

河南理工大学博士基金项目(B2009-23)资助
河南省重点学科“测绘科学与技术”资助

海量三维地形数据 实时绘制技术研究

靳海亮 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

河南理工大学博士基金项目(B2009—23)资助
河南省重点学科“测绘科学与技术”资助

海量三维地形数据 实时绘制技术研究

靳海亮 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书对海量三维地形数据实时绘制技术进行了较深入的研究,主要研究内容包括:LOD模型的原理与经典的地形 LOD 模型;符合人眼视觉原理的地形简化准则;海量地形数据的多分辨率表示和实时连续绘制;大规模地形数据组织与动态调度策略;地形纹理数据的多分辨率四叉树的纹理组织及映射方法;可视点的三维坐标获取和三维地形空间分析。

本书反映了海量三维地形数据实时绘制理论的最新进展和实现技术,可作为地理信息系统、测绘工程、地理、地质、计算机软件以及相关专业的教师、科研人员、研究生和高年级学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

海量三维地形数据实时绘制技术研究/靳海亮著. —徐州:中国矿业大学出版社,2009.3

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0311 - 3

I. 海… II. 靳… III. 三维—地形测量 IV. P217-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 049613 号

书 名 海量三维地形数据实时绘制技术研究

著 者 靳海亮

责任编辑 潘俊成 周 红

责任校对 李 敬

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 徐州中矿大印发科技有限公司排版中心

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 787×960 1/16 印张 9.5 字数 276 千字

版次印次 2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

定 价 36.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

三维地理信息系统作为“数字地球”的一项重要支撑技术,由于能够产生三维效果而受到人们的广泛关注,近年来其已成为地学领域的研究热点。地形作为地理信息的载体,它的三维可视化是三维地理信息系统发挥功能的关键,可视化效果直接影响着三维地理信息系统功能的实现。地形三维实时绘制作作为完善三维地理信息系统空间分析处理能力等的关键技术,已经迅速发展起来,是近年来人们研究的热点之一。

随着科学技术的不断进步和卫星遥感技术及数字摄影测量技术的发展,空间数据获取的数量正以前所未有的速度增长,从数字城市到数字中国再到数字地球,大范围、海量地形数据的廉价获取已成为可能。这些由上百万或更多三角形面片表示的各种地形模型,虽满足了人们对地形真实性所提出的越来越高的要求,但由于超大规模的模型远远超出了当前计算机硬件的数据处理能力,无法一次性载入内存,因此要想达到交互式的实时绘制是一件非常困难的事情,对计算机的性能提出了新的挑战。如何实现海量地形数据的实时绘制已经成为地形可视化领域的一个瓶颈问题,是目前人们广泛关注和研究的热点课题。

本书在已有的研究成果的基础上对海量地形数据实时绘制的关键技术进行了较为深入的研究,全书共分8章。第1章主要介绍海量地形数据实时绘制问题的研究背景、当前的研究现状和本书的研究内容。第2章全面讨论了LOD模型的原理和几种经典的地形LOD模型,探讨了海量地形数据的绘制途径。第3章探讨了基于四叉树结构的多分辨率地形模型,并对海量地形简化准则及可视化算法进行了研究。第4章对大规模地形数据组织与动态调度策略进行了研究。第5章对大规模地形纹理实时映射技术进行了研究。第6章提出了可视点的三维坐标获取算法,并探讨了三维地形空间分析算法。第7章对自行开发的三维地形实时可视化系统(3DTerrain)进行了介绍。第8章是本书的结论和展望部分。

值本书出版之际,首先感谢导师高井祥教授对我的指导、培养和帮助,本书的研究工作是在导师的悉心指导下完成的。导师严谨的治学态度、渊博的知识和对事业的执著追求将永远鼓舞和激励着我在科学的道路上永攀高峰。

在本书的编写过程中,得到了中国矿业大学环境与测绘学院邓喀中教授、张

书毕教授、杜培军教授,河南理工大学测绘与国土信息工程学院郭增长教授的大力支持和帮助!还得到了王坚博士、孙久运博士、李丽华硕士、陈建硕士、姚丽慧硕士对我的关心帮助!在此一并向他们表示诚挚的谢意。

本书参阅了大量的国内外资料,书中引用的他人成果作者均尽量注明,但难免存在漏注情况,见此均敬请谅解!也对这些作者和单位表示感谢!

