

## 支持 HLA 仿真和并行绘制的统一对象模型研究

王总辉 熊 华 姜晓红 石教英

(浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室 杭州 310058)

(zhwang@cad.zju.edu.cn)

## Research on Unified Object Model Supporting HLA-Based Simulation and Parallel Rendering

Wang Zonghui, Xiong Hua, Jiang Xiaohong, and Shi Jiaoying

(State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

**Abstract** With the development of computer hardware, network, and software technology, and also with the development of social requirements, distributed interactive simulation applications which involve massive complex scene and large quantity of simulation entity objects put high demand on simulation object management capability and scene rendering ability. There are two problems in the existing HLA-based distributed interactive simulation applications. One is the fact that the timeliness of scene simulations with massive complex scene are bad. The other is that the management of simulation entity object and the management of rendering object are separate. In order to solve the above problems, a unified object model consisting of heterogenous scene graph tree, action list and universal access interface, is presented, realizing the efficient organization and unified management of simulation entity object and rendering object. The unified object model builds a bridge for high efficient data exchange between HLA-based simulation platform and parallel rendering platform, reducing the development workload of integration between them, and supporting the real-time rendering of massive complex scene and large quantity of simulation entity object to help to enhance the timeliness of scene simulation. The unified object model is a common method for HLA-based simulation platform and parallel rendering platform. Finally, an experimental demo with analysis is given.

**Key words** unified object model; object management; scene simulation; timeliness of simulation; parallel rendering interface; high level architecture (HLA)

**摘 要** 随着计算机硬件、软件、网络以及社会需求的发展,分布式交互仿真应用对大规模复杂场景和大量仿真实体对象的管理能力和绘制能力提出了较高的要求。针对现有 HLA 仿真应用中大规模复杂场景的视景仿真实时性较差、仿真实体对象管理与绘制对象管理是分离的等问题,提出了统一对象模型,包含异质实体对象树、操作记录列表和统一访问接口,实现了仿真实体对象和绘制对象的高效组织和统一管理。该统一对象模型在 HLA 仿真平台和并行绘制平台之间建立了高效的数据交换桥梁,减轻了两者的集成开发工作量,并有效地支持了大规模复杂场景和大量仿真实体对象的实时绘制,有助于提高仿真的实时性。该统一对象模型对于 HLA 仿真平台和并行绘制平台具有通用性。最后给出了实验结果和分析。

关键词 统一对象模型 ;对象管理 ;视景仿真 ;仿真实时性 ;并行绘制接口 ;高层体系结构

中图法分类号 TP391.9

随着社会需求的不断发展,在军事作战、娱乐游戏等领域的应用需要大规模分布式仿真系统的支持,这些系统一般涉及到大规模复杂场景和大量仿真实体,对分布式交互仿真系统的对象管理能力和绘制能力提出了较高的要求.未来仿真系统对大规模复杂场景和大量仿真实体必须具有较强的对象管理和组织能力,并支持并行绘制以及高分辨率多屏拼接显示.

目前,国内外现有仿真系统的场景绘制实现大多采用第三方绘制平台.这些绘制平台虽然具有较强的单机绘制能力,但在大规模复杂场景的视景仿真中,其单机绘制帧速率较低,导致仿真实时性较差.而且,它们虽然有一定的场景组织和管理机制,但一般仅限于场景模型的几何数据,这样就造成现有仿真应用中仿真实体对象管理与绘制对象管理是分离的,引起对象数据存储冗余和维护不便,容易造成数据不一致性,导致仿真出错.对于将场景并行绘制的需求,这些平台不能直接支持,需要进行进一步开发才能满足.

本文从研究 HLA 仿真平台和并行绘制平台共同参与的仿真对象的组织与管理分析出发,结合仿真应用,提出了支持 HLA 仿真和并行绘制的统一对象模型.该模型已经在我们研制的基于 HLA 的 HIVE 仿真平台和 PSG 并行绘制平台上实现,在两个平台之间建立了高效的数据交换桥梁,实现了仿真实体对象和绘制对象的高效组织和统一管理,并将两个平台高效集成,有效地支持了大规模复杂场景和大量仿真实体的并行实时绘制,满足了仿真应用的实时性需求.该模型适用于其他 HLA 仿真平台和并行绘制平台,是一种通用的方法.

## 1 相关工作

### 1.1 HLA 仿真平台

为了满足现代仿真对互操作性和可重用性的需求,美国国防部建模和仿真办公室(DMSO(Defense Modeling and Simulation Office))于1995年3月提出了HLA(High Level Architecture)标准的初始定义<sup>[1]</sup>.在不断修改和完善后,1997年6月HLA标准开始了IEEE标准化过程,并于2000年10月被正式采纳为IEEE P1516系列标准<sup>[2]</sup>.

