

文章编号:1002-1175(2008)05-0577-08

综 述

地学中海量数据的并行可视化研究进展^{*}

陈绍林 张 怀 石耀霖

(中国科学院研究生院计算地球动力学实验室, 北京 100049)

(2007 年 12 月 18 日收稿; 2008 年 2 月 21 日收修改稿)

Chen SL, Zhang H, Shi YL. The research progress of large-scale data parallel visualization in geosciences. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2008, 25(5): 577 ~ 584

摘 要 地球科学中观测和数值模拟结果数据爆炸式的增长, 给可视化和分析这些海量数据带来极大的挑战, 将海量数据并行可视化技术应用到地球科学中是解决这一问题的有效手段. 地球科学中海量数据可视化是目前国际科学可视化研究的一个新方向. 本文介绍了海量数据并行可视化的几个步骤, 总结了地球科学中海量数据的特点, 重点讨论了海量数据并行可视化在地幔对流、地震波传播以及海啸数值模拟等可视化研究中的应用实例.

关键词 海量数据, 并行可视化, 地幔对流, 地震波传播, 海啸

中图分类号 P315.31; P315.63

1 引言

信息技术和高性能计算技术的发展, 为地球科学研究提供了越来越多的实验及观测数据. 特别是最近几年来, 数字化地震台网、高精度 GPS 网络等各种观测台网的建立和各种对地观测和气象卫星积累了高速增长的海量观测数据^[1~4]; 此外, 现代大规模并行模拟技术在地球科学中也得到了广泛应用, 使得科学家们对地球物理现象的建模和数值模拟的规模获得了几何量级的提高, 从而产生了海量的科学研究数据. 例如, 对海啸波和地震波传播过程以及 3D 地幔对流进行数值模拟都会产生 Tb 级的数据. 面对如此庞大的数据量, 传统的桌面系统由于处理速度、GPU 绘制能力和显示分辨率的限制, 越来越无法满足对这些数值结果进行可视化分析的需求.

海量数据可视化的一个有效的解决方法就是分布式并行处理. 多边形绘制和体绘制并行可视化算法早在 20 世纪 90 年代就进行了大量研究^[5~7]. 如为了减少网络的传输和可视化绘制过程中处理的数据量, 很多学者研究了大规模数据的特征值提取技术及其并行算法^[8,9]. Ma Kwan-Liu 等人将海量数据的并行可视化技术成功应用到了地震波传播模拟的可视化中^[10~15]. James S. Painter、Kirk E. Jordan 和 Magan Damon 等将该技术应用到了对地幔对流模拟结果的交互式可视化中来^[16~18]. 近些年来, 交互式远程可视化技术也被应用地球科学中来^[19~22]. 另外目前国际上主要采用并行高分率显示墙系统来解决高分率沉浸式可视化需求^[23].

本文首先从并行可视化技术出发, 介绍了海量数据并行可视化的几个关键算法和步骤, 然后总结了地学中海量数据的特点, 最后重点讨论了几个在数值模拟结果数据可视化中的实例.

^{*} 中国国家基础科学研究项目(2004cb408406)和国家自然科学基金项目(40774049, 40474038)资助

2 海量数据并行可视化技术

典型的并行可视化系统,包括数据输入输出节点,处理节点,可视化绘制节点和显示节点,此外还包括存放数据的文件系统.在并行可视化过程中,根据各个模块的功能不同,可将并行可视化分为以下 3 个步骤:数据预处理、并行绘制和并行显示.数据的预处理过程是将超级计算机或并行计算机集群产生的海量数据进行各种操作,如特征值提取、数据转化、同化、压缩、过滤等,以此来减少网络传输和可视化绘制的数据量.海量数据可视化的相当一部份工作要花销在数据的处理、转换和为后续的绘制工作的准备上^[24].可视化的绘制过程是将几何数据(点、线、曲面、多边形)转化成图像的过程,它需要耗费大量的计算资源,尤其是对目前流行的体绘制技术更是如此.

2.1 海量数据的预处理

海量数据的预处理包括将原始数据映射成几何数据的整个过程,这其中可能包含数据格式的转化、过滤、数据的传输、特征值提取、数据映射、数据压缩和解压等多个方面.