本著作的出版还得到了河南理工大学博士基金项目“海量三维地形数据组织和调度方法研究”(B2009—23)和河南省重点学科“测绘科学与技术”的资助。

由于时间较为仓促,加之笔者水平所限,书中错误在所难免,敬请广大读者批评指正。

著 者

2008 年 11 月于河南理工大学

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状和发展趋势	2
1.2.1 三维地形简化技术的研究进展	3
1.2.2 数据调度与三维地形简化相结合的处理技术研究进展	7
1.2.3 地形纹理数据组织与应用技术研究进展	8
1.3 本书的研究意义	9
1.4 本书的研究内容和结构安排	11
1.4.1 本书的研究内容	11
1.4.2 本书的结构安排	12
2 海量地形数据实时绘制的实现原理	14
2.1 当前三维可视化的方法概述	14
2.2 细节层次简化技术的原理与方法	15
2.2.1 细节层次简化技术的原理	15
2.2.2 细节层次简化技术的分类	16
2.2.3 经典地形细节层次算法分析	21
2.3 海量地形三维可视化的可行思路和途径	25
2.3.1 海量地形三维可视化的可行思路	25
2.3.2 海量地形三维可视化的途径	26
3 海量地形建模及可视化算法	29
3.1 引言	29
3.2 基于四叉树的规则格网多分辨率地形模型	30
3.2.1 多分辨率地形表示	30
3.2.2 四叉树数据结构	31
3.2.3 四叉树地形结构构造	31
3.2.4 四叉树地形动态多分辨率表示	34

3.3	地形四叉树节点评价测度研究	36
3.3.1	地形粗糙度标准	36
3.3.2	视距标准	38
3.3.3	节点评价测度	39
3.4	一种新的基于视觉原理的地形简化准则	39
3.4.1	人眼视觉模型	39
3.4.2	基于视觉原理的地形评价准则	40
3.5	地形节点间裂缝的处理算法	43
3.5.1	消除裂缝的方法概述	44
3.5.2	顾及顶点间约束关系的裂缝消除方法	44
3.6	地形绘制时的优化技术	47
3.6.1	三角形条带的应用	47
3.6.2	视觉光滑处理技术	49
3.7	实验结果及其分析	51
3.8	本章小结	52
4	大规模地形数据组织与动态调度	56
4.1	大规模地形数据处理技术概述	56
4.1.1	累进网格的层次模型	57
4.1.2	交叉存取四叉树模型	58
4.1.3	基于细节层次的聚类技术	58
4.2	大规模地形数据组织研究	60
4.2.1	数据组织方法概述	60
4.2.2	数据结构与存储方式	61
4.2.3	大规模地形数据分割与索引研究	62
4.3	大规模三维地形数据调度研究	65
4.3.1	基本的动态调度策略	66
4.3.2	多线程处理机制的应用	68
4.3.3	数据调度中的预取策略研究	71
4.4	消除相邻地形块间的裂缝	74
4.5	实验结果及其分析	75
4.6	本章小结	76

5 大规模纹理实时映射	77
5.1 纹理映射的主要方法	78
5.2 大规模地形纹理映射的解决方案	81
5.3 地形纹理四叉树结构研究	82
5.3.1 纹理影像分块	83
5.3.2 地形纹理四叉树表示	83
5.3.3 多分辨率纹理四叉树	85
5.4 纹理四叉树的关键技术	86
5.4.1 多分辨率纹理生成算法	86
5.4.2 纹理四叉树结点的选取	87
5.4.3 多分辨率纹理四叉树的实时装载	89
5.4.4 纹理边界处理	89
5.5 实验结果	90
5.6 本章小结	91
6 三维地形空间查询分析算法	93
6.1 三维地形可见点的判别与坐标查询	93
6.1.1 传统的点坐标查询算法	94
6.1.2 一种新的高效的点坐标查询算法	95
6.2 基本地形因子计算	98
6.2.1 坡度/坡向及其变化率计算	98
6.2.2 任意两点间剖面的生成和剖面积计算	99
6.2.3 不规则区域表面积和周长计算	101
6.2.4 两点间距离量算	103
6.2.5 土石方量计算	103
6.3 两点间的通视分析	105
6.4 洪水淹没分析	107
6.4.1 DEM 数据的预处理	107
6.4.2 无源淹没分析	108
6.5 本章小结	109
7 三维地形实时可视化系统——3DTerrain	110
7.1 3DTerrain 的系统结构	110
7.2 开发环境与系统功能	111

