

DAGUIMO DIXING SHISHI DONGTAI
DUOFENBIANLÜ XIANSHI GUANJIAN SUANFA YANJIU

大规模地形实时动态 多分辨率显示关键算法研究

张俊峰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

大规模地形实时动态 多分辨率显示关键算法研究

张俊峰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书对大规模地形实时动态多分辨率显示关键算法进行了系统研究。主要内容包括：绪论，地形三维可视化与加速绘制理论与方法，基于规则格网的地形实时动态显示算法研究，基于 3D_DP 算法和 Quad_TIN 的地形实时动态显示算法研究，地形实时动态显示中的数据组织和可见性加速算法研究，总结与展望。

本书可供可视化技术研究和应用人员使用。

图书在版编目（CIP）数据

大规模地形实时动态多分辨率显示关键算法研究 /
张俊峰著. — 北京：中国水利水电出版社，2015.4
ISBN 978-7-5170-3068-3

I. ①大… II. ①张… III. ①地形观测—立体视觉—
研究 IV. ①TV697.2

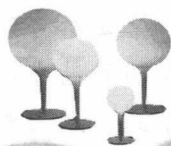
中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第065944号

书 名	大规模地形实时动态多分辨率显示关键算法研究
作 者	张俊峰 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 7.25印张 138千字
版 次	2015年4月第1版 2015年4月第1次印刷
印 数	001—500册
定 价	25.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言



随着数字地球和全球信息网格概念的相继提出，建立大规模虚拟现实场景的研究越来越被学者所关注；随着计算机技术的飞速发展，20 世纪 80 年代到 90 年代初国内外形成了对虚拟现实的研究热潮。从根本上说，虚拟现实技术是一种对人类在自然环境中的听、看、动等行为的高度逼真模拟，以其关键技术所支撑的多维空间信息使我们产生一种高度逼真的现实感受，实时性和真实感是当前虚拟现实面对的最重要挑战。

地形是人类赖以生存和进行各种生产实践活动的根基，在传统的地形展示中，多采用二维地图向人们表达和展示我们生活的地理环境，然而基于二维平面的抽象地图与三维世界的复杂物体之间存在着较大的鸿沟，地图所固有的平面化表达方式在某些方面已不能满足人们的现实需求；另外在表现形式上也较为专业，对于一些并不具备专业地图学知识的使用者来说较难理解，因此如何从测绘学、地理学等专业领域出发，充分利用当前的计算机图形学技术，采用虚拟现实的方式构建出具有高度仿真以及可互操作的地形三维模型，给人们提供一种直观逼真的使用体验，无疑是一项具有建设性和创造性的工作。

当前主流的地形三维动态显示算法多采用静态细节层次模型实现精度和速度的统一，但存在着模拟切换跳跃感强、显示层次较少等问题；尽管也有连续 LOD 和多分辨率 LOD 算法，但有实时细节判断复杂、难以适用于大规模地形的弊端；地形显示的数据基础多为规则格网，数据冗余度大，不易准确表达地形细部；虽然不规则采样点冗余度低，便于按照地形特征表示高程特征，但三角网的不规则性和拓扑

复杂性使其难以应用于地形的动态多分辨率显示；另外加速算法的效率不高一直是尽可能减少数据量并提高显示速度的瓶颈，如何与 LOD 算法结构巧妙结合以实现判断精度和显示速度的平衡是亟待解决的问题。基于此，本书重点研究了地形的实时动态多分辨率 LOD 算法和可视化加速技术，从 DEM 的多种表达形式入手，通过构建合理的数据结构，结合预处理、场景分块、可见性剔除、内外存调度、细节层次等多种算法实时生成了高质量的仿真地形。

