



基于 HLA 的仿真体系结构及调度问题研究

凌云翔 史扬 胡华平 金士尧

(国防科学技术大学计算机学院 长沙 410073)

(E-mail: YXLing@163.net)

摘要 HLA 是构造建模与仿真通用技术框架的起点和基础. 文中结合最新的 HLA/RTI 技术文献, 提出了基于 HLA 的分布-集中式仿真体系结构, 提供针对该结构的多级调度方案, 并给出了时间 Petri 网性能模型和分析. 这个方案结合了尽可能快的分析型仿真成员和独立时间推进的实时仿真成员对时间服务的要求, 能解决连续系统综合仿真中的实时协同问题, 具有实现简单、便于控制、易于扩展等优点, 对充实 HLA 标准的可操作性具有现实意义.

关键词 高级仿真结构, 时间管理, 调度.

HLA-BASED SIMULATION ARCHITECTURE AND SCHEDULING

LING Yunxiang SHI Yang Hu Huaping JIN Shiyao

(College of Computer, National University of Defence Technology, Changsha 410073)

Abstract HLA lays down a foundation for modeling and simulation. Based on recent HLA/RTI documents, this paper proposes a "distributed-centralized" HLA simulation architecture. Then it describes a method of analyzing the hierarchical scheduling problem and its time Petri net model for performance analysis. The method compromises with as-fast-as-possible analysis federates and independent time advance real-time federates on time service demand, and it solves the real-time cooperative problem among continuous simulation applications. What's more, the scheme is easy, controllable, and expansible.

Key words High level architecture(HLA), time management, scheduling.

1 引言

HLA (High Level Architecture) 将实现某种特定仿真目的的系统称为联邦 (federation), 联邦由若干相互交换时戳事件的联邦成员 (federate) 和运行支持系统 RTI (Run Time Infrastructure) 构成^[1]. HLA/RTI 作为能集成各种类型仿真应用的综合框

架,时间调度是其中的关键技术.目前 RTI 提供的服务主要集中在解决成员间同步的问题上,如 Lookahead,Zero-Lookahead 和 Time Warp 等,但对仿真任务的实时性能需求考虑不足,缺乏有效的实时时钟管理和调度手段,而且实现开销较大,导致仿真的执行效率不高.本文基于分布-集中的 HLA 仿真体系结构,提出一种多级调度方案,并进行性能分析.这个方案能解决连续系统综合仿真中多个实体的实时协同问题.

2 问题的描述

目前 HLA/RTI 的实现一般都采用集中式(如 RTI-Lite 和 eRTI)或分布式结构(如 UK-RTI 和 RTI-s).集中式结构简单,但其伸缩性不好,同时 Server 的负担较重,影响用户响应时间的实时性.而分布式系统的优点为响应速度快,但因缺少全局信息,导致时间管理等与全局有关的操作不易实现^[2].为了对综合仿真进行全面的支持,并提供相应的支撑平台^[3],我们提出了一种分布-集中的混合式结构,较好地克服了以上两种方式的缺点,具有系统简单、响应快速、可靠性和可扩展性好等优点.

如图1所示,联邦总管(federation manager)是面向系统的公共协作支持,主要支持仿真环境中全局性操作,进行一致性检测;协作代理是面向仿真应用的局部协同支持,减少了组内各联邦成员的计算压力;联邦成员是具体的仿真应用部件.联邦总管、各协作代理和各联邦成员通过 RTI 的支撑构成联邦.联邦成员和 RTI 之间的接口是遵循 HLA/RTI 规范的 Ambassador.

引入仿真步(simulation step)的概念,把各成员一帧内的运作看作类似于流水操作的四个仿真步组成,如图2所示. a_{11} 表示 federate 方的本地仿真计算,并根据最新的属性值向上级发出请求,该请求可能由成员所在组的代理来服务,也可能由于涉及全局操作而代理不能处置,便交由联邦总管; a_{12} 表示由 federate 方传送请求到代理或联邦总管; a_{13} 表示从等待队列进入局部或全局的服务处理阶段; a_{14} 表示把服务结果从代理或联邦总管回传到 federate 方. $t_{11} \sim t_{14}$ 为各仿真步所花时间.

