

分布式虚拟环境的时空一致性研究

彭宇行, 张拥军, 李思昆

(国防科技大学计算机学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 军事仿真是分布式虚拟环境的典型应用, 时空一致性是其中的一个挑战性问题. 近年来, 该问题的研究得到了很大的进展, 出现了诸如本地滞后、时间回卷、推算定位、加锁、令牌等相关技术, 但都存在其局限性. 本文着重研究分布式虚拟环境中网络传输延时所带来的时空一致性问题, 分析了引起时空不一致的三个原因, 提出了“时空状态一致性”的概念、一致性维护方法以及相应的分布式虚拟环境模型. 实验结果表明, 本文的研究成果可以有效地应用于分布式虚拟环境中.

关键词: 虚拟现实; 分布式虚拟环境; 时空一致性

中图分类号: TP391. 9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 02-0313-04

Time-Space Consistency in Distributed Virtual Environments

PENG Yu-xing, ZHANG Yong-jun, LI Si-kun

(School of Computer of National University of Defence Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Distributed Virtual Environments that refer to the distributed computer and network systems are usually applied to simulations, especially to the large-scale battlefield simulations. One of their challenging issues is the time-space consistency problem. In recent years, consistency maintenance in distributed virtual environments is well studied by many researchers. The schemes can be summarized as follows: Local Lag, Time Warp, Dead Reckoning, Lock, Token and so on, but they are far from well studied. This paper focuses on the inconsistency caused by the network transport delays. There are three causations that result in the time-space inconsistency in the Environments. To maintain the consistency, this paper proposes the concept “delayed status consistency” and the related methods. Based on the concept, a distributed virtual environment model is proposed to make the methods practical for the simulation applications. The experiment result shows that our methods are suitable for the applications in distributed virtual environments.

Key words: virtual reality; large-scale simulation; time-space consistency

1 引言

分布式虚拟环境技术是目前虚拟现实领域的研究热点, 也是国家 973 项目“虚拟现实的基础理论、算法及实现”中需要研究的关键技术, 在军事仿真中有着重要的应用前景^[1~5]. 时空一致性问题分布式虚拟环境技术中一个传统的、目前尚未解决但必须解决的技术难题, 它可以简单地概述为环境中计算和网络延时等因素造成的仿真过程中各计算节点上仿真结果不一致的现象^[6~8], 其产生原因大致可以分为三类:

(1) 时间因素

各计算节点的系统时间不一致

各计算节点上计算资源和计算量的不匹配造成的计算
延时

网络传输延时

(2) 空间因素

各计算节点的仿真坐标系不一致

(3) 由时间因素造成的时空不一致

由计算或传输延时造成的不同计算节点上同一实体对象的
空间差异

由计算或传输延时造成的不同计算节点上同一实体对象
状态的时间差异

时空一致性问题给分布式仿真带来极大的困难, 以至造成在一些计算节点上发生了某些在其它计算节点看来根本不可能发生的事情. 因此, 近年来不少学者致力于研究解决时空一致性问题或减小时空不一致影响的方法和技术. 其方法可以大致分为以下几类^[9~20]:

(1) 统一各计算节点上的时钟

(2) 采用处理滞后的策略, 减小不同计算节点对同一实体
对象状态认识的不一致

(3) 每一步仿真结果都带上时戳

(4) 采用回卷策略修改前序错误的仿真结果

(5) 推算其它计算节点上被实体对象的状态, 减少网络带

收稿日期: 2004-02-09; 修回日期: 2004-08-26

基金项目: 国家 973 项目 (No. 2002CB312105)

来的影响

此外,令牌、加锁等技术也应用于分布式虚拟环境中.这些方法和为解决时空一致性问题带来很大进展,然而也存在不足,具体可归纳为:若要保证各计算节点上的时钟统一,则需要花费较大的代价;滞后策略很难确定一个满足各项要求的滞后量;时戳信息必须在滞后策略的前提下应用才有意义;回卷策略不适合实时仿真,否则给用户造成仿真结果自相矛盾的印象;推算定位策略有时会造成推算结果与仿真结果的不一致.因此,在目前的技术背景下,研究分布式虚拟环境的时空一致性问题是十分有意义的.