2.1.1 特征值提取

特征值提取技术是对原始数据进行分析,提取特征信息,如提取数据场的等值线、等值面的特征可视化技术.采用特征可视化技术,可以去掉不感兴趣的数据体,大大减少需存储的数据量,还可减少可视化绘制阶段的工作量.传统的 Marching Cubes 类的等值面生成的方法需要在等值面与物体的单元交界面上生成多边形,而且需要逐个单元进行处理,因此非常耗时,为此 Jane Wilhelms 提出了一种基于 Octrees 存储的快速等值面生成算法^[25].Han-Wei Shen, Udeeta D. Bordoloi 等研究了大规模数据场空间中高效的等值面提取方法,以及采用一种暂时分级索引的方法来提取随时间变化的数据体的等值面的方法^[26,27].Benjamin Vrolijk 等提出了在磁盘中存储数据的快速等值面提取,及快速的时间上独立的交互式等值面提取的算法^[28,29].Mackerras P 和 Miquet S 等将 Marching Cubes 算法并行化^[30,31].Charles D. Hansen 研究了一种大规模并行的等值面提取算法^[32].Zhang Huijiang, Zhang Xiaoyu 等分别提出了不同的高效率的外存存储的等值面并行抽取算法^[33,34].基于特征值提取的方法是实现海量数据可视化的一个有效的手段.

2.1.2 数据映射

数据映射是将数值数据(节点坐标及其拓扑关系和节点上的物理量)映射到几何数据(点、线、多边形、面等)及其属性(时间、颜色、透明度、反向系数、表面纹理等),即研究如何建立科学数据几何模型的理论和方法.由于研究对象的不同,产生的数据类型也不同,一般数据类型包括标量场、矢量场和张量场.对于不同场的数据采用不同的映射方法,反映出各种不同数据场的特点.为了解决海量数据的可视化数据映射应当研究标量场、矢量场和张量场的各种算法的并行化实现^[35].

2.1.3 数据编码压缩和解压

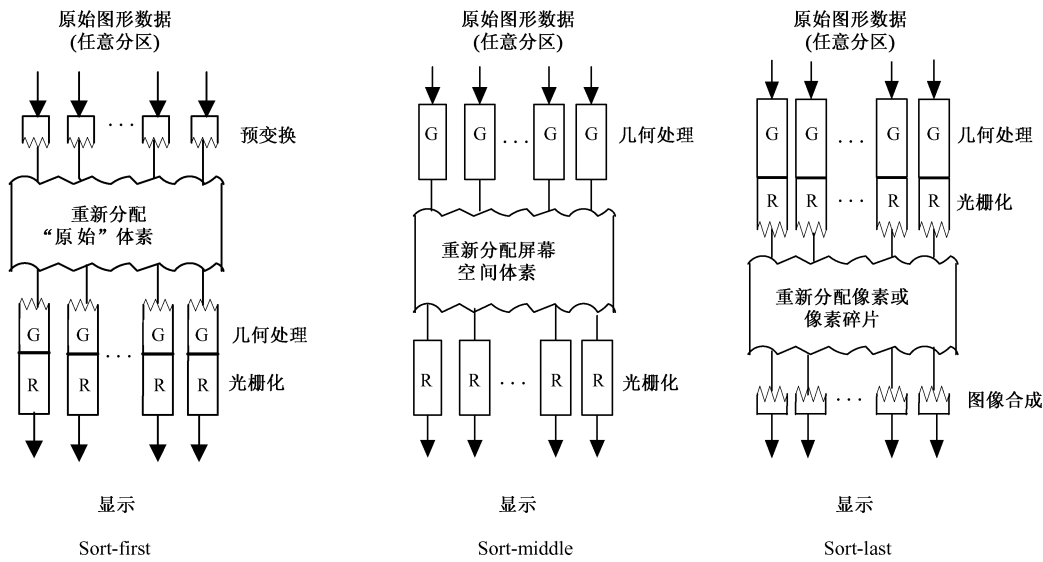
数据编码压缩是提高海量数据预处理能力的一个有效手段,主要有两方面的优点:一是降低内存需求,同时提高时域相关数据的交互性;二是可以减少这些数据的传输和处理时间,这对基于远程实现的可视化系统来说更为重要.时序体数据的压缩方法主要有两类:一类是将时序体数据看作 4D 数据;另一类是将时间和空间分开进行编码.在时间上普遍采用差分的方法,利用在连续时间步长之间的数据一致性,可以大大减少要处理和传输的数据量^[36].Ma Kwan Liu 等介绍了一种基于量化体数据有效的编码方法,在时间上采用差分的方法,在空间上采用 Octree 编码方法进行压缩^[37].如果在连续时间步具有相同的值,那么这些时间步的值就可以合并,只存储前一个时间步的值,因而大大节省了要存储的数据量.有人研究了基于分级数据结构称作 Time-Space Partitioning (TSP)的存储方法进一步利用空间和时间一致性^[38].此外,还有一些人研究利用小波压缩和小波变换方法对数据进行编码和压缩的方法^[39,40].

在远程可视化过程中,超级计算机可视化系统绘制完成的图像需要通过网络一帧一帧的传输到客户端,如果要提高交互式的速率,同样需要对图像进行压缩,在客户端还要对其进行解压.目前普遍使用的图像压缩和解压方法主要有:MPEG、JPEG、LZO、BZIP 等^[41].

