973 项目结题总结报告

项目名称：虚拟现实的基础理论、算法及实现
课题编号：2002CB312106
课题名称：分布式虚拟环境
子课题名称：分布并行图形绘制技术及系统
子课题负责人：石教英

一、子课题任务与研究内容

课题任务书中明确本子课题的任务是："为了保证实时图形绘制质量并保证系统的时间真实感，研究高性能并行、分布图形绘制流水线，使得系统在图形质量和绘制实时性之间达到较好的平衡，特别将研究软硬件相结合的、几何和纹理动态自适应转换的分布图形绘制技术、场景信息的实时压缩和传输技术，解决大规模虚拟场景的高保真实时绘制问题"。研究内容包括"研究规模可扩展的高性能分布并行图形绘制体系结构，及其并行绘制算法"，"研究分布并行图形绘制系统的负载平衡算法，高效数据流压缩和传输技术、同步策略以及高分辨率分屏显示技术，设计并实现一个自适应的任务划分方法"，"对分布并行图形绘制的理论和算法研究，进一步改进分布并行绘制系统的体系结构和算法性能"，"研究开发新型分布式并行图形绘制原型系统"。概括的说本子课题的任务是研究适用于分布式虚拟环境的实时高质量的图形绘制技术与系统。

分布式虚拟环境图形绘制具有以下特点：（1）分布式虚拟环境所包含的虚拟场景一般规模较大，例如覆盖超过 1000 平方公里的复杂地理环境，实时绘制大规模虚拟场景需要很大的绘制能力；（2）分布式虚拟环境所包含对象的数据类型比较复杂，包括静态对象和动态对象，静态对象又包含地形、海洋、建筑等不同类型的模型，动态对象往往具有比较复杂的属性；（3）分布式虚拟环境中一般存在仿真系统数据结构和图形绘制系统数据结构两套数据集合，数据管理复杂，并且其中部分数据结构冗余；（4）分布式虚拟环境多采用高分辨率投影墙作为观察终端，这种类型的显示设备具有绘制数据量大、显示分辨率高、任务划分方式相对固定等特点；（5）分布式虚拟环境具有广泛的分布特征，例如数据来源、参与用户、仿真计算节点、终端显示节点都具有分布特征。

二、子课题研究成果介绍

针对课题任务书中的内容和分布式虚拟环境图形绘制的特点，我们完成了一个"分布并行图形绘制系统"，我们的研究成果主要包括：

（1）完成新型的基于动态绘制组的混合式自适应并行绘制体系结构（见图 1 和图 2），以及基于节点迁移的负载平衡策略。该项技术可扩性好，具有特别适用于采用多屏拼接显示 VR 应用的特点。动态绘制组是本体系结构的基本绘制功能单元，由数目可变的 PC 节点组成，包括一个主节点和数量可变的从节点。各动态绘制组之间按 sort-first 并行绘制流程工作。动态绘制组内部主从节点间的并行绘制工作流程由主节点确定，可以在 sort-first 和 sort-last 两种工作流程之间自动切换，以适应不同图元分布状态，达到最佳并行绘制性能。基于节点迁移的负载平衡策略对图像空间的划分固定不变，通过调整对应图像区域的动态绘制组的计