本文针对分布式虚拟环境中网络传输延时带来的实体对象时空不一致现象,以保证不出现实体对象的矛盾状态为目标,提出分布式虚拟环境的时空状态一致性概念、统一事件处理以及其它相关方法,维护分布式虚拟环境中的实体对象时空状态一致性.

2 时空一致性问题分析

从传统意义上来说,分布式虚拟环境的时空一致性可以定义为:设 O 为环境中的一个实体对象,若 $L_i^O(t)$ 为 t 时刻 O 在第 i 个计算节点上的状态,则 $L_i^O(t) = L_1^O(t), i = 1, 2, \dots, n$. 从时空一致性定义来看,只要存在计算和网络传输延时,就会出现同一时刻仿真状态的不一致的现象,因此时空一致性问题在分布环境下是不可避免的.然而,与传统研究不同的是,本文着重解决由于网络传输延时造成实体对象时空状态不一致的问题.例如,计算节点 N_1 、 N_2 分别对跑道 O_1 、飞机 O_2 等实体对象进行仿真.若在 t_1 时刻 O_1 被炸毁,经过一段网络传输延时,在 t_2 时刻 O_1 被炸毁的消息才传到 N_2 上,由于在 t_1 与 t_2 之间 N_2 并不知道 O_1 已被炸毁,因此 O_2 可以在 N_2 上起飞,但在 N_1 看来 O_2 起飞是虚拟环境中的一个不一致的实体对象状态.

在分布式虚拟环境中,影响实体对象状态的网络传输延时现象可以归纳如下.第一,事件以不同的传输延时达到其它的节点.设 E 为 t 时刻在节点 N 上发生的事件,由于从节点 N 上传输事件 E 到其它节点上有延时,并且不同的节点延时也不同,因此造成事件 E 在 t_1 时刻到达节点 N_1 ,在 t_2 时刻到达节点 N_2 .第二,事件以非正常的顺序到达某节点.设 E_1 为节点 N_1 上发生的事件, E_2 为节点 N_2 上发生的事件, E_1 在 E_2 之前发生.由于从 N_1 传输 E_1 到节点 N_3 上的时比从 N_2 传输 E_2 到 N_3 上的延时长,因此造成 N_3 先获得事件 E_2 ,后获得事件 E_1 .

怎样才能保证存在网络传输延时不出现实体对象状态的矛盾呢?如果我们在飞机起飞这个例子中考虑网络延时这一因素,认为仿真事件传输到目的地的时间(而不是它在计算节点上的发生时间)才是仿真系统认为的事件发生时间,即系统内所有节点(包括节点 N_1)均认为跑道被炸毁这一事件在 t_2 时刻发生,则可以得到这样的结论:虽然在节点 N_1 看来系统对飞机被炸毁这一事件反映过慢,但仿真系统内不会出现实体对象时空不一致的矛盾现象.

因此,我们可以得到这样一个结论:要保持实体对象在各

个计算节点上时空状态的一致性,关键是保证不同事件的发生顺序对所有相关计算节点来说是相同的.对于现象 1,我们可以在 E 发生后并在其它任意对象状态改变前,让所有有关节点都知道事件 E 已经发生,不因为 E 没有传到某些节点造成仿真不一致.对于现象 2,如果 E_1 和 E_2 之间没有因果关系,我们可以让所有计算节点均认为节点 N_2 上的事件 E_2 在节点 N_1 上的事件 E_1 之前发生,使它们不出现认识上的矛盾;如果 E_1 和 E_2 之间有因果关系, E_1 是因, E_2 是果,即 N_2 得知事件 E_1 发生后才产生事件 E_2 ,我们可以在事件 E_1 发生后,先发送 E_1 到有关计算节点,再产生事件 E_2 .

基于上述分析,我们提出分布式虚拟环境中的统一事件处理机制来保证实体对象时空状态的一致性.即每个计算节点按照实体对象的行为计算其状态,将状态值上报给事件处理机制;由事件处理机制将状态值回传给有关计算节点进行状态显示,并作为下一个时间段内实体对象的初始状态.这样,对虚拟环境中的每一个实体对象来说,所有计算节点所看到的状态即为事件处理机制上的唯一状态,状态改变的时间为改变值达到事件处理机制上的时间.

