

石教英 等著

分布并行图形绘制技术及其应用



 科学出版社
www.sciencep.com

分布并行图形绘制技术 及其应用

石教英 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了分布并行图形绘制的基础知识、体系结构和多种绘制加速算法以及典型的应用系统,分为基础篇、技术篇和应用篇,共15章的内容。

本书可作为并行图形绘制、分布式虚拟现实、高性能图形绘制等方向的研究生教材以及技术参考书,同时可供研究并行绘制技术和分布式虚拟现实技术的师生和从事高性能图形绘制技术的研发人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

分布并行图形绘制技术及其应用/石教英等著. —北京:科学出版社,2010
ISBN 978-7-03-027240-9

I. ①分… II. ①石… III. ①分布式处理系统-并行处理-图形处理
IV. ①TB391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 067834 号

责任编辑:张海娜 / 责任校对:钟 洋
责任印制:赵 博 / 封面设计:嘉华永盛

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年4月第 一 版 开本:B5(720×1000)
2010年4月第一次印刷 印张:27 3/4 彩插:2
印数:1—3 000 字数:535 000

定价:70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

石教英

浙江大学计算机辅助设计与图形学(CAD&CG)国家重点实验室

jyshi@cad.zju.edu.cn

近年来,随着计算机图形软硬件技术的日益进步和应用需求的不断增长,计算机图形学的研究和应用呈现出以下几个特点:

(1) 模型复杂度急剧增大。随着三维扫描、计算机辅助设计和科学仿真等技术的提高,几何建模变得更加方便,模型的几何复杂度也越来越大,包含上千万甚至数十亿几何图元的模型变得十分普遍。这些模型数据精度高,能保留原始模型的细节特征,对机械制造、生命科学、军事仿真、建筑规划、文物保护、影视游戏等诸多领域具有重要价值。

(2) 场景对象更加复杂。随着几何、材质、物理建模技术以及运动捕获技术的提高,虚拟场景中对象类型越来越多,对象属性也变得更加复杂。对象状态可能为静态,也可能由用户控制或程序驱动而动态变化;对象表示可能采用几何表达方式,也可能采用基于图像的表达方式,甚至两者相结合的表达方式;对象属性除了包含几何和材质属性外,也可能包含物理属性,以及交互和智能等高级属性。

(3) 绘制真实感要求更高。随着材质获取、建模和编辑技术的提高,以及对绘制算法的不断研究,许多应用不但要求表现模型的复杂外观效果,例如头发、皮肤、蚀刻等效果,还要求表现复杂的全局光照明效果,例如镜面反射、透射、阴影、衍射、色渗等效果。

(4) 显示分辨率呈数量级递增。多年来,单屏显示分辨率一直局限在 1024×1024 数量级上,成为制约图形显示能力的瓶颈。近年来,多屏拼接显示技术的发展和成熟使得大范围、可伸缩、高分辨率的沉浸式显示设备,例如 CAVE 和大屏幕投影墙,得到越来越广泛的应用。这类显示设备通过提高显示分辨率来提供更加精细的绘制结果,能极大增强人们在虚拟环境中的沉浸感,提高虚实合一的程度,同时此类技术要求能同时处理十倍甚至百倍单屏显示的数据量,从而对图形绘制性能提出了新的要求。

上述新的应用特点加上对真实感与实时性统一的要求,最终反映在提高绘制性能的追求上。自 20 世纪 90 年代以来,单机图形处理器(GPU)性能快速提高,分布并行图形绘制技术呈现蓬勃发展的趋势,成为提高绘制性能的两个主流方向。

分布并行图形绘制硬件系统从最初的专用并行图形绘制硬件,发展到日益成熟的基于 PC 集群(PC cluster)的并行绘制系统,以及目前最新的基于图形集群(graphics cluster)的并行绘制系统和基于网格(grid)的并行绘制系统。分布并行图形绘制软件系统从基于绘制指令分布的并行绘制系统,发展到基于场景数据分布的并行绘制系统,以及集成多种绘制加速算法的并行绘制系统。与通用计算 GPU (GPGPU)应用类似,由这些软硬件组成的高性能分布并行绘制系统不仅可以用于要求极高图形处理能力的应用领域,例如大规模虚拟战场仿真、大规模流体仿真和可视化、大型飞机 CAD 模型可视化、海量医学图像分析及其可视化、时变海量高维信息可视化等,还可以用于其他需要大量计算能力的应用领域,例如大规模数值分析、海量信号处理、海量数据库检索等。