为便于描述,把引发全局协同服务的成员请求叫做 Trigger,相应排队机构叫 Trigger 队列;而把由协作代理处理的请求叫 non-Trigger,相应排队机构叫 non-Trigger 队列,如图3所示.图中 non-Trigger 机构只列出了协作代理 P_1 及所属的 K 个成员,其余代理与之类似.

3 调度方案

上述基于分布-集中的层次式仿真结构,宜采用多级调度.

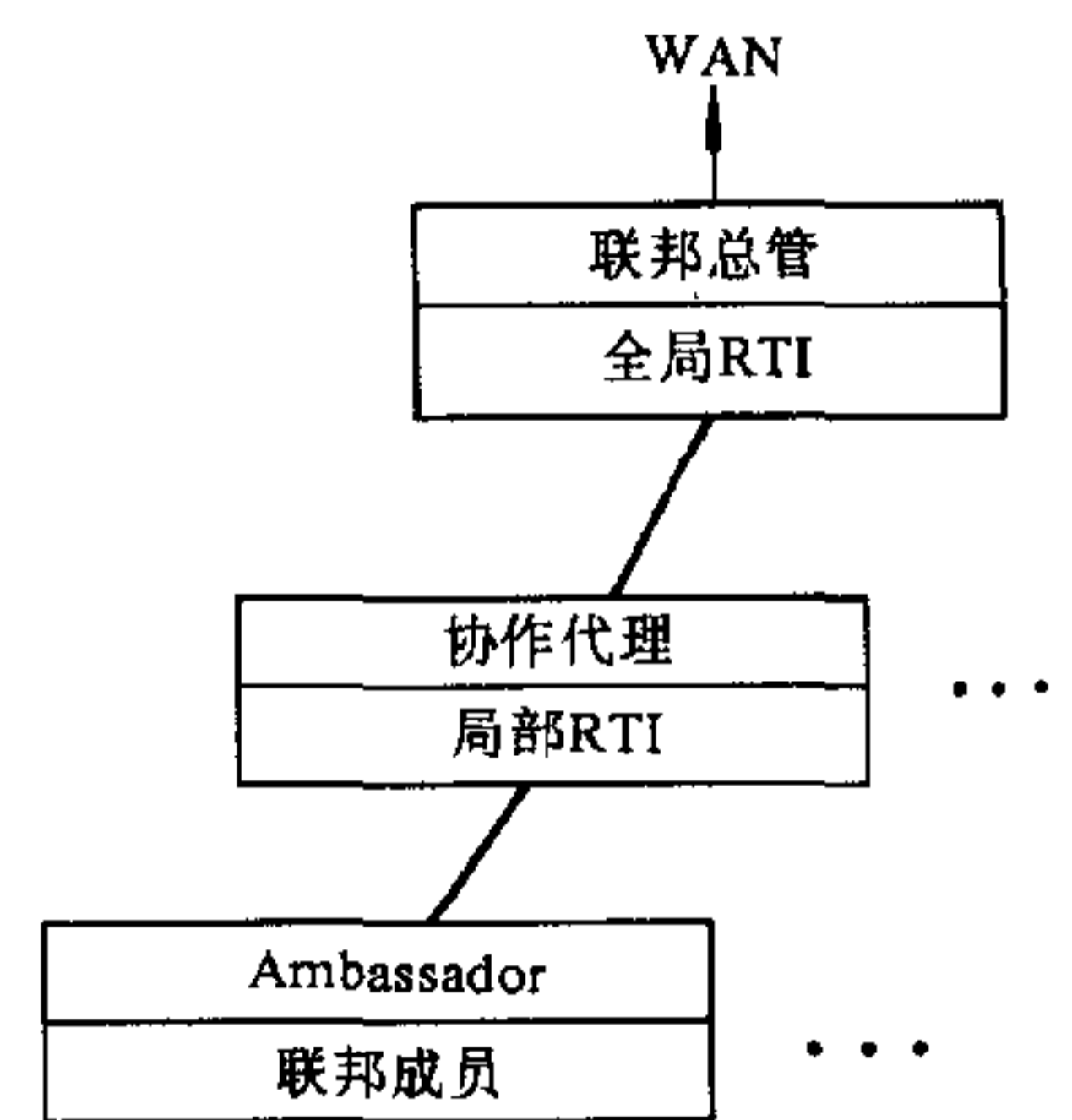


图1 基于 HLA/RTI 的分布-集中式结构

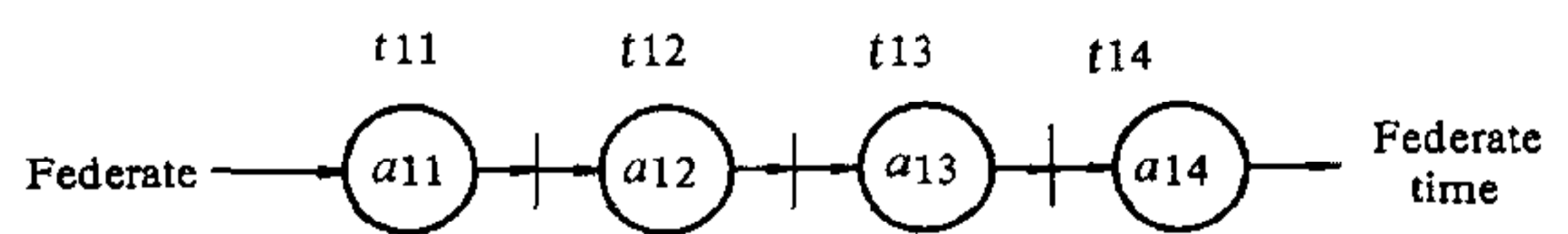


图2 仿真成员帧内的仿真步

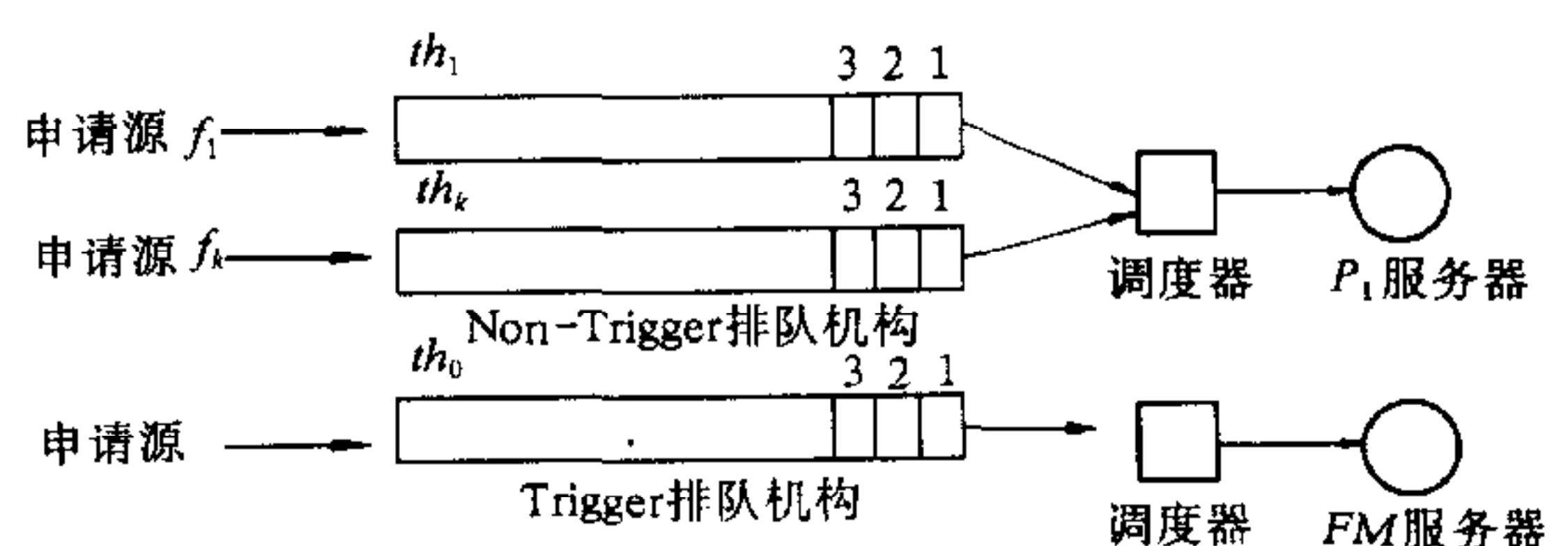


图3 调度方案的描述

第一级实施任务组级管理,每个代理 p_i 包括一个局部调度器、服务器和多个缓冲队列. 每一个联邦成员 f_i 的请求使用一个缓冲队列,而不是按请求的到达顺序或优先级进入不同队列,从而可以保证每个仿真成员帧的 FIFO 服务次序及实时要求. 在模型中用下列变量参数来描述服务的调度、到达请求的长度和丢帧的控制.

1) 仿真成员所发出的每帧请求数据中都需携带时戳信息 (time stamp), 时间秩 $r1(f_i)$ 定义为 f_i 的缓冲队列中所有请求的最小时戳. 为了保持同一成员中帧的连续性,避免成员间发生失步现象,协作代理每次都选择组内拥有最小时间秩,即满足时戳顺序信息低限 LBTS 的成员请求作为服务对象,并允许其推进到下一时刻.

