

大区域地形可视化技术的研究

谭兵¹⁾ 徐青^{1),2)} 周杨¹⁾

¹⁾信息工程大学测绘学院, 郑州 450052) ²⁾(浙江大学 CAD/CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要 近年来,地形场景的实时绘制已受到人们越来越广泛的关注,目前已经提出的一系列场景加速绘制算法,虽然在不同的应用场合也取得了一定的效果,但都存在着局限性,尚不能满足大区域地形环境的实时高速绘制的要求,而与其密切相关的技术主要涉及到地形多分辨率表示、海量地形数据和纹理数据的分页管理、地形和纹理数据的 LOD 控制、地形和纹理数据的快速存取和更新等。为了能够对地形场景进行实时绘制,在对大区域地形数据管理和实时绘制技术进行研究和试验的基础上,对构建视相关动态多分辨率模型的方法进行了改进,实现了地形模型多分辨率表示与视相关的有机结合,并提出了一种高效的场景数据存取方法,进而实现了一个整合自适应三角网剖分、地形场景数据分页管理和动态更新等相关技术于一体的地形三维可视化系统,试验结果表明,该算法能够实时绘制地形场景,且质量较好。

关键词 计算机图形学(520·6030) 数字高程模型 细节层次 多分辨率模型 视相关

中图分类号: TP391.41 P208 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)05-0578-07

The Research of Large Scale Terrain Visualization

TAN bing¹⁾, XU qing^{1),2)}, ZHOU yang¹⁾

¹⁾(Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052)

²⁾(State Key Laboratory of CAD & CG., Zhejiang University, Huangzhou 310027)

Abstract Real-time rendering of landscape has attracted growing interest in recent years. The existent accelerating methods of 3D terrain rendering have made their contributions to terrain visualization, but, they have themselves drawback, especially for large scale terrain visualization at interactive rate. Large scale terrain visualization contains the following contents: terrain multi-resolution representation, terrain and texture paging, terrain and texture LOD control and efficient data store and retrieve. Based on the research about management and real-time rendering of large scale terrain data, one method of generating multi-resolution terrain model is improved, which combines the representation of terrain multi-resolution model with view-dependent control. A new method of storing and retrieving terrain data by quadtree is proposed. Furthermore, an all-in-one terrain visualization system which integrates adaptive triangulation, dynamic scene paging and data updating is realized. At last, some experiments have been presented to verify the work done in this paper.

Keywords Digital elevation model(DEM), Level of detail(LOD), Multi-resolution model, View dependent

0 引言

随着科学技术的不断进步和计算机视觉、科学计算可视化、遥感技术、计算机图形学等学科的发展,由航空航天摄影测量或由其他测量手段获取地形数据来生成具有高细节层次的三维地形模型已经十分普遍。如计算机视觉中,由激光扫描设备产生的 Range

数据;摄影测量中,由摄影测量手段获取的地形数据,以及计算机图形学中的细分或参数化曲面等。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,但由于这些数据几乎很少从绘制(Rendering)效率方面考虑进行优化,其在进行地形三维显示时,就对计算机的性能提出了新的挑战,因此,为更好地发挥图形硬件的绘制效率,在不显著降低视觉效果的情况下,

基金项目:国家 863 基金项目(2002AA783050)

收稿日期:2002-03-25;改回日期:2002-10-17

必须尽可能多地对地形场景进行简化。在地形场景可视化方面,一种提高地形场景的绘制效率的有效途径就是对可见区的不同区域用不同的细节层次(LOD, levels of detail)来进行绘制,即对离视点越远的区域用较低的分辨率来进行绘制;而对离视点越近的区域用较高的分辨率来进行绘制,以便在对误差进行适当控制的情况下,能显著地提高地形场景的绘制效率,同时又能较好地保持地形场景绘制的效果。此外,还有基于图象的绘制算法,但由于受人机交互方面灵活性的限制,所以目前使用最广泛的,还是基于视相关的地形场景多分辨率模型。