2.2 并行绘制

可视化绘制是将几何数据转化成光栅中像素的过程,绘制过程分为 2 个阶段:几何处理和光栅化.几何处理构成了绘制管道的第一阶段,它包括模型坐标和设备坐标(屏幕坐标)的转化,光照、纹理坐标计算和裁剪.光栅化过程是将体素(三角形)转化成像素的过程,对像素进行各种操作,诸如纹理映射、Z-深度缓存、alpha-blending 等操作.最终的像素经过合成形成一幅完整的图像之后被写入帧缓存,帧缓存中的像素可以经扫描送到显示器上显示^[42].在绘制的过程需要消耗大量的计算资源,特别是在几何处理过程中要进行大量的浮点操作,例如在进行光照计算时,根据光源的数量以及光照的复杂度,每个顶点都要进行上百次的浮点操作.在目前流行体绘制技术中,每一帧的图像都需要对所有的体素进行绘制,对计算机的处理能力要求极高,因此对于大规模数据进行体绘制时多采用分布式并行体绘制算法^[15].

可视化的并行实现,主要有 3 种基本的处理方式^[43]:作业并行(Task Parallelism)、流水线并行(Pipeline Parallelism)和数据并行(Data Parallelism).在这 3 种方式基础上组合,可以设计更复杂的并行程序和系统.几何处理过程的并行化是通过向每个绘制管道分配一个对象图元的子集;光栅化的并行化通常通过向每个处理器分配一部份的像素计算.根据在并行绘制管道中分配数据的位置,可将并行绘制算法分为^[44]:Sort-first、Sort-middle、Sort-last 3 类(图 1).在实际中也可以将其中的 2 种进行组合来设计并行绘制管道,称为 Hybrid Sorting(混合分类)^[45].设计一个高效的并行算法,要综合考虑任务和数据的分解、粒度、程序的可扩展性、复杂平衡、一致性以及对象空间到图像空间的映射等多个方面.很多并行程序很难兼顾以上几个方面,就会在并行绘制的其他环节带来过载或瓶颈^[46].



Sort-first: 在几何处理过程中重新分配“原始”体素; Sort-middle: 在几何处理和光栅化的过程中重新分配屏幕空间体素; Sort-last: 在光栅化的过程中重新分配像素或像素碎片^[44].

图 1 并行绘制算法分类

2.3 高分率显示墙系统

海量数据可视化面临着另一个问题是如何将处理好的数据以高精度高分辨图像显示出来.在地球科学数值模拟结果的可视化显示过程中,也同样面临这样的问题.现有普通的显示设备尺寸不能满足海量数据可视化高分辨率的要求,也无法满足科学家对其计算结果的浸入式观察分析的要求.使用并行算法实现大屏幕显示技术是解决单个显示设备尺寸过小,提高系统整体分辨率的一个最有效途径.

目前大屏幕显示研究的热点主要是基于 PC 集群和投影设备,以及显示设备来实现并行显示.具有代表性的有 Princeton 大学的 Display Wall、Minnesota 大学的 PowerWall 和 AT&T 实验室的 InfoWall.这方面

的研究包括 3 个方面:硬件环境、软件环境和应用软件^[47].硬件环境包括计算机、连接网络、投影设备的选择以及图像的排列和校正系统;软件环境的研究包括对操作系统的选择、通用底层函数库的开发以及人机交互界面的开发;应用软件的研究主要包括通用应用程序的大屏幕显示和特定应用程序的大屏幕显示.美国芝加哥 illinois 大学电子可视化实验室(EVL)(www.evl.uic.edu/cavern/sage/index.php)实验室一直从事这方面的研究工作,开发的 SAGE 及其他可视化中间件,将传统的显示设备拼接在一起,实现高分率显示,而且具有很好的交互性.此外还有加利福尼亚大学 HiperWall 技术(<http://hiperwall.calit2.uci.edu/>),利用这一技术,美国加州圣地亚哥大学(UCSD)利用普通的液晶显示器拼接,实现了一个迄今分辨率最高的显示器墙,达到 220 个百万像素.

3 并行可视化技术在地学海量数据中的应用

地球科学中海量数据与其他学科产生的数据相比有以下几个特点:(1)数据产生快,数据量巨大.例如,对全球进行地震波传播过程进行模拟时:当全球的网格达到 300 万时,计算 2000 步时,存储 5 个变量,进行一次数据模拟时将生成 12T($300 \times 10^6 \times 5 \times 4 \times 2000 = 1.2 \times 10^{13}$)的数据量.当改变参数,计算多个算例时,整个数值模拟结果的数据量将成倍增加.(2)数值模拟结果数据多为时间相关的三维体数据,计算的过程中要存储多个时间步的数据,极大地增加了结果的数据量.这种随时间变化的海量数据的可视化通常需要进行交互式可视化或制作成视频格式的动画进行播放,才能达到整体的效果.(3)多尺度特征.地球科学中实际的物理问题的一个显著特点是研究对象都是多尺度特征,数据规模庞大;既需要整体信息,还需要局部放大信息.此外在研究中如果要考虑实际地形对问题的影响,常常要产生不规则的网格,这些海量数据和不规则的网格给可视化都带来很大的挑战.因此为了满足地学家分析数据的要求,海量数据的并行可视化技术已经广泛的应用到地学分析中来^[15~18].以下介绍几个分布式并行可视化在地球科学中的应用例子.