RTI(Run-Time Infrastructure)是实现HLA标准中接口规范的核心软件,是HLA分布式仿真的核心部件.DMSO最先开发和发布RTI 1.3<sup>[3]</sup>,并支持开发了RTI 1.3NG<sup>[4]</sup>等软件.除了DMSO外,目前国际和国内很多研究机构和团体致力于RTI软件的开发和研究,比如瑞典Pitch AB公司开发的pRTI<sup>[5]</sup>、MÄK公司开发的MÄK-RTI<sup>[6]</sup>、国内的比如国防科技大学开发的KD-RTI<sup>[7]</sup>和基于CORBA中间件技术开发的StarLink<sup>[8]</sup>、北京航空航天大学开发的DVE-RTI<sup>[9]</sup>、航天二院开发的SSS-RTI<sup>[10]</sup>、浙江大学开发的HIVE<sup>[11]</sup>等.

但是,HLA标准仅仅是一个技术框架,并未对其具体实现RTI软件的体系结构、通信协议、数据处理方法等方面作出规定,而对偏重于应用层仿真过程表达的绘制方面更是没有任何涉及.为了方便仿真应用的开发,国内外仿真系统大都采用支持仿真的第三方绘制平台.

### 1.2 绘制平台

目前在现有仿真应用中,常用的场景绘制平台有SGI公司的Open Inventor<sup>[12]</sup>、OpenGL Performer<sup>[13]</sup>和MultiGen-Paradiam公司的Vega<sup>[14]</sup>等.这些绘制平台虽然有较强的单机绘制能力,但在大规模复杂场景和大量仿真实体的视景仿真应用中,单机绘制帧速率较低,导致仿真实时性较差<sup>[15]</sup>,场景需要并行绘制实现实时绘制,以提高视景仿真的实时性.而且,这些平台一般提供基于场景模型的几何数据的场景组织和管理,造成仿真实体对象管理与绘制对象管理是分离的,需要在仿真和绘制两个平台中分别完成<sup>[16-18]</sup>.在仿真应用中,仿真实体对象的相关属性不仅存储在仿真平台中,也存储在绘制平台的对应场景对象中;在仿真平台中对它们的属性更新的同时也要更新对应场景对象的属性,这样引起仿真实体对象数据冗余存储和双重维护,容易造成数据不一致性,导致仿真出错.在这些平台上实现并行绘制和仿真应用集成需要从底层开始开发,由于大规模复杂场景的几何数据组织形式多样,有高度场数据、CAD模型、三维扫描模型、动画和贴图,开发过程复杂、难度大、周期长.

而现有的并行绘制平台比如WireGL<sup>[19]</sup>、Chromium<sup>[20]</sup>、AnyGL<sup>[21]</sup>等,虽然支持基于立即模式的并行绘制,不需要对场景对象进行管理,但其并

行绘制能力受到网络带宽的限制<sup>[22]</sup>,不支持大规模复杂场景的实时绘制,因此不适用于大规模复杂场景的视景仿真应用。而基于保留模式的并行绘制平台有 Syzygy<sup>[23]</sup>,PSG 并行绘制平台<sup>[24]</sup>等,网络带宽对其并行绘制能力的影响不大,但需要进行场景组织和管理,因此如果用在仿真应用中也会存在仿真实体对象管理与绘制对象管理分离的问题,而且也缺乏与仿真平台的接口,与仿真平台集成的开发工作量大。

因此,在现有 HLA 仿真应用中,普遍存在大规模复杂场景的视景仿真实时性较差、仿真实体对象管理与绘制对象管理是分离的、并行绘制平台与仿真平台集成的开发工作量大等问题。

## 2 统一对象模型

### 2.1 仿真应用对象的组织与管理分析

在仿真应用中,仿真平台和并行绘制平台共同参与组织和管理的仿真环境包含以下 3 类对象:

1) 静态场景对象:指发生仿真交互时不会改变的场景对象,比如天空、大地、海洋等。

2) 静态实体对象:指发生仿真交互时会改变但是不参与交互的对象,比如建筑物、树、草地等。被炮弹等对象击中后可能会发生变化。

3) 动态实体对象:指仿真中参与交互的实体对象,比如飞机、坦克、战士等。这类对象的特点是参与交互,并能发生变化。另外,仿真环境中的观察者、数据收集器等虽然是虚拟实体在仿真环境中没有化身体现,但也是属于动态实体对象,因为它们也能接收到各种更新和交互数据。

在这 3 类仿真环境对象中,根据具体不同场景和实体对象,其几何数据组织形式有以下几类:

① 静态高度场数据:地形场景对象属于这类,一般采用层次四叉树来组织。

② 动态高度场数据:例如大海场景对象,采用傅立叶变换模拟波浪运动,产生动态高度场数据。

③ CAD 模型数据:例如建筑物、飞机等场景对象,一般采用层次八叉树和层次包围盒来组织。

④ 三维扫描模型:雕像等场景对象属于这类,一般采用多分辨率层次结构来组织。

⑤ 基于关键帧的动画数据:人物等场景对象属于这类,这类对象运动时需要不停变换动作。

⑥ Billboard 纹理数据:树、草地等数量较多的简单场景属于这类,采用将纹理贴图直接贴在 Billboard

上进行显示。

在仿真平台中,需要对仿真实体对象进行组织、交互、同步和分布,并对其属性进行实时更新;而在并行绘制平台中,需要对绘制对象进行本地化组织和更新,进行并行绘制。因此,两个平台都要对仿真对象进行组织和管理,且平台之间需要进行数据交换。这两个平台对象管理的分离,引起仿真对象的数据存储冗余和双重维护,容易造成数据不一致性,导致仿真出错。

综上所述,仿真应用需要连接仿真平台与并行绘制平台的对象管理模型来完成以下工作:

#### 1) 对各种数据进行高效组织

采用统一的数据结构对绘制对象和仿真实体对象进行组织,并对数据进行惟一存储。这样实现了组织有效性,也避免了数据冗余和存储浪费。

#### 2) 对各种对象进行统一管理

提供统一的访问和维护接口,以便其对仿真实体对象和绘制对象进行维护和管理,避免了维护双重数据容易造成的不一致性问题。

#### 3) 提供便利的访问接口和开发接口

提供便利的访问接口,方便仿真平台和并行绘制平台访问和维护,并提供便利的开发接口,减轻两个平台集成的开发工作量。

### 2.2 统一对象模型

为了实现仿真平台和并行绘制平台的高效集成,我们提出统一对象模型 UOM(unified object model),其包含以下 3 部分:

1) 异质实体对象 HSG(heterogenous scene graph) 树,即统一对象模型的数据组织结构。

2) 操作记录列表,用来记录会导致 HSG 树发生变化的所有操作。

3) 统一访问接口,指 HLA 仿真平台和并行绘制平台对 HSG 树的统一访问接口。

对于仿真环境中的 3 类对象,尽管它们包含不同种类的几何数据组织或者没有几何数据(即虚拟实体),统一对象模型采用异质实体对象 HSG 树来组织和存储。图 1 是一个 HSG 树示意图。

树节点的数据结构设计采用面向对象的继承技术,即 HSG 树中的每个节点继承 PSGTreeNode 这个基础类。PSGTreeNode 基础类包含以下成员:

① 对象在仿真环境中惟一的对象 ID;

② 对象的类型;

③ 对象中心点所在的位置、方位角和状态;

④ 对象所对应的场景模型文件索引。

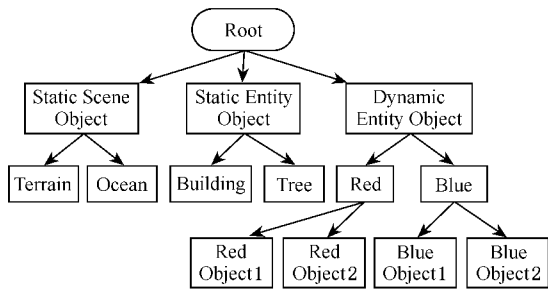


Fig. 1 An example of heterogeneous scene graph tree.

图1 异质实体对象 HSG 树示意图

为了统一 HSG 树和节点的数据管理和访问, PSGTreeNode 基础类还包含以下方法:

- ① 对象的添加、删除和搜索方法;
- ② 对象的成员设置和查询方法;
- ③ 对象的场景模型装入方法;
- ④ 对象的绘制方法;
- ⑤ 对象的碰撞检测方法。

仿真应用中各种对象继承 PSGTreeNode 基础类后, 还需要增加与仿真应用相关的成员和方法。例如, 飞机类除了需要增加其本身飞行参数、携带武器数量、飞行方法等特有属性和方法外, 还需增加仿真相关的方法, 如发布/订阅、注册/发现、更新/反射、发送交互/接收交互等。

采用了 HSG 树的统一存储后, 一个对象的存储空间将比现有应用的冗余存储节省 50B 左右(主要为对象的位置、方位和状态等信息)。针对 HSG 树的维护和使用, 根据对象索引建立一棵平衡二叉树, 其检索、插入和删除的效率均为  $O(\log_2 n)$ , 因此维护该树与现有应用维护单棵树的开销差不多, 但是维护量比现有应用的双重维护少一半, 且不会造成数据的不一致性。