在目前的任何一个地形可视化系统中,地形多分辨率模型都是其核心组成部分,而且模型的好坏将直接影响到系统功能的成败,但对大区域地形场景来说,由于受到图形设备的限制,不可能一次就将全部地形数据都交给图形设备进行绘制,即使采用多细节层次方法也是如此。例如,对于用规则格网表示的,包含 $100\,000 \times 100\,000$ 采样点的地形区域来说,如果每一采样点的高程值都用16位字节进行表示,则在不包含纹理数据的情况下,数据量可达20GB,如果按图1的方法进行绘制,则图形API一次需要绘制的三角形可达2000亿个,即使目前最先进的图形工作站也只能望而却步,在可预见的将来也无法满足这样的要求。因此,对于一个适用于大区域地形可视化的可视化系统来说,除了需考虑作为其核心结构的视相关(View-dependent)多分辨率模型外,还应包括对庞大的地形数据和纹理数据的分页管理、地形和纹理数据的LOD控制、地形和纹理数据的快速存取和更新等技术,以使地形动态显示时的每一帧都能随着视点、视景物参数的变化,而只对场景中的一部分可见区域进行绘制。由于数字地面模型通常用不规则三角网和规则格网进行表示,因此可将多分辨率模型相应地归结为基于三角网的多分辨率模型^[1-5]和基于规则格网的多分辨率模

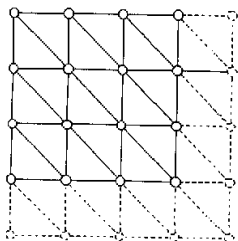


图1 规则格网的三角形剖分

型^[6-8]两类。

在基于三角网的多分辨率模型方面,DeFloriani首先提出了用层次结构来描述地形的方^[4],但由于层次三角形中,细长三角形不可避免地存在,故地形的拟合精度不高。后来又出现了^[2]对三角网进行预处理的方法,该方法首先记录模型中的模型信息,即一个由误差控制的地形节点列表,在实时绘制过程中,利用这些已知的信息进行分裂和归并,以避免复杂的三角网重建过程,如唐泽圣等提出的有序递减网格实时动态绘制算法^[2]。此外,还有利用几何形态变形方法(Geomorphs)来实现不同分辨率地形三角网间切换的方法,如Hoppe提出的算法^[5]。但由于三角网多分辨率模型的几何关系比较复杂,不便于数据的实时存取,因此文献^[2]、^[4]、^[7]都是一次性将数据全部载入内存,这显然不适合大区域地形数据的可视化。

在基于规则格网的多分辨率层次模型方面,主要是采用二叉树或四叉树这样的数据结构来对数据进行组织。王宏武等利用四叉树来对归一化格网数据进行预处理^[9],其在实时绘制阶段是根据误差阈值对树进行自上而下的遍历,其虽能对参与绘制的三角面数目进行精确的控制,但不能对大区域数据进行处理;Duchaineau提出了一种自适应实时格网优化算法(ROAM)^[7],并实现了基于二叉树的快速地形绘制;Lindstrom等也提出了相似的算法^[10];Renato又对地形数据的数据分页管理和实时存取技术进行了有益的研究^[8],但只给出了一个小范围地形数据的实验结果。陈刚提出了基于二叉树和四叉树的地形场景实时多分辨率绘制方法^[3],同时对大区域地形数据的实时可视化也进行了深入的研究。

总的说来,目前该领域研究最多、也最有前景的仍然是基于规则格网数据的地形LOD模型。本文对地形可视化中的大区域地形管理和实时绘制等关键技术也进行了研究和实验,不仅实现了一个完整的适合大区域地形可视化的地形三维可视化系统——ReSDISS-3D,并给出了相关的实验结果。

1 地形场景多分辨率模型

1.1 地形四叉树

一般地说,按规则格网存储的DEM数据,可以表示为一个二维数组DEM[nMaxRow][nMaxCol],其中,mMaxRow和nMaxCol分别表

示地形场景在纬度和经度方向上的采样点数,由于其与树数据结构具有天然的一致性,从而可以用二叉树数据结构对其进行表示:对DEM数据作不同精度的等间距格网采样,采样结果即构成二叉树的一层节点.树中的每一个节点都覆盖地形场景中一块相应的矩形区域,其根节点覆盖了整个地形区域,涉及地形场景的4个角顶点,并构成地形场景的一个最粗略表示,而其4个子节点则构成了其父节点的四分之一覆盖,并构成对地形场景的次粗略表示,通过节点依次向下遍历即可形成地形场景的最精细表达.对于相邻的两层来说,上一层的节点具有更大的采样误差,绘制质量也比下一层的节点差,但由于其涉及的采样点较少,因此用其来表示地形场景时,具有更高的绘制效率,这在交互式地形浏览中,具有十分重要的意义.