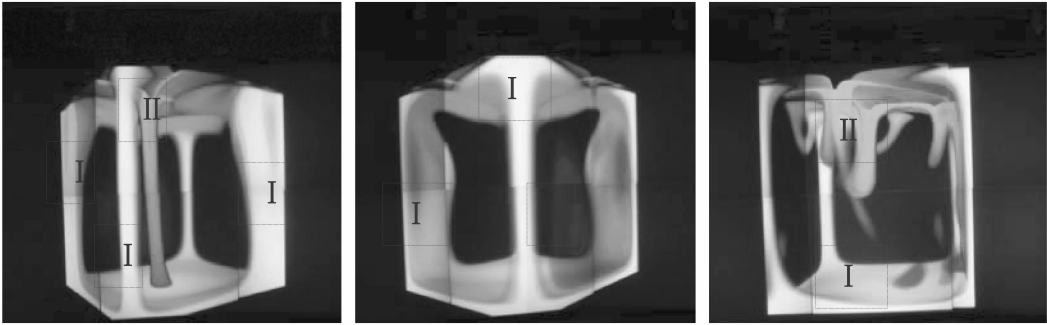
3.1 地幔对流

地幔对流^[48,49]是近年来地球动力学研究的热点^[50~54].由于大规模并行计算技术的发展,地学家已经有能力对全球尺度的或局部区域的地幔对流进行大规模数值模拟^[55,56].James S. Painter^[16]在 1996 年超级计算机 Cray T3D 上,利用并行可视化技术,对计算全球地幔对流的数值模拟结果进行可视化,全球网格总数为 125 万.在可视化的过程中,利用并行的切片提取,并行等值面提取技术,采用基于 Sort-middle 并行绘制算法进行绘制,可以获得整个对象的任意切片和抽取任意的等值面,对计算结果进行分析.Kirk E. Jordan^[17]等人使用 pV3 系统,一个并行/分布的交互式可视化系统对地幔对流的数值模拟结果进行并行交互式可视化,pV3 是一个基于 client/server 的工作模式,一方面利用 pV3 进行并行计算;另一方面利用 pV3 实现远程的交互式可视化.为了减少网络传输的数据量,在可视化的过程中,提取感兴趣的区域或特征值进行可视化.

美国明尼苏达大学的 Megan Damon^[18]利用计算科学与工程实验室(LCSE)的 PowerWall,一个并行绘制和并行显示地可视化系统,实现了对 3D 地幔对流的结果进行交互式可视化,通过高速网络将使用 AcuTEMan 程序计算的结果直接实时地传输到 LCSE 上进行可视化,在此过程中不经过对硬盘的读写,结果数据经过数据转化节点直接传送 LCSE 可视化系统的内存中.在进行数值模拟的同时,分析计算结果.这样一来,如果参数设置的不合理,可以中止程序,重新计算.PowerWall 包含 10 个绘制节点,1 个负责将传输来的数据转化成 HV 格式的数据转化节点;经转化的数据被送入绘制节点,采用并行体绘制的方法,对计算结果进行可视化;同时还利用了 LCSE 的 PowerWall 的高分辨率的并行显示功能对绘制的结果进行并行显示.PowerWall(www.lcse.umn.edu)的前端是由 10 个绘制节点分别驱动的由多块的液晶屏进行无缝拼接而成的分辨率高达 13MegaPixels 并行显示系统,在 LCSE 被用来进行各种可视化的显示功能,如图 2.利用高分率的显示系统对计算结果进行显示,让物理学家可以对计算结果进行浸入式的分析.