3 基于实体对象时空状态一致性的分布式虚拟环境模型

事件处理机制由对象管理器、对象状态监控器、状态回传器组成,如图 1 所示.对象管理器管理对象的静态信息;对象状态监控器实时接收计算节点传来的对象动态状态信息;状态回传器将对象状态的变化回传给对象以及它在各个计算节点上的表现实体.

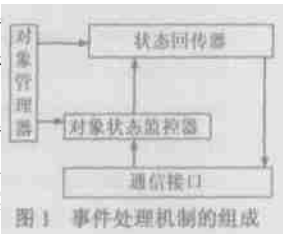


图1 事件处理机制的组成

基于实体对象时空状态一致性的分布式虚拟环境模型如图 2 所示,它由对象仿真、事件处理机制、通信机制三部分构成.对象的仿真状态通过通信机制上报给事件处理机制,事件处理机制将对象状态的变化回传,作为这一段时间内的对象仿真结果和下一段时间内对象仿真的初始状态.



图2 分布式虚拟环境模型

我们分析一下没有统一的事件处理机制时,在分布式虚拟环境下的仿真信息传递情况.设节点 N 上的对象 O 状态发生改变,不妨将其定义为事件 E . E 事件需发送给 k 个节点 $N_i, i = 1, 2, \dots, k$,且从节点 N 上传输 E 到 N_i 的时间为 $t_i, i = 1, 2, \dots, k$,假设节点 N 在 0 时刻获知事件 E ,则最晚获知事件 E 的节点的时间为 $\max\{t_i | i = 1, 2, \dots, k\}$,最晚获知时间与最早获知时间之差亦为 $\max\{t_i | i = 1, 2, \dots, k\}$.最晚获知时间描述仿真的实时性,时间差描述时空一致性.

当分布式虚拟环境中存在统一的事件处理机制,假设从节点 N 上传输 E 到事件处理机制的时间为 t ,从事件处理机制上回传 E 到 N 的时间为 t_0 ,传输 E 到 N_i 的时间为 $t_i, i = 1,$

2, ..., k, 则最晚获知事件 E 的节点时间为 $t + \max\{t_i | i = 0, 1, \dots, k\}$, 最晚获知时间与最早获知时间之差为 $\max\{t_i | i = 0, 1, \dots, k\} - \min\{t_i | i = 0, 1, \dots, k\}$, $t + \max\{t_i | i = 0, 1, \dots, k\}$. 即与没有统一的事件处理机制相比, 仿真的实时性要慢, 但保证了实体对象时空状态的一致性。

4 系统及实验

4.1 分布式虚拟海战环境

DVSE2000^[21]是国防科技大学计算机学院研制的分布式虚拟海战环境。它可以进行各种海军作战仿真, 也可以作为 DVENET^[22]的组成部分, 结合分布式虚拟陆战和空战环境, 进行陆海空联合作战仿真。

DVSE2000 系统结构如图 3 所示, 计算节点层次结构如图 4 所示。计算节点建立在 WINDOWS 或 UNIX 操作系统之上, 节点相互独立, 可以自由加入和退出系统, 节点之间采用标准的 DIS/HLA 协议进行数据交换。

仿真过程中, 每个计算节点不仅负责维护自己创建和控制的、被称为本地实体的实体对象, 而且还维护由其它节点创建和控制的、被称为远程实体的实体对象。为保证本地实体和远程实体的状态一致性, 计算节点需要将本地实体的状态变化不断发送到维护相关远程实体的计算节点上。同时, 为了减

少网络传输量和网络传输延时, 系统采用了推算定位等方法^[12,15]。

4.2 基于时间处理机制的虚拟海战环境

基于实体对象时空状态一致性的分布式虚拟环境由计算节点、事件服务器、网络三部分构成, 如图 5 所示。计算节点对节点上的对象进行仿真, 通过网络将对象状态的变化传给事件服务器。一个计算节点可以仿真多个对象, 一个对象可以在多个计算节点上表现出来。事件服务器通过网络接收实体对象的状态值, 并回传给相关计算节点。计算节点根据事件服务器的回传信息继续进行对象仿真。

