中,对 $\forall \sigma$,把所有与建模仿真相关,并影响广义全域时空 $\bar{\bar{\Omega}}$ 一致的因素称作活动,用 A_i^O 表示, i 表示活动编号, σ 是 sf 内元素.

例 1:第 2 节中阐述的底层平台因素、仿真模型因素、应用服务因素和用户认知因素均属于活动.具体来说,

把资源域内降低网络传输延迟、模型域内规范易用的模型接口设计、服务域内同一服务的共享与更新机制设计以及认知域内采用的仿真态势一致性控制技术等都归于此类活动。

假设 1. SODSA 中存在一个墙上时钟 C , 系统中各仿真节点对 C 的瞬时捕获值 T_i 是完全相同的。

假设 2. SODSA 的实现是由分散在各个仿真节点上的模型包和服务包来完成。

假设 3. 每个模型和服务在某个特定时间都由 1 个节点单独控制。

以上假设满足 SODSA 的大多数情况。以下定义均基于仿真广义时空 Ω 。

定义 4(约束元). 对 $\forall \sigma$ 内的活动 A_j^σ , 把影响 SODSA 广义时空一致或影响 σ 内 A_j^σ 一致性状态的因素称作约束元, 用 γ_{ji}^σ 表示, i 表示约束元的序号, σ 为具体仿真域, 需要指出: 每一个活动 A_j^σ 拥有多个约束元 γ_{ji}^σ 。

例 2: 针对不同仿真域 σ , 具有不同的约束元 γ_{ji}^σ , 如模型约束元、资源约束元、服务约束元、认知约束元等, 分别用 $\gamma_{ji}^M, \gamma_{ji}^R, \gamma_{ji}^S, \gamma_{ji}^P$ 表示, 对应本文第 2 节中影响广义时空不一致的二级因素(如图 3 所示)。

定义 5(资源一致性状态). 在任意时刻 T , 对某一仿真节点 j , 资源域 R 所有与一致性相关的约束元 γ_{ji}^R 的一个类型一致的资源约束序列集 S_R^j 的赋值 $S_R^j = \{\gamma_{j1}^R, \gamma_{j2}^R, \dots, \gamma_{jm}^R\}$, 称为 R 的一个一致性状态, i 为约束元个数, γ_{ji}^R 的赋值用 $R_j^i(T) (0 \leq R_j^i(T) \leq 1)$ 表示, 称作 R 的一个一致性子状态, 如计算机晶振一致性子状态、信息传输一致性子状态、不确定网络一致性子状态等。

定义 6(模型一致性状态). 设 $S_M^j = \{\gamma_{j1}^M, \gamma_{j2}^M, \dots, \gamma_{jm}^M\}$, 在任意时刻 T , 对模型域 M 所有与一致性相关的约束元 γ_{ji}^M 的一个类型一致的模型约束序列集 S_M^j 的赋值, 称为 M 的一个一致性状态, γ_{ji}^M 的赋值用 $M_j^i(T) (0 \leq M_j^i(T) \leq 1)$ 表示, 称作 M 的一个一致性子状态, 如仿真模型与真实客观存在的一致性子状态、仿真模型动态演化的前后逻辑一致性子状态、模型不同副本的一致性子状态等。

定义 7(服务一致性状态). 与服务一致性相关的约束元 γ_{ji}^S 包括服务的描述规范化、接口标准化、共享与重用机制、同一服务的不同版本的一致性。设 $S_S^j = \{\gamma_{j1}^S, \gamma_{j2}^S, \dots, \gamma_{jm}^S\}$, 在任意时刻 T , 对服务域 S 所有与一致性相关的约束元状态给予一个类型一致的序列集 S_S^j 的赋值, 称为服务 S 的一个一致性状态, γ_{ji}^S 的赋值用 $S_j^i(T), 0 \leq S_j^i(T) \leq 1$ 表示, 称作服务 S 的一个一致性子状态。

定义 8(认知一致性状态). 认知一致需要确保仿真态势显现的正确性、与真实客观存在的相符性、用户感知的客观一致性等认知约束元 γ_{ji}^P 的一致性。定义 $S_P^j = \{\gamma_{j1}^P, \gamma_{j2}^P, \dots, \gamma_{jm}^P\}$ 为认知约束元集, 在任意时刻 T , 认知一致性状态用 S_P^j 的一个类型一致的状态赋值来表示, $P_j^i(T)$ 是对 γ_{ji}^P 的一致性状态赋值序列, 也称作认知 P 的一个一致性子状态。

DSA 的绝对广义时空一致是不现实的, 但通过适当的一致性控制与评估验证提高整个仿真系统的一致性程度是有意义的。本文提出时空一致性紧合度, 有利于分析、比较各种一致性控制方法。

定义 9(一致性紧合度). 一致性紧合度如式(1)定义:

$$\lambda_\sigma = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^l w_j^i \cdot \sigma_j^i(T)}{m} \quad (1)$$

其中, $\sigma_j^i(T)$ 表示某任意时刻 T , 仿真节点 j 上对 $\forall \sigma$ 内的第 i 个约束元的一致性程度(即 $M_j^i(T), P_j^i(T)$); w_j^i 表示仿真节点 j 上第 i 个约束元对 $\forall \sigma$ 一致性的影响程度, 其中, $0 \leq \sigma_j^i(T) \leq 1, w_j^i \geq 0, \sum_{1 \leq i \leq l} w_j^i = 1 (1 \leq j \leq m), \sigma \in sf, l$ 为特定 σ 内的约束元数目, m 为仿真节点数。