1.2 误差的度量

地形模型的多分辨率表示,就是在考虑地形场景本身起伏和视相关参数的前提下,动态选择一最优节点集来形成地形场景的完整覆盖,从而在地形场景的绘制效率和绘制质量间保持一个良好的平衡.地形模型中最优节点选择的基本依据是节点误差,下面给出一个综合考虑地形场景本身起伏特征与视点相依赖的节点误差评价准则:

首先对地形节点的静态误差进行定义.设 $h(x, y)$ 为地形的高程函数, $A(P)$ 为节点定义的平均误差平面,定义节点 C_i 的静态误差 $S(C_i)$ 为节点到平均误差平面的距离,其中,平均误差平面定义为以节点为中心,使邻域内节点具有最小拟合误差的平面.由于节点的静态误差只与地形场景本身的起伏情况有关,因此可以在数据预处理阶段完成其处理过程.

根据透视变换的原理^[2],长度为 l 的投影线段在投影平面上的长度 τ (像素数)满足如下公式:

$$\tau = \frac{l \times L \times \lambda}{2 \times \tan \frac{\alpha}{2} \times d} \quad (1)$$

其中, λ 为物体空间中的单位长度在投影平面上的像素数, α 和 L 分别为视点的张角和投影平面的边长, d 为视点与该线段中心的距离.由式(1)可知,对于一条特定的边,距离 d 越大, τ 也就越小.如用户指定的屏幕容许投影误差为 ε ,那么,当模型中一条边离视点的距离 d 充分大时,其在屏幕上的投影误差可以小于 ε ,从而可以将其忽略,这就是视相关的

依据.

综合考虑地形特征和视点依赖这两个因素的影响,定义误差的判别准则为

$$e(C_i) \approx \frac{k' \cdot L}{\varepsilon \cdot D} \cdot S(C_i) \quad (2)$$

式中, L 定义为节点覆盖区域的边长, D 为视点到地形节点中心的距离, ε 为允许的屏幕控制误差, $S(C_i)$ 为节点的静态误差.由式(2)可知,覆盖地形起伏较大的区域时,其节点的动态误差较大,同时由于在距离越近、允许的屏幕控制误差变小的情况下,地形的动态误差将增大,从而大于给定误差阈值而被选中参与绘制的节点就越多,即地形的绘制细节将更详细;反之,绘制的细节就较略.分析结果表明,式(2)表达的节点误差评价准则是能充分考虑地形本身起伏特征和视相关这两个条件的,与文献[8]相比,该评价准则具有计算简单、形式直观的优点,而且可以通过这一可变参数,对系统的性能进行灵活的调整.

1.3 自适应三角网剖分

在运用树结构对地形进行多分辨率表示时,会出现天然的“裂缝”现象.这种“裂缝”现象的产生如图2所示,图上节点 C_1 具有较低的分分辨率,而与之相邻的节点 C_2 、 C_3 则具有较高的分辨率.由于这使得对角化时,出现了没被覆盖的区域,从而在地形绘制时就产生了裂缝.图2中的左图对产生裂缝的边用黑线进行了加粗.

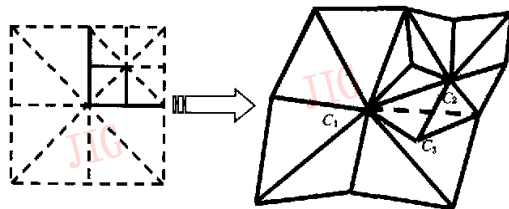


图2 “裂缝”现象的形成

解决“裂缝”现象最常用的方法是构建限制二叉树,但限定二叉树块间的分辨率差别最多不超过一层,文献[6]提出了一种专门针对二叉树的桶序法,但该方法在裂缝生成区不能保持原始模型的拓扑结构;文献[3,8]根据格网点的依赖关系来构建具有正确构网特性的限制二叉树.此外还出现过在不同分辨率二叉树块的接边处,通过填补三角面来消除裂缝的方法,但其将导致模型表面的不连续.本文采用递归调用的方法实现了地形二叉树的自适应三角网

剖分,不仅消除了拼接缝,并且剖分结果符合约束四叉树条件,同时还能保持地表的连续性.下面对其进行介绍:

首先对四叉树作出如下条件约束:

(1)对每一满足误差阈值的四叉树节点来说,可将其三角剖分归结为直接对角剖分和保留中点的剖分这两种形式,而且其中保留中点的剖分方式还可以分割为 4 种基本的表示方式(图 3).