浙江大学计算机辅助设计与图形学(CAD&CG)国家重点实验室分布并行图形绘制研究团队近十年来,先后有 12 名博士生、5 名硕士生(详见文后附表),在国家 973 项目“虚拟现实基础理论与算法”(2002CB312105)的支持下,围绕分布并行图形绘制技术的各个方向进行深入系统的研究,取得了一批研究成果,发表了一批高质量的学术论文。本书集中汇聚了这些研究成果,本书的出版是一件十分有意义的事。这部专著是集体劳动的结晶,我作为项目负责人和研究生导师,策划和组织了本书的编写工作,在封面上只署我的名字,各章作者分别在目录和相关章节后署名,以体现知识产权保护和文责自负的精神。

分布并行图形绘制研究方向的形成和得以坚持的原因是多方面的。最初的动机是出于“还债”心理,我从原苏联列宁格勒大学物理系核物理专业毕业,自 1973 年进入浙江大学无线电系计算机教研组,而改行从事计算机专业研究,最初是从研制小型计算机硬件做起的。后来一直工作于计算机系统结构教研组(计算机系统研究所)。80 年代后期,经学校推荐从事浙江大学“计算机辅助设计与图形学国家重点实验室”的组建工作,1989~1998 年期间,任实验室主任。实验室初创阶段需要集中人力和物力做好做强计算机辅助设计和计算机图形学这两个方向,我作为实验室负责人,责无旁贷把我的团队整个投入到实验室主流方向上,长达十年之久。

这段时期我有足够业绩通过学校的考核指标,但我经常扪心自问,我的业绩是无法向计算机系统研究所交代的。因此我一直对系统所的多届领导心存感恩和愧疚之心,感谢他们的宽容,感谢多年来他们一直容许我名列系统所之下,却致力于 CAD&CG 国家重点实验室的工作。同时,我也希望有朝一日能有所回报,能重新进行计算机体系结构的研究。于是,在 20 世纪 90 年代后期,我选择了分布并行处理系统与图形算法相结合的并行图形绘制技术及其应用这一新的研究方向,这便是前面“还债”的含义。

这一方向能够坚持至今,离不开国家 973 项目“虚拟现实基础理论与算法”

(2002CB312105)的支持。我们的团队在这一项目中承担了课题五“分布式虚拟环境”中“分布并行图形绘制技术”等课题。承担国家 973 项目使我们的研究目标更加明确,即研究面向分布式虚拟环境的并行绘制技术。分布式虚拟环境的特点是绘制资源分布,场景规模大,数据类型复杂,真实感要求高,实时性要求强,以及大多需要采用高分辨率的多屏拼接显示技术。针对上述特点,我们提出并实现了全新的并行绘制体系结构和集成多种绘制加速算法的并行绘制系统 PSG。我们的 PSG 系统既支持 OpenGL API,也支持 Direct3D API(D3DPR);适用于 PC 集群,也适用于网格环境,具有较强的软硬件适用性,以及较广的应用性。PSG 系统在体系结构与加速算法上都有较高的创新性。