算能力，对从节点在各动态绘制组之间进行迁移，以适应负载变化。负载平衡算法开销小、速度快，负载平衡性能测试结果见图 3。

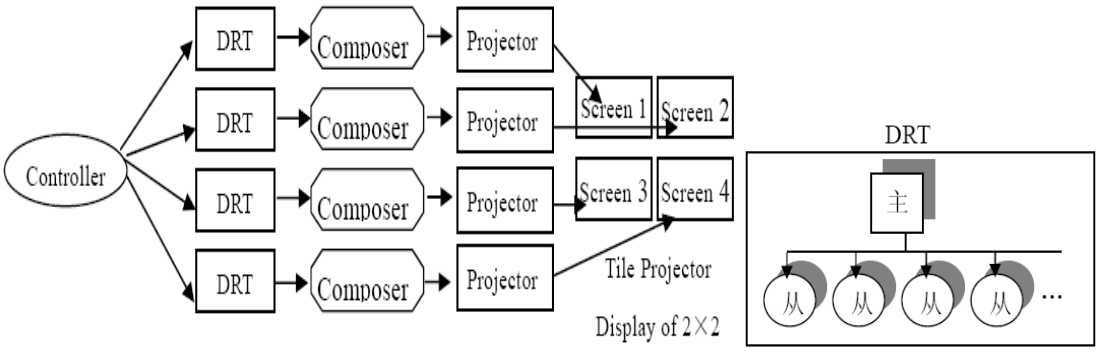


图 1 基于动态绘制组的并行绘制体系结构

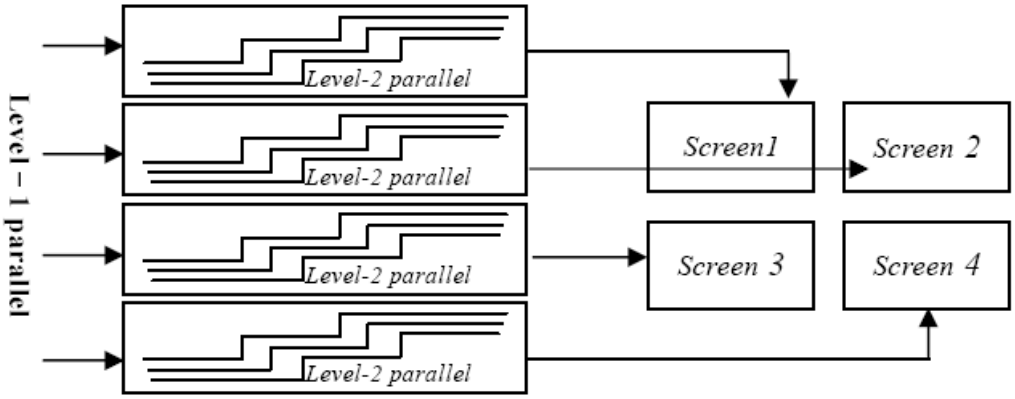


图2 复式嵌套并行绘制流水线

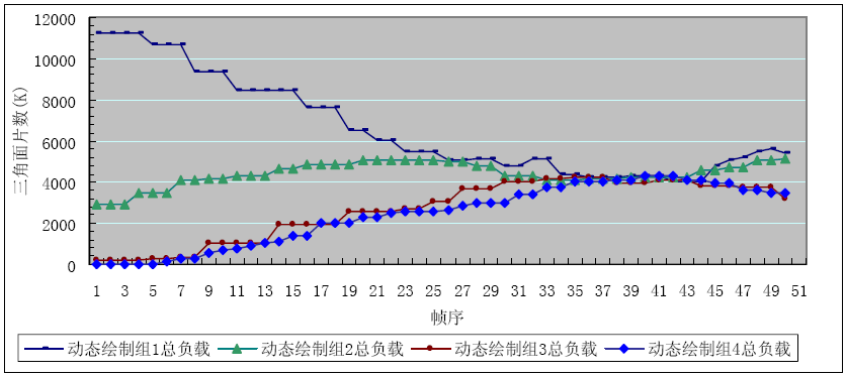


图3 负载平衡性能测试结果

（2）完成多种图形绘制加速技术的研究与集成，支持大规模虚拟场景的实时绘制，保证并行图形绘制系统的交互性能。我们研究与集成的多种加速绘制技术包括基于预测的可见性剔除（见图4）、并行简化与多分辨率构建（见图5）、存储访问优化技术（见图6）、面向并行绘制的网格压缩和条带化技术（见图7）等。基于预测的可见性剔除技术充分挖掘可见性的时空连贯性，采用可见性预测器来选择执行硬件遮挡查询，具有预处理时间短、遮挡剔除效率高、遮挡剔除速度快等优点。并行简化与多分辨率构建技术采用基于基准测试的资源管理和动态任务划分机制，能有效降低网格简化和多分辨率表示的预处理时间。存储访问优化