由定义 9 可知, $0 \leq \lambda_\sigma \leq 1.0, \lambda_\sigma$ 越大, 特定 σ 内一致性紧合度越强。整个 sf 内一致性紧合度 λ 如下计算:

$$\lambda = \sum_{\sigma \in sf} \omega_\sigma \cdot (\lambda_\sigma) \quad (2)$$

其中, $\omega_\sigma \in [0, 1]$ 表示某个特定 σ 对整个 SODSA 的一致性程度 λ 的影响权重, $\sum_{\sigma \in sf} \omega_\sigma = 1$ 。

定义 10(一致性概率分布). 设随机变量 $X_\sigma(0 < X_\sigma \leq 2)$ 服从 $N(\mu, \delta^2)$ 的正态分布. 在任意时刻 T_i , 对 $\forall \sigma$ 内的 Ω 一致性状态值用随机变量 X_σ 的概率 $P(\lambda_\sigma \leq X_\sigma \leq 1)$ 表示, 称作 σ 的时空一致性概率分布.

$$P(\lambda_\sigma \leq X_\sigma \leq 1) = \Phi\left(\frac{1-\mu}{\delta}\right) - \Phi\left(\frac{\lambda_\sigma - \mu}{\delta}\right) \quad (3)$$

若 $\lambda_\sigma=1$, 则一致性概率 $P(X_\sigma=1)=0$, 表明仿真域 sf 的绝对时空一致是不可能的; 若 $\lambda_\sigma=0$, 则 $P(0 \leq X_\sigma \leq 1)=0.5$, 表明一致性状态变量 X_σ 落在限定区间上的概率极值为 0.5. 若 $\mu=1, \delta=0.01$, 则公式(3)可表示为 $0.5 - \Phi\left(\frac{\lambda_\sigma - 1}{0.01}\right)$ (查标准正态分布表).

定义 11(一致性间隙). $\forall \sigma$ 内的 Ω 一致性状态值 $P(\lambda_\sigma \leq X_\sigma \leq 1)$ 与领域专家对该 σ 域的一致性评估值 λ_σ 之间的间隙用 θ_σ 表示:

$$\theta_\sigma = \left| P(\lambda_\sigma \leq X_\sigma \leq 1) - \frac{\lambda_\sigma}{2} \right| \quad (4)$$

定义 12(R 时空一致). R 一致性状态用 $R_j(T_i) = \sum_{r=1}^m \omega_r \cdot R_j^r(T_i)$ 来表示, j 为仿真节点编号, m 为约束元个数, ω_r 为约束元影响一致性的权重值. 在 T_i 时刻, 同一仿真对象在不同节点 j 上的 R 时空一致, 当且仅当:

$$\forall 1 \leq j, k \leq l, j \neq k, \text{ s.t. } \begin{cases} R_j(T_i) = R_k(T_i) = R(T_i) \\ R_j^o = R_k^o \\ \theta_R \leq 2\delta \end{cases}$$

成立, 称整个 R 达到阈值为 λ_R 、一致性间隙为 θ_R 的时空一致.

定义 13(M 时空一致). 用 $M_j(T_i) = \sum_{k=1}^l \omega_k \cdot M_j^k(T_i)$ 表示仿真模型在墙上时钟为 T_i 时在节点 j 上的一致性状态, 其中, $M_j^k(T_i)$ 表示模型的子状态, ω_k 表示该子状态对模型一致性的影响权重, l 为模型子状态个数. 用 $M(T_i) = \sum_{j=1}^n M_j(T_i)/n$ 表示所有模型在墙上时钟为 T_i 时的一致性状态, 亦有 $M(T_i) = \sum_{j=1}^n M_j^k(T_i)/n, 1 \leq k \leq l, n$ 为仿真节点数. 用 θ_M 表示 M 一致性间隙, iff $\theta_M \leq 2\delta, 0 \leq \lambda_M \leq 1$, 称模型域 M 达到一致性间隙为 θ_M 的一致性. 在任意时刻 $T_i > 0$, 整个 M 达到阈值为 λ_M 的时空一致:

$$\text{iff } \forall 1 \leq k \leq l, 1 \leq j, q \leq n, \text{ s.t. } \begin{cases} M_j(T_i) = M_q(T_i) = M(T_i), j \neq q \\ \theta_M \leq 2\delta \end{cases}$$

当且仅当 $\lambda_M=1$ 时, 若上式成立, 则称 M 绝对时空一致.

定义 14(S 时空一致). 仿真服务在墙上时钟为 T_i 时在仿真节点 j 上的一致性状态用 $S_j(T_i) = \sum_{r=1}^u \omega_r \cdot S_j^r(T_i)$ 度量, $S_j^r(T_i)$ 表示服务的子状态, ω_r 为其影响一致性的权重, u 为服务子状态个数. S 内所有服务在墙上时钟为 T_i 时的一致性状态用 $S(T_i) = \sum_{j=1}^f S_j(T_i)/f$ 表示, 此时有 $S(T_i) = \sum_{j=1}^f S_j^r(T_i)/f, 1 \leq r \leq u, f$ 为仿真节点数. θ_S 表示服务域 S 的一致性间隙, iff $\theta_S \leq 2\delta, 0 \leq \lambda_S \leq 1$, 称服务域 S 达到一致性间隙为 θ_S 的一致性. 在任意时刻 $T_i > 0$, 整个 S 达到阈值为 λ_S 的时空一致:

$$\text{iff } \forall 1 \leq r \leq u, 1 \leq p, w \leq f, \text{ s.t. } \begin{cases} S_p(T_i) = S_w(T_i) = S(T_i), p \neq w \\ \theta_S \leq 2\delta \end{cases}$$

当且仅当 $\lambda_S=1$ 时, 若上式成立, 则称 S 绝对时空一致.