为了测试数据经过事件服务器后的实时性, 我们如图 6 所示的方式进行了模拟。网络带宽为 1.5Mbps, 数据包平均大小为 2.4kb。数据经过发送、接收并转发、再接收的过程, 表 1 给出了 20 个实验结果数据, 最多达到 0.36 秒。实验结果表明, 统一处理机制的实时性能够满足分布式海战仿真需求。



图3 DVSE2000系统结构

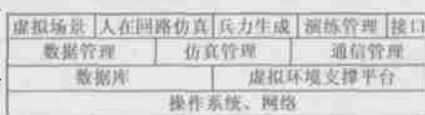


图4 DVSE2000系统计算节点层次结构

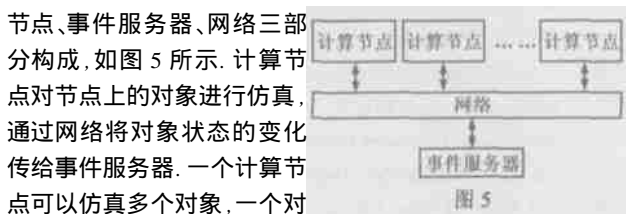


图5

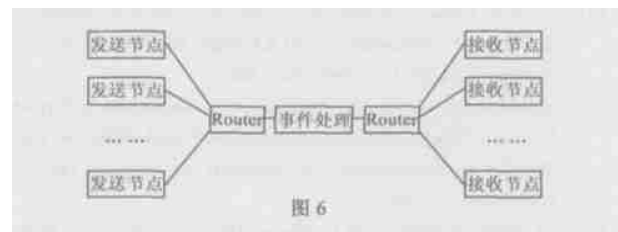


图6

表1 20个实验结果数据

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Delay(Sec.)	0.290481456	0.325282016	0.321105949	0.335234976	0.327391348	0.351087021	0.286434808	0.275256322	0.293317839	0.359669786
No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Delay(Sec.)	0.352854621	0.274064987	0.336040612	0.324501686	0.345916962	0.349644673	0.337050865	0.340665993	0.328278136	0.328006053

4.3 实时性措施

虽然实验数据表明, 统一处理机制能够满足分布式海战仿真实时性要求, 但由于其传输延时最多接近 0.36 秒, 因此难以满足空战仿真最大延时时必须小于 0.3 秒的要求。这样, 在进行陆海空联合作战仿真时必然会影响到仿真效果。另外, 由于所有需要传输的状态变化均要通过事件服务器, 事件服务器便成了限制规模扩大的瓶颈。

在维护实体对象时空状态一致性的前提下, 怎样提高仿真实时性便成了分布式虚拟环境能否实际应用的一个非常关键的问题。问题的焦点在事件服务器, 它既维护了实体对象时空状态一致性, 又带来了约两倍于传统传输延时的时间开销。如前所述, 引进事件服务器的目的是让所有相关计算节点所认识的事件发生顺序保持相同。为了达到这一目的, 我们从事件服务器上连续不断地向各计算节点广播时标, 并在每一个计算节点上设置一个事件队列。每一个节点根据时标以及预先制定的实体先后顺序动态对本节点上所发生的事件进行排序执行, 从而达到既有相同的事件顺序, 又减小事件传输延时的目的。

实验表明, 通过采用上述实时性措施, 传输最大延时可控制在 0.2 秒以内, 满足了联合仿真需求。

参考文献:

- [1] E Fréon, M Stenius. Dive: a scalable network architecture for distributed virtual environments[J]. Distributed Systems Engineering Journal, 1998, 5(3): 91 - 100.
- [2] S Singhal, M Zyda. Networked Virtual Environments Design and Implementation[M]. New York, USA: ACM press, 1999.
- [3] J C Oliveira, S Shirmohammadi, N D Georganas. Collaborative Virtual Environment Standards: A Performance Evaluation[A]. In Proceedings of the 3rd International Workshop on Distributed Interactive Simulation and Real-Time Applications[C]. College Park, Maryland: 1999. 14 - 22.
- [4] C Greenhalgh, S Benford, G Reynard. A QoS architecture for collaborative virtual environments[A]. In Proceedings of the ACM Multimedia[C]. Oriaando, USA: 1999. 121 - 130.
- [5] R M Fujimoto. Parallel and Distributed Simulation Systems[R]. Wiley Interscience, January 2000.