技术结合外存访问优化和缓存访问优化两种技术，支持大规模场景数据的按需调度，能有效减少绘制访问缓存失效率。提出支持网格分片随机存取的三角形网格压缩框架，可见性连贯的三角形单条带化压缩技术，以及混合模式缓存优化的三角形条带化压缩技术，可以提高并行绘制环境下场景数据的传输和调度效率。

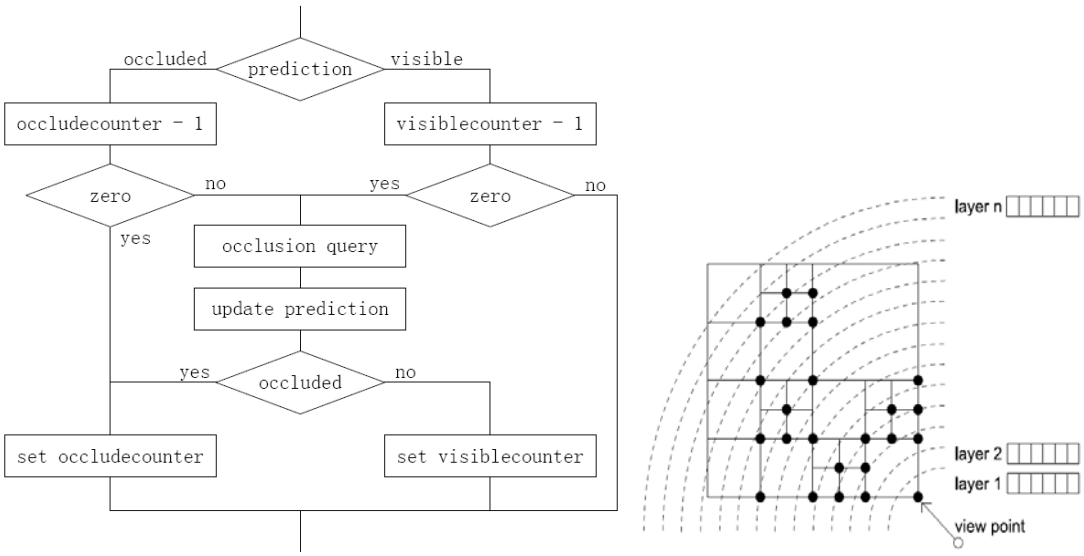


图4 可见性预测器原理和基于分层缓冲区的场景排序

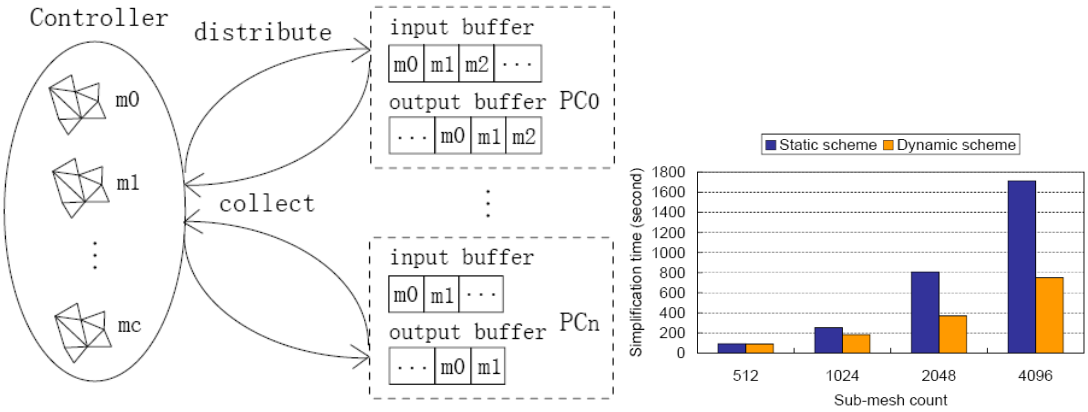


图 5 并行简化的动态任务管理机制及测试性能结果

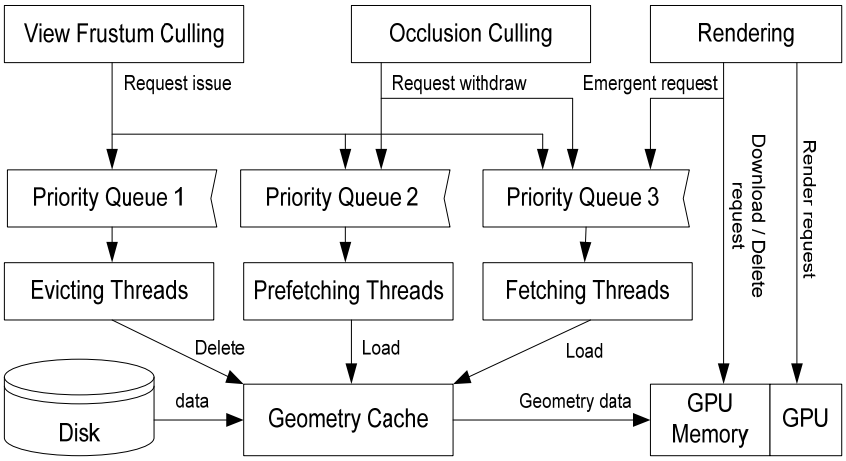
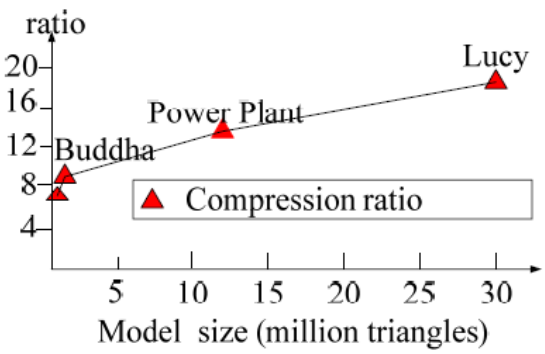