这里还要感谢国际学术交流对我们的帮助。自 1996 年我进入 ACM SIGGRAPH 教育委员会,任亚洲代表达十年之久。在这十年里,每年均获全额资助出席 ACM SIGGRAPH 大会,因而得以及时获得学科的最新动态和信息。这种学术交流使我和我的团队获益匪浅。例如,我们及时抓住了 2001 年 ACM SIGGRAPH 大会上 Stanford 大学报告的 WireGL 工作,组织学生细读这篇论文,重复这项工作,但是始终缺乏感性认识,工作进步不快。2002 年春,我作为 ACM SIGGRAPH 执行委员会委员候选人,在旧金山湾区参加一次工作会议后,有机会参观 Stanford 大学著名的计算机图形学实验室,亲眼见到了 WireGL 整个软硬件系统和演示,一下对它的先进性、实用性和技术难度有了很强的感性认识,使我立刻感觉到我们应该加速研制同类系统,并完全有能力研制它。回国后,我立即着手推动基于 PC 集群并行绘制系统的研制工作。2006 年,我们实验室自行研制的 PC 集群和多屏拼接显示系统已经成功运行了一段时间,但颜色和亮度拼接均匀度均未获圆满解决,团队受到多种技术因素的困扰,似乎这是一个不可解决的问题。恰好在同年 5 月初,我参加了德国 Encarnacao 教授 65 岁生日庆典,有机会参观了他的研究所(IGD-FhG),看到了 IGD 研制的多屏拼接显示系统完美的亮度与颜色拼接效果,并索取了有关技术资料,并以此推动了实验室该项技术问题的解决。在此,我列举了一些从国际学术交流中的得益,还有一层意思,就是针对今天普遍存在的热衷于日常事务但却忽略业务进修和轻视国际学术交流的倾向,希望引起大家重视。

本书系统地介绍了分布并行图形绘制的基础知识、体系结构、绘制加速算法以及典型的应用系统,全书的内容包括三篇:基础篇包括第 1~3 章,主要介绍与分布并行图形绘制技术相关的计算机图形学基础知识。技术篇包括第 4~12 章,集中介绍分布并行图形绘制的关键技术和本团队在该领域取得的研究成果。应用篇包括第 13~15 章,主要介绍本团队研发的分布式图形绘制应用系统。本书集成了我们团队的研究成果,还包含相关研究领域中丰富的综述资料和参考文献,以及对未来研究方向的分析与展望。本书的出版对推动我国高性能图形绘制技术的研究与

发展具有重要的意义,对高性能图形绘制领域的研发人员具有较高的参考价值,而且许多章节对从事计算机图形绘制和处理技术(如可见性剔除、多分辨率建模、存储访问优化、网格压缩等)研究的人员同样具有较高的参考价值。本书介绍的基于PC集群的分布并行绘制技术与系统与国际上已报道的相比具有以下特点:

(1) 基于动态绘制组的体系结构以及基于节点迁移的负载平衡策略,通过动态增加绘制节点提高绘制能力,达到负载平衡的并行绘制性能,特别适用于任务划分方式相对固定的应用,如采用多屏拼接显示的应用。

(2) 复式嵌套绘制流水线组织机制,能自适应地构建混合 sort-first 和 sort-last 的并行绘制模式,可有效处理不同的屏幕空间图元分布情形。

(3) 异构数据场景图,可包含不同异质场景对象,降低上层应用程序与底层并行绘制系统耦合的复杂性,并且在与其它系统对接时,如分布式仿真系统,能有效地完成数据通信,降低数据冗余,提高数据管理效率。

(4) 集成多种绘制加速技术,包括基于预测的可见性剔除、可变粒度的多分辨率表示、分布外存绘制框架、多分辨率表示缓存优化技术、面向并行绘制的网格压缩和条带化技术,能进一步提高分布并行绘制系统的绘制性能,可有效处理大规模虚拟场景,保证系统的交互性能。

(5) 研制的支持 Direct3D API 并行的并行绘制系统 D3DPR,可支持应用程序透明化并行执行和 GPU 着色器(shader)并行执行,具有较强的软件通用性。

(6) 首次实现了基于网格的分布仿真、并行绘制和可视化集成的系统,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和灵活的数据管理框架。

(7) 适用于不同显示终端,可以是单机显示屏幕,也可以是多屏拼接显示投影墙。

感谢浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室为我们提供良好的学术环境,以及实验室主任鲍虎军教授对并行绘制方向的大力支持。2002 年实验室立项研制基于 PC 集群的多屏拼接显示系统,投入经费达 200 万元,并获得成功,成为实验室一个先进的公共软硬件平台,对促进实验室的高性能图形绘制技术研究及其应用发挥了很好的作用。