由于研究问题的复杂性和研究时间的紧迫性，该研究仍然是初步的，在某些方面还不太成熟，有待在以后的研究中逐步深入、完善。

作者

2014.12

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 虚拟现实简介	1
1.2 VR 面临的最重要挑战	2
1.3 图形生成的加速技术	3
1.4 研究意义	5
1.5 技术路线及组织	7
第 2 章 地形三维可视化与加速绘制理论与方法	10
2.1 地理信息多维可视化	10
2.2 三维地形的生成方式和可视化模型	11
2.2.1 三维地形的生成方式	12
2.2.2 三维地形的可视化模型	14
2.3 细节层次模型	17
2.3.1 细节层次模型的基本原理	17
2.3.2 细节层次模型的分类	18
2.3.3 基于 RSG 和 TIN 的细节层次模型算法对比分析	20
2.4 实时可见性加速算法	21
2.4.1 可见性计算概述	22
2.4.2 通用可见性加速算法	23
2.5 本章小结	25
第 3 章 基于规则格网的地形实时动态显示算法研究	26
3.1 引言	26
3.2 相关算法回顾与分析	26
3.2.1 基于 RSG 的静态 LOD 算法	26
3.2.2 基于 RSG 的动态多分辨率 LOD 算法	28
3.3 RSG 的树结构与相应的层次模型	31
3.3.1 层次四叉树模型	31
3.3.2 等腰直角二叉树模型	32

3.3.3 层次树中的裂隙问题	32
3.4 四叉树结点数据结构及算法流程	34
3.5 规则格网的数据预处理	36
3.5.1 自上而下的四叉树分割	36
3.5.2 自下而上的参数计算	37
3.6 结点评价体系	37
3.6.1 地形的保守性几何误差	38
3.6.2 基于视觉保持的屏幕投影误差	39
3.7 RSG 的动态 LOD 实时绘制	41
3.7.1 四叉树结点的孤立分割和裂隙消除	42
3.7.2 三角形条带的快速绘制	44
3.8 实验	46
3.8.1 实验 1: 相同控制因子下的三组地形数据动态表达	46
3.8.2 实验 2: 不同控制因子下的地形实时表达	47
3.8.3 实验 3: 基于规则格网实时动态显示的不同算法对比	48
3.9 本章小结	49
第 4 章 基于 3D_DP 算法和 Quad_TIN 的地形实时动态显示算法研究	50
4.1 引言	50
4.2 相关算法回顾与分析	51
4.2.1 不规则采样点的相对重要性判断	51
4.2.2 基于 TIN 的静态 LOD 算法	53
4.2.3 基于 TIN 的连续 LOD 算法	55
4.3 地图综合中的 3D_DP 算法	57
4.3.1 DP 算法的基本原理	58
4.3.2 三维特征点的提取	59
4.4 Quad_TIN 的数据结构及算法流程	61
4.5 不规则采样点的预处理	63
4.5.1 基于 3D_DP 的不规则采样点重要性排序	64
4.5.2 不规则采样点的四叉树层次分割	64
4.6 结点评价体系	66
4.6.1 模拟误差的计算	66
4.6.2 基于视点的模拟误差	67
4.7 不规则采样点的动态 LOD 实时绘制	68
4.7.1 误差控制下的采样点孤立分割	68

4.7.2 裂隙消除和三角网的快速绘制	70
4.8 实验	70
4.8.1 实验 1: 基于 3D_DP 和 Quad_TIN 的三组采样点数据动态表达	71
4.8.2 实验 2: 不同控制因子下的地形实时表达对比分析	72
4.8.3 实验 3: 基于规则格网和不规则采样点的实时动态显示算法对比	73
4.9 本章小结	75
第 5 章 地形实时动态显示中的数据组织和可见性加速算法研究	76
5.1 大规模数据的空间分块及组织	76
5.1.1 大规模数据的空间分块	77
5.1.2 地形块的数据组织	78
5.2 视域裁剪	80
5.2.1 视域裁剪的基本原理	80
5.2.2 基于结点包围球和平头视锥体的视域裁剪	82
5.3 基于层叠式山脊线的遮挡剔除	84
5.3.1 地面单点的遮挡剔除算法	85
5.3.2 四叉树结点的遮挡剔除	88
5.4 大规模地形的实时多线程调度	90
5.5 实验	92
5.5.1 实验 1: 基于 RSG 的大规模地形三维动态表达	93
5.5.2 实验 2: 基于不规则采样点的大规模地形三维动态表达	94
5.6 本章小结	96
第 6 章 总结与展望	97
6.1 研究总结	97
6.2 研究展望	98
参考文献	100