图 6 基于优先权的外存数据管理和调度策略



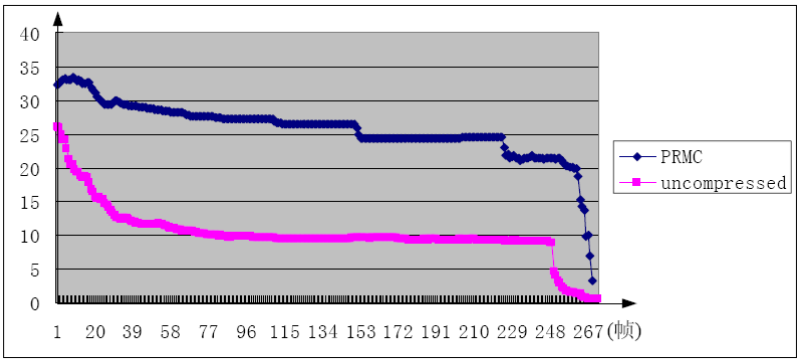


图7 基于分片保拓扑曲面片压缩的压缩率测试结果和采用压缩数据并行绘制结果

（3）完成支持异构场景数据的场景组织框架（见图8）和支持HLA仿真平台和并行图形绘制平台集成的统一对象模型（见图9），可以支持不同类型的上层应用，能有效支持与分布式仿真系统的集成。异构场景数据组织框架核心为异构场景图，该场景图对普通场景图定义方式进行扩充，以面向对象方式提出了一整套数据管理的解决方案。异构数据场景图基本节点不定义与应用相关的场景数据结构，只定义一套并行绘制接口规范，不同场景数据结构只需继承抽象节点基类，并实现相关接口，就可以被并行绘制系统统一调度，达到应用程序透明的并行绘制功能，扩大了并行图形绘制系统的适用范围。