7.2.1	3DTerrain 的开发环境	111
7.2.2	3DTerrain 的主要功能	111
7.3	三维动态漫游	113
7.3.1	漫游路径的设定	113
7.3.2	场景自动漫游	115
7.4	地形场景的输出	115
7.4.1	三维地形的图像文件输出	116
7.4.2	三维地形的视频文件输出	117
7.4.3	三维地形的实时联机打印	118
7.5	3DTerrain 应用实例	119
7.5.1	三维地形可视化演示	119
7.5.2	交互查询和空间分析演示	120
7.5.3	三维漫游可视化演示	120
7.6	本章小结	122
8	结束语	125
8.1	总结	125
8.2	下一步工作展望	126
参考文献		127

1 绪 论

1.1 引 言

地形与人类的生产、生活息息相关,是人类社会赖以生存和从事一切实践活动的根基。在人类文明发展的历史长河中,人们从来没有停止过对自身生活环境(地球表面)的探索研究,总是想方设法寻找一种既方便直观又准确的方法来表达实际的地形地貌,从而为不同的应用领域如土木工程、矿山工程、土地规划、道路设计、农业及军事等提供有效的服务。在人们的日常生活中,地图一直是人们表达和传递地表信息的主要手段。地图是按照一定的数学法则,运用符号系统概括地将地面上各种自然和社会现象表示在平面上的图形,它具有三个基本特征:数学法则性、制图综合性和内容符号性,地图的最大优点在于具有可量测性(徐青,2000)。

然而,从本质上讲,地图是对客观存在的特征和变化规则的一种科学的概括(综合)和抽象,其客观世界是丰富多彩、千姿百态的三维空间实体。这种二维介质平面图与所表示的三维现实世界的复杂物体之间有着不可逾越的鸿沟。因此地图所固有的、抽象的、平面的表达方式已经远远不能满足人们的现实需要。另一方面,从形式上看,地图运用了一套专门的符号和文字(一种特殊的语言即地图语言)来表示地形地物,用这种抽象的地图语言表示现实地形以及空间要素,对于大多数不具备专用地图学知识的使用者来说,是难以理解和接受的。长期以来,地图学家一直致力于地形图的立体表示,试图寻求一种既能符合人们的视觉生理习惯,又能恢复地形真实世界的表示方法,并先后发明了写景法(Scenography)、地貌晕渲法(Hill Shading)、分层设色法(Layer Tinting)等。但是这些方法由于缺乏数学上的严密性和绘制上的复杂性等而使其应用受到了很大的限制。因此,根据测绘学等学科理论,借助先进的计算机技术,生成具有高度真实感和可量测性的地形三维模型,实现三维地形表面的逼真还原,无疑是一项富有建设性和开创性的工作(徐青,2000)。

近年来,随着电子技术、计算机科学、计算机图形学、计算几何、图论、分形几何及现代数学理论的发展,将现实世界的三维特征用计算机进行真实的再现已

成为现实,三维地形的可视化技术也发展成为计算机图形学的一个分支,它的应用已涉及地理信息系统、虚拟现实、娱乐游戏等众多领域。

在三维图形绘制中,三维地形绘制是近年来的研究热点之一,在科学可视化和虚拟现实技术中具有非常重要的地位,被广泛地应用于战场仿真、三维游戏、飞行模拟、电子地图、地形漫游等方面。随着遥感技术、卫星技术的发展,使得获取高分辨率的数字几何高程数据以及影像纹理数据成为可能,因此建立国家级乃至全球性的空间信息可视化系统已经成为各个国家及国际组织的共识。

