

前言

石教英

浙江大学计算机辅助设计与图形学国家重点实验室

浙江大学计算机学院

jyshi@cad.zju.edu.cn

近年来,随着计算机图形软硬件技术日益进步和应用需求不断增长,计算机图形学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1024x1024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势头,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)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的导师,策划和组织了本书的编写工作,在封面上以主编名义署名,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,我自1973年进浙江大学无线电系计算机教研组,从原苏联列宁格勒大学物理系核物理专业毕业,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,经学校推荐从事浙大“计算机辅助设计与图形学国家重点实验室”组建工作,1989-1998年,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到实验室主流方向上,长达10年之久。

这段时期我有足够业绩通过学校考核指标，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待的。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 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”（编号 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。我们针对上述特点，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 Grid 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 10 年之久。在这 10 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最新动态和信息。这种学术交流使我和我的团队受益匪浅。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，一下子对它的先进性、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，并感到完全有能力研制它。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。

本书系统的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究和开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大的参考价值。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，能自适应的构建混合 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，并且在与其他系统对接时，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。

最后我要感谢 CAD&CG 国家重点实验室提供的良好学术环境，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仍积极参加本书写作的毕业生，他们是彭浩宇博士（浙江工商大学）、王总辉博士（浙江大学）、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）、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）、仇应俊硕士（阿里巴巴中国有限公司）和张亚萍博士，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两位花费大量时间，帮助我整理文稿和协助对外联系工作，没有他们帮助，就没有本书的成功。

附表：与本书有关的博士/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

2009.1 初稿

2010.3 定稿