最后,再次感谢我们团队中的每一位成员,特别是已经走上工作岗位但仍积极参加本书编写的毕业生,他们是彭浩宇博士(浙江工商大学计算机与信息工程学院)、王总辉博士(浙江大学计算机科学与技术学院)、李超硕士(阿里巴巴云计算)、秦爱红博士(浙江传媒学院)、刘真博士(杭州电子科技大学计算机学院)、李岩博士(超威半导体(上海)有限公司)、杨珂博士(微软中国有限公司)、熊华博士(杭州实时数码科技有限公司)、仇俊波硕士(阿里巴巴中国有限公司)和张亚萍博士(云南师范大学计算机科学与技术学院),感谢他们在本职工作之余,为本书出版所作的贡献。我还要特别感谢熊华和张亚萍,他们花费大量时间,整理文稿并

协助我进行对外联系工作,没有他们的帮助,就没有本书的成功。

附表:与本书有关的博士及硕士工作

姓名	学位	论文题目	毕业年份
杨孟洲	博士	分布式虚拟环境中一些关键技术的研究	2000 年 5 月
姜晓红	博士	分布式虚拟环境中的数据管理和传输技术研究	2002 年 8 月
杨建	博士	AnyGL:一个大规模混合分布图形系统	2002 年 11 月
金哲凡	博士	保留模式图形并行绘制研究	2003 年 8 月
李超	硕士	基于 PC 集群的高性能并行图形绘制与高分辨率投影墙校正	2005 年 1 月
赵友兵	博士	面向网格基于 Java 的交互式可视化系统 GVis 研究与实现	2005 年 9 月
仇应俊	硕士	交互式可视化网格系统 GVis 研究及实现	2006 年 3 月
殷萍	硕士	Terrain-VDR:基于 out-of-core 的交互式地形并行绘制框架	2006 年 6 月
周然	硕士	基于 PC 集群的高分辨率投影墙校正和应用	2006 年 6 月
吴潜禄	硕士	基于集群的大屏幕高清晰度视频播放系统的研究与实现	2006 年 6 月
彭浩宇	博士	基于 PC 集群机的并行图形绘制系统研究	2007 年 3 月
王总辉	博士	高可扩展性分布式交互仿真支撑平台的研究和实现	2007 年 9 月
秦爱红	博士	面向绘制加速的三角形网格压缩	2007 年 12 月
刘真	博士	D3DPR:支持 Direct3D9 应用程序透明并行绘制系统的研究与实现	2007 年 12 月
杨珂	博士	基于图形处理器的数据管理技术研究	2008 年 9 月
熊华	博士	面向并行环境的绘制加速技术研究	2008 年 12 月
张亚萍	博士	大型三维网格模型多分辨率构建与绘制	2010 年 3 月

目 录

基 础 篇

前言

第 1 章 图形流水线与场景图	熊 华	3
引言		3
1.1 计算机图形学简介		3
1.1.1 计算机图形学的发展历史		3
1.1.2 计算机图形学的研究内容		4
1.1.3 计算机图形学的应用领域		6
1.2 图形流水线		8
1.2.1 图形流水线基础		8
1.2.2 图形流水线处理阶段		9
1.3 场景图		11
1.3.1 场景图简介		11
1.3.2 场景图特点		12
1.3.3 常见场景图		12
1.4 总结和展望		13
参考文献		14
第 2 章 图形 API:OpenGL 与 Direct3D	李 岩 刘 真	16
引言		16
2.1 OpenGL 的基础		16
2.1.1 OpenGL 的发展历史		16
2.1.2 OpenGL 的特性		17
2.1.3 OpenGL 的扩展及常用库		19
2.2 OpenGL 的体系结构与实现		21
2.2.1 OpenGL 的图形流水线		21
2.2.2 OpenGL 的指令语法		21
2.3 OpenGL 的状态与数据管理		22
2.3.1 OpenGL 的状态		22
2.3.2 OpenGL 的数据管理		23