定义 15(P 时空一致). 在墙上时钟为 T_i 时在仿真节点 j 上的认知一致性状态 $P_j(T_i) = \sum_{k=1}^m \omega_k \cdot P_j^k(T_i), P_j^k(T_i)$ 表示对认知约束元的认知状态, ω_k 为其影响一致性的权重, m 为认知约束元个数. θ_P 表示认知域一致性状态与估计

值的间隙, iff $\theta_p \leq 2\delta, 0 \leq \lambda_p \leq 1$, 称认知域 P 达到一致性间隙为 θ_p 的一致性状态. P 内所有认知在墙上时钟为 T_i 时的一致性状态用 $P(T_i) = \sum P_j(T_i)/n$ 表示. 整个 P 达到阈值为 λ_p 的时空一致:

$$\text{iff } \forall 1 \leq k \leq m, 1 \leq p, q \leq n, \text{ s.t. } \begin{cases} P(T_i) = P_p(T_i) = P_q(T_i), p \neq q \\ \theta_p \leq 2\delta \end{cases}$$

当且仅当 $\lambda_p=1$ 时, 若上式成立, 则称 P 绝对时空一致.

3.2 C-RMSP一致性模型

在设计与开发 SODSA 时, 会权衡考虑 sf 域内各种影响时空一致性的约束元 γ_{ji}^σ , 由于仅考虑底层的时钟等资源域内约束元 γ_{ji}^R , 或者模型域内的约束元 γ_{ji}^M 等, 也很难保证仿真的正确性. 基于仿真对象的状态一致性、仿真正确性、仿真态势显现等因素权衡考虑, 4 个仿真域之间的一致性关联关系如图 4 所示. 可以看出: M 时空一致依赖于 R 时空一致; R 和 M 的一致性程度直接影响 S 的服务一致性状态, 为 S 提供一致性时空支撑; 而 P 基于用户认知和仿真门户, 认知的客体来自于 R, M 和 S , 是对 sf 时空一致的理解与展现.

定义 16(一致性状态逻辑序). 在 SODMSF 框架中, $\forall \sigma(T_i), \sigma \in \{R, M, S, P\}, T_i > 0, \exists sf$ 内的一致性状态逻辑序 LS (logic sequence):

$$LS = [R(T_i) \rightarrow M(T_i) \rightarrow S(T_i) \rightarrow P(T_i)] \tag{5}$$

各个 σ 之间的逻辑序 LS 如图 5 所示, 其中, \rightarrow 表示直接支撑逻辑序, \Rightarrow 表示间接支撑逻辑序, \leftrightarrow 表示自身支撑. 具体 LS 序列见表 1.

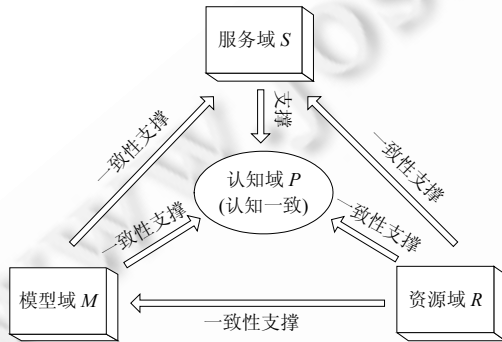


Fig.4 Consistency relationships among global simulation field based on perceive field

图 4 基于认知域的全局仿真域一致性关联关系

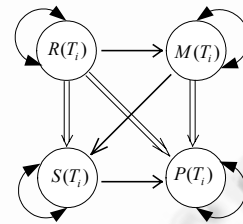


Fig.5 Logic sequences of consistent states in σ

图 5 σ 一致性状态逻辑序

Table 1 Relationships on logical sequences of consistency states in σ

表 1 σ 一致性状态逻辑序关联关系

一致性状态	$R(T_i)$	$M(T_i)$	$S(T_i)$	$P(T_i)$
$R(T_i)$	\leftrightarrow	\rightarrow	\Rightarrow	\Rightarrow
$M(T_i)$	-	-	\rightarrow	\Rightarrow
$S(T_i)$	-	-	\leftrightarrow	\rightarrow
$P(T_i)$	-	-	-	\leftrightarrow

例 3: $R(T_i) \rightarrow M(T_i)$ 表示 R 一致性状态为 M 一致性状态提供底层支撑, 脱离 R 时空状态情况下讨论 M 的时空一致对仿真全局一致性意义不大, 也即, 未考虑仿真狭义时空基准的建模与仿真, 其模型的真实性和有效性很难判断, 甚至导致仿真错乱; 反之亦然. 同理, 逻辑序列的其他状态也是层级关联的, 考虑各 σ 内的一致性状态关联对于整个仿真的正确性与一致性具有重要意义.

定义 17(C-RMSP 一致性模型). 在 SODSA 里, 当且仅当各仿真节点 j 满足以下条件时, 仿真域 R, M, S 和 P 内各约束元 γ_{ji}^σ 的状态均达到时空一致, 称作广义时空四域一致模型(C-RMSP):

条件 1. $\forall \sigma \in sf, T_i > 0, p \neq q, \sigma(T_i) = \sigma_p(T_i) = \sigma_q(T_i)$.