目前,建立国家级乃至全球性的空间信息可视化系统已经成为各个国家及国际组织所关注的问题,最具代表性的是美国提出的“数字地球(Digital Earth)”战略。“数字地球”最早是美国前副总统戈尔于1998年1月31日在美国加利福尼亚科学中心发表的题为《数字地球:二十一世纪认识地球的方式》的演讲中提出来的,戈尔在他的文章里指出“我们需要一个‘数字地球’,即一种可以嵌入海量空间数据的、多分辨率的和三维的地球”表示,可以在其上添加许多与我们所处的星球有关的数据”。通常认为数字地球主要由三部分组成:①不同分辨率尺度下的地球三维可视化的浏览界面;②网络化的空间信息世界,为用户提供公用信息和商业信息;③多源信息的集成和显示机制,就是融合和利用现有的多源信息,并将其“嵌入”数字地球的框架,进行“三维的描述”和智能化的网络虚拟分析(陆艳青,2003)。“数字地球”概念的提出将虚拟现实系统所包含的信息量推向了极致,对现有的虚拟现实技术提出了挑战,特别是在地形绘制方面,问题更加突出。

随着现代测绘技术的发展,空间数据获取的数量正以前所未有的速度增长,从数字城市到数字中国再到数字地球,地形数据呈几何级数增长,大范围、海量地形数据的廉价获取已成为可能。如何针对海量地形数据实现三维快速漫游,已成为相关领域的一个研究难点。

1.2 国内外研究现状和发展趋势

地形可视化的概念是在20世纪60年代以后随着地理信息系统的出现而逐渐形成的,是一门以研究数字地形模型(Digital Terrain Model,DTM)或数字高程域(Digital Height Field)的显示、简化、仿真等内容的学科。它的应用涉及地理信息系统(GIS)、虚拟与现实(VR)、地形的穿越飞行(flythrough)等领域。

迄今为止,三维地形的可视化技术分为两种,一种是面绘制技术,另一种是体绘制技术。由于体绘制技术具有离散及计算和存贮量大的特性,对硬件的性能要求很高,所以目前地形的实时绘制主要采用面绘制技术。基于面绘制的三

维地形建模技术研究得比较早,到目前为止基本上可以归纳为三类:分形地景仿真、曲面拟合地形仿真和基于真实地形数据的多边形模拟(杜金莲,2003)。

分形地景仿真是利用分形几何所具有的细节无限和统计自相似的典型特征,通过递归算法使复杂景物可用简单的规则来生成(王桥,1997)。它的优点是数据量小,缺点是算法的复杂度高,且没有与实际所需的真实地形、地貌相联系,因此在应用上受到限制。

曲面拟合地形仿真是根据控制点选择合适的曲面对地形进行拟合,其优点是保证了相邻面的斜率连续性,缺点是曲面方程及参数不易控制,且生成的地形过于光滑,真实感较差(齐敏,2000)。这种模型目前应用很少。

基于真实地形数据的多边形模拟是指利用真实地形的采样点,通过插值、剖分等方法建立多边形集合模拟地形表面(李志林,2001)。数字高程模型 DEM 便是典型的也是目前基于真实采样点的三维地表模型的主要表示方法,是目前人们对三维地形实时显示算法进行研究的基础。

由于分形仿真和曲面拟合均有各种限制,而基于真实地形数据的建模由于能通过剖分方法生成连续的多边形网格,有利于计算机绘制,同时生成的地形也具有高度的真实感,所以它便成为人们描述三维地形的主要手段。基于真实地形数据的可视化模型可分为规则网格模型(Grid)、不规则三角网模型(TIN)和混合数据模型三种。

