

实时分布式仿真平台 RDSP 的设计与实现^{*}

The Design and Implementation of Real-time Distributed Simulation Platform

朱晴波 周 钢 许建峰 陈道蓄 谢 立

(南京大学计算机软件国家重点实验室 南京 210093)

Abstract Distributed simulation is to divide a global simulation problem into a set of communicating task, trying to exploit the parallelism inherent among the respective model components with the concurrent execution of these tasks. In this paper, a real time distributed simulation platform (RDSP) is proposed to support the execution of communicating simulation tasks, which is constructed between simulation applications and operation system, providing the flexibility, transparency and efficiency.

Keywords Modeling and simulation, Distributed platform, Real time

由于计算机硬件和分布式软件技术的迅猛发展,计算机建模与仿真技术从单机阶段步入分布式仿真阶段。Advanced Distributed Simulation (ADS)^[1], High Level Architecture (HLA)^[2], Joint Modeling and Simulation System (JMASS)^[3]等新型的仿真系统体系结构都是基于分布式仿真这个基本概念之上而发展起来的。在这里我们指的分布式仿真是指把一个仿真问题划分成若干个协作的仿真任务,然后将其分配到分布计算平台上去并发执行,以充分挖掘问题空间本身的并行性^[4]。这个分布计算平台把若干台计算机通过网络连接在一起,对仿真任务的并发执行提供支持,因此有着与其他分布计算平台不同的特点,比如交互性和实时性等等。

1. 现有仿真系统的分析

以前的仿真系统是采用离散的单机模式,运行仿真系统的机器上的软件包括单机操作系统、接口驱动程序和仿真应用程序三个部分,仿真应用程序又包括初始化启动程序、主循环程序、周期性任务和若干中断处理程序等。仿真应用程序启动以后,周期性仿真任务的调度和各个 PC 机的资源管理均由仿真应用程序实现,仿真应用程序通过调用接口驱动程序实现与其它 PC 之间的信息交换,这样开发的系统具有以下一些缺点:

(1)在软件概要设计期间,即根据仿真系统的具体需求确定各个 PC 机上应用程序之间的任务分工,根

据这样的任务分工完成各个处理机上的程序设计和编程调试以后,难以再对各机上的仿真任务进行大的调整,仿真系统的适应性和通用性相对较弱。

(2)各个仿真任务由应用程序自行调度,而不是由操作系统进行调度,在微观上因为可以节省一定的调度开销,能使部分仿真任务具有较高的实时性;但是在宏观上由于应用程序难以实现周期性任务的嵌套运行,系统的整体效率会有明显下降。

(3)各个 PC 机上的应用程序既要实现各个仿真需求,又要实现对处理器、时钟、中断、接口等各种资源的管理,使系统功能与应用功能相互交叉,既不利于程序设计人员进行合理的分工,更不利于软件的模块化和对象式设计。

2. 实时分布式仿真平台 RDSP 的设计构思

针对现有系统的不足,我们提出了实时分布式仿真平台 RDSP 的设计构思。即在仿真系统 PC 机上介于单机操作系统与仿真应用程序之间构筑一个分布式仿真平台,它包括面向仿真应用的实时任务调度、实时任务通信、仿真任务装订和面向系统硬件及操作系统的时钟管理、中断管理、接口驱动等多个功能部分。RDSP 在仿真系统中所处的位置如图 1 所示。

由于分布式仿真平台的引入,带来了如下影响:

(1)RDSP 为仿真应用程序提供任务装订功能,所有仿真任务都可以在实时仿真系统启动以前通过此功能加载到仿真系统中,可以自动根据系统负载调整仿

^{*} 本文得到国家“863”高科技计划资助。朱晴波 硕士研究生,主要研究方向为分布式计算;周 钢 硕士研究生,主要研究方向为分布式计算;许建峰 博士研究生,主要研究领域为雷达软件工程和分布式系统;陈道蓄 教授,博士生导师,主要研究领域为分布与并行计算机系统;谢 立 教授,博士生导师,主要研究领域为分布与并行计算机系统。

真任务到各台机器上,这就可以使整个仿真系统具有很大的灵活性和适应性;

(2)RDSP 的实时任务调度可以实现多种周期仿真任务的嵌套运行,这可以使处理机资源得到合理利用,从而使系统的整体效率得到较大提高;

(3)RDSP 与仿真应用程序之间的关系通过任务来体现,任务实际上是一个模块或一组模块的集合,因此它为仿真应用程序实现模块化提供了较为理想的环境和手段,进而促进仿真系统进行面向对象的设计;

(4)RDSP 使处理机的硬件和接口对仿真应用任务透明,从而使仿真应用程序设计人员集中实现各种仿真需求,有利于设计人员的合理组织和分工;

