

# 地形可视化

王永明

(北京信息高技术研究所, 北京 100085)

**摘要** 由于地形可视化有着广阔的应用背景, 近来越来越受到人们的关注. 该文在给出地形可视化的基本概念和研究内容后, 着重讨论和回顾了国内外学者在地形可视化的数字地形模型、地形的简化、地形的多分辨模型和地形的真实性等4个专题领域的主要研究方法和成果, 以及尚未解决的问题. 最后对这一领域的研究方向和应用前景进行了展望.

**关键词** 地形可视化 数字地形模型 地形的简化 多分辨模型 层次细节法 地形纹理 视相关

**中图分类号:** P208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2000)06-0449-08

## Overview of Terrain Visualization

WANG Yong-ming

(Information Advanced Technology Institute, Qinhe Building Hai, Beijing 100085)

**Abstract** Terrain Visualization has become increasingly interesting in recent years because it has wide application backgrounds. In this paper, we summarize the terrain visualization to four categories in terms of digital terrain model, terrain simplification, multiresolution model and terrain reality. Based on the survey, discussion and comparison of existing methods and results, we formalize the concepts and research contents of terrain visualization. At last, the potential applications of this domain are predicated.

**Keywords** Terrain visualization, DTM (Digital Terrain Model), Terrain simplification, Multiresolution model, LOD (Levels of Detail), Terrain texture, View dependent

## 0 引言

地形可视化的概念, 是在60年代以后随着地理