2.4 Direct3D 的基础	25
2.4.1 Direct3D 的发展历史	25
2.4.2 Direct3D 的发展趋势	28
2.5 Direct3D9 的图形流水线	29
2.6 Direct3D9 的图形库特征	30
2.6.1 Direct3D9 的绘制接口	30
2.6.2 Direct3D9 图形流水线的状态	31
2.6.3 Direct3D9 的场景数据组织模式和存储方式	32
2.7 总结和展望	35
参考文献	36
第3章 图形处理器与图形集群	杨珂 刘真 37
引言	37
3.1 GPU 技术发展概述	37
3.2 GPU 并行体系结构	41
3.2.1 固定功能架构	41
3.2.2 分离渲染架构	42
3.2.3 统一渲染架构	45
3.3 GPU 技术应用概况	49
3.3.1 GPU 用于图形处理	50
3.3.2 GPU 通用计算简介	55
3.4 GPGPU 技术的发展趋势	61
3.4.1 GPU 技术发展趋势	61
3.4.2 GPU 技术带来的机会	62
3.5 图形集群	63
3.5.1 基于 PC 集群的并行绘制系统	63
3.5.2 图形集群	67
3.5.3 本书的图形集群	68
3.6 总结和展望	69
参考文献	70

技 术 篇

第4章 并行图形绘制体系结构	彭浩宇 75
引言	75
4.1 并行图形绘制体系结构的定义	76
4.1.1 必要性与可并行性	76

4.1.2 并行图形绘制体系结构的狭义定义	78
4.1.3 并行图形绘制体系结构的广义定义	79
4.2 典型并行图形绘制系统分析	84
4.2.1 基于专用硬件的实现	84
4.2.2 基于 PC 集群的并行图形绘制系统	87
4.2.3 PC 集群环境下的并行绘制体系结构性能分析	92
4.3 基于动态绘制组的混合式自适应并行图形绘制体系结构	95
4.3.1 多屏拼接显示系统的特点	95
4.3.2 基于动态绘制组的混合式自适应并行图形绘制体系结构框架	97
4.3.3 动态绘制组的组成	99
4.3.4 动态绘制组内 sort 方式的自适应切换	100
4.3.5 复式嵌套并行图形绘制流水线	102
4.4 总结和展望	105
参考文献	106
第 5 章 基于节点迁移的负载均衡策略	彭浩宇 109
引言	109
5.1 负载均衡概述	110
5.1.1 相关概念	110
5.1.2 “平衡性”详解	112
5.1.3 图形绘制的负载特性	113
5.1.4 SceneFramework 简介	114
5.2 负载均衡算法综述	116
5.2.1 静态负载均衡算法	117
5.2.2 动态负载均衡算法	118
5.2.3 自适应负载均衡算法	118
5.2.4 基于时间反馈的自适应算法	120
5.3 基于节点迁移的负载均衡算法	121
5.3.1 算法内涵	122
5.3.2 算法设计前提	122
5.3.3 算法实现分析	124
5.3.4 测试结果	128
5.4 总结和展望	130
参考文献	130
第 6 章 基于预测的遮挡剔除和并行遮挡剔除	熊华 132
引言	132

6.1 遮挡剔除简介	132
6.1.1 可见性剔除分类	132
6.1.2 遮挡剔除的相关概念	133
6.1.3 遮挡剔除中的时空连贯性	134
6.1.4 遮挡剔除中的层次结构	134
6.1.5 基于点的遮挡剔除	134
6.1.6 基于区域的遮挡剔除	135
6.2 基于预测的遮挡剔除算法	135
6.2.1 硬件遮挡查询	136
6.2.2 建立空间层次结构	138
6.2.3 访问空间层次结构	139
6.2.4 实验结果	143
6.2.5 讨论和小结	148
6.3 并行遮挡剔除算法	149
6.3.1 数据并行遮挡剔除策略	149
6.3.2 功能并行遮挡剔除策略	152
6.3.3 实验结果	154
6.3.4 讨论和小结	157
6.4 总结和展望	158
参考文献	158
第7章 并行网格简化和并行多分辨率构建	熊华 161
引言	161
7.1 大型网格模型简化技术	162
7.1.1 网格简化技术简述	162
7.1.2 基于网格分割的外存简化	163
7.1.3 基于外存数据结构的外存简化	163
7.1.4 基于流式处理的外存简化	163
7.1.5 其他外存简化策略	164
7.1.6 讨论和比较	164
7.2 并行网格模型简化算法	165
7.2.1 基于网格分割的并行简化	166
7.2.2 基于流式处理的并行简化	172
7.2.3 讨论和小结	176
7.3 大型网格模型多分辨率技术	176
7.3.1 多分辨率技术简介	176