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三部分，实现了仿真实体对象和场景对象的高效组织和统一管理。统一对象模型在仿真平台和并行绘制平台之间建立一个高效的数据交换桥梁，减轻了两者集成的开发工作量，实现了仿真视景绘制方式多样化，有效地支持大规模复杂场景和大量仿真对象的实时绘制，有助于提高视景仿真的实时性，并具有较好的通用性。

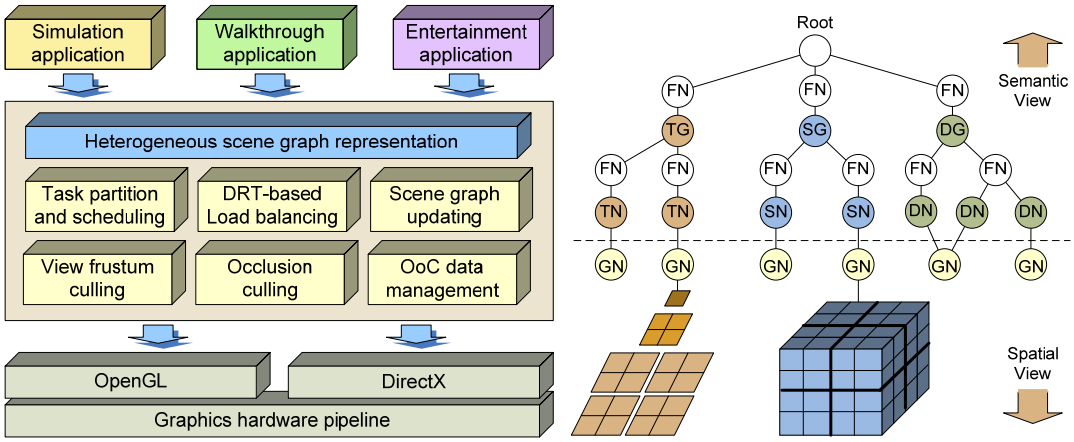
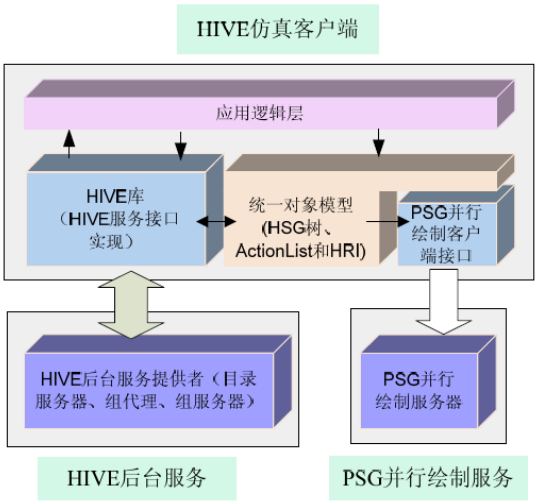


图8 支持异构场景数据的场景组织框架



模型名称	文件大小	三角面片数	数量	类型
地形	1.9GB	172M	1	静态场景对象
电厂	479MB	13M	1	静态实体对象
飞机	3MB	11K	100	动态实体对象
坦克	4MB	18K	100	动态实体对象