条件 2. $\forall \sigma \in sf, T_i > 0, \theta_\sigma \leq 2\delta$.

条件 3. $\forall \sigma(T_i), \sigma \in \{R, M, S, P\}$, 满足定义 16 中的一致性状态逻辑序.

C-RMSP 模型基于 SODMSF 框架视角,综合仿真域 R, M, S 和 P ,考虑整个 DSA 内的 Ω 一致性问题,代表了 SODSA 对 Ω 一致性需求的方向.该模型从 DSA 全局出发,全方位、深层次、真实地反应系统各活动的约束元时空一致性特征与规律,以及达到所要求的一致性程度所需要的条件,对理解其时空一致性具有重要意义.

3.3 C-TSM成熟度

借鉴软件成熟度模型,考虑 DSA 系统 Ω 一致性需求,我们提出了一致性时空成熟度概念模型(C-TSM),如图 6 所示.该模型分为 4 个层级,各个层级嵌套递进;层级越高,时空一致性程度也就越高.约定 R 时空一致为 I 级一致性成熟度,记作 C-TSM-I.在 R 时空一致的基础上,上升到 M 时空一致, R 与 M 时空一致称为 II 级一致性成熟度,记作 C-TSM-II.在 II 级成熟度基础上,加入 S 时空一致,称作 III 级一致性成熟度,记作 C-TSM-III.最后,在 III 级成熟度的基础上加入 P 时空一致,称作 IV 级一致性成熟度,记作 C-TSM-IV.

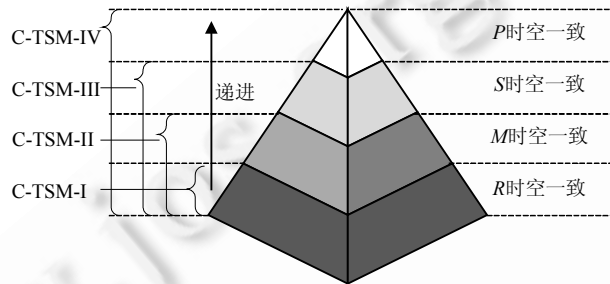


Fig.6 Maturity model of generalized TSC

图 6 广义时空一致成熟度模型

各级一致性成熟度与 sf 时空状态之间的对应关系见表 2. $R(T_i)$ 表示 R 时空一致性状态,其他依次类推.从表中可以看出,只有达到 IV 级一致性成熟度,整个仿真系统的时空一致性程度才最高,其仿真结果最具科学性与准确性.C-TSM 模型基本概括了 SODSA 全局时空层级一致性需求,阐明了 DSA 系统 Ω 一致的层级递进式关系,可衡量仿真系统与真实世界的逼真度.

Table 2 Relations between C-TSM and consistency states in σ
表 2 一致性时空成熟度与 σ 一致性状态的关系

时空成熟度	状态一致			
	$R(T_i)$	$M(T_i)$	$S(T_i)$	$P(T_i)$
C-TSM-I	√	-	-	-
C-TSM-II	√	√	-	-
C-TSM-III	√	√	√	-
C-TSM-IV	√	√	√	√

当前,学者们从不同角度来研究 DSA 的时空一致性问题,虽然涉及到各个仿真域,但重点关注 R 内的时空一致性问题,即 I 级一致性成熟度.尽管研究者提出了不少保持时空一致的技术与算法,但很少从 DSA 全局视角考虑,尚未形成时空一致性研究的整体概念框架.因此,当前的研究尚未解决整个 DSA 系统 Ω 一致性问题.C-TSM 模型为深化理解并解决此问题提供了研究思路与框架.

3.4 C-HF层级框架

3.4.1 总体层级框架(C-HF)

在分布交互仿真中,为确保仿真正确,达到所要求的仿真效果和互操作性能,首先需要确保同构或异构 DSA

在一个一致的时间和空间环境中交互.底层的时钟同步仅能使各仿真节点的时间一致,而很难保证整个仿真应用的正确性与一致性.图7给出了SODMSF框架下,维护仿真广义全域时空一致性的总体框架.该框架以多域广义时空、层次式、递进级的方式描述了SODSA全局时空一致性变化的构成,分别从 R, M, S 和 P 多域时空来描述,依次记作 $C-HF-R, C-HF-M, C-HF-S$ 和 $C-HF-P$.各域时空变化关联关系由下而上, R 时空为 M 时空提供稳定的狭义时空基准; M 时空是服务公布、订购、封装等的基础域; S 时空是针对一致性仿真模型资源开发的的服务的层次集合; P 时空是对 M 和 S 时空的态势展示、直观感知与用户体验等.