统一对象模型中的操作记录列表 ActionList 是用来记录会变动 HSG 树的操作, 包括节点的新增、节点属性的修改、节点的删除等。如果 HSG 树发生变化, 很可能导致场景发生变化, 需要根据变化情况对场景进行重新绘制。

统一对象模型还提供了统一访问接口 UAI (universal access interface), 以下是其部分方法:

- 1) 绘制初始化方法 InitDraw。该函数完成了并行绘制的初始化工作。
- 2) 场景绘制方法 DrawScene。该函数完成了对整个仿真场景的绘制。
- 3) 碰撞检测方法 DetectCollision。该函数完成仿真中实体对象的碰撞检测。

4) 数据更新方法 UpdateData。该函数完成整个 HSG 树的数据更新。

通过这些数据结构、方法和机制, 统一对象模型实现了仿真平台和并行绘制平台的高效集成, 大大减轻了两者的集成的工作量。

## 2.3 基于统一对象模型的数据交换

在仿真应用中, 仿真平台和并行绘制平台的数据交换的基础数据是 HSG 树, 前者来构建和维护 HSG 树, 后者使用 HSG 树。

### 2.3.1 UOM 与仿真平台的数据交换

在 HLA 标准中, 邦员是指归属于联邦的一个成员。参与在联邦中的所有应用程序都称为邦员, 比如邦员管理者、数据收集器和观察者等。而联邦是指发生交互的邦员、联邦对象模型和 RTI 等为了达到特定目的而组合在一起的整体集合<sup>[1]</sup>。

在 HLA 仿真应用的联邦运行过程中, 与统一对象模型进行数据交换涉及以下几个方面:

#### 1) 静态场景对象绘制管理

在联邦管理中, 当邦员加入联邦(join federation)和退出联邦(resign federation), 需要加载和销毁静态场景对象。静态场景对象的绘制贯穿于整个联邦的存在运行周期。

#### 2) 静态实体对象绘制管理

在联邦管理中, 和静态场景对象一样, 当邦员加入联邦和退出联邦时, 需要对静态实体对象进行加载和销毁。在对象管理中, 当邦员接收到交互事件(receive interaction), 静态实体对象很可能会发生变化, 需要对其进行调整 and 绘制。

#### 3) 动态实体对象绘制管理

在对象管理和数据分布管理中, 当邦员需要注册对象(register object instance)和发现对象(discover object instance)时, 需要对动态实体对象进行加载, 并将对象 ID 和实体对象进行关联, 以便以后根据对象 ID 进行搜索; 当对象属性发生变化或产生交互时, 需要发送对象属性更新(update object attributes)或发送交互(send interaction)给其他相关邦员; 当邦员反射对象属性更新(reflect object attributes)时或接收交互(receive interaction)时, 对象属性有可能会发生改变, 需要将其进行重新绘制; 当邦员需要删除对象实例(delete object instance)和移除对象实例(remove object instance)时, 需要将实体对象进行删除, 并重新绘制场景。

在传统仿真应用中, 当实体对象的属性发生变化时, 先由仿真平台修改该实体对象的属性, 然后再

通知绘制平台修改其对应场景对象的属性,再进行绘制。由于采用了统一对象模型,仿真应用只需要根据对象 ID 在 HSG 树中查到该节点,修改该节点的属性,然后进行重新绘制即可。统一对象模型把仿真应用中仿真实体对象和绘制对象用 HSG 树组织起来,进行惟一的存储,并提供统一的访问和维护接口,实现了这些对象的高效组织和统一管理,解决了仿真对象管理是分离的问题,并提高了其存储和维护效率。

### 2.3.2 UOM 与并行绘制平台的数据交换

当 HSG 树发生改变时,统一对象模型需要对 HSG 树所做的操作进行记录,以形成统一对象模型的操作记录列表。这些操作类型分以下 3 类:

- 1) 需要进行绘制的 HSG 树节点的增加/删除,无场景模型的虚拟实体节点除外;
- 2) 会引起场景发生变化的 HSG 树节点的某些状态属性的改变,比如位置、方向、状态等;
- 3) 本仿真客户端的相应节点的位置、视角等属性的变化,因为这将直接改变并行绘制的状态。

当仿真客户端需要绘制时,统一对象模型将当前 ActionList 发送给并行绘制服务器进行绘制。

在统一对象模型与并行绘制服务器的场景数据更新时,采用懒更新(lazy update)机制,即将对 HSG 树的操作记录到 ActionList,当仿真应用认为需要重新绘制时将操作记录打包,通过组播(multicast)方式发给并行绘制服务器,然后再进行绘制,这样提高了大规模复杂场景和大量仿真实体对象的场景数据更新效率和绘制效率。