(5)RDSP 使仿真任务与具体处理机的相关性减少,为某些处理机失效的情况下采用容错技术提供了有利条件。

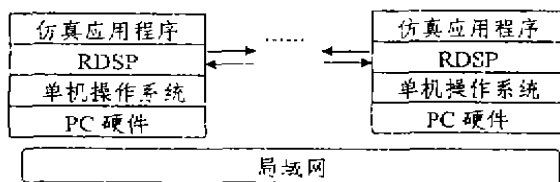


图1 仿真系统的软件结构示意图

3. 实时分布式仿真平台 RDSP 的结构

图2所示的是RDSP的软件模块化结构,由用户交互界面、任务配置管理器、任务调度管理器、通信管理器和任务状态监视器五个部分组成。

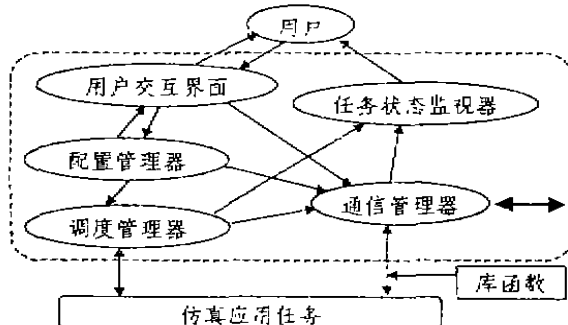


图2 RDSP 内部结构图

4. RDSP 的功能模块

4.1 用户交互界面

用户交互界面是RDSP与用户的交互接口,用户通过交互界面输入仿真任务的信息,并控制RDSP的运行,使其完成相应的功能。用户交互界面具有以下功

能:

- 仿真任务信息输入:RDSP系统中的每个结点均向用户提供格式统一的交互界面,用户可以在任意一台主机上向系统输入信息。用户不仅可以在仿真系统启动前输入任务信息加载任务,而且可以在仿真系统启动运行了一段时间以后再增加新的任务。用户交互界面向用户提供友好的输入界面,并对用户输入的任务信息进行语法语义检查,帮助用户正确地进行任务信息输入。

RDSP中任务的定义是:一个任务是在一个处理机上一组可以连续执行的程序代码。RDSP将仿真应用程序看作由若干个任务所组成的集合,因此在RDSP中对仿真应用程序的调度通过对各个任务的调度来实现,任务是调度的基本单元,任务分为以下几种类型:

- (1)周期性任务,是周期性运行的仿真任务,它按照自己的运行周期运行。

- (2)非周期任务,是由外部事件驱动而运行的仿真任务,它不定期产生,由某些外部事件触发,这里的外部事件包括外部中断、异常和特定的消息等等。

- (3)初始化任务,应用程序中为正常完成上述任务而必须在系统开始时运行的任务。

- 仿真系统控制:用户通过交互界面向系统输入仿真任务信息以后,便可以控制仿真系统的执行,包括:系统启动、系统运行、系统挂起、系统恢复运行、系统退出。

4.2 任务配置管理器

任务配置管理是利用用户输入的信息进行任务分配并生产和管理任务配置文件。

- 仿真任务的分配:任务分配是根据用户的要求和周期任务的运行周期确定任务的优先级,综合考虑任务的运行时间和任务之间的通信关系和系统的负载情况,在各台主机之间的任务分配,同时生成仿真任务配置文件,为任务调度和任务通信提供信息,进行任务分配的原则是负载均衡,避免任务夭折,减少通信开销。

- 显示任务分配的结果:向用户给出仿真任务分配的结果。与一般的分布式系统不同,分布式仿真系统中各个仿真任务在结点上的分布是重要的。用户可以在仿真系统运行前,或是在系统运行了一段时间以后,查看各台主机上仿真任务的分配情况,对仿真任务的分配进行调整。

- 配置文件的管理:根据用户输入的任务信息以及任务的分配情况生成仿真任务配置文件。仿真任务配置文件是调度管理器和通信管理器进行任务调度和通信的依据。在仿真系统中,某些仿真可能会重复多

次,因此以前的配置文件依然有用,系统可以使用以前的任务配置文件,进行一定的增加、删除或修改操作即可。

4.3 调度管理器

RDSP 的任务调度严格按照仿真任务的优先级进行,并采取抢占的方式。调度器进行初始化以后,先运行用户提供的初始化任务,然后周期性地调度运行各周期任务,并在非周期任务产生时调度其运行。