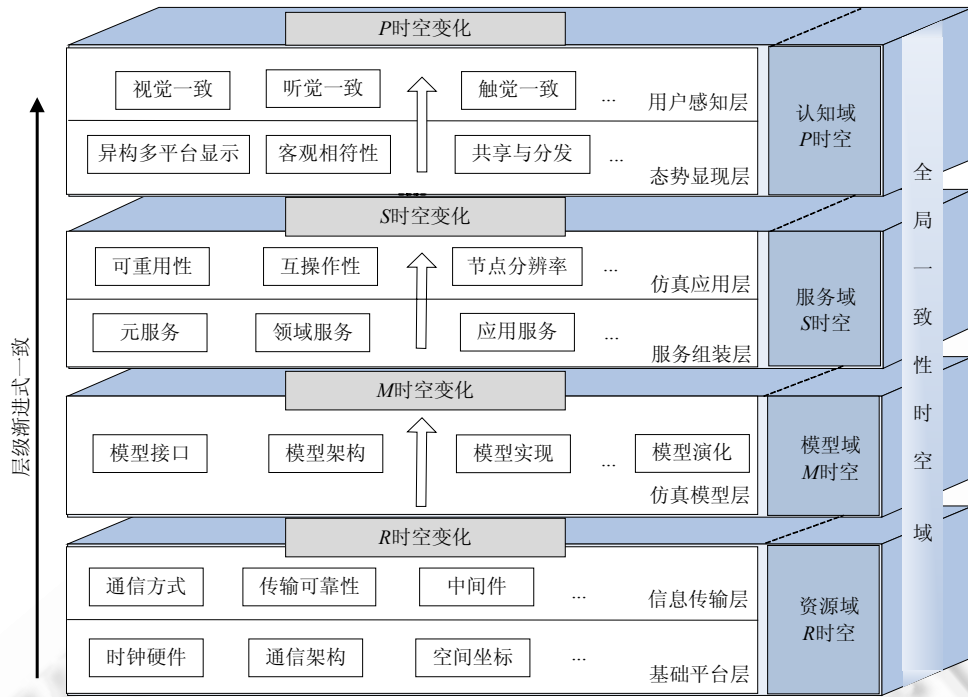


Fig.7 Hierarchical consistency framework based on generalized time-space field

图7 广义时空域层级一致性框架

3.4.2 R 时空(C-HF-R)

我们定义 R 时空为分布仿真系统的基础时空,涉及到硬同步、软同步、混合同步、坐标校准等活动,是狭义的时空域范畴.为实现各仿真节点的时钟同步,常见的同步方法有全球定位系统同步(GPS)、网络时间协议(NTP)、泛洪时间同步(FTSP)、参考广播同步(RBS)等.采用的技术有本地滞后技术、DR推算定位、时间扭曲等.资源域时空变换主要是由网络延迟、本地时钟飘移(偏移)、数据丢包等约束元造成的.为使仿真时钟逻辑因果顺序一致性,需要确保域内各约束元尽可能小地影响时空一致性状态.

3.4.3 M 时空(C-HF-M)

M 时空是一致性层级框架的核心域之一,包含仿真模型的构建、模型实现、模型的动态演化、模型组件化技术、模型互操作等活动相关的一致性约束元.为使仿真结果正确,仿真模型应尽可能地接近概念(真实)模型,模型之间通过统一的接口范式实现互操作,对于模型的理解与校验需要建立实用性强的形式化语法、语义规范. M 时空立足于 R 时空,在确保 R 时空一致的前提下,组建符合时空一致性要求的模型构件及其相关规范,是保证仿真过程演化及其结果正确性的重要途径之一.

3.4.4 S 时空(C-HF-S)

S 时空基于 M 时空,也是一致性层级框架的核心领域之一,其内部活动包括元服务的定义、领域服务构建、对 M 时空中相关活动的服务化组装、应用服务使用,以及与仿真应用相关的服务可重用、互相调用等. S 时空

一致不仅需要确保同一服务不同版本的全局一致性,而且需要保证服务本身的描述规范化、服务接口的强互操作性等。 S 时空一致对整个仿真结果的正确性与有效性具有重要作用。确保 M 与 S 时空一致,是 SODSA 中需要重点考虑的问题。

3.4.5 P 时空(C-HF- P)

P 时空内的活动基于上述 3 个时空域,包括建模仿真过程的实时显示、不同用户的感知、各节点的仿真活动在认知层面的一致性等。 P 内的活动是为了展示给用户一个与真实世界相逼近的“虚拟视窗”,模拟并指导现实世界中的各种复杂情况。当且仅当 R 时空、 M 时空、 S 时空均达到一致的情形下, P 时空才有可能达到真正意义上的一致性状态,而单纯考虑 P 时空对整个仿真结果的正确性影响,其意义并不大。 P 时空一致涉及到人的主观因素,具有不确定性,研究并提出一套规范、合理的认知规则及其形式化描述框架,对提高 P 时空一致具有重要意义。

4 应用举例

某 DSA 系统,基于 HLA 架构,在局域网内工作,涉及仿真节点 3 个,各节点的模型包、服务包和显示界面各 1 个,领域专家 3 人,利用本文提出的概念和模型形式化地量化分析系统的 Ω 一致性程度。在全局 $\bar{\Omega}$ 视角下,构建 C-HF 层级框架,并分析系统的 C-RMSP 一致性和 C-TSM 成熟度。

对 $\forall \Omega$, 各 σ 内一致性状态 $\sigma_j(T_i)$ 可由领域专家赋值确定,因本文重点考虑 Ω , 假定 γ 是一致的,即 $\gamma_1^o = \gamma_2^o = \gamma_3^o$ 。在仿真域 sf 中,对 $\forall A_i^\sigma, \exists \gamma_{\mu}^\sigma$ 约束元为 3 个。因此, $\exists A_i^\sigma (i=1,2,3, \sigma=R, M, S, P)$ 。在 A_i^R 中, $\exists S_R^j (j=1,2,3)$, 如序列 $S_R^1 = \{\gamma_{11}^R, \gamma_{12}^R, \gamma_{13}^R\}$, 同理可得 S_R^2 和 S_R^3 ; 同理,在 A_2^M 中 $\exists S_M^j (j=1,2,3)$, 如 $S_M^1 = \{\gamma_{11}^M, \gamma_{12}^M, \gamma_{13}^M\}$ 。同理可得 S_M^2 和 S_M^3 。依次可得 S_S^1, S_S^2, S_S^3 和 S_P^1, S_P^2, S_P^3 。而领域专家给出序列 S_σ^j 的平均赋值用 $\sigma_j(T_i)$ 表示。以模型域 M 为例,约束元序列 S_M^j 赋值及各约束元的权重值 ω_k 由专家给出,具体计算原理参照定义 9 和定义 13。