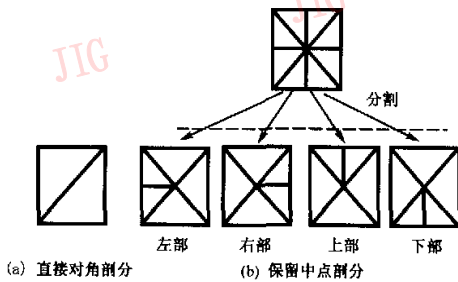


图 3 四叉树分割示意图

(2)四叉树节点的 4 个子节点命名规则如图 4 所示,并定义其上部、下部、左部、右部分别为用 [3,2]、[0,1]、[3,0]、[1,2]表示的节点.

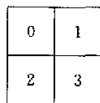


图 4 节点子节点示意图

自适应三角网剖分是在地形动态简化的同时进行的,具体方法如下:

(1)如果所选节点与上、下、左、右相邻的 4 个节点相比,具有相同或更高的分辨率,则直接进行对角剖分;

(2)如果所选节点与上、下、左、右相邻的 4 个节点相比,具有更低的分辨率,则首先对该节点进行相应的保留中点剖分,然后分别判断该节点上部、下部、左部、右部子节点与其相邻的节点是否满足条件(1),如果仍然不满足,则需继续进行分裂剖分.这是一个不断迭代的问题,迭代的终止条件就是满足条件(1).并且自适应三角网剖分是在地形动态绘制的同时进行的,下面仅对节点绘制过程中的拼接缝消除的一种情况进行介绍,其他情况与此完全相似.(注:假设 pTreeNode1(左)比 pTreeNode2(右)具有更低的分辨率):

```
BEGIN;
SeamErase(pTreeNode1,pTreeNode2){
```

```
IF pTreeNode1 的分辨率 EQ pTreeNode2 的分辨率
    递归终止
ELSE IF 左右关系
    pTreeNode1 → bRight EQ TRUE
    IF pTreeNode1 为父节点的第 1 区
        PTreeNode1 → pParent → bTop = TRUE;
    ELSE IF pTreeNode1 为父节点的第 2 区
        PTreeNode1 → pParent → bBottom = TRUE;
    SeamErase (pTreeNode1 → pSon [1], pTreeNode2 →
pSon[0])
    SeamErase (pTreeNode1 → pSon [3], pTreeNode2 →
pSon[2])
}
END
```

1.4 实时动态绘制

地形动态绘制的关键是在不显著降低地形场景绘制效果的前提下,具有交互性,为了获取相对稳定的浏览频率,要求根据视点和视景体的参数来对地形场景用不同的细节进行描述,这是一个在一定误差控制下,对树节点进行逐步求精、动态选择节点集 S 的过程.文献[4]认为,在给定误差条件下,对地形场景进行最佳描述的节点集 S 必须完全覆盖地形场景的采样区域,而且既不能有重复也不能有相交.

为进一步简化显示数据和提高动态仿真效果,以达到动态、交互的仿真要求,在实际应用中,通常需要随着视点位置 and 方向的变化,根据改变后的视野,对每一个树节点进行可见性判断,然后仅仅将可见的数据节点参与绘制.如图 5 所示,随着视点向左前方向(视点由南向北观察)移动,位于左面和前面的节点将逐渐进入视景体参与绘制,而位于右面和后面的节点则逐渐淡出视景体,不再参与绘制.图 6 为基于视点进行可见性裁剪的一个 LOD 实例,图