实验	采用 UMO 的仿真实验的帧速率	采用传统方法的仿真实验帧速率
1	大于 15fps	小于 0.1fps
2	大于 30fps	小于 10fps

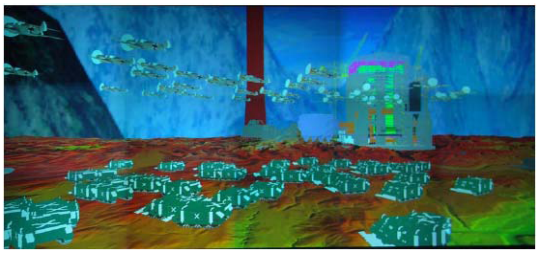


图 9 支持 HLA 仿真平台和并行图形绘制平台的统一对象模型

（4）首次完成支持 Direct3D API 和 GPU Shader 透明并行执行的并行绘制系统 D3DPR，可支持基于 Direct3D 和采用 GPU Shader 的应用程序透明化并行，具有较强的软件通用性。D3DPR 系统以绘制资源方式完整描述了 Direct3D9 应用程序的场景数据和绘制状态信息，包括顶点流、索引流、纹理流、顶点着色器、像素着色器和命令流；D3DPR 系统逻辑结构将图形集群划分为资源分配和资源绘制两类节点，可有效的将 Direct3D9 应用程序转换为绘制资源和描述信息，并进行绘制任务分布、绘制资源重构和绘制接口方法执行等。

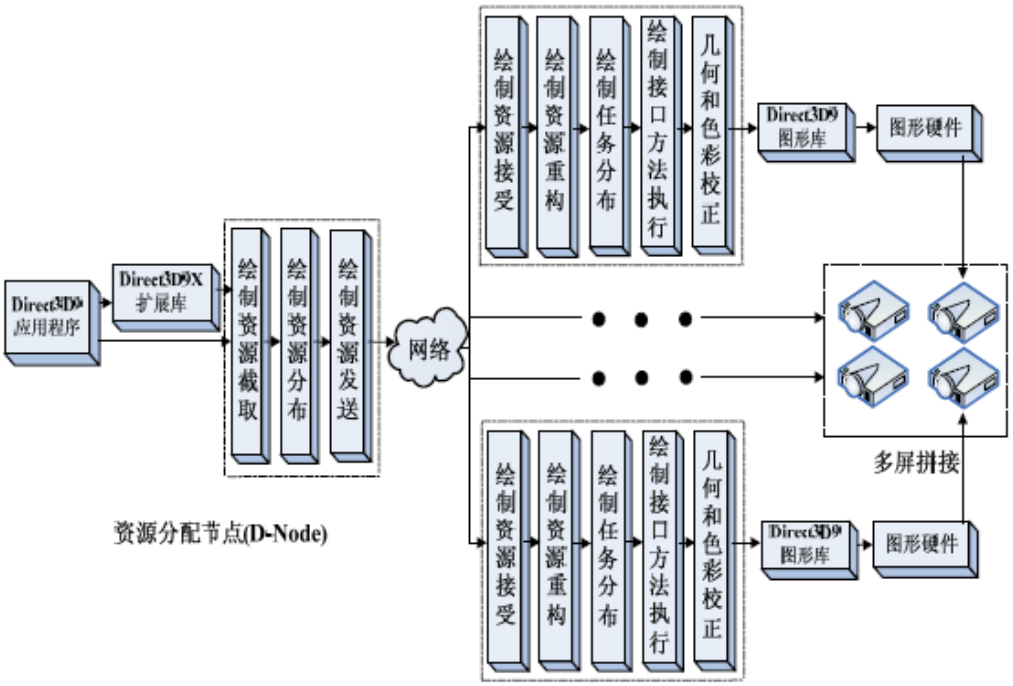


图10 D3DPR系统逻辑结构

（5）完成高分辨率多屏拼接显示技术。通过基于数码相机的多矩阵几何矫正算法完美地解决了几何拼接的问题，通过边缘融合技术一定程度上解决了色彩突变的问题。该系统效果良好，实用性较强，适用于各种需要高分辨率大尺寸显示的应用场所。