包含这些机制的统一对象模型在 HLA 仿真平台和并行绘制平台之间建立了数据交换桥梁,实现了两者的高效集成,有效地支持了大规模复杂场景和大量仿真实体对象的视景仿真的并行实时绘制,有助于提高仿真的实时性。

## 3 统一对象模型与仿真应用的集成

### 3.1 统一对象模型的支撑平台

本文实现的统一对象模型的支撑平台分别是 HIVE 仿真平台和 PSG 并行绘制平台,当然,统一对象模型同样适合于其他 HLA 仿真平台和并行绘制平台,根据这些平台提供的开发接口稍作调整,即可实现仿真对象的统一存储和维护,并将两个平台高效集成,实现对并行绘制的支持。

### 3.1.1 HIVE 仿真平台

HIVE 仿真平台<sup>[11]</sup>是一个基于 HLA 的分布式交互仿真系统平台,该平台具有以下特点:

- 1) 开放性,即允许第三方按照 HIVE 所公布的接口标准开发新的计算节点和应用节点;
- 2) 支持大规模的各类仿真节点,可进行大规模计算,并支持仿真节点的动态加入和动态退出;
- 3) 支持大规模的动态对象,支持对象的动态生成、动态加入、动态消亡、动态退出。

图 2 是系统网络拓扑结构图,其中 DM 为目录服务器,提供 GM/Client 资源身份验证,GM/Client 资源监控和负载均衡等全局服务;GA 为组代理,提供 GM 管理,根据 DM 的要求来创建/管理/销毁 GM;GM 为组服务器,给 Client 提供 HIVE 的各种服务;Client 为仿真客户端,调用 HIVE 库来实现 HLA 仿真应用。

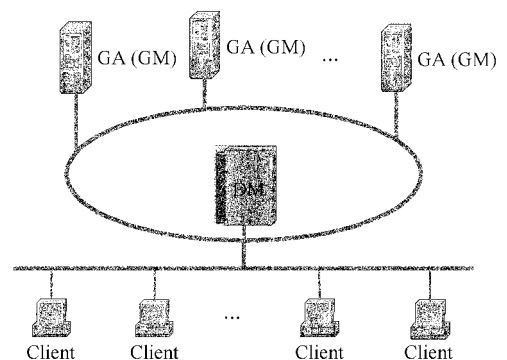


Fig. 2 Network topology of HIVE.

图 2 HIVE 网络拓扑结构图

### 3.1.2 PSG 并行绘制平台

PSG 并行绘制平台<sup>[24]</sup>是一个基于 PC 集群的并行绘制平台,有以下特点:

- 1) 采用支持自适应的动态绘制组 DRT(dynamic rendering team),实现负载均衡。
- 2) 支持遮挡剔除。利用硬件提供的遮挡测试方法实现了图像空间遮挡剔除算法。
- 3) 支持保留模式并行绘制和基于优先级的 out-of-core 数据管理。
- 4) 支持高度场、模型、动画和贴图等多种几何数据组织形式的场景对象的混合同步并行绘制。

PSG 并行绘制平台拓扑结构如图 3 所示。其中 Client 为绘制客户端,DRT 为动态绘制组,M 为主节点(master),S 为从节点(slave),FSP 为空闲从节点池(free slave pool),RA 为节点资源分配器(resource allocator)。

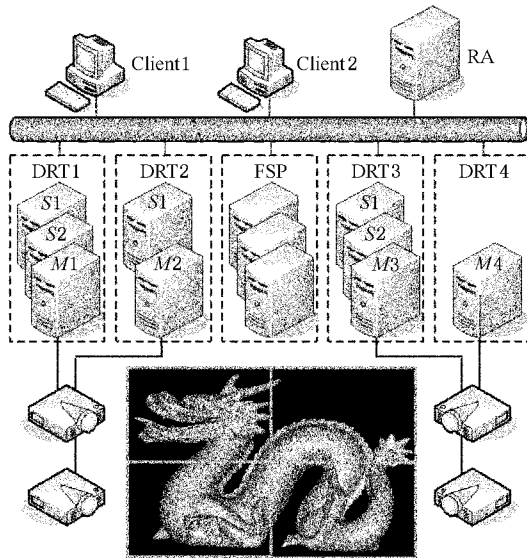


Fig. 3 Structure of PSG parallel rendering platform.