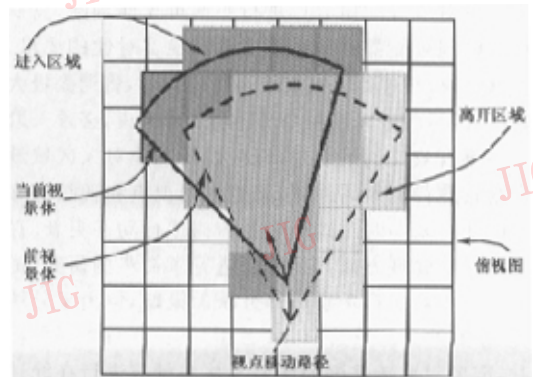


图 5 视点移动观察示意图

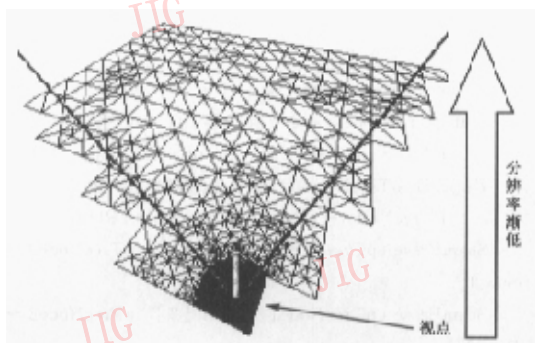


图6 进行视景体节点裁减的视相关 LOD 实例

中两条粗黑线外的区域为不可见区域,不参与地形绘制,同时还可以看到,离视点越近,地形分辨率越高,离视点越远,地形分辨率越低。

地形场景的动态绘制步骤如下:

(1)数据初始化,装载地形数据、纹理数据;构建地形四叉树;计算地形节点静态误差。

(2)根据给定的误差阈值来动态地选择地形节点,并对节点可见性进行判断,剔除不可见节点。

(3)可见节点的自适应三角网剖分与实时绘制。

在实时浏览中,需要随着视线的变化,不断地对节点集进行调整,以实现地形的实时 LOD 控制,即步骤(2)、(3)是一个不断递归进行的过程。

2 场景的管理与更新

但是,单就上面介绍的视相关多分辨率模型来说,只能对装入内存中的数据进行处理,由于在装入数据量很大的情况下,将严重占用系统的有效资源,即使只对所有的树节点进行一次可见性判断,其所用的时间可能都会让系统无法满足实时性的要求,也就是说,在进行大区域地形可视化时,将遇到极大的困难,因而对大规模地形环境仿真来说,必须采取一种更有效的场景管理机制,以便既能对大区域地形场景进行有效的管理,又能根据视点和视线等参数的变化来实时对地形场景数据进行动态更新。在地形场景管理方面,文献[8]进行了初步的研究,提出了一种对地形场景进行分块的策略,但由于分块时,存贮的都是原始 DEM 数据,其在进行数据更新时,需要对更新数据的误差及法向量等进行在线计算,因而影响了系统的实时性能,文献[3]也采用了

相似的地形场景管理方式。本文在借鉴文献[3]、[8]中采用的地形场景数据分块思想的基础上,对地形场景数据的存贮方式进行了改进。

2.1 数据的存贮与获取

对于大区域地形场景的可视化来说,由于实时绘制的速度和交互性才是人们追求的最终目标,因此要实现地形场景的有效管理和地形场景数据的较快更新,就要求所选择的数据模型在数据的外部存贮与获取以及空间数据的选择方面都具有较高的灵活性,若考虑到地形节点的静态误差和法向量只与地形本身起伏情况有关的这一特点来加速实时绘制时,更新数据的初始化进程,则完全可以对地形块中的每一节点的静态误差和格网点的法向量预先进行离线计算,而将分块的地形场景数据,以四叉树节点的形式进行存贮,则能满足这一要求。

在处理大区域地形场景时,首先需将输入的地形数据和纹理数据进行分块,以使每一地形数据块包含 $(2^k+1)(2^k+1)$ 个格网数据点,而纹理数据块与地形数据块完全相对应,通常为保持这种一一对应关系,需要对纹理数据进行重采样。在对地形数据进行存贮时,需先构建覆盖该地形区域的地形四叉树,同时计算所有节点的静态误差,并剔除静态误差为零的节点区域(如海洋、湖泊、平坦区域等),且在实现四叉树的压缩的同时,不影响地形的表达精度;然后将所有的数据块都按一定的索引,以压缩四叉树的形式存贮于文件中,图7就是一种可能的压缩四叉树存贮结构。虽然按四叉树结构存贮时,数据有一定的冗余,可能因此会消耗更多的存贮空间,但仍不失为一种用空间换时间的有效方法,数据的存贮可用一个递归的过程方便地完成,如下面的伪代码所示:

```

BEGIN
    计算节点静态误差并剔除误差为零的节点
    Conde * pNode = new CNode();
    pNode = rootNode;
    Save(pNode){
        保存节点数据
        FOR I=0; I<4; I++
            IF (pNode->Child[I])
                Save(pNode->Child[I])
    }
END