3.2 地震波传播过程的并行可视化

在地震波的数值模拟研究中,常常会面临以下几个挑战:大规模的海量数据;随时间变化的数据;结

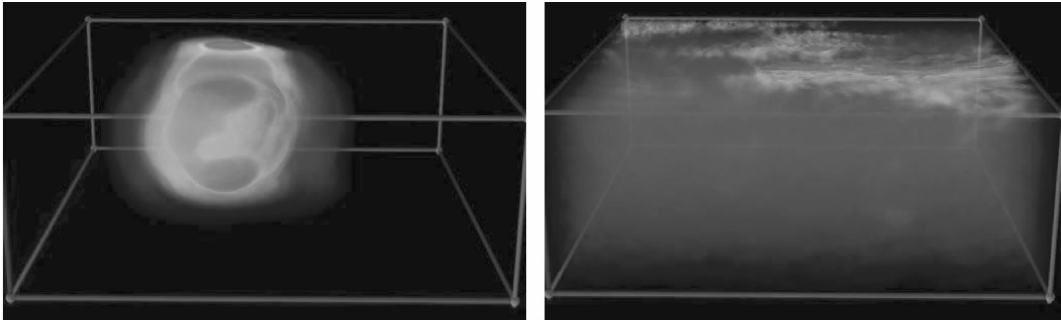


I 表示热柱,II 表示冷柱.每 4s 间隔图像更新一次. BladeCenter 的计算结果数据通过局域网传输到 LCSE,然后利用 LCSE 的可视化系统来绘制和显示.在计算时,研究人员可以使用 21DSVR 来控制图像的旋转、放大和调节色标.最右边一幅图显示的是 Rayleigh 数为 106 时的近似稳态时温度场状态^[18].

图 2 利用 LCSE 的 PowerWall 展示可视化利用 ACuTEMan 数值模拟计算结果的截图

果中保存多个变量;非结构化网格;结果中包含矢量场和位移场.地震波传播过程模拟的海量数据主要来源于前 3 个方面.对地震波的传播过程有关的物理量进行可视化,对于理解和发掘隐藏在结果中的信息有着极大的帮助,特别是体绘制方法的应用,可以让我们看到激发的地震波在三维空间中的整个传播过程,大大提高了结果的真实感.但体绘制方法大大增加了绘制时的计算量^[57~59].

Ma Kwan-Liu 等在 Pittsburgh 超级计算中心设计了一个并行的可视化系统^[15],对 1994 年发生在 Northridge 的地震的三维地震波的传播过程的数值模拟结果进行可视化.整个模型的网格数超过了 1000 万,如图 3.在设计过程中,采用了以下几个手段来实现对大规模随时间变化的不规则数据场的绘制:(1)使用交叉式的负载分配来达到更好的负载平衡;(2)尽可能的避免对每一个时间步的预处理计算;(3)叠加通信和计算时间,隐藏数据传输带来的过载;(4)压缩数据降低通信开销.在可视化系统中采用 Sort-last 的并行绘制算法以及 Octree 数据存储格式,在绘制的过程中,可以根据对最终图像分辨率和交互速度的要求来对数据进行不同等级的绘制,平衡绘制时的负载.在图像合成的过程中,采用了 Scheduled Linear Image Compositing (SLIC) 的合成算法,大大减少在合成图像过程中传输的信息量. Hongfeng Yu 等又在这系统上应用增强绘制,克服了因不同时间步数值的巨大变化而导致的直接体绘制的不透明度不随时间变化的缺点^[60].



时间步为 50 时(实际时间为 4s)的结果

时间步为 500 时(实际时间为 40s)的结果^[15]

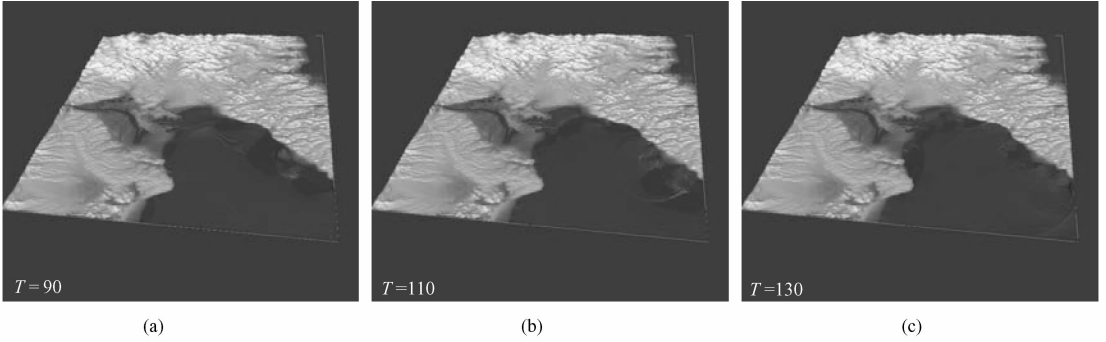
整个区域包含 1150 万的六面体网格.

图 3 利用体绘制方法可视化地震引发的强地面运动

3.3 海啸的可视化

在对海啸的数学建模和数值模拟中,传统的数学解析法近似解已经能很好的预测远场范围的长波海啸到达时间,并被首先用来预测海啸和预警^[61].但是对于近场的海啸、潮汐和海浪模拟分析和预测,涉及到了复杂地形地貌及其他复杂情况,如岛屿和港口,在时间和空间上必须利用高精度数值模拟方法以获得精确的预测.在采用潜水波方程对韩国的 Pohang 港进行海啸模拟,采用 1200 × 1200 的平面网格,

在计算过程中,仅保留波高一个变量 150 步的数据时,就达到近 10G 的数据,笔者在进行可视化过程中遇到很大困难,增加了系统的虚拟内存才得以完成(如图 4).在开展更大规模、更高精度的三维海啸模拟时,更是给后处理和可视化分析带来极大的挑战.只有采用并行分布式的可视化技术对结果进行可视化,才能满足交互式的需求.