然而,虽然多边形模拟具有线性近似的良好数学特性并与硬件固化了的绘图方式相辅相成,但是当地形数据量大时,多边形数量会急剧增加,模型就会变得复杂,即使是最高端的图形工作站也不能满足实时绘制的要求。怎样通过建立合适的模型和算法,在所期望的硬件性能和实现硬件水平之间搭起一座桥梁,是解决大规模三维地形实时显示重要且必然的途径(杜金莲,2003),国内外的许多学者已将目光聚焦到这一领域。目前,对于大规模三维地形实时绘制的研究主要集中在以下三个关键技术:三维地形简化技术、海量地形数据动态调度与地形简化相结合的处理技术和地形纹理数据的组织与应用技术。

1.2.1 三维地形简化技术的研究进展

所谓三维地形的简化是指在保持模型对描述地形表面一定逼真度和精确度的前提下,尽量减少模型的复杂度,取得模型复杂度与地形逼真度和精确度之间的折中,简化的结果为用少量的图元,如点、线、面等表达原始地形。

在模型简化中一个重要的技术就是细节层次模型(LOD, Levels of Detail),它的思想是为每一个物体建立多个详细程度不同的模型,使用时根据条件进行选择。LOD 模型技术改变了“模型越精细图像质量越好”的片面观点,通过对场

景复杂度和图形系统进行综合评定,用一定的算法为各物体选择适当的细节模型,从而使图形显示在保证恒定帧速率的前提下最大程度地提高视觉效果。LOD 模型技术最早是由 Clark 提出的,1976 年 Clark 在其论文中提出用不同的分辨率或细节层次表示场景中不同物体的思想(Clark,1976),这一思想为多边形简化技术提供了明确的方向,以后的多边形简化技术基本上都沿着这一方向发展(Cohen,1998;Erikson,1996;Michael,1997),三维地形的简化技术更是以此为基础进入了空前繁荣阶段。自多细节层次思想的提出到现在,三维地形简化技术的研究发展大致经历了三个阶段:离散 LOD 模型阶段、连续 LOD 模型阶段和多分辨率模型阶段。

1.2.1.1 离散 LOD 模型

离散 LOD 模型的原理是:对每一原始模型建立几个不同逼近精度的几何模型,每个模型均保留一定的细节层次,当从近处观察时采用精细模型,从远处观察时采用粗糙模型。一直到 20 世纪 90 年代前半期,研究工作主要集中在离散 LOD 模型的生成及实时显示方面。其采用的方法是离线生成多个离散的不同细节层次的模型,早期生成 LOD 模型的基本方法有两种:简化方法(simplification)和细化方法(refinement)。实时显示时,根据当时的条件选用,这些条件包括地景整体距视点的距离远近、投影后地形在图像空间所占像素面积的大小以及光照强弱等。交互过程中,对于每个特定的场景,只需选择一个合适的 LOD 模型进行渲染即可。由于这种模型在不同的细节层次上拓扑结构不同,因此有一个突出的缺点,即在进行模型切换时会产生明显的突跳感,同时由于内存的有限性,生成的 LOD 模型的个数必然受到限制,这一特性决定了这种模型无法满足高质量真实感图形的要求。

1.2.1.2 连续 LOD 模型

20 世纪 90 年代中期出现了连续 LOD 模型。为了从根本上解决离散 LOD 模型技术上的缺陷,1996 年 Lindstrom 提出连续 LOD 模型的概念(Lindstrom,1996)。连续 LOD 模型是一种紧凑的模型表示方法,它能在运行时通过迭代运算从这个表示中产生任意多个不同分辨率的模型,从而实现模型的实时连续显示,从这个意义上讲,该模型也被称为动态简化模型。Lindstrom 将网格拆散成长方形的块,通过网格的四叉树划分表示块,并以新三角形与旧三角形对的误差在图像空间的投影为标准,设计了一种高效率的算法来实现三角形对自下而上的合并,从而实时生成与视点相关的连续多细节层次模型,满足了视觉的要求,但在处理块间的“裂缝”时方法过分复杂,计算量太大而影响实时效果。另外,尽管这种模型无论在表示上还是在实时显示上都比离散 LOD 模型科学得多,但 Lindstrom 算法在不同细节层次切换时仍然无法消除图像的突跳现象。1998 年