图3 PSG并行绘制平台拓扑结构图

### 3.2 集成统一对象模型的仿真应用框架

在我们实现的 HIVE 仿真应用系统中包含 3 部分。首先是 HIVE 仿真客户端,它包含应用逻辑层,用来控制仿真逻辑,运行在 HIVE 服务接口、统一对象模型和 PSG 并行绘制客户端接口之上。而统一对象模型处于 HIVE 仿真平台和 PSG 并行绘制平台之间,是实现两个平台集成的核心。第 2 部分是 HIVE 后台服务,为应用提供 HIVE 仿真服务。第 3 部分是 PSG 并行绘制服务,实现大规模复杂场景和大量仿真实体对象的并行绘制以及高分辨率多屏拼接显示。图 4 是 HIVE 应用框架结构图:

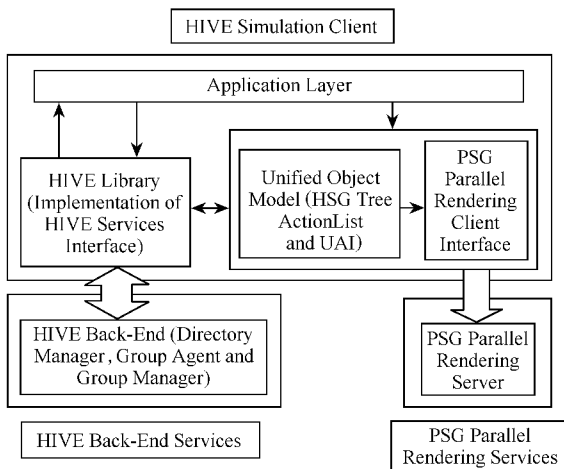


Fig. 4 Architecture of HIVE simulation application.

图4 HIVE 仿真应用框架结构图

## 4 实验与结果分析

在仿真应用实验 1 中,共 6 个仿真客户端加入到仿真中,其中 1 个仿真客户端是观察者,采用 Puget Sound 地形作为静态场景对象,电厂作为静态实体对象,采用 PSG 并行绘制平台和大屏幕投影系统作为绘制和显示系统;另外 5 个仿真客户端仿真了 100 架飞机和 100 辆坦克,其仿真环境场景采用简化模型,并采用单机绘制。表 1 为实验系统中并行绘制用到的模型情况。本实验中,PSG 并行绘制平台是构架在 32 台 PC Server 的集群系统上,每台 PC Server 节点配置两颗 Intel PIV 2.4GHz 处理器、1GB 主存、nVidia GeForce5950 显卡,操作系统使用 Windows 2000 professional,节点间采用 3Gbps 高速网连接。在这 32 个节点中,有 15 个主节点、16 个从节点、1 个节点资源分配器,整个仿真场景分布在 15 个动态绘制组上进行绘制,并把绘制结果通过与主节点相连的 15 台投影仪按照 5×3(行×列)的阵列投影到大屏幕上,显示分辨率为 5120×2304,通过软件几何校正实现多屏拼接显示。图 5 为实验 1 的并行绘制结果。

Table 1 Models in Parallel Rendering in the Demo

表 1 在实验 1 中并行绘制用到的模型情况

Model Name	File Size (MB)	Triangle Number	Number	Object Type
Puget Sound Terrain	1900	$172 \times 10^6$	1	Static Scene Object
Power Plant	479	$13 \times 10^6$	1	Static Entity Object
Airplane	3	$11 \times 10^3$	100	Dynamic Entity Object
Tank	4	$18 \times 10^3$	100	Dynamic Entity Object



Fig. 5 Result of parallel rendering in the demo.

图5 实验仿真应用的并行绘制结果

在一般情况下,仿真应用对动态对象状态的更新弛豫时间要求不大于 100ms。在实验 1 中,统一

对象模型将 PSG 并行绘制平台集成在 HIVE 仿真应用中,绘制帧速率达到 15fps 以上,满足了仿真实时性的需求。而在未采用统一对象模型,采用传统的仿真实体管理、场景管理和单机绘制方法的实验应用中,其绘制帧速率小于 0.1fps,严重限制了仿真实时性。实验情况见表 2:

Table 2 Comparison of Frame Rate of Demo with UMO and Without UMO in Two Simulation Demos

表 2 采用 UMO 和采用传统方法的两个仿真

实验的帧速率结果比较

fps

NO.	Frame Rate of Demo with UMO	Frame Rate of Demo Without UMO
1	Above 15	Below 0.1
2	Above 30	Below 10