2) th_i 表示成员 f_i 的阻塞缓冲阈值,也是允许的最大空间. 如果缓冲队列的长度小于 th_i ,则允许请求进入缓冲队列,否则 f_i 被阻塞,直至队列长度小于阈值. 这主要是对 Best-effort 推进加以适当的制约.

3) tw_i 表示 f_i 缓冲队列中拥有最小时戳的请求已在队列中的滞留时间, α_i 则是等待时间阈值. 如果 $tw_i > \alpha_i$,意味着该请求的等待时间超过最大容忍值,其实时性将得不到满足,只好丢弃本帧.

第二级为联邦总管 FM 的总控管理,包括一个全局调度器、服务器和一个 Trigger 缓冲队列. Trigger 队列采取最高响应秩优先 HRRF (Highest Reactive Rate First) 非抢占式服务策略.

Trigger 队列中请求的响应秩 $r2(f_i)$ 定义为

$$r2(f_i) = \frac{Server_i}{Frame_i - Com_i - Client_i - Tw_i}, \quad (1)$$

其中 $Server_i$ 为此次服务所需持续的时间, $Frame_i$ 表示仿真模型的帧时间,也即帧内的计算时限, Com_i 为通信延迟, $Client_i$ 为 f_i 本地仿真计算所花的时间, Tw_i 