表 3 给出了约束元赋值和计算结果。

Table 3 State values of S_M^j and calculating results of $M(T_i)$ for model field M
表 3 模型域 M 中的 S_M^j 状态值与 $M(T_i)$ 计算结果

仿真节点 j	S_M^j 状态赋值 $M_j^k(T_i)$	约束权重 ω_k	节点一致性状态 $M_j(T_i)$	M 一致性状态 $M(T_i)$
节点 1	$(M_1^1(T_i), M_1^2(T_i), M_1^3(T_i)) = (0.99, 0.98, 0.98)$	$(0.45, 0.35, 0.2)$	$\sum_{k=1}^3 \omega_k \cdot M_1^k(T_i) = 0.9845$	$\frac{\sum_{j=1}^3 M_j(T_i)}{3} = 0.9820$
节点 2	$(M_2^1(T_i), M_2^2(T_i), M_2^3(T_i)) = (0.97, 0.99, 0.98)$	$(0.5, 0.3, 0.2)$	$\sum_{k=1}^3 \omega_k \cdot M_2^k(T_i) = 0.9780$	
节点 3	$(M_3^1(T_i), M_3^2(T_i), M_3^3(T_i)) = (0.98, 0.99, 0.98)$	$(0.45, 0.35, 0.2)$	$\sum_{k=1}^3 \omega_k \cdot M_3^k(T_i) = 0.9835$	

其他 σ 内约束元序列 S_M^j, S_S^j, S_P^j 的赋值和权重也可以按照同样的方法由领域专家给出。计算相应节点 σ 内的一致性状态结果见表 4。

Table 4 Results of consistency states in σ
表 4 σ 内的一致性状态结果

仿真节点 j	一致性状态				一致性紧合度 λ
	$R_j(T_i)$	$M_j(T_i)$	$S_j(T_i)$	$P_j(T_i)$	
节点 1	0.975 5	0.984 5	0.963 6	0.981 0	$\sum_{\sigma \in sf} \omega_\sigma \cdot (\lambda_\sigma) = 0.9789$
节点 2	0.975 5	0.978 0	0.984 2	0.981 0	
节点 3	0.975 5	0.983 5	0.992 5	0.981 0	
λ_σ	0.975 5	0.982 0	0.980 1	0.981 0	
ω_σ	0.4	0.3	0.2	0.1	

σ 的时空一致性状态变量 X_σ 服从 $N(\mu, \delta^2)$ 正态分布,假定 $\mu=1, \delta=0.01$, 由表 3、表 4、公式(3)和定义 12 得到:

$$R_1(T_i) = R_2(T_i) = R_3(T_i) = R(T_i) = 0.9755 = \lambda_R, \gamma_1^O = \gamma_2^O = \gamma_3^O,$$

则资源域 R 达到阈值 $\lambda_R=0.9755$ 、一致性间隙 $\theta_R=0.0084$ 的时空一致. 同样, 针对认知域 P , 由公式(3)和定义 15 得到:

$$P_1(T_i) = P_2(T_i) = P_3(T_i) = P(T_i) = 0.9810 = \lambda_P,$$

$$\theta_P = \left| P(\lambda_P \leq X_P \leq 1) - \frac{\lambda_P}{2} \right| = \left| 0.5 - \Phi\left(\frac{\lambda_P - 1}{0.01}\right) - \frac{\lambda_P}{2} \right| = 0.0192 < 0.02 = 2\delta,$$

$$\theta_R = \left| P(\lambda_R \leq X_R \leq 1) - \frac{\lambda_R}{2} \right| = \left| 0.5 - \Phi\left(\frac{\lambda_R - 1}{0.01}\right) - \frac{\lambda_R}{2} \right| = 0.0084 < 0.02 = 2\delta.$$

上述计算满足 P 时空一致性状态, 则认知域 P 达到阈值 $\lambda_P=0.9810$ 、一致性间隙 $\theta_P=0.0192$ 的时空一致. 根据公式(4)、表 3 和表 4, 依次可计算 θ_M 和 θ_S . 模型域 M 因 $\theta_M=0.0269 > 2\delta$, $M_j(T_i) \neq M_k(T_i)$ 而未达到 M 时空一致; 服务域 S 虽 $\theta_S=0.0134 < 2\delta$, 但 $S_j(T_i) \neq S_k(T_i)$, 仍未达到 Ω 内的 S 时空一致. 但整个 DSA 的 Ω 一致性紧密度 $\lambda=0.9789$, 表明仿真已接近专家视角下的真实水平. 根据 C-RMSP 一致性模型及相应计算结果, 该 DSA 系统未能满足定义 17 中的条件 1 和条件 2, 尚未达到 C-RMSP 所阐述的一致性程度. 该 DSA 系统满足 R 时空一致, 即达到 C-TSM-I 一致性成熟度, 虽然 P 时空达到一致, 但 M 时空和 S 时空未能达到一致, 故 C-TSM 成熟度无法上升到更高级别.