第 1 章 绪 论

1.1 虚拟现实简介

地球空间信息、纳米技术以及生物技术被称为 21 世纪的三大新兴技术，它们对人类社会的影响日益广泛和深远，其中，地球空间信息被认为是人类认识身边现实世界和探索未知空间的基本信息源。随着“数字地球”（digital earth）和“全球信息网格”（global information grid）概念的相继提出，建立大规模虚拟现实场景的研究越来越被学者所关注；随着计算机技术的飞速发展，20 世纪 80 年代到 90 年代初国内外形成了对虚拟现实的研究热潮。

虚拟现实（virtual reality, VR）技术是一种新的人机交互技术，它通过头盔式的三维立体显示器、数据手套、数据衣、三维鼠标、立体耳机等使人能完全沉浸于计算机生成创造的一种特殊三维图形环境，并且人可以操作控制三维图形环境，实现特殊的目的。多感知性（multi-sensory，视觉、听觉、触觉、运动等）、沉浸感（immersion）、交互性（interaction）、自主感（autonomy）是虚拟现实技术的四个重要特征（邬伦，2001），其最大特点是参与者与计算机生成的虚拟系统之间的交互性，也就是说能够用人类自然的技能和感知与虚拟现实中的对象进行交互。VR 的核心技术是场景和物体的实景仿真，即将真实的世界模拟出来并进行实时、逼真的展示，因其结合了逼真的虚拟场景和物体、真实的人机接口设备以及实时反应处理系统，因此可以用于各种仿真器或者训练器，军事中的战争模拟就是一个典型的例子（李胜，2004）。

应该说，虚拟现实技术并不是一个新的概念，早在计算机发展之初的 1965 年，图形学之父 Ivan Sutherland 就在 IFIP 会议上以 *The Ultimate Display* 为题提出了一个富有挑战性的计算机图形学研究新课题。他指出，计算机的屏幕应该充当观察虚拟世界的“窗口”，在该窗口中的世界应该看起来、听起来、动起来都是真实的，这一思想奠定了虚拟现实研究的基础。1968 年，他发表了题为 *A Head-Mounted 3D Display* 的文章，从设计原理和设计思路等角度对头盔式三维显示设备进行了深入讨论，同时也给出了头盔式显示装置的设计原型，这也成为了三维立体显示技术的奠基性成果。



虚拟现实技术在上世纪 60—80 年代发展很缓慢,直到 80 年代后期,由于显示技术的飞速发展已经能够满足视觉耦合系统的性能要求,VR 技术才得以快速发展。在这一时期,液晶显示技术的发展使廉价的头盔式显示器的生产称为可能(许妙忠,2003)。VR 系统大致分为三种类型:桌面式、沉浸式和分布式。桌面式 VR 系统需要事先设定一个虚拟观察者(视点)的位置,并采用一般的显示器和立体显示技术,其分辨率比较高,价格较为便宜,通常应用于建筑设计、工程辅助设计等领域;沉浸式 VR 系统利用头盔显示器将人类的视觉、听觉等感官封闭在一个虚拟环境中,使人产生身临其境的感觉;分布式 VR 系统则是在沉浸式 VR 系统的基础上,通过网络将各个用户联系起来,在同一个虚拟空间中,产生一种更强烈的视觉感受。由于桌面式 VR 系统不需要额外的昂贵辅助设备,价格相对比较低廉,因此当前最为普及的还是以桌面显示器为主的虚拟现实系统。