(a)、(b)、(c)是选取的几个时间序列,图中 T 表示步数

图 4 利用 Amira 可视化二维的潜水波方程模拟韩国 Pohang 港的发生海啸时波的传播过程

海量数据的并行可视化除应用于上述地球物理学的几个方向外,同样还可应用于板块俯冲、地磁场的模拟、类地行星地幔对流及其发电机学说等很多大规模数值模拟结果可视化过程中,同时还可应用到各种观测海量数据的可视化中.

4 结论

地学中海量数据并行可视化技术是集计算机的软硬件、并行技术、可视化技术,以及地学背景为一体的一个研究新方向,需要计算机、计算数学、可视化、地学等多个学科的研究人员的共同协作.近些年来海量数据的并行可视化在地幔对流、地震波传播过程等数值模拟中取得了可喜的进展.将海量数据的交互式的并行可视化技术应用到地学大规模数据的可视化中,特别是高分辨的并行显示技术,使地学家们可以深入观察试验结果的细节,并在观察大尺度的模拟结果时对于发掘隐藏在结果中的信息有极大的帮助.中国在这个方面的研究工作还较少,特别是软件方面的研究,因此还需要各个学科科研人员的共同努力才能取得长足的进展.

在成文过程中,谭茂金和陈石提出了宝贵意见,并提供了很大帮助,在此表示衷心感谢.

参考文献

- [1] Zhang PZ, Wang Q, Ma ZJ. GPS velocity and active crustal deformation in and around the QingHai-Tibet plateau. *Earth Science Frontier*, 2002, 9(2): 442 ~ 450 (in Chinese)
张培震,王 琪,马宗晋.青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场. 地学前缘, 2002, 9(2): 442 ~ 450
- [2] Zhang PZ, Wang Q, Ma ZJ. GPS velocity and active crustal blocks of contemporary tectonic deformation in continental China. *Earth Science Frontier*, 2002, 9(2): 431 ~ 441 (in Chinese)
张培震,王 琪,马宗晋.中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块. 地学前缘, 2002, 9 (2): 431 ~ 441
- [3] Shen ZK, Wang M, Gan WJ, *et al.* Contemporary tectonic strain rate field of Chinese continental and if geodynamic implications. *Earth Science Frontier*, 2003, 10(8): 93 ~ 100 (in Chinese)
沈正康,王 敏,甘卫军,等.中国大陆现今构造应变率场及其动力学成因研究. 地学前缘, 2003, 10(8): 93 ~ 100
- [4] Chen LZ, Shen XH, Tian QJ. SAR technique and its application to geologic and seismic research. *Earthquake*, 2003, 23(1): 29 ~ 35 (in Chinese)
陈立泽,申旭辉,田勤俭.合成孔径雷达(SAR)及其在地质和地震研究中的应用. 地震, 2003, 23(1): 29 ~ 35
- [5] IEEE Computer society. In: 1995 Parallel Rendering Symposium Proceedings. ACM SIGGRAPH, 1993
- [6] IEEE Computer society. In: 1996 Parallel Rendering Symposium Proceedings. ACM SIGGRAPH, 1995
- [7] IEEE Computer society. In: 1997 Parallel Rendering Symposium Proceedings. ACM SIGGRAPH, 1997