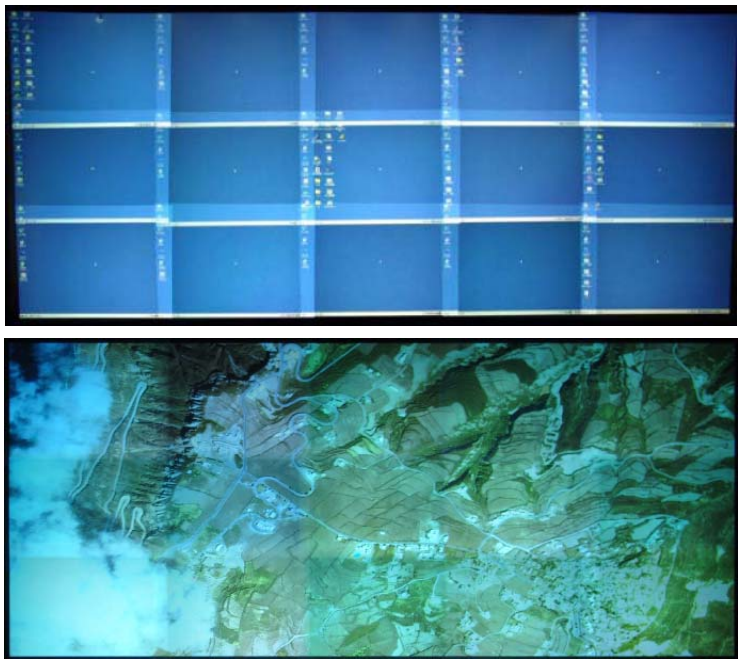


图 11 采用几何矫正和边缘融合技术前后拼接结果对比

（6）完成基于 PC 集群的并行绘制与多屏拼接显示集成系统，以及基于 PC 集群的并行绘制系统、基于 HLA 的分布仿真和多屏拼接显示集成系统。并行绘制与多屏拼接显示集成系统采用我们研制的基于动态绘制组的并行绘制体系结构和基于几何矫正和边缘融合的拼接显示技术。此外，并行绘制系统、分布仿真系统和多屏拼接显示集成系统还采用了统一对象模型技术，可有效的减少数据冗余、实现高效的数据通信。

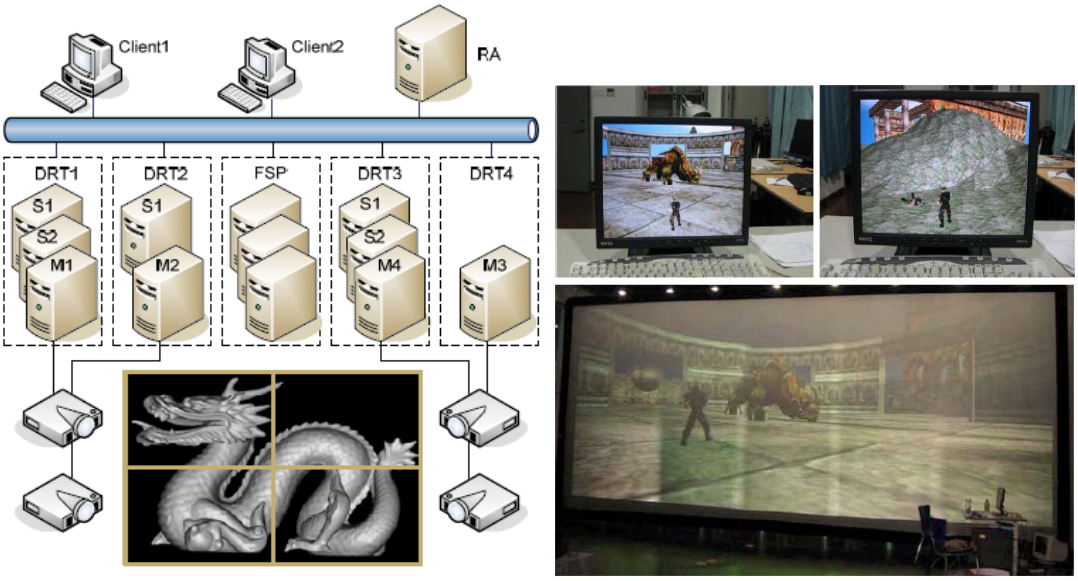


图 12 并行绘制系统、分布仿真系统和多屏拼接显示集成系统

（7）首次实现了基于网格的分布仿真、并行绘制和可视化集成系统 GSPR，提出了支持多种应用的网格体系结构、动态资源分配与管理方法、以及灵活的数据管理框架。GSPR 系统采用三层体系结构模型，分别为运行时环境层 GRE，网格应用框架层 GAF 和网格门户层 GPortal。GRE 提供网格系统必须具备的信息管理、资源管理、任务管理和数据管理功能，为网格应用的执行提供资源的匹配和选取、任务的分布、监测和迁移等功能支持，屏蔽了网