- 产生周期性的时钟节拍。任务调度管理器产生周期性的时钟节拍。对于 RDSP 来说,所运行的仿真任务大部分是周期性任务,因此产生准确的时钟周期节拍是至关重要的。

- 启动各初始化任务,在这个仿真系统运行之前,任务调度管理器启动初始化任务。

- 周期任务的调度。仿真任务调度严格按照任务的优先级进行,任务的优先级由任务调度器读取仿真任务配置文件获得。调度器维护一个任务等待队列。当一个周期任务的运行周期到达时,如果本任务任务号与当前运行任务或在任务等待队列中某一任务的任务号相同则取消本任务的运行,即本任务的运行夭折。任务夭折意味着在下一个周期来到的时候,上一周期的任务实例还没有完成,是系统负载异常的表现。

- 检测驱动非周期任务运行的外部事件。在 RDSP 中,非周期任务需要得到最快的响应,因此非周期任务的优先级高于周期性任务。调度管理器随时检测外部事件是否发生。当调度管理器发现外部事件的产生时,就根据外部事件的事件号查任务配置文件,查到对应的非周期任务的任务号,调度该非周期任务运行。

4.4 通信管理器

在 RDSP 中,系统之间的通信和仿真任务之间的通信都通过通信管理器来完成。

- 为仿真任务建立信箱。在初始化时,它根据任务配置文件中任务信箱个数和大小的设定为相应的仿真任务建立信箱。信箱是仿真任务通信的中介,在 RDSP 中为任务建立若干信箱,仿真任务之间通信时将信件发到指定的信箱里。这样做的好处是不会产生混淆,保证了通信的可靠性。

- 发送系统信息。在仿真系统中,各个 RDSP 结点之间有许多系统信息需要传递。系统信息包括用户在不同主机上输入的仿真应用任务信息,系统进行任务分配后的生成仿真任务配置信息,用户通过用户交互界面对系统的运行进行控制的控制信息。这些系统信息的传递都通过各个结点上的通信管理器之间的通信来完成。

- 仿真任务之间的通信。RDSP 为用户提供了一套通信函数。通信函数为用户编写仿真应用程序,屏蔽

了底层的通信,用户只需指定目的任务的任务号和信箱号即可向该任务发信。为了保证实时性,发信和收信函数都采用非阻塞方式。

- 通信的同步代理。是处理信件之间的同步。在分布式仿真中,为了到达对现实客观世界的准确仿真,常常需要仿真任务满足一定的同步关系,其中最重要的就是信件的同步,即一个仿真任务所收到的多个其它任务发来的信件之间必须满足固定的时间差关系。用户可以定义这样的时间差,即通信管理器在收到发给这个任务的信件时,并不是直接将信件放入信箱,而是等到必须满足固定时间差的信件都到齐以后,再按照时间差放入信箱。

4.5 任务状态监视器

任务状态监视器向用户提供当前主机上仿真任务的运行状态。在仿真系统中,仿真任务的运行状态对于用户来说是一个重要的信息,任务状态监视器通过图形方式给出仿真任务的执行频率、夭折次数等信息,以便用户对仿真任务的配置作出改动。

任务状态监视器给出以下的任务运行信息:(1)任务运行的频率;(2)任务之间的通信情况;(3)任务的夭折情况。

5. RDSP 的性能评价和分析

5.1 测试环境

三台 WindowsNT 4.0 的 PC 机用以太网互连构成了测试环境:处理器 PII233,内存 64M,网卡 NE2000 支持 10Mbps 以上的传输速率。

5.2 性能测试与分析

评价一个实时分布式仿真系统的主要指标是任务的夭折率。

实时分布式仿真平台 RDSP 的任务调度管理器对于周期性任务采用的调度算法是单调速率法。对于这种调度算法有以下特点:即任务如果在第一个周期里运行不出现夭折,那么它在以后的各个周期内也不会夭折。但是考虑到系统中有优先级高于周期性任务的非周期任务的不定期产生,以及 Windows NT 操作系统的一些不可预知的系统开销,尽管在任务分配时是满足条件的,但在实际运行时,仍然可能产生任务夭折。

因此我们对 RDSP 的任务调度时产生的任务夭折数进行了统计,当任务全部是周期性任务,并且利用率小于 80%时,系统中没有夭折的情况产生。这里的利用率是 $\sum C_i/T_i$, C_i 和 T_i 分别是第 i 个任务的运行时间和运行的周期。当利用率大于 80%时,系统中出现任务夭折的情况。我们对于以下三个任务集的调度中出现的夭折数进行了统计,得到了图 3 所示的结果。

任务集的任务负载情况如下:

任务集1:

任务1,周期 5ms,运行时间 2ms;
任务2,周期 5ms,运行时间 2ms;
任务3,周期 50ms,运行时间 3ms,
利用率 $\Sigma C_i/T_i=84\%$ 。