从应用案例来看, 先前的一致性研究^[8,14,20-23], 如狭义时空一致, 力求系统时钟同步, 只可能达到 C-TSM-I 成熟度级别(R 时空一致); 而模型一致主要考虑建模的逼真度、模型接口及动态演化等, 只可实现 M 时空一致; 仿真服务一致侧重研究分布式服务版本的一致性技术等, 只可达到 S 服务一致; 认知一致偏向于认知规则、制度和评估方法等研究, 仅能实现 P 时空一致. 然而, 大规模仿真系统是个复杂的系统, 仅关注单方面一致很难实现全局广义时空一致(C-TSM-IV 级). 仿真实际结果表明, 各方面的一致性关联是层级递进的. 此外, 先前的研究也很少就量化评估做形式化描述和分析. 本文借鉴系统工程思想, 从建模与仿真全过程的整体一致性出发, 引入“一致性状态”等数学化概念, 综合考虑上述一致性问题集的自底向上层级关联关系, 实现量化分析 DSA 系统的全域时空一致性的目标. 本文模型更加侧重于从整个 DSA 全生命周期和仿真架构的各个层面出发, 探讨各阶段、各层面内相关的资源、模型、服务、认知等时空一致性状态, 从 DSA 整体层面反应系统的 Ω 一致性程度.

5 结束语

本文通过分析 SODMSF 框架下的 DSA 对狭义和广义时空一致性的需求, 提出了仿真系统的一致性时空轴, 并从 5 个层面阐述了影响时空不一致的因素; 然后提出了广义时空层级一致性构想, 包括与时空一致相关的形式化定义、一致性四域模型 C-RMSP、一致性时空成熟度 C-TSM 以及一致性层级框架 C-HF. 本文对于理解分布式系统中的时空一致性、整个仿真应用的正确性及各仿真对象的一致性状态等具有一定的启发, 也扩展了 DSA 时空一致性内涵. 下一步将研究 C-HF 层级框架中各域的时空误差动态演化机理, 通过挖掘大规模分布仿真环境中仿真节点、仿真对象的时空一致性涌现行为, 发现内在的规律与演化机制, 从而达到控制时空误差、提高系统时空一致性程度的目的. 另外, 在本文提出的概念与模型基础上, 还将研究并提出广义时空一致性量化评价模型.

致谢 在此, 我们向对本文的工作给予支持和建议的各位同行, 尤其是在该领域做了大量研究及为本文提供宝贵思路和建议的国防科技大学计算机学院李思昆和彭宇行教授及其团队表示感谢.

References:

- [1] Wang WG, Wang WP, Zhu YF, Li Q. Service-Oriented simulation framework: An overview and unifying methodology. Simulation: Trans. of the Society for Modeling and Simulation Int'l, 2011, 87(3):221-252. [doi: 10.1177/0037549710391838]
- [2] Dobre C, Pop F, Cristea V. New trends in large scale distributed systems simulation. Journal of Algorithms and Computational Technology, 2011, 5(2):221-257. [doi: 10.1109/ICPPW.2009.66]

- [3] Shi Y, Lu MH, Xiao MY, Zhang DS. Research on service-oriented and component-based simulation platform. In: Proc. of the 2011 Int'l Conf. on Web Information Systems and Mining. Berlin: Springer-Verlag, 2011. 19–27. [doi: 10.1007/978-3-642-24273-1_3]
- [4] Kok JD, Engelen G. Linking and reusing model components for environmental simulation. In: Proc. of the 1st Int'l Conf. on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. Setubal: INSTICC Press, 2011. 103–108.
- [5] Lee JY, Kang HS, Noh SD, Woo JH, Lee P. NESIS: A neutral schema for a Web-based simulation model exchange service across heterogeneous simulation software. *Int'l Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2011,24(10):948–969. [doi: 10.1080/0951192X.2011.608726]
- [6] Peng YX, Zhang YJ, Li SK. Time-Space consistency in distributed virtual environments. *ACTA ELECTRONICA SINICA*, 2005, 33(2):313–316 (in Chinese with English abstract). [doi: 0372-2112(2005)02-0313-04]
- [7] Lamport L. Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system. *Communications of the ACM*, 1978,21(7):558–565. [doi: 0001-0782/78/0700-0558]
- [8] Yang J, Huang G, Chen XP, Mei H, Cheung SC. Consistency assurance in flattening hierarchical architectural models. *Ruanjian Xuebao/Journal of Software*, 2006,17(6):1391–1400 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1391.htm> [doi: 10.1360/jos171391]
- [9] Zhang T, Liu YS, Zha YB. A ontology based simulation service customization and composition. *Journal of National University of Defense Technology*, 2007,29(4):105–109 (in Chinese with English abstract). [doi: 1001-2486(2007)04-0105-05]
- [10] Xu CL, Li SK, Han MH. A time-space consistency evaluating method in distributed virtual battlefield. *Journal of Computer Research and Development*, 2005,42(Suppl.):544–548 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.1360/crad20050402]
- [11] Rhee IK, Lee J, Kim J, Serpedin E, Wu YC. Clock synchronization in wireless sensor networks: An overview. *Sensors*, 2009,9(1): 56–85. [doi: 10.3390/s90100056]
- [12] Zhong HR. Research of time-space consistency in large-scale distributed simulation system [Ph.D. Thesis]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [13] Zhang W, Zhou HJ, Peng YX, Li SK. Asynchronous time consistency control methods in distributed interactive simulation. *Ruanjian Xuebao/Journal of Software*, 2010,21(6):1208–1219 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3630.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03630]
- [14] Xu CL. Time-Space consistency in large-scale distributed virtual environment [Ph.D. Thesis]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [15] Lin C, Kong XZ, Zhou H. Enhance the dependability of computing systems: Integration of virtualization and SOA. *Ruanjian Xuebao/Journal of Software*, 2009,20(7):1986–2004 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3549.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03549]
- [16] Zhang J. Time-Space consistency in distributed virtual environments based on P2P [Ph.D. Thesis]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [17] Tang XY, Zhou SP. Update scheduling for improving consistency in distributed virtual environments. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2010,21(6):765–777. [doi: 10.1109/TPDS.2009.113]
- [18] Zhou SP, Cai WT, Lee BS, Turner SJ. Time-Space consistency in large-scale distributed virtual environments. *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation*, 2004,14(1):31–47. [doi: 10.1145/974734.974736]
- [19] Peng C, Zarki ME. Perceptual view inconsistency: An objective evaluation framework for online game quality of experience (QoE). In: Proc. of the 10th Annual Workshop on Network and Systems Support for Games. New York: IEEE Press, 2011. 1–6. [doi: 10.1109/NetGames.2011.6080978]
- [20] Hu H, Yin Q, Lü J. Service behavior and quality consistency in virtualized computing environment. *Ruanjian Xuebao/Journal of Software*, 2007,18(8):1943–1957 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1943.htm> [doi: 10.1360/jos181943]
- [21] Wang WR, Fan YS. The service oriented virtual enterprise model and its consistency checking mechanism. *Chinese High Technology Letters*, 2011,21(10):1076–1083 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3772/j.issn.1002-0470.2011.10.013]