- [8] Krzysztof B, Witold D, Yuen DA. Parallel extraction and visualization of clusters from large-scale data sets. *Parallel Computing*, 2001
- [9] Hansen CD, Hinker P. Massively parallel isosurface extraction. In: Proceedings of IEEE Visualization '92. 1992. 189 ~ 195
- [10] Ma KL. Visualizing time-varying volume data. *Computing in Science & Engineering*, 2003, 5(2): 34 ~ 42
- [11] Ma KL, Camp DM. High performance visualization of time-varying volume data over a wide-area network. In: Supercomputing, ACM/IEEE 2000 Conference. 2000. 29
- [12] Ma KL, Parker S. Massively parallel software rendering for visualizing large-scale data sets. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, 21(4): 72 ~ 83
- [13] Ma KL, Painter JS, Hansen D, et al. Parallel volume rendering using binary-swap compositing. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1994, 14(4): 59 ~ 68
- [14] Ma KL, Crockett W. A scalable parallel cell-projection volume rendering algorithm for three-dimensional unstructured data. In: 1997 Parallel Rendering Symposium. 1997. 95
- [15] Ma KL, Stompel A, Bielak J, et al. Visualizing very large-scale earthquake simulations. In: ACM/IEEE SC 2003 Conference (SC'03). 2003
- [16] Painter JS, Bunge HP, Livnat Y. Mantle convection visualization on the Cray T3D. In: Proceedings of the 7th conference on Visualization '96. 1996. 409
- [17] Jordan KE, Yuen DA, Reuteler M, et al. Parallel interactive visualization of 3D mantle convection. *IEEE Computational Science & Engineering*, 1996, 3(4): 29 ~ 37
- [18] Damon M, Kameyama MC, Knox M, et al. Interactive visualization of 3-D mantle convection. submitted to Visual Geosciences. 2007
- [19] Garbow ZA, Yuen DA, Erlebacher G, et al. Remote visualization and cluster analysis of 3-D geophysical Data over the internet using off-screen rendering. *Visual Geosciences*, 2003
- [20] Yuen DA, Garbow ZA, Erlebacher G. Remote data analysis, visualization and problem solving environment(PSE) based on wavelets in the geosciences. *Visual Geoscience*, 2004, 9(1): 29 ~ 38
- [21] Kadlec BJ, Yuen DA, Erlebacher G. Visualization and analysis of multi-terabyte geophysical datasets in an interactive setting with remote webcam capabilities. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163(11): 2455 ~ 2466
- [22] Kadlec BJ, Yuen DA, Sere OD. Webcam for remote visualization and scanning of Giga- to Tera-byte size data sets on large-scale display devices. In: APEC Cooperation for Earthquake Simulation (ACES). 2004
- [23] LCSE: <http://www.lcse.umn.edu/>
- [24] Pavlakos CJ, Heermann PD. Issues and Architectures in large-scale data visualization. In: The Visualization Handbook, Elsevier Academic Press, 2005. 551 ~ 567
- [25] Wilhelms J, Gelder AV. Octrees for faster isosurface generation. *ACM Trans on Graphics*, 1992, 11(3): 201 ~ 207
- [26] Shen HW. Isosurface extraction in time varying fields using a temporal hierarchical index tree. In: Proceeding of IEEE Visualization '98. 1998. 59 ~ 166
- [27] Bordoloi UD, Shen HW. Space efficient fast isosurface extraction for large datasets. In: Proceeding of IEEE Visualization '03. 2003. 201 ~ 205
- [28] Vrolijk B, Post FH. Interactive out-of-core isosurface visualization in time-varying data sets. *Computers & Graphics*, 2006, 30(2): 265 ~ 276
- [29] Vrolijk B, Botha CP, Post FH. Fast time-dependent isosurface extraction and rendering. In: *Proceedings of the 20th Spring Conference on Computer Graphics*. 2004
- [30] Mackerras P. A fast parallel marching cubes implementation on the Fujitsu ap1000. *Technical Report TR-CS-92-10*. Australian National Univ, 1992
- [31] Miguet S, Nico JM. A load-balanced parallel implementation of marching-cubes algorithm. In: Proceedings of High Performance Computing Symposium '95. 1995. 229 ~ 239
- [32] Hansen CD, Hinker P. Massively parallel isosurface extraction. In: Proceedings of the 3rd Conference on Visualization '92. 1992. 77 ~ 83
- [33] Zhang XY, Bajaj C, Ramachandran V. Parallel and out-of-core view-dependent isocontour visualization using random data distribution. In: Proceedings of the symposium on Data Visualisation 2002. 2002
- [34] Zhang HJ, Newman TS. Efficient parallel out-of-core isosurface extraction. In: Proceedings of the 2003 IEEE Symposium on Parallel and Large-Data Visualization and Graphics. 2003. 3
- [35] Sun XM, Huang ZH, Cai X, et al. Parallel and distributed visualization technology and application. Beijing: Defense Industry Press, 2001
孙晓梅, 黄朝晖, 蔡 勋, 等. 并行与分布式可视化技术及应用. 北京: 国防工业出版社, 2001
- [36] Shen HW, Johnson CR. Differential volume rendering: A fast volume visualization technique for flow animation. In: Proceedings of the IEEE Visualization '94 Conference. 1994. 180 ~ 187
- [37] Ma KL, Smith D, Shih MY, et al. Efficient encoding and rendering of time-varying volume data. Technical Report ICASE Report No. 98 ~ 22. Institute for Computer Graphics Applications in Science and Engineering, 1998
- [38] Shen HW, Chiang LJ, Ma KL. A fast volume rendering algorithm for time-varying fields using a time-space partitioning (TSP) tree. In: proceeding of Visualization '99. 1999. 371 ~ 377
- [39] Westermann R. Compression time rendering of time-resolved volume data. In: Proceedings of the Visualization '95 Conference. 1995. 168 ~ 174
- [40] Bong-Soo S, Bajaj C, Siddavanahalli V. Feature based volumetric video compression for interactive playback. In: Proceedings of Volume