虚拟现实系统为我们提供了一种最自然的与计算机通信的方法,它很好地将人类数以万年进化而来的三维空间认知能力与空间的计算机三维表达相匹配,并逐渐成为人类认识和改造世界的强有力武器(Pajarola,1997)。作为一种新的技术增长点,虚拟现实受到了世界范围内许多学者的广泛关注和研究,为了掌握 VR 这一技术制高点,欧美各国和各大公司都投入巨额资金用于该领域的研究,并在很多领域取得了辉煌成果,比如在数据和模型的可视化、医疗救护、航空航天、军事推演、自动化控制和远程操作、工程设计、城市规划等方面。可以预见,随着计算机技术的飞速发展和数据获取手段的多样化,虚拟现实技术将进一步展现其非凡的科技魅力。

1.2 VR 面临的最重要挑战

从根本上说,虚拟现实技术是一种对人类在自然环境中的听、看、动等行为的高度逼真模拟,以其关键技术所支撑的多维空间信息使我们产生一种高度逼真的现实感受。一般来说,人类获取外界信息的 80%来源于视觉,因此视觉通道是虚拟现实系统中最需要优先考虑的重要方面(福赛恩,2004)。人的视觉系统对于任何不满足光学和物理学定律的运动场景是非常敏感和严格的,任何不能很好同步的视频帧列都有可能给视觉系统带来明显的刺激,从而导致虚拟环境的失真。因此,对于虚拟现实来说,如何确保图形画面的视觉效果与真实的活动一致是需要优先考虑的问题,也是产生真实感的必要条件。以计算机为基础的虚拟现实仿真应用特别强调的是图形生成的实时性和质量的高保真性。对于人类的视觉系统来说,二维的平面图画是永远不如三维的立体景象吸引人的,同时,可以交互操作的动态场景又比静态的场景更加有趣生动,这种特性对于人类的感知系统



如此,对计算机的相对显示也是如此。我们知道,为了达到实时响应和显示的效果,电影的播放帧速为 24 帧/s,电视为 30 帧/s,但是电影和电视都是事先录制好的,在播放时并不需要人与场景的交互作用,而在虚拟现实中的每一帧图形都不是事先录制好或者事先绘制好的,它主要根据视点位置以及一些相应的判断因素来确定和计算每一帧需要显示的图像,也可以说在虚拟现实环境中,每一帧图形都是基于交互作用的图像显示,其生成都是实时的,必须考虑很多外部的因素,因此虚拟现实技术不仅对图形的质量有较高的要求,对图像的生成速度也同样有很高的限制。

一般来说,衡量虚拟环境优劣有两个主要的指标,一是动态性;二是交互延迟性。动态性指的是每 1s 的图形帧数,常规的自然动态特性要求每秒需要生成和显示 30 帧的图画,至少也不能低于 10 帧,否则将产生不连续感和跳跃感(Bryson, 1993)。交互延迟性指的是虚拟系统对人的交互动作的反应时间,对于人的交互动作,如飞行模拟中的方向控制、速度控制、高度控制等,系统必须能够立即发生反应,并产生实时的图形和场景。为了保证视觉效果,反应的时间延迟不应该大于 0.1s,最多不能大于 0.25s,否则在长时间的使用中,容易使人产生疲劳、烦躁甚至恶心等感觉,导致虚拟现实的失真。动态性和交互性都依赖于图形产生的速度和质量,一方面每帧图形的生成时间应该控制在 30~50ms,对于交互性来说,还须考虑交互输入和相应的处理时间;另一方面,为了保证虚拟现实的真实性,在速度一定的情况下,还必须保证显示的效果与真实场景尽可能一致。因此可以得出结论:对于计算机图形学的研究来说,实时性和真实感是当前虚拟现实面对的最重要挑战。

1.3 图形生成的加速技术

相应地,在当前的硬件条件下,图形实时显示的重要程度要高于图形的真实感。图形生成的速度主要受图形处理软硬件体系结构的控制,特别是图形硬件加速器的处理速度,因此高性能的图形工作站和并行的图形处理器以及软件架构是实现图形实时生成的重要保证,然而即使计算机速度飞速发展,当前的图形工作站的工作性能与虚拟显示的高要求仍是有较大差距的,而且随着计算机图形学应用领域的不断拓展,人们对虚拟现实的实时性和真实感的要求也越来越高,而这些复杂的模型处理要求往往是要超过当前图形工作站的实时处理能力的,因此,考虑到虚拟现实对场景复杂度的几乎没有限制的要求,在当前的硬件条件下,如何从软件角度入手,加快虚拟环境的生成,是提高虚拟现实实用性的主要目标。