Erlanger-Nuremberg 大学的 Stephan Rottger 采用几何渐变(Geomorphing)技术来实现光滑模型的转化,取得了一定的成果(Rottger,1998)。

这类方法的典型代表还有 Hoppe 于 1996 年提出的累进网格(Progressive Meshes,PM)法(Hoppe,1996),这种算法通过一系列的边折叠(Edge Collapse),将原始数据网格简化为一个简单的基网格,这样就可以根据其逆操作边分裂(Edge Split)将细节逐渐增加到基网格上。它的优点是可以抽取多个连续的细节层次,支持数据的压缩存储和累进传输以及几何数据的重建。Hoppe 认为,优化准则限制得太严格可能导致优化操作的失败,因此提出了一个相对宽松的条件,这样将不可避免地引入额外的三角形,并且在这些三角形所形成的近似区域上,尚没有一个误差指标被用来评测优化三角形网格与原始网格间的近似程度,因而失去了对优化过程的某种控制能力,这是 PM 算法存在的一个问题。对于 PM 算法,还有许多改进方法,如 William 将边折叠/分裂扩展到点分裂/合并等处理,但这仍是对三维物体进行基于快速局部简化的处理技术(William,1996)。我国学者卢成文在对连续 LOD 模型的实现上也提出了基于对象对应关系的 LOD 模型连续过渡方法(卢成文,2001)。

尽管人们在连续 LOD 模型上提出了许多改进和创新,但该模型只是适用于物体或小范围地形的简化,对于大范围的地形仍不能产生令人满意的效果,原因是模型的建模机理与现实生活中人们观察大规模景物的物理原理还有很大的差距。该模型的特点是同一模型的各处具有相同的细节层次,而实际地形一般场面宏大,绵延不断,人们在观察时只有那些距离视点近的或变化曲率大(有明显的轮廓线)的区域才需要较高的细节层次表达,以保证一定的形状精度和真实感,而离得远或没有明显轮廓的区域用粗糙的细节层次表示即可。因此,为了进一步减少数据量,考虑用不同的分辨率来表示地景的不同区域。为此人们开始研究用不同的细节层次来构造一幅画面,这就是目前人们普遍关注的三维地形多分辨率实时显示模型。

1.2.1.3 多分辨率模型

将不同区域具有不同细节层次的模型称为“多分辨率模型”(Multi-resolution model),也称视相关的(View-dependent)动态简化模型。基本思想是用不同 LOD 构造或近似表示地形场景,距视点距离不同的区域局部分辨率(细节层次水平)可以不同,并且随着视点的移动作相应的变化;而对于依据地表特征变化的模型,在突变和缓变处采用不同的细节层次。这样即可在没有视觉损失的前提下,加快大规模地形的渲染速度,并且满足所需的图像质量要求。

这种模型是 Michael 和 Heckbert 于 1994 年首次提出的(Michael,1994),而人们开始注意并真正对其进行研究却是在 1996 年之后。尽管该模型出现的