7.3.2	多分辨率表示的设计	177
7.3.3	多分辨率表示的构建	177
7.3.4	多分辨率表示的绘制	178
7.3.5	讨论和比较	179
7.4	并行多分辨率构建算法	180
7.4.1	多分辨率表示	181
7.4.2	并行外存构建	181
7.4.3	实验结果	184
7.4.4	讨论和小结	185
7.5	总结和展望	185
	参考文献	186
第8章	外存数据管理框架和基于三角形排布的缓存优化技术 熊华	189
	引言	189
8.1	外存技术	189
8.1.1	外存访问模型	190
8.1.2	外存处理技术	191
8.1.3	外存技术应用	192
8.2	基于优先权的统一外存数据管理框架	192
8.2.1	框架组织结构	193
8.2.2	框架运行机制	194
8.2.3	实验结果	196
8.2.4	讨论和小结	197
8.3	缓存优化技术	198
8.3.1	缓存访问模型	198
8.3.2	网格排布优化	199
8.4	基于三角形排布的缓存优化技术	200
8.4.1	排布算法原理	200
8.4.2	排布算法流程	202
8.4.3	实验结果	204
8.4.4	讨论和小结	206
8.5	总结和展望	207
	参考文献	207
第9章	面向并行绘制的三角形网格压缩 秦爱红	210
	引言	210
9.1	三维模型表示及其压缩	210

9.1.1	三角形网格	211
9.1.2	三角形网格压缩	212
9.2	经典的三角形网格压缩算法	214
9.2.1	广义三角形网格	215
9.2.2	拓扑手术算法	217
9.2.3	顶点度驱动的编码算法	219
9.2.4	切割边界算法	220
9.2.5	边分裂算法	222
9.2.6	大规模网格压缩算法	223
9.2.7	外存压缩算法	224
9.2.8	三角形网格流式压缩算法	225
9.3	大规模网格模型对集群并行绘制系统的挑战	226
9.3.1	基于集群的并行绘制系统简介	226
9.3.2	图元计算粒度与绘制数据的冗余度	227
9.3.3	大规模网格模型引起的绘制瓶颈及解决方法	229
9.4	面向并行绘制系统的三角形网格压缩算法	231
9.4.1	基于压缩数据的并行绘制	231
9.4.2	几何指令流压缩	233
9.5	面向并行绘制系统的三角形网格压缩框架 PRMC	233
9.5.1	PRMC 压缩框架的基本思想	234
9.5.2	面向分片压缩的三角形网格分割	235
9.5.3	基于分片保拓扑的三角形网格压缩算法	240
9.6	支持 PRMC 压缩数据流集的并行绘制系统框架	242
9.6.1	基于 PRMC 压缩数据流集的 SceneFramework 场景图扩展	244
9.6.2	基于 PRMC 场景图的并行绘制系统的归属判断	247
9.7	实验结果	248
9.8	总结和展望	251
	参考文献	252
第 10 章	三角形条带化	秦爱红 255
	引言	255
10.1	三角形条带化概述	255
10.1.1	三角形条带的相关概念	255
10.1.2	三角形条带应用的必要性	256
10.1.3	三角形条带优劣的判别准则	257
10.2	经典的三角形条带化算法	258