目前图形绘制中的硬件流水线一般划分为几何数据处理和栅格绘制两个阶



段, 三维图形显示流程如图 1.1 所示。从处理器开始遍历整个虚拟场景到最终的图形界面, 虚拟环境的图形处理所耗费的时间大致包括处理器遍历时间、几何数据处理时间和绘制输出时间, 最终虚拟显示所需要的图形生成时间也就由这三个方面组成的流水线中共同消耗的时间决定。几何数据处理时间主要是由几何数据的顶点总数决定的, 绘制输出时间则是由绘制的三角面片所覆盖的像素数目决定的。要降低这三个方面的时间消耗, 除了利用图形硬件本身的性能以外, 最主要的还是要从算法角度出发, 考虑如何最大限度地减少几何变换阶段的所需时间、图形特性的设置时间和绘制输出时间等。

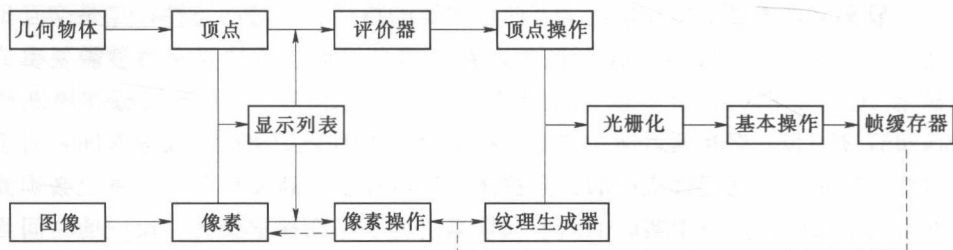


图 1.1 三维图形显示流程 (据 OpenGL 绘制流程)

当前图形生成的加速技术主要有以下几种:

(1) 并行或分布式计算。虚拟现实系统可以允许多个用户同时加入到当前的虚拟网络中, 这也是 VR 系统的一种典型体系结构, 这种类似于客户机/服务器的虚拟网络分布式系统可以将各种任务分散在局域网或者广域网中的多个工作站中, 因此它不仅可以充分利用各种已有的分布资源, 而且便于远程计算机的加入, 从而允许多个用户共享虚拟现实环境。需要指出的是, 虽然这种架构有众多优点, 但是不可否认该手段需要涉及各个分布式的计算机本身系统不尽相同的问题, 而且成本也比较高, 因此难以大规模推广和普及利用。

(2) 脱机预处理。脱机预处理是当前减轻计算机实时处理量的最常用方法之一。VR 系统是一个多任务的实时模拟系统, 因此非常有必要将大量的可以预先计算的参数提前得到并保存在相应的数据结构中或外存中, 以便于实时显示阶段的直接调取和使用, 比如全局的光照模型计算、相关的动态模拟参数计算等。

(3) 基于图像的绘制。基于图像的绘制也是一种较常采用的方法, 它不需要知道三维模型的几何信息, 而是采用图形学的真实感方法或者数码相机事先拍摄多帧图像, 然后插值生成新的过渡图像。然而, 这种算法一般在改变视点的过程中, 场景是保持不变的, 而且如果想获取高质量的场景, 就需要用较多人力拍摄大量的图像, 并保存在内存中。

(4) 场景分块计算和显示。对于一定的视点参数来说, 场景中的某些区域是



不可见的,因此可以预先将场景划分为多个子场景,各个子场景之间是无缝拼接的。比如将一个大的建筑物按照内部的房间划分为各个子部分等。另外,当观察值在某个房间时,仅能看到该房间内的场景以及透过门窗可见的其他场景,从而可有效地减少需要绘制的三角面数量,从而大大减小了场景的复杂程度。不过,这个方法对于封闭的空间非常有效,对于开放的空间效果不是特别明显。