```

而数据块的获取则是一个与存贮完全相反的递归调用过程,按这种方式对地形数据进行存贮时,能

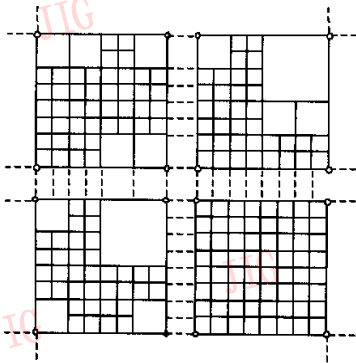


图 7 一种可能的压缩四叉树存贮结构

方便地对节点的地形数据进行获取,而且格网点的地理坐标、法向量、纹理坐标等都能直接进行应用,这样不仅可以节省在线计算时间,而且对地形平坦区域来说,相当于具有预简化的功能。

2.2 地形场景的动态更新

在大区域地形场景可视化中,由于不可能一次就将地形数据和纹理数据都装载进主内存,而且对于动态绘制地形的每一帧来说,也只有整个地形场景的一部分对此作出了贡献,为此,本文引入了数据页的概念,即每次只装载一部分地形数据块进入主内存,而装入主内存的这些数据则代表了现实世界的一个窗口,而且该窗口完全与当前的视点和视线方向等参数密切相关。如图 8 所示,假设整个地形区域包含 $n \times n$ 数据块,而每一数据页包含的数据块为 $m \times m (m \ll n)$,并且视点始终保持在数据页的中心,即内存中,数据块与数据大小始终是无关系的。由图 8 可以看出,随着视点的移动,只有一小部分数据块需要进行更新。此外,在实际的更新过程中,并不是随着视点的每一微小变化就对地形场景进行更新,更新只是在当视点和视景体的变化已经影响到图象绘制的质量或超过一定的误差阈值时才进行,这样将有助于减少数据交互的数量,同时也可降低数据管理的难度。在编程实现中,可以创建两个专用线程,

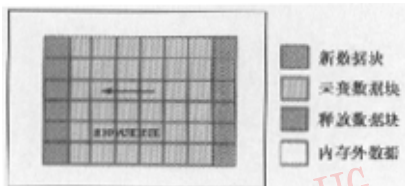


图 8 场景动态更新机制

一个线程专门负责地形场景的动态更新,另一个线程专门负责地形场景的实时绘制,这种方式尤其适用于多处理器的处理。

3 试验结果

为了解本文算法的效果,在硬件平台为 P I 400、内存 256MB 外加 Oxygen GVX1 图形加速卡,软件平台为 WindowsNT/2000、Visual C++ 6.0 和三维图形标准 OpenGL 的情况下,利用某地区已配准的地形和纹理影像数据进行了试验。图版 I 彩图 1 展示了纹理映射对提高地形可视化真实感的作用,其中彩图 1(a)是对地形的全分辨率模型进行纹理映射的效果,彩图 1(b)对原始模型进行简化后,误差为 5m 时的多分辨率模型,彩图 1(c)是对简化模型彩图 1(b)进行纹理映射的效果,由此可以看出,即使在有较大误差的条件下,也能较好地保持地形的真实感和有意义的细节。图版 I 图 2 是用不同的误差(10m, 5m, 2m 和 1m)对地形进行绘制的一个实例,由图版 I 图 2 可以看出,随着地形绘制误差的减少,地形绘制的细节越来越多。图版 I 图 3 演示了视相关 LOD 控制的效果,由图版 I 图 3 可见,视相关 LOD 控制时,视点始终位于图象的中央,并且视线朝着正北方向,视点的移动路径为从左到右,如图版 I 图 3 所示,具有最高分辨率的地形区域始终位于视点注视的中心位置。

此外,还对大区域地形可视化进行了试验,整个试验数据包含的数据块为 48×87 ,每一数据块覆盖的范围为 $6.5\text{km} \times 6.5\text{km}$,试验时,数据页中的常驻内存数据块为 13×13 。为了便于与文献[8]中的实验结果进行对比,试验过程中,模拟的飞行速度为 1000km/h ,而飞行时间为 10s,实验中,更新的数据块为 587 块,花在场景更新上的时间仅为 2160ms,平均每块为 3.68ms,优于文献[8]中的 24ms。图版 I 图 4 是场景分块的示意图。表 1 为对该地形区域进行飞行模拟时的速度进行测试的结果。图版 I 图 5 为进行交互浏览时的一帧。

表 1 不同三角面片数时的地形场景绘制速度比较

三角面片数	5 274	10 275	15 783	20 487	43 784
绘制速度(帧/s)	86	45.1	35.7	22.1	14.1

4 结 论

地形场景的实时绘制是大区域地形可视化的一

个瓶颈问题,为此,在解决大区域地形可视化方面进行了深入的研究,取得了以下有益的成果:

(1) 针对四叉树地形数据结构的特点,在考虑地形起伏特征和视相关的基础上,设计了一种合理的误差度量方法;

(2) 提出了一种快速自适应的三角网剖分算法,该算法不仅能消除地形节点间因分辨率不一致而产生的拼接缝,而且剖分结果也满足约束四叉树条件;

(3) 在地形的多分辨率模型和地形场景动态管理方面,对现有算法进行了改进,实现了地形数据的实时交互。

此外,该研究成果已经成功地集成于总装型号项目——ReSDISS-3D中,该系统不仅能满足大区域地形可视化的要求,而且能实现大区域地形场景的有效管理和实时更新;在对误差阈值进行控制的情况下,还能实现地形场景从最粗分辨率到最细分辨率的任意变化;在将绘制的三角面数限定在10000~20000的情况下,其绘制速度可以大于25帧/s(每秒显示的帧数),完全可以实现地形的平滑绘制,并能保证较好的绘制质量。

随着航空航天技术和摄影测量技术的飞速发展,获取大范围、高分辨率遥感影像已经十分容易,为此未来的工作将仍然主要集中在数据的管理和更新,尤其是纹理数据的管理。另外,如何实现特大区域(如全球范围)地形和纹理数据的一体可视化,将仍然是一个极富挑战性的难题。

参 考 文 献

- 徐青. 地形三维可视化技术[M]. 北京:测绘出版社,2000.
- 唐泽圣. 三维数据场可视化[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
- 陈刚. 虚拟地形环境的层次描述与实时渲染技术的研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学测绘学院,2000.
- De Floriani, Paola Meggillo. Multiresolution models for topographic surface description [EB/OL]. [http://www. disi. unige. it/person/DeflorianiL/publications. html](http://www.disi.unige.it/person/DeflorianiL/publications.html). 2001-03-17.
- Hoppe H. Smooth view-dependent level-of-detail control and its application to terrain rendering [EB/OL]. [http://research. microsoft. com/~hoppe](http://research.microsoft.com/~hoppe).
- 谭兵. 基于遥感影像的地形三维重建技术的研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学测绘学院,2001.
- Mark Duchaineau, Murray Wolinsky. ROAM Terrain: Real-time optimally adapting meshes [EB/OL]. [http://www. vterrain. org](http://www.vterrain.org),2001-03-17.
- Renato Pajarola. Large scale terrain visualization using the restricted quadtree triangulation [EB/OL]. [http://www. vterrain. org](http://www.vterrain.org),2001-03-17.
- 王宏武,董士海. 一个与视点相关的动态多分辨率地形模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2000,12(8):575~579.
- Lindstrom P, Koller D, Ribarsky W *et al.* Real-time, continuous level of detail rendering of height fields [A]. In: Proceeding ACM SIGGRAPH 96[C], New Orleans, Louisiana USA, 1996, 108~118.



谭兵 1975年生,解放军信息工程大学测绘学院遥感信息工程系博士研究生。主要研究方向为摄影测量与遥感、遥感影像处理、地形环境仿真。



徐青 1964年生,解放军信息工程大学测绘学院遥感信息工程系教授、博士生导师,浙江大学CAD&CG国家重点实验室访问学者。主要研究方向为摄影测量与遥感、GIS、虚拟现实、空间对地观测等。