为该请求在队列中已滞留时间. HRRF 策略在每次调度时机 (有请求服务结束时) 求出队列中各请求的响应秩 $r2(f_i)$, 并选取最高响应秩者作为服务对象. “响应秩”反映了此次请求的紧迫度.

在这个方案中, α_i 和 $r2(f_i)$ 考虑了各仿真任务对实时性能的不同要求,有效地保证了仿真过程的实时性; $r1(f_i)$ 和 th_i 的控制保证了成员之间的同步. 而且,仿真成员请求的调度、丢帧和拥塞控制不需要缓冲队列的扫描和到达请求的重新排序等复杂操作,实现简单,各种参量的设置灵活,便于控制,各个缓冲队列可以根据用户要求动态分配.

4 方案的 TPN 性能模型

引入时间 Petri (TPN) 模型. 成员请求的产生和服务可由时间变迁来表示; 请求的拥塞、进入缓冲和丢帧可由瞬时变迁表示,它们不占用时间; 缓冲队列可由库所来表示. 另外,为了描述变迁的实施而引入控制参量. 图4给出了调度方案的 TPN 模型,包括库所、变迁、阈值、时间和秩等五大部分^[4], 其中 q_0 是联邦总管的 Trigger 队列, q_i 是 f_i 的 non-Trigger 队列, s_0 是总管的全局服务, s_i 是 f_i 请求接受的局部服务, j_i 表示 q_i 的拥塞; l_i 表示 f_i 请求进入 q_i , g_i 表示 f_i 请求进入 q_0 , d_i 表示 q_i 中 f_i 请求的丢弃, x_i 表示 f_i 请求到