(5) 可见性剔除。可见性剔除是与观察者的视点位置密切相关的,它使系统仅需要显示观察者可以看到的场景。当由于其他物体的遮挡,观察者仅能看到当前场景的很小一部分时,系统也只需要绘制相应的场景部分,这样就可以大大减小输出地三角面数据,但是当观察者所处的场景较为开阔、遮挡物较少时,这种方法也起不到什么作用,甚至由于进行可见性剔除的大量无用计算而导致帧速降低。

(6) 细节层次模型。从计算机图形学的角度考虑,在理想情况下,场景的绘制时间与三维模型的复杂程度是没有关系的,而只与需要绘制的三维场景最终在屏幕上的投影像素数目相关。如果采用传统的处处相同的分辨率绘制算法,对三维场景的各个部分在屏幕投影后的贡献大小一视同仁考虑,必将增加需要绘制的三角形数据,降低了渲染速度。一般来说,对于远离视点的物体,很多细小部分经过透视投影缩小后是不可见的或者是可以忽略的,因此即使不绘制这部分物体对场景的显示质量也不会有任何影响。基于此,可以根据场景各部分的几何性质、纹理特性、光照特性等进行有区别的多分辨率绘制,即根据当前物体的几何误差大小或者在屏幕上的投影面积大小选择应该采用的分辨率级别,使在一定的视点条件下绘制的场景效果与采用最精细分辨率绘制出来的原始场景效果完全一致或者在一定的误差范围之内,通过该方法,在保持视觉效果的前提下,可以大大减小需要绘制的三角形数目。

对比以上几种主要的加速技术,当前最常使用的也是最有效的是场景分块计算和显示、可见性剔除以及细节层次模型这三种方法,其中细节层次模型的自动快速生成以及可见性加速绘制技术已经成为非常有研究前景的方向,受到了国内外学者的广泛关注。

1.4 研究意义

随着信息技术的飞速发展,快速高效地获取高分辨率的空间数据以及纹理影像数据已经成为可能,建立大规模的空间信息可视化系统成为大势所趋。早在1998年,美国前副总统戈尔就提出了数字地球的构想,在他的题为《数字地球——认识21世纪我们的星球》的讲话中系统阐述了数字地球的概念,随后引起



了全世界各国的广泛关注,在随后的很长时间内,很多国家和地区都开展了与数字地球相关的研究和探索,我国政府也从国家战略高度出发将数字地球列为 21 世纪的战略目标之一。数字地球试图在全球范围内建立一个按照地理位置将各种信息组织、融合在一起的 VR 系统,该系统包括地形、河流、建筑,甚至经济、教育、文化等信息,它使用户方便地以沉浸的方式交互灵活地浏览自己感兴趣的信息。

数字地球的建设涉及大规模计算、海量存储、宽带网络、航天遥感、空间互操作等支撑技术,它主要以虚拟现实、地理信息系统和互联网为基础,在该虚拟环境中,通过 GIS 组织海量的空间信息,同时基于互联网构建一个全球性的信息系统框架,实现资源共享,各地的人们通过视、听等感官身临其境地浏览自己所需要的信息。数字地球强调对地球的真实描述,在实现这一宏伟计划的过程中,面向数字地球的虚拟现实系统需要大量的现代技术的支持,主要包括:海量数据的组织、多层次场景的绘制引擎、地形的多分辨率表达、嵌入式的网络模型等,其中大规模地形的可视化是实现数字地球虚拟系统的关键之一。