格资源的异构性、自治性和动态性特征。GAF 由具体的应用模块组成，包括分布式仿真、并行图形绘制和体可视化三个应用模块，并具有良好的可扩性。GPortal 为用户定制、提交网格任务以及与正在执行的任务进行交互操作提供统一的用户界面。GPortal 功能上的独立性和完全基于 Java 实现的特点使得 GPortal 可以被部署在网络上的任何位置，增加了 GSPR 系统的实用性。

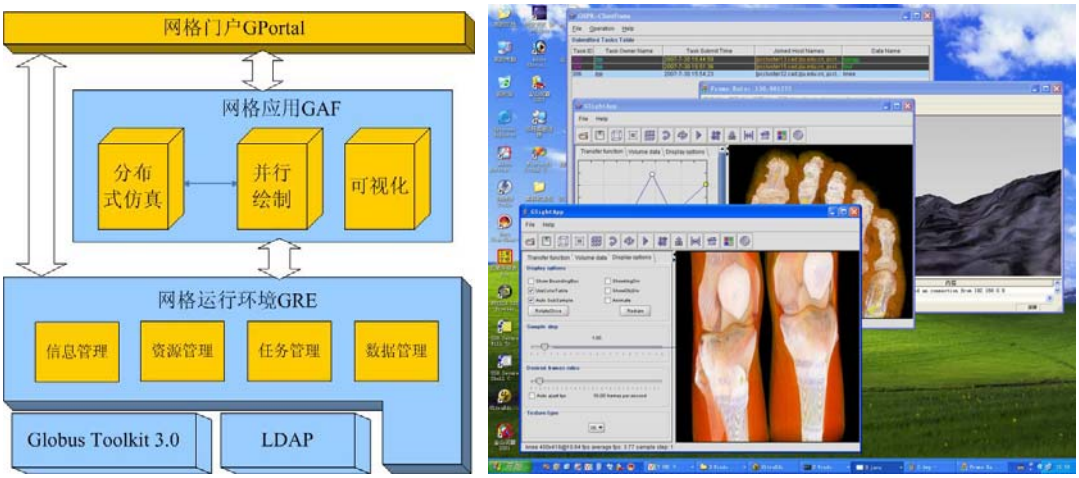


图 13 GSPR 体系结构和客户端多应用多任务执行界面

三、子课题研究成果特点

我们的研究成果具有以下特点：（1）具有较强的硬件通用性，支持不同类型的分布并行环境，既支持 PC 集群和图形集群，也支持网格分布并行环境。（2）具有较强的软件通用性，支持不同类型的图形绘制 API，包括 OpenGL 和 Direct3D；异构场景图组织方式可支持不同类型的上层应用，屏蔽分布并行环境结构，能有效减轻在分布并行环境下的虚拟现实应用的开发工作量；D3DPR 支持基于 Direct3D 的虚拟现实应用程序在分布并行环境下的透明化执行。（3）基于动态绘制组的并行绘制体系结构与基于节点迁移的负载平衡策略具有较高的负载平衡效率和较好的扩展性，特别适用于任务划分相对固定的虚拟现实应用。（4）支持分布式仿真环境与并行绘制系统的高效集成，统一对象模型提供分布仿真环境与并行绘制环境的高效的数据通讯机制，可用于构建大规模分布式虚拟环境。（5）并行绘制系统集成多种绘制加速技术，支持大规模场景的分布数据存储、数据流压缩传输和实时绘制。