在仿真应用实验 2 中,采用浙江大学新校区模型作为场景(三角面片数约为 200K),同样采用统一对象模型的实验应用的绘制帧速率大于 30fps,满足了仿真实时性的需求,而采用传统方法的实验应用的绘制帧速率小于 10fps,也限制了仿真实时性。从两个实验结果的比较可以看出,实验 1 中 PSG 并行绘制与单机绘制的帧速率加速比为  $15/0.1 = 150$ ,而实验 2 加速比为  $30/10 = 3$ ,因此场景规模越大帧速率加速比越高,因为在并行绘制中数据同步和通信等也占了一定的开销。

该结果表明,统一对象模型将 HIVE 仿真平台和 PSG 并行绘制平台的高效集成,有效地支持了大规模复杂场景的实时绘制,满足了视景仿真实时性的需求,并实现了高分辨率多屏拼接显示。另外,HIVE 仿真应用的快速开发,表明统一对象模型提供的 HSG 树、ActionList 和 UAI 等是方便、高效的,大大减轻两个平台集成的开发工作量。

## 5 结 论

本文从分析仿真应用对象的组织与管理出发,结合仿真应用提出了统一对象模型,实现了仿真对象的高效组织与统一管理,并将 HIVE 仿真平台和 PSG 并行绘制平台高效集成。本文的主要贡献有:①分析了现有的绘制平台,指出在现有仿真应用中存在大规模复杂场景的视景仿真实时性较差、仿真实体对象管理与绘制对象管理是分离的等问题。②在此基础上,提出了统一对象模型,其包含异质实体对象树、操作记录列表和统一访问接口 3 部分,实现了仿真实体对象和绘制对象的高效组织和统一管

理,在 HLA 仿真平台和并行绘制平台之间建立了高效的数据交换桥梁,减轻了两者的集成开发工作量,有效地支持了大规模复杂场景和大量仿真实体对象的并行实时绘制,有助于提高仿真的实时性。该统一对象模型也适用于其他的 HLA 仿真平台和并行绘制平台,具有通用性。下一步工作:对统一对象模型进行整理和优化,并加入对更多种类的仿真实体对象和绘制对象的支持。

## 参 考 文 献

- [1] U. S. Department of Defense (DMSO). High level architecture rules, high level architecture federate interface specification, high level architecture object model template specification version 1.3 [OL]. <http://www.dmsomil>, 1998-04
- [2] Simulation Interoperability Standards Committee (SISC) of the IEEE Computer Society. IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA)—IEEE Std 1516-2000, 1516.1-2000, 1516.2-2000 [S]. The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2000
- [3] U. S. Department of Defense. High level architecture run-time infrastructure programmer's guide version 1.0 [OL]. <http://www.dmsomil>, 1997
- [4] Science Applications Int'l Corporation. RTI-NG 1.3v6 release notes [OL]. <http://hla.dmsomil/sdc>, 2002
- [5] Pitch Technologies. Runtime infrastructure for HLA 1.3 simulations [OL]. <http://www.pitch.se/prti>, 2002-03
- [6] MAK Technologies. MAK high-performance RTI [OL]. <http://www.mak.com/products/rti.php>, 2005
- [7] Hao JG, Huang J. Implementation architecture of KD-RTI [J]. System Modeling & Simulation, 2002, 1(1): 48-52
- [8] Liu Buquan, Wang Huaimin, Yao Yiping. Key techniques of a hierarchical simulation runtime infrastructure-StarLink [J]. Journal of Software, 2004, 15(1): 9-16 (in Chinese) (刘步权, 王怀民, 姚益平. 层次式仿真运行支撑环境 StarLink 中的关键技术 [J]. 软件学报, 2004, 15(1): 9-16)
- [9] Lu Liangquan, Zhou Zhong, Wu Wei, et al. DVE-RTI: Distributed interactive simulation run-time infrastructure [J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(5): 828-834 (in Chinese) (吕良权, 周忠, 吴威, 等. DVE-RTI: 一个基于组播技术的分布式交互仿真运行基础机构 [J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(5): 828-834)
- [10] Qing Duzheng, Li Bohu. An overview of a runtime infrastructure named SSS-RTI [J]. Journal of System Simulation, 2000, 12(5): 490-493 (in Chinese) (卿杜政, 李伯虎. HLA 运行支撑框架 (SSS-RTI) 的研究与开发 [J]. 系统仿真学报, 2000, 12(5): 490-493)
- [11] Z H Wang, X H Jiang, J Y Shi. HIVE: A highly scalable framework for DVE [C]. The Virtual Reality Annual Int'l Symposium, Chicago, USA, 2004