地形是人类赖以生存和进行各种生产实践活动的根基,在传统的地形展示中,多采用二维地图向人们表达和展示我们生活的地理环境。地图是按照一定的数学法则,运用符号系统将地面上主要的自然和社会现象抽象概括后形成的图形,它具有数学法则性、制图综合性和内容符号性三个重要特征,其最大的优点在于可量测性。地图从本质上说是对客观存在的地物特征和变化规律的一种科学的综合和抽象表达,然而我们生活的客观世界是丰富多彩的三维空间,因此基于二维平面的抽象地图与三维世界的复杂物体之间存在着较大的鸿沟,地图所固有的平面化表达方式在某些方面已不能满足人们的现实需求;另外在表现形式上,地图采用了专门的地图语言来表达现实物体以及它们之间的相互关系,这对于一些并不具备专业地图学知识的使用者来说是较难理解的,因此如何从测绘学、地理学等专业领域出发,充分利用当前的计算机图形学技术,采用虚拟现实的方式构建出具有高度仿真以及可互操作的地形三维模型,给人们提供一种直观逼真的使用体验,无疑是一项具有建设性和创造性的工作。

大规模地形场景的三维可视化是一项富有挑战性的课题,对于大范围的地形特征来说,一方面要保持其逼真的视觉效果,另一方面又要有较高的帧速,即使当前高速发展的硬件条件下,也是难以满足这二者要求的,因此最主要的还是要从软件角度出发,从模型的生成和简化算法方面解决这一难题,其中建立地形的多分辨率表达模型是一个非常重要的环节。在地理信息系统中,地形多采用数字高程模型(digital elevation model, DEM)这一高度场模型来表达,因此如何从 DEM 的多种表达形式入手,通过构建合理的数据结构,结合预处理、场景分



块、可见性剔除、内外存调度、细节层次等多种算法实时生成高质量的仿真地形，是本节的研究重点。

1.5 技术路线及组织

本研究围绕数字高程模型，从真实数据的角度研究和探讨了大规模地形的三维实时动态显示算法，重点是地形多分辨率模型的构建和实时加速算法的设计，在对比已有算法的基础上，优化数据结构，以生成具有较快速度和较高真实感的实时动态三维地形。本研究技术路线如图 1.2 所示，具体内容将在后面几章详细阐述。文章主要内容分为以下几个部分：