- [6] S Srinivasan. Efficient Data Consistency in HLA/DIS++ [A]. Proc. of the 1996 Winter Simulation Conference [C]. College Park, Maryland, USA:1996. 946 - 951.
- [7] M Mauve. Consistency in replicated continuous interactive media [A]. In Proceeding of ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work [C]. Philadelphia, PA, USA:1998. 181 - 190.
- [8] X Shen, R Hage, N Georganas. Agent-Aided Collaborative Virtual Environments over HLA/RTI [A]. In Proceedings of the 3rd International Workshop on Distributed Interactive Simulation and Real-Time Applications [C]. College Park, Maryland:1999. 23 - 24.
- [9] C A Ellis, S J Gibbs. Concurrency Control in Groupware System [A]. Proceedings ACM SIGMOD International Conference on Management of Data [C]. Portland, Oregon:1989. 399 - 407.
- [10] Schiper, J Egli, A Sandoz. A New Algorithm to Implement Causal Ordering [A]. Proc of the 3rd Int Workshop on Distributed Algorithms [C]. Berlin:Springer Verlag, 1989. 219 - 232.
- [11] B R Preiss, L D Macintyre, W M Loucks. On the trade-off between Time and Space in Optimistic Parallel Discrete-Event Simulation [A]. Proc of the 6th Workshop on Parallel and Distributed Simulation [C]. 1992. 133 - 141.
- [12] S Gble, K Morris. Dead-Reckoning for Aircraft in Distributed Interactive Simulation [A]. Proceedings of ALAA Flight Simulation Technology Conference [C]. SC, USA:1992. 302 - 310.
- [13] V Hook, J Calvin, J Smith. Data Consistency Mechanisms to Support Distributed Simulation [A]. Proceedings of the 13th Workshop on Standards for the Interoperability of Distributed [C]. Orlando, Florida, USA:1995. 797 - 806.
- [14] M Mauve. Consistency in Continuous Distributed Interactive Media [R]. Technical Report TR-9-99, Reihe Informatik, Department for Mathematics and Computer Science, University of Mannheim, November 1999.
- [15] M Mauve. Distributed Interactive Media [D]. Ph D Thesis ISBN 3 - 89838 - 471 - 3. infix. Berlin. 2000.
- [16] S Zhou, W Cai, F B Lee, S J Turner. Consistency in Distributed Interactive Application [A]. In Proceedings of the 2001 European Simulation Interoperability Workshop [C]. London UK:2001. 8 - 13.
- [17] C Sun, D Chen. Consistency Maintenance in Real-Time Collaborative Graphics Editing systems [J]. ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 2002, 9(1):1 - 41.
- [18] N W Ngee. A Study of HLA Use in Non-Military Installary and the Grid-based Approach to Data Distribution Management in High-Level Architecture [R]. www.comp.nus.edu.sg/ngweenge/urop/final-report.htm.
- [19] B Roehl. Distributed Virtual Reality-An Overview [Z]. <http://www.ece.uwaterloo.ca/broehl/distrib.html>.
- [20] S Zhou, et al. Time-Space Consistency in Large Scale Distributed Virtual Environment [Z]. <http://www.ntu.edu.sg/home/asspzhou/ts.ps>.
- [21] 曾亮, 郑义, 李思昆. 分布式作战台位虚拟仿真器可重用建模技术 [J]. 仿真系统学报, 2002, (14) 7:894 - 900.
- [22] 赵沁平. DVENET 分布式环境 [M]. 北京:科技出版社, 2002.

作者简介:



彭宇行 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为信息系统集成、流媒体技术、分布式虚拟现实技术. Email: peng-kevin@etang.com.



张拥军 男, 1972 年生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为实时系统、流媒体技术、分布式虚拟现实技术.

李思昆 男, 1941 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为 VLSI 设计、GPS、分布式虚拟现实技术.