- [12] Mercury Computer System, Inc. Open Inventor 6 User's Guide [OL]. [http://www.tgs.com/support/oiv\\_doc/UsersGuide/UserGuide.pdf](http://www.tgs.com/support/oiv_doc/UsersGuide/UserGuide.pdf), 2006-03
- [13] Silicon Graphics, Inc. OpenGL Performer White Paper [OL]. <http://www.sgi.com/pdfs/3637.pdf>, 2005
- [14] MultiGen-Paradigm Inc. Vega Manual Pages [OL]. [http://www.multigen-paradigm.com/support/dc\\_files/VegaManHtmlDOcs.zip](http://www.multigen-paradigm.com/support/dc_files/VegaManHtmlDOcs.zip), 2002
- [15] Chen Yi. Research on key technologies in distributed virtual environment and their applications in Sophisticated System Simulation: [Ph D dissertation I D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2002 (in Chinese)  
(陈谊. 分布式虚拟环境关键技术及其在复杂系统仿真中的应用研究: [博士论文 I D]. 北京: 北京理工大学, 2002)
- [16] Lv Weiwei, Wang Chuanpeng, Yu Jiangying. 3D graphics modularization based on action semantic primitive method in HLA simulation [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(7): 1634-1636 (in Chinese)  
(吕伟伟, 王传鹏, 余江英. HLA 仿真中基于动作语义原语的三维模块化方法 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(7): 1634-1636)
- [17] Li Yuxiang, Gong Guanghong. Design and realization on 3D visualization simulation of attack and defense based on HLA [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(7): 1634-1636 (in Chinese)  
(李翔宇, 龚光红. 基于 HLA 攻防对抗仿真中三维视景设计与实现 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(12): 2961-2964)
- [18] Jiang Junhong, Pei Lianjun, Li Yifan. Distributed interactive scene simulation for a missile testing system [J]. Computer Simulation, 2002, 19(2): 20-24 (in Chinese)  
(姜军红, 裴练军, 李一凡. 某导弹测试系统的 DIS 视景仿真 [J]. 计算机仿真, 2002, 19(2): 20-24)
- [19] Greg Humphreys, Pat Hanrahan. A distributed graphics system for large tiled displays [C]. IEEE Visualization Conf, San Francisco, CA, USA, 1999
- [20] G Humphreys, M Houston, R Ng, et al. Chromium: A stream-processing framework for interactive rendering on clusters [C]. ACM SIGGRAPH 2002, San Antonio, Texas, 2002
- [21] Jian Yang, Jiaoying Shi, Zhefan Jin, et al. Design and implementation of a large-scale hybrid distributed graphics system [C]. Eurographics Workshop on Parallel Graphics and Visualization, Saarbruecken, Germany, 2002
- [22] Jing Zhefan. Research on retained-mode parallel graphics rendering: [Ph. D. dissertation I D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003 (in Chinese)  
(金哲凡. 保留模式图形并行绘制研究: [博士论文 I D]. 杭州: 浙江大学, 2003)
- [23] B Schaeffer, C Goudeseune. Syzygy: Native PC Cluster VR [C]. The IEEE Virtual Reality Annual Int'l Symp, Los Angeles, CA, USA, 2003
- [24] Haoyu Peng, Hua Xiong, Jiaoying Shi. Parallel-SG: Research of parallel graphics rendering system on PC-Cluster [C]. The 2006 ACM Int'l Conf of Virtual Reality Continuum and Its Applications, Hong Kong, 2006



**Wang Zonghui**, born in 1979. Ph. D. His main research interests include distributed simulation and virtual reality.

王总辉, 1979 年生, 博士, 主要研究方向为分布式仿真和虚拟现实。



**Xiong Hua**, born in 1978. Ph. D. candidate at Zhejiang University. His main research interests include computer graphics and virtual reality.

熊华, 1978 年生, 博士研究生, 主要研究方向为计算机图形学和虚拟现实。



**Jiang Xiaohong**, born in 1966. Associate professor of computer science and engineering at Zhejiang University, and member of China Computer Federation. Her main research interests include virtual reality and image processing.

姜晓红, 1966 年生, 副教授, 中国计算机学会会员, 主要研究方向为虚拟现实和图像处理。



**Shi Jiaoying**, born in 1937. Professor and Ph. D. supervisor of computer science and engineering at Zhejiang University. His main research interests include computer graphics, virtual reality and computer architecture.

石教英, 1937 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实和计算机体系结构。

## Research Background

Future simulation systems which involve massive complex scenes and large quantity of entities put high demand on management capability and rendering ability. In this paper, we present a unified object model supporting HLA-based simulation and parallel rendering, which consists of heterogenous scene graph tree, action list and universal access interface, which establishes an efficient data exchange bridge between HLA simulation and parallel rendering. Our work is supported by the 973 Program No. 2002CB312105 and the Key Project of National Natural Science Foundation of China No. 60533080.