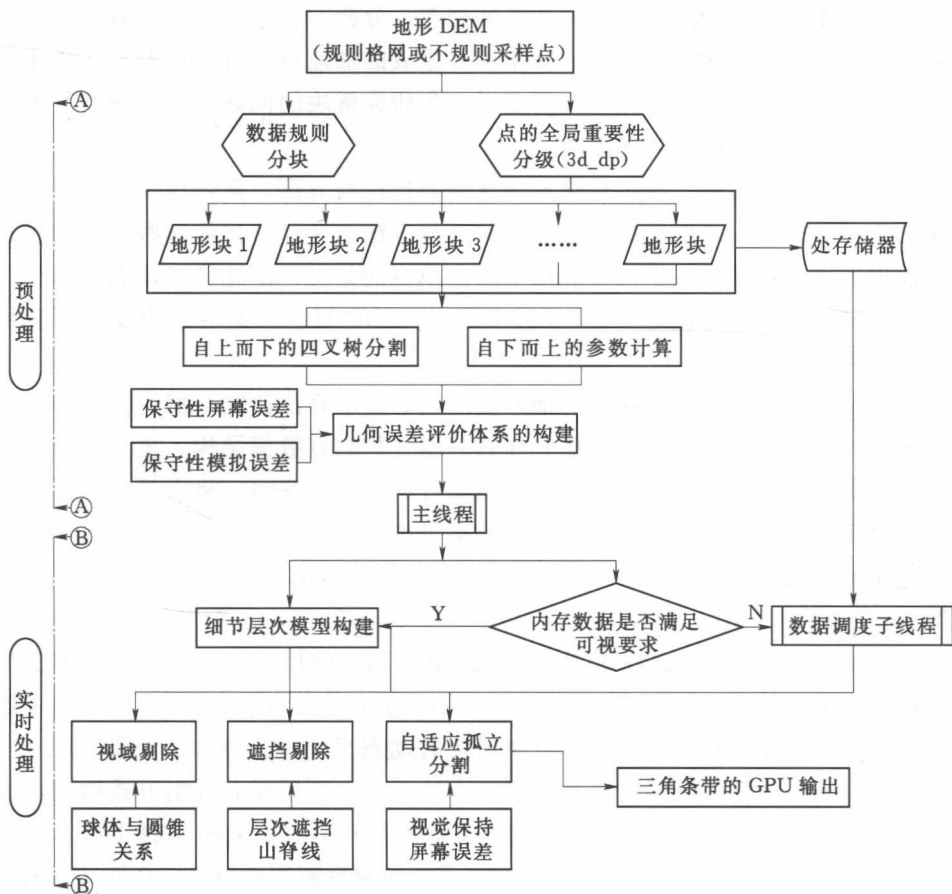


图 1.2 本研究的技术路线

(1) 探讨地形显示的基本理论和传统的简化算法。



(2) 基于地形的规则格网数据, 提出视点相关的保守性屏幕误差控制下的层次四叉树多分辨率表示模型, 并采用添加拆分点的方式消除层次间裂隙, 实现实时动态显示。

(3) 探讨如何将地图综合中的三维 Douglas-Peucker 算法引入地形简化中, 分析其优势, 并对不规则采样点从全局重要性角度排序分级。

(4) 针对不规则三角网模型表达地形的不足, 研究将层次四叉树与不规则采样点结合, 充分利用二者的优势, 实现地形的高质量三维显示。

(5) 探讨地形的加速绘制算法, 综合运用场景分块、视域裁剪、山脊线遮挡和内外存多线程调度等方法提高分析计算的速度并减少模型的绘制数据量。

全书共分为 6 章, 介绍了取得的研究成果。

(1) 第 1 章 绪论。介绍虚拟现实的概念, 分析在数字环境下计算机图形学面临的实时性和真实感两大挑战; 介绍图形生成的加速技术方法以及相关技术的国内外研究现状, 并讨论虚拟现实需要进一步研究解决的问题; 介绍研究目的和意义; 确定研究内容和全文框架。

(2) 第 2 章 地形三维可视化与加速绘制理论与方法。阐述地理信息多维可视化的手段和方法, 总结三维地形生成的三种方法, 并分析比较这些方法的优缺点; 提出三维可视化的数据模型和细节层次模型的分类, 论述实时动态显示的原理与方法, 着重研究对比基于 RSG 和 TIN 的 LOD 算法; 最后给出实时可见性加速技术的方法。

(3) 第 3 章 基于规则格网的地形实时动态显示算法研究。探讨规则格网的树结构和相应的层次模型, 通过建立高效的四叉树结点数据结构, 提出采用自上而下的层次分割和自下而上的参数计算相结合的预处理策略, 将大量工作提前完成; 研究实时动态显示阶段的通过改进的基于视点的保守性屏幕误差结点评价体系快速判断 LOD 级别的方法; 最后利用添加的拆分点消除不同 LOD 层次之间的裂隙。

(4) 第 4 章 基于 3D_DP 算法和 Quad_TIN 的地形实时动态显示算法研究。讨论将地貌综合的三维 Douglas-Peucker 方法引入地形 LOD 中的思路, 通过构建 Quad_TIN 模型, 提出一种地形实时动态显示的新算法。介绍 3D_DP 算法在不规则采样点的全局重要性分级的方法; 提出利用孤立分割方式构建四叉树空间索引, 从而巧妙结合规则格网的四叉树结构和不规则采样点的 TIN 结构在虚拟表达中的优势, 并消除了结点间依赖关系; 研究视距和模拟误差在四叉树的绘制层次和插入采样点的顺序及数量上的作用, 最后添加拆分点消除结点间裂隙。

(5) 第 5 章 地形实时动态显示中的数据组织和可见性加速算法研究。研究基于 RSG 和不规则采样点的大规模地形的分块策略, 并据此提出采用结点包围



球和平头视锥体间相互关系以确定视域裁剪的策略；分析基于层叠式山脊线的离线遮挡剔除算法，利用保守估计确保算法效率；在实时漫游中，讨论基于外存储器的增量更新准则，运用多线程机制保证了地形分块之间的快速调度和卸载。

(6) 第6章 总结与展望。总结了研究成果和创新点，并为下一步的研究方向及内容进行展望。