10.2.1	三角形条带化算法分类	258
10.2.2	直接方法	259
10.2.3	重采样方法	260
10.3	三角形条带化技术的近期发展	262
10.3.1	Hamiltonian 条带建立的新思路	263
10.3.2	与绘制加速技术兼容的三角形条带	265
10.3.3	三角形条带化算法总结	267
10.4	可见性连贯的分片三角形单条带化	268
10.4.1	建立同心圆	268
10.4.2	基于同心圆周游的三角形条带增长	271
10.4.3	实验结果	273
10.5	总结和展望	274
	参考文献	274
第 11 章	并行绘制系统 PSG 与系统集成技术	熊华 276
	引言	276
11.1	并行绘制集成系统 PSG	277
11.1.1	PSG 的体系结构	277
11.1.2	PSG 的功能和特点	282
11.1.3	PSG 的应用领域	282
11.2	并行绘制系统集成技术	283
11.2.1	系统集成需求分析	284
11.2.2	并行场景图 PSG	285
11.2.3	集成系统工作流程	290
11.2.4	并行场景图 PSG 的特点	293
11.3	并行绘制集成系统应用实例	294
11.4	总结和展望	296
	参考文献	296
第 12 章	D3DPR 并行图形绘制系统	刘真 297
	引言	297
12.1	D3DPR 透明并行化策略和系统逻辑结构	298
12.1.1	单机 Direct3D9 应用程序执行流程	298
12.1.2	透明并行化策略	299
12.1.3	D3DPR 系统逻辑结构	301
12.2	D3DPR 实现原理与技术	303
12.2.1	D3DPR 系统实现结构	303

12.2.2	资源分配节点	304
12.2.3	资源绘制节点	313
12.2.4	网络传输和系统同步	317
12.2.5	D3DPR 系统集成几何校正和色彩校正的技术	322
12.3	基于多流场景数据组织模式的任务分布	324
12.3.1	D3DPR 系统绘制任务分布限制条件	324
12.3.2	D3DPR 系统绘制任务分布策略	327
12.4	支持着色器的透明并行化研究	331
12.4.1	着色器	331
12.4.2	着色器编程	333
12.4.3	支持着色器透明并行化	337
12.5	D3DPR 系统整体测试与分析	343
12.5.1	测试用例	343
12.5.2	测试结果与分析	344
12.6	总结和展望	348
	参考文献	349

应 用 篇

第 13 章	多屏拼接显示	李超	355
	引言		355
13.1	分布式图形绘制的显示技术		355
13.2	高分辨率投影墙的建立		356
13.2.1	硬件构建		356
13.2.2	立体投影显示		360
13.3	高分辨率投影墙的校正		362
13.3.1	机械校正		363
13.3.2	基于数码相机的软件校正		364
13.4	总结和展望		371
	参考文献		372
第 14 章	分布并行绘制与 HLA 仿真应用的集成技术	王总辉	373
	引言		373
14.1	HLA 仿真平台与常用第三方绘制平台		374
14.1.1	HLA 仿真平台概述		374
14.1.2	常用的第三方绘制平台		376
14.1.3	并行绘制平台		377

14.2	仿真应用对象的组织与管理分析·····	379
14.3	分布并行绘制与仿真应用的集成技术·····	380
14.3.1	统一对象模型·····	380
14.3.2	基于统一对象模型的数据交换·····	382
14.4	HIVE 仿真平台及与 PSG 并行绘制平台的集成·····	384
14.4.1	HIVE 仿真平台·····	384
14.4.2	集成 PSG 并行绘制平台的 HIVE 仿真应用框架·····	389
14.4.3	集成应用例子·····	390
14.5	总结和展望·····	396
	参考文献·····	397
第 15 章	基于网格的分布式仿真与可视化系统····· 张亚萍 仇应俊	399
	引言·····	399
15.1	网格概述·····	400
15.1.1	网格的概念·····	400
15.1.2	网格的特点·····	400
15.1.3	网格的体系结构·····	401
15.2	基于网格的分布式仿真与可视化系统 GSPR 体系结构·····	403
15.3	基于网格的分布式仿真与可视化系统 GSPR 实现·····	404
15.3.1	运行时环境层 GRE 实现·····	404
15.3.2	网格应用层实现·····	410
15.3.3	网格门户层实现·····	416
15.4	系统测试·····	419
15.5	总结和展望·····	424
	参考文献·····	424