时间不长,却吸引了许多学者对其进行研究。国内外的一些学者和研究机构已提出许多算法,目前多分辨率模型已成为三维地形可视化的主要技术之一。

Berg、Klein、陈刚、余明等学者构造了与视点相关的 TIN 结构(Berg,1995; Klein,1996;陈刚,2003;余明,2004),当视点改变时依误差控制标准运用 Delaunay 规则重构 TIN 模型,因此任何局部的修改都要影响到全局,降低构网速度,影响实时性效果。Luebke 等也提出了一种基于顶点树(Vertex Tree)的针对任意几何模型的简化算法(Luebke,1997)。Hoppe 也将自己提出的 PM 模型应用到地形的多分辨率表示方面——VDPM(View-Dependent Progressive Mesh)(Hoppe,1997,1998),并且提供了与视点相关的支持。为了避免三角剖分给全局网格带来影响,VDPM 将地形预先分成大小相等的若干块,在块的内部实施 PM 算法。由于不能解决拼接问题,块与块之间只好保持不简化,这在一定程度上影响了简化的效率。一些学者在此基础上又提出了基于点删除和三角形折叠的渐进网格生成算法(张建保,1999;蒲浩,2000;许妙忠,2003)。Michael 使用二次误差测度来控制表面网格的简化(Michael,1997),此算法采用顶点对折叠这一基本简化操作,可得到高质量的近似模型。孔国梁提出了一种基于面删除操作的视相关 LOD 模型简化方法(孔国梁,2005),每次删除一个或多个面片;由删除面片的外轮廓形成了一个单连通域,并将此区域重新构建成三角网。Duchaineauy 等人也对 Lindstrom 算法进行改进(Duchaineauy,1997),提出了他们的“实时优化自适应网格”(Real-Time Optimally Adapting Meshes,ROAM)算法,用二叉树来组织三角形,并且利用合并队列和分割队列来协同完成对格网的合并与分割操作,直到达到希望的细节等级,实现了地形的快速绘制,然而 ROAM 算法的程序实现比较复杂。有不少学者在上述算法的基础上做了一些改进。例如,王宏武(2000)、谭兵(2003)等利用四叉树来对归一化地形数据进行预处理,能对参与绘制的三角面数目进行精确的控制,但不能对大规模数据进行处理;淮永建、许妙忠等抛弃了 Duchaineauy 的根据视点计算误差的方法,改为根据误差函数对每个顶点预先计算一个包围球,当视点进入球内时,就加入该顶点,否则就不加入,各个顶点包围球之间可以构成层次关系(淮永建,2002;许妙忠,2004);苏虎等采用一种基于四叉树的自顶向下的细分来实时生成地形连续 LOD 模型(苏虎,2003)。此外,小波变换也被用于多分辨率模型(Gross,1995; Maria,2003)。

尽管目前算法很多,但这些算法普遍存在的一个问题是简化准则所含信息量单一,从而使得简化结果不理想,容易造成地形的失真。另外有些算法本身过于复杂,计算量大,难于实现,比如 VDPM 算法和 ROAM 算法结构复杂,不易实施。

1.2.2 数据调度与三维地形简化相结合的处理技术研究进展

随着卫星遥感等数据采集手段的不断增强,人们获取的地理数据越来越多,数据精度也越来越高。这种拥有大数据量的同时也促进了许多新应用的不断涌现,如战场环境仿真、虚拟旅游、城市景观规划、防洪减灾等,特别是在“数字地球”这一概念的倡导下,人们可能还要对地球进行无缝漫游。这些应用领域都要求对大规模(如一个景点、一个区域、一个城市乃至一个国家、整个地球)的地形数据进行三维动态仿真。动态仿真不但要求图形正确、真实感强,还要求图形能快速移动,要达到这样的效果,要求计算机既要有较快的计算能力又要有大量的内存空间,因此对计算机的硬件要求非常高。尽管近年来计算机的硬件发展很快,CPU 的处理速度越来越高,内存的价格也不再是高不可攀,图形硬件加速器也在不断发展,但我们同时也应该看到实际应用中所需的数据往往比硬件可以显示的数据量大一个或几个数量级,而且应用模型的复杂程度往往超过当前图形工作站的实际处理能力,更不用说一台普通的 PC 机。当数据集大到不能一次装入内存时,单纯的多边形简化技术也无济于事。解决问题的唯一途径就是采用数据调度策略,将多边形简化与数据动态调度相结合以实现大规模地形的实时仿真(杜金莲,2003)。