- [22] Al-Shishtawy A, Khan TJ, Vlassov V. Robust fault-tolerant majority-based key-value store supporting multiple consistency levels. In: Proc. of 2011 IEEE the 17th Int'l Conf. on Parallel and Distributed Systems (ICPADS). New York: IEEE Press, 2011. 589–596. [doi: 10.1109/ICPADS.2011.110]
- [23] Zhang J, Lei XY, Dai SL. Real perceive-based technology of time and space consistency in distributed virtual environment. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010,36(8):969–972,976 (in Chinese with English abstract). [doi: 1001-5965(2010)08-0969-04]
- [24] Ebrahim GA. A framework for locating service providers in service-oriented software systems. In: Proc. of the 2011 Int'l Conf. on Computational Problem-Solving. New York: IEEE Press, 2011. 487–492. [doi: 10.1109/ICCPS.2011.6092242]
- [25] Guo S, Bai F, Hu XL. Simulation software as a service and service-oriented simulation experiment. In: Proc. of the 2011 IEEE Int'l Conf. on Information Reuse and Integration (ICIRI 2011). New York: IEEE Press, 2011. 113–116 [doi: 10.1109/IRI.2011.6009531]

附中文参考文献:

- [6] 彭宇行,张拥军,李思昆.分布式虚拟环境的时空一致性研究.电子学报,2005,33(2):313–316. [doi: 0372-2112(2005)02-0313-04]
- [8] 杨杰,黄翌,陈湘萍,梅宏.软件体系结构模型单层化的一致性保障方法.软件学报,2006,17(6):1391–1400. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1391.htm> [doi: 10.1360/jos171391]
- [9] 张童,刘云生,查亚兵.基于本体的仿真服务定制与组合.国防科技大学学报,2007,29(4):105–109. [doi: 1001-2486(2007)04-0105-05]
- [10] 徐春蕾,李思昆,韩明华.大规模分布式虚拟战场中的时空一致性评估方法研究.计算机研究与发展,2005,42(增刊):544–548. [doi: 10.1360/crad20050402]
- [12] 钟海荣.大规模分布式仿真系统的时空一致性研究[博士学位论文].长沙:国防科学技术大学,2005.
- [13] 张伟,周航军,彭宇行,李思昆.分布式交互仿真中的异步时钟一致性控制方法.软件学报,2010,21(6):1208–1219. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3630.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03630]
- [14] 徐春蕾.大规模分布式虚拟环境的时空一致性[博士学位论文].长沙:国防科学技术大学,2005.
- [15] 林闯,孔祥震,周寰.增强计算系统可信性:融合虚拟化和 SOA.软件学报,2009,20(7):1986–2004. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3549.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03549]
- [16] 张进.基于 P2P 的分布式虚拟环境中的时空一致性[博士学位论文].合肥:中国科学技术大学,2008.
- [20] 胡昊,殷琴,吕建.虚拟计算环境中服务行为与质量的一致性.软件学报,2007,18(8):1943–1957. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1943.htm> [doi: 10.1360/jos181943]
- [21] 王伟然,范玉顺.面向服务的虚拟企业模型及其一致性检查机制.高技术通讯,2011,21(10):1076–1083. [doi: 10.3772/j.issn.1002-0470.2011.10.013]
- [23] 张炯,雷小永,戴树岭.真实感 DVE 时空一致性技术.北京航空航天大学学报,2010,36(8):969–972+976. [doi: 1001-5965(2010)08-0969-04]



范林军(1985—),男,湖南隆回人,博士生,主要研究领域为分布交互仿真,时空一致性,面向服务的分布仿真支撑环境.
E-mail: ljfan_nudt@163.com



王涛(1987—),男,博士生,主要研究领域为人机交互,指挥决策分析.
E-mail: U1987-2@163.com



凌云翔(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为指挥决策分析,作战模拟,分布交互仿真.
E-mail: yxling@tom.com



燕厚仪(1987—),男,博士生,主要研究领域为人机交互,指挥决策分析.
E-mail: yanhouyi@126.com