任务集2:

任务1,周期 5ms,运行时间 2ms;
任务2,周期 5ms,运行时间 2ms;
任务3,周期 20ms,运行时间 2ms,
利用率 $\Sigma C_i/T_i=90\%$ 。

任务集3:

任务1,周期 5ms,运行时间 2ms;
任务2,周期 5ms,运行时间 2ms;
任务3,周期 10ms,运行时间 3ms,
利用率 $\Sigma C_i/T_i=100\%$ 。

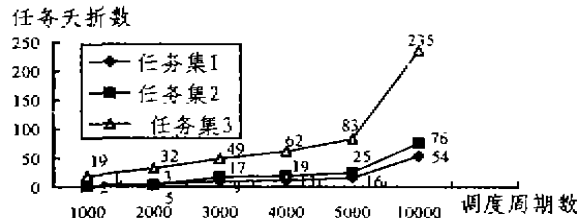


图3 任务调度时的夭折数统计

从上面的统计数据可以看出, RDSP 中调度管理器的调度的系统开销是比较小的, 仿真应用任务的运行时间在整个周期中占到 90% 以上。因此, 我们认为, 实时分布式仿真平台 RDSP 的任务调度的效率是满足设计要求的。

我们在系统中增加一个非周期任务, 非周期任务由调度管理器模拟产生, 非周期任务的产生时间通过随机数确定, 我们在每一个调度周期里产生一个 0 到 49 的随机数, 当随机数为 23 时, 非周期任务得到运行, 其运行时间是 3ms。同时, 在系统中运行的周期性

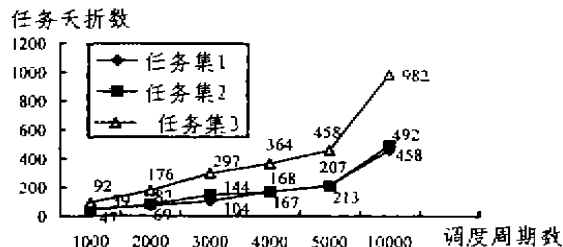


图4 任务调度的夭折数统计

任务和上面的三个任务集相同, 则得到图 4 的结果, 其

中, 在 10000 个调度周期里, 对于任务集 1, 该非周期任务共运行 199 次; 对于任务集 2, 该非周期任务共运行 179 次; 对于任务集 3, 该非周期任务共运行 205 次。

从上面的结果可以看出, 在 RDSP 中, 当周期性任务负载较重时, 非周期任务会导致周期性任务的运行出现夭折, 但由于非周期任务的出现频率并不是太高, 因此周期性任务的夭折数和任务的运行次数相比, 还是属于少数。我们认为这并不影响整个仿真系统的正常运行。

结束语 本文详细介绍了一个实时分布式仿真平台 RDSP 的设计和实现。分布式技术和仿真技术相结合是仿真技术的一个重要发展方向。现在 RDSP 已经在国防重点型号机载预警雷达 XXXXX(代号略去)的研制中得到应用, 支持了雷达显示控制仿真, 目标回波仿真、波束控制仿真及分系统状态仿真等多项仿真任务, 取得了良好的效果。

参考文献

- Garrett D R, Randy. A New Simulation Paradigm: Advanced Distributed Simulation. Phalanx, Sep. 1995
- Beebe B. High Level Architecture (HLA) Engineering ProtoFederation (EPF) Experiment. In: Proc. of The IEEE 1997 National Aerospace and Electronics Conf. 1997. 517~524
- McQuay W K. Modeling And Simulation Trend And J-MASS Technology. In: Proc. of The IEEE 1996 National Aerospace and Electronics Conf 1996. 579~584
- Perscha A. Parallel and Distributed Simulation of Discrete Event Systems. In: A. Y. Zomaya, ed. Parallel and Distributed Computing Handbook. McGraw-Hill, 1995
- Givens B R, O'Quinn D B. Migration of An Engineering Design Simulator to the High Lever Architecture. In: Proc. of The IEEE 1997 National Aerospace and Electronics Conf. 1997. 564~571
- Cheng Sheng-Tzong, Agrawala A K. Allocation and Scheduling of Real-Time Periodic Tasks with Relative Timing Constraints. In: Proc. of Second Intl. Workshop on Real-Time Computing System and Applications, 1995. 210~217
- Khenka A, Shyamasundar R K. Scheduling Periodic Distributed Hard Real-Time Tasks. In: Proc. of the 4th International Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems. 1996. 101~104
- Fujimoto R M. Parallel Discrete Event Simulation. Communications of the ACM. 1990. 33(10):30~53