自 1998 年以来,人们便开始对数据调度技术进行研究,取得了一些研究成果(Rottger, 1998; Pajarola, 1998; Klein, 1998; Zhao Youbing, 2001; Cignoni, 2003; 杨崇源, 2001; 陈斌, 2004; 张立强, 2004)。不同的绘制算法也根据自己的特点和实现中的各种因素构造不同的处理模型,如 Hoppe 提出的基于分块的层次累进网格模型(Hoppe, 1998), Lindstrom 采用四叉树及三角形二叉树进行大规模地形的绘制方法(Lindstrom, 2001, 2002)及 Xiaohong Bao 提出的基于空间聚类技术的四叉树模型(Xiaohong Bao, 2002, 2003, 2004)等,这些模型或根据绘制的需要进行数据调度或先将数据调入再进行多分辨率的组织,以实现大规模地形的实时绘制。陈刚等学者提出基于二叉树的地形场景进行实时绘制,同时对大规模地形数据的实时动态渲染也进行了深入的研究(陈刚, 2000; 王璐锦, 2002; 王源, 2004; 曾俊, 2004; 金宝轩, 2004)。戴晨光、李惠、廖巍等学者都描述了一些大规模地形的快速渲染方法(涂超, 2002; 王建宇, 2002; 肖金城, 2002; 廖巍, 2003; Thatcher, 2003; 戴晨光, 2004, 2005; 李惠, 2004; 邢伟, 2004),基本思想是将地形数据分块组织,对每一块数据都预先生成几种不同细节层次的网格,存储在外存储介质上。运行时刻,选择当前可见地形块的适当的细节层次导入内存,然后进行渲染工作。这种方法的优点是易于实现,并且可以预先把各细节层次组织成显示列表,加快渲染速度。但缺点也是明显的,比如需要采用较多的

存储空间,在两种细节层次间切换时会产生视觉上的跳跃效果,虽然这些可以采用一些相关技术来弥补,如在不同细节层次之间进行插值、减小相邻细节层次差别等,但是实现起来比较复杂。

目前,对大规模地形数据的处理方法还处于研究阶段,所以还没有一个成熟的、可普遍适用的方法。虽然人们也提出了不同的处理模型,但这些模型仍不完善,有的由于数据结构过于庞大而造成系统性能不佳,在实际应用中达不到预期的效果,有的还处于理论研究状态,还没有应用到实际工程中(杜金莲,2003)。因此,如何将大规模地形数据的模型简化、动态调度和多分辨率表示生成有机地结合起来,从而实现大规模地形的高质量仿真仍然是国内外学者正努力攻关的课题,也是本书对其进行研究的原因所在。

1.2.3 地形纹理数据组织与应用技术研究进展

地形地貌的真实再现是三维地形可视化的最高境界,在研究三维地形可视化的同时,如何增加视觉上的真实效果一直是人们努力追求的目标。然而由于地貌的变化万千,植被多种多样,进行真实感地形的绘制是一个非常困难的研究课题。在绘制系统中,纹理映射可以不通过增加物体的复杂性而使得场景细节显得更加丰富,使得场景更真实。但大规模的地形纹理,数据量巨大,如同几何数据一样,其纹理数据也超出了内存的容量。地形纹理数据的处理和使用已越来越成为制约仿真效果的瓶颈,因此也引起了人们的普遍关注。

Silicon Graphics Infinite Reality 第一个实现了 Clipmap 技术。此技术大大发展了 Mipmap,它支持无限大纹理,但目前 Clipmap 技术只在高端的图形工作站上运行,对于普通低端用户,还无法利用 Clipmap 技术来实时交互地显示大规模纹理。

David Cline 采用纹理四叉树来表示大规模纹理(David Cline,2001),每个纹理采用固定分辨率表示,不同层次的纹理表示覆盖的区域不同,在几何绘制时,需要根据绘制的多边形的大小选取四叉树中合适的纹理。若没有合适的纹理,则暂选取粗糙的纹理,并把该纹理插入一个队列,进行统一的调度。这样,虽然利用了视域的连贯性,但是可能无法满足当前所需要的显示精度,影响显示质量,并且对每一个纹理结点没有采用 Mipmap 方式,由于多边形不可能刚好对应于纹理四叉树中的某个层次,从而导致纹理走样现象。在数据的调度上,该方法也没有利用四叉树父子结点之间的重复信息来进行数据的累进调度。Dollner 在地形绘制中采用几何和纹理的多分辨绘制(Dollner,2000),在几何上采用离散的层次细节树,同样对纹理也建立层次树,在绘制时,根据屏幕的显示要求,选取不同层次的几何和纹理进行绘制。Blow 在高细节的地形绘制中也采用纹理