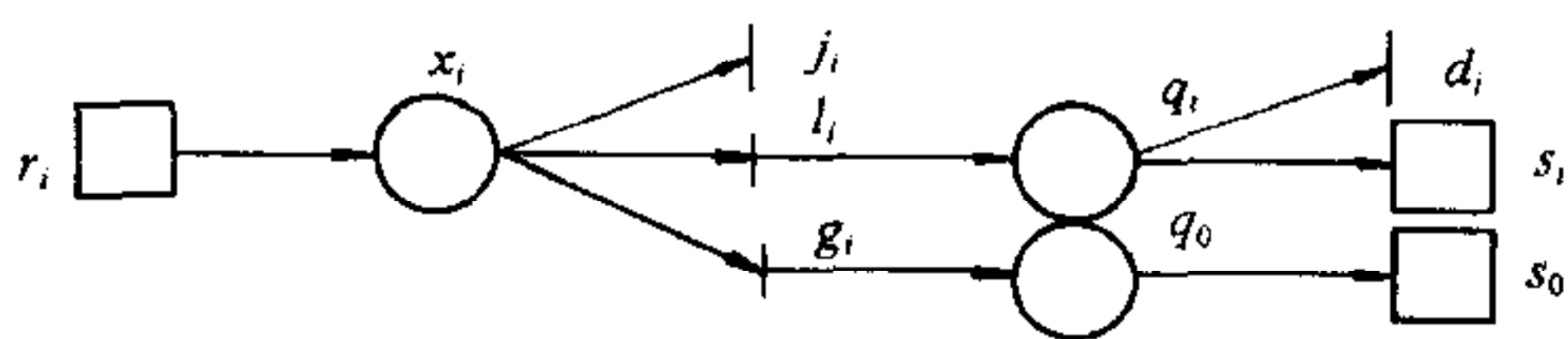


图4 TPN 性能模型

图4 TPN 性能模型

达的临时保留场所,容量仅为1, r_i 表示 f_i 请求的产生, th_i 表示队列 q_i 允许的最大长度, tw_i 为 f_i 请求在 q_i 中的滞留时间, α_i 为 f_i 请求在 q_i 中设置的持续时间阈值, $r1_i$ 表示 f_i 请求在 q_i 中的时间秩, $r2_i$ 表示 f_i 请求在 q_0 中的响应秩.

不失一般性,将有 n 个成员的 non-Trigger 模型分解成多个子模型,每个协作代理管辖 k 个仿真成员,对应一个子模型. q_i 的标识使用队长变量 b_i 表示,子模型的一个实存状态可由 $M[b_1 \cdots, b_i, \cdots, b_k]$ 表示.子模型 Markov 链中任一状态之间的转换如下所示:

$$M[b_1 \cdots, b_i + 1, \cdots, b_k] \leftarrow M[b_1 \cdots, b_i, \cdots, b_k] \rightarrow M[b_1 \cdots, b_i - 1, \cdots, b_k].$$

进入缓冲 服务或丢帧

$$\text{成员 } f_i \text{ 的拥塞率 } JP_i \text{ 可表达为 } JP_i = P[M(q_i) \geq th_i], \quad (2)$$

$$\text{成员 } f_i \text{ 的丢帧率 } DP_i \text{ 可表达为 } DP_i = P[tw_i > \alpha_i]. \quad (3)$$

对于子模型中的 k 个成员, μ_i 为变迁 s_i 的服务速率, s_i 的实施速率 $T(s_i)$ 可以表达为

$$T(s_i) = \mu_i \times \prod_{j=1}^k P[r1_j \geq r1_i]. \quad (4)$$

Trigger 模型中,需要联邦总管处理的请求的到达时间和服务时间均趋近于 Poisson 分布,令两者均服从 Poisson 分布.同时认为这是一个有限缓冲区问题,即如果 q_0 队列中已有 th_0 个请求,则新到请求将被阻塞.故可得出 Trigger 访问模型是 $M/M/1/N$,其中 $N = th_0 + 1$.令 λ_0 和 μ_0 分别是请求的到达率和总管的服务率,则全局请求的拥塞率 JP_0 和变迁 s_0 的实施速率 $T(s_0)$ 可以表达为

$$JP_0 = \frac{1 - \lambda_0/\mu_0}{1 - (\lambda_0/\mu_0)^{N+1}} \times (\lambda_0/\mu_0)^N, \quad (5)$$

$$T(s_0) = \frac{1 - (\lambda_0/\mu_0)^N}{1 - (\lambda_0/\mu_0)^{N+1}} \times \lambda_0, \quad (6)$$