Visualization and Graphics 2002. 2002. 89 ~ 96

- [41] Ma KL, Lum EB. Techniques for visualizing time-varying volume data. In: *The Visualization of Handbook*. Elsevier Academic Press, 2005. 511 ~ 531
- [42] Shi JY, Jin ZF. A survey on parallel polygon rendering. *Journal of Computer-Aid Design and Computer Graphics*, 2003, 15(6): 637 ~ 642 (in Chinese)
石教英, 金哲凡. 并行多边形绘制技术综述. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, 15(6): 637 ~ 642
- [43] McCormick P, Aherns J. Large-scale data visualization and rendering: A problem-driven approach. *The Visualization Handbook*. Elsevier Academic Press, 2005. 533 ~ 549
- [44] Molnar S, Cox M, Ellsworth D, *et al.* A sorting classification of parallel rendering. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1994, 14(4): 23 ~ 32
- [45] Samanta R, Funkhouser T, Li K, *et al.* Hybrid sort-first and sort-last parallel rendering with a cluster of PCs. In: *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/ EUROGRAPHI- CS workshop on Graphics hardware*. 2000. 97 ~ 108
- [46] Cohen RE. High performance computing requirements for the computational solid earth sciences. *Workshop on Computational Geoinformatics*, 2004
- [47] 姚继峰. 大屏幕并行显示技术综述. Beijing: The Conference for Graduated Students, 2002
- [48] McKenzie DP, Robert J, Weiss NO. Convection in the earth's mantle. *Tectonophysics*, 1973, 19: 89 ~ 103
- [49] Jason MW. Deep mantle convection plumes and plate motions. *AAPG Bulletin*, 1972, 56: 203 ~ 213
- [50] Hager BH, O'Connell RJ. A simple global model of plate dynamics and mantle convection. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(Issue B6): 4843 ~ 4867
- [51] Reuteler DM, Balachandrar S, Honda S, *et al.* Three-dimensional mantle convection: effects of depth-dependent properties and multiple phase transitions. *Int Video J of Eng Research*, 1993, 3: 47 ~ 63
- [52] Conrad CP, Hager BH. Mantle convection with strong subduction zones. *Geophysical Journal International*, 2001, 144(2): 271 ~ 288
- [53] Monnereau M, Quéré S. Spherical shell models of mantle convection with tectonic plates. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 184(3 ~ 4): 578 ~ 587
- [54] Erlebacher G, Yuen, DA, Dubuffet F. Case study: visualization and analysis of high Rayleigh number——3D convection in the earth's mantle. In: *Proceedings of the Conference on Visualization '02*. 2002
- [55] Kameyama M. ACuTEM: A multigrid-based mantle convection simulation code and its optimization to the Earth Simulator. *Journal of the Earth Simulator*, 2005, 4: 2 ~ 10
- [56] Kameyama M, Kageyama A, Sato T. Multigrid iterative algorithm using pseudo-compressibility for three-dimensional mantle convection with strongly variable viscosity. *J Comput Phys*, 2005, 206(1): 162 ~ 181
- [57] Bao H, Bielak J, Ghattas O, *et al.* Earthquake ground motion modeling on parallel computers. In: *Supercomputing '96*. Pittsburgh, Pennsylvania, 1996
- [58] Hong Y, Li LM, Luo SX. 3D visualization of seismic data based on volume rendering. *Computing Techniques For Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 29(1): 23 ~ 25 (in Chinese)
洪源, 李录明, 罗省贤. 基于体绘制技术的三维地震数据可视化. *物探化探计算技术*, 2007, 29(1): 23 ~ 25
- [59] Lei B, Ma ZT. 3D seismic data volume visualization. *Computing Techniques For Geophysical and Geochemical Exploration*, 2004, 24(3): 206 ~ 210 (in Chinese)
雷兵, 马在田. 三维地震数据的体绘制. *物探化探计算技术*, 2004, 24(3): 206 ~ 210
- [60] Yu H, Ma KL, Welling J. A parallel visualization pipeline for terascale earthquake simulations. In: *Proceedings of the 2004 ACM/IEEE Conference on Supercomputing*. 2004
- [61] Annunziato A, Best C. GRC-EC report: The tsunami event analysis and model. 2005

The research progress of large-scale data parallel visualization in geosciences

CHEN Shao-Lin ZHANG Huai SHI Yao-Lin

(Laboratory of Computational Geodynamics, Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Visualizing and analyzing the explosive datasets coming from observation and simulation in the geosciences faces great challenge. Using parallel visualization technique to visualize the large-scale of geosciences data is an effective solution. We discuss the usage of large-scale of data parallel visualization in the geosciences in the paper. We firstly introduce the several parts of large-scale of data parallel visualization, then characterize the features of large-scale data of geosciences, at last, we discuss the usage of parallel visualization of large-scale data in the visualizing simulation results of mantle convection, seismic wave propagation and tsunami.

Key words large-scale data, parallel visualization, mantle convection, seismic wave propagation, tsunami