周杨 1974年生,2002年获解放军信息工程大学测绘学院遥感信息工程系硕士学位,讲师。主要研究方向为摄影测量与遥感、GIS、城市三维仿真。

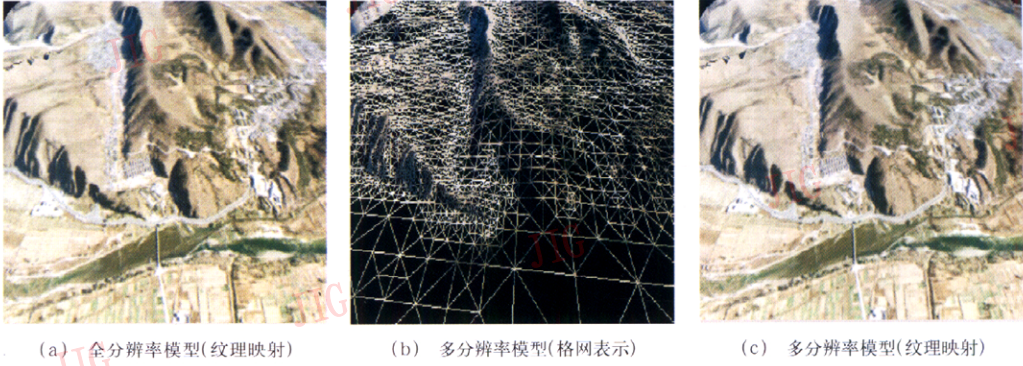


图1 带纹理映射的地形可视化

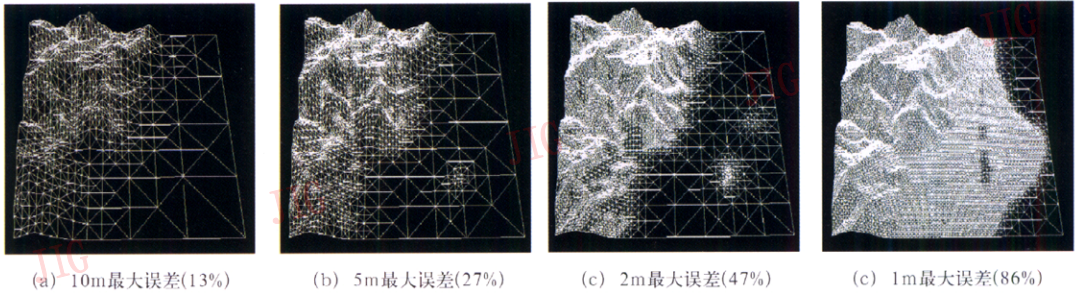


图2 不同误差控制下绘制的地形表面模型
(括号中百分比是绘制的三角面片数占原始三角面片数的百分比)

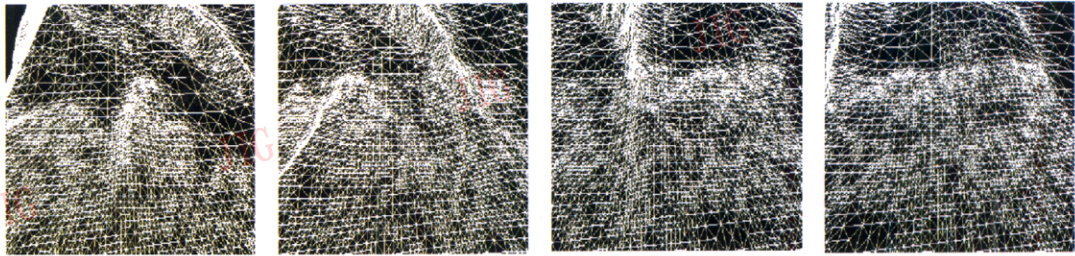


图3 视点移动效果图
(从左到右4幅图象是视点从左到右移动截取的)

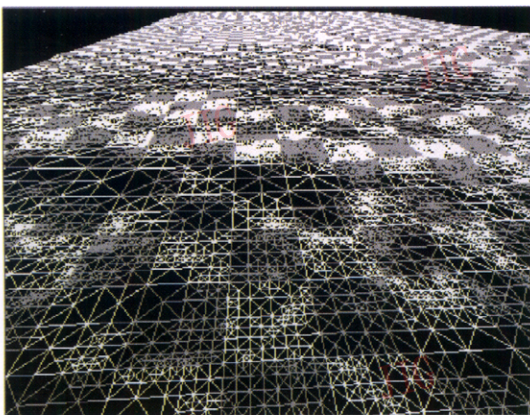


图4 地形场景分块示意图

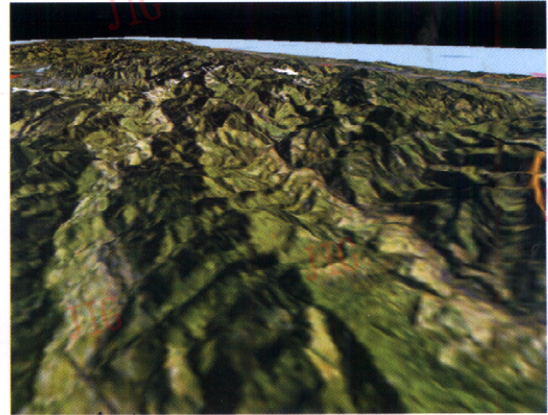


图5 交互浏览时的一帧