队列 q_i 的平均利用率 $U(q_i)$ 可以表达为

$$U(q_i) = \frac{\sum_{k=1}^{th_i} k \times P[M(q_i) = k]}{th_i}. \quad (7)$$

进一步整个系统的缓冲队列的平均利用率 $U(Q)$ 可以表达为

$$U(Q) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^{th_i} k \times P[M(q_i) = k]}{\sum_{i=0}^n th_i}. \quad (8)$$

5 结束语

HLA 一经提出,立即受到国际仿真界的高度重视.我们遵循 HLA 标准,设计实现了分布-集中式仿真平台 YH-RTI^[5].文中提出的调度方案在解决实时协同仿真的问题上,实现简单,便于控制,易于扩展,对充实 HLA 标准的可操作性具有较强的指导性和现实性.YH-RTI 在国内仿真界处于先进水平,具有很大的参考价值 and 意义.

进一步的工作包括:优化时间推进机制;完善 RTI 的另一个关键技术——数据分配管理中数据流的优化,以进一步提高 YH-RTI 的执行效率.

致 谢 航天工业总公司李伯虎教授为该文提供 HLA 资料,作者在此表示感谢.

参 考 文 献

- 1 Hook D J, Rak S J, Calvin J O. Approaches to RTI implementation of HLA data distribution management service. In: Proc. 15th Distributed Interactive Simulation Workshop. Orlando, FL: IEEE Computer Society Press, 1996. 535~544
- 2 Fullford D. Distributed interactive simulation: it's past, present, and future. In: Proc. of 1996 Winter Simulation Conf., San Diego, CA: ACM SIGSIM, 1996. 179~185
- 3 李伯虎, 文传源. 系统仿真技术新动向. 计算机仿真, 1996, 13(3): 3~5
- 4 林闯. ATM 网络基于队列长度阈值的传输调度. 软件学报, 1998, 9(4): 316~320
- 5 凌云翔, 王召福, 刘晓建, 金士尧. 基于 HLA/RTI 的仿真系统设计. 国防科技大学学报, 1999, 21(2): 75~78

凌云翔 1972年生. 1999年于国防科学技术大学计算机学院获计算机体系结构专业博士学位. 主要从事并行与分布计算、仿真技术的研究.

金士尧 1937年生. 1960年毕业于哈尔滨军事工程学院, 教授, 博士生导师, 国防科学技术大学计算机学院科技委副主任. 先后主持银河仿真 II 型机等多项重大科研项目, 长期从事计算机体系结构、仿真计算机和性能评价方面的研究.

中国自动化学会第16届青年学术年会(YAC'2001)征文通知

中国自动化学会第16届青年学术年会(YAC'2001)将于2001年7月15~17日在山水甲天下的桂林召开. 本次会议由中国自动化学会、中国自动化学会青年工作委员会主办, 桂林电子工业学院和桂林空军学院联合承办. 热烈欢迎全国青年科技工作者及学生积极参加. 会议设有优秀论文奖和优秀应用论文奖.

一、征文范围

(1)线性与非线性系统控制;(2)自适应控制和预测控制;(3) H_∞ 控制和鲁棒控制;(4)智能控制、模糊控制;(5)系统辨识与建模;(6)故障诊断与容错控制;(7)神经网络及控制;(8)自动化仪表与过程控制;(9)软件工程、并行处理;(10)人工智能与专家系统;(11)计算机视觉、图象处理与模式识别;(12)机器人与机器人控制;(13)大系统;(14)电力系统及其自动化;(15)电机驱动及运动控制;(16)传感器与检测技术;(17)离散事件动态系统;(18)计算机集成制造系统;(19)计算机软硬件技术及其应用;(20)系统工程理论、方法及其应用;(21)自动化指挥系统;(22)数据融合与软测量;(23)单片机控制及应用技术;(24)企业改革、发展策略及管理决策;(25)工业过程与生产管理;(26)图书馆自动化与数字图书馆技术;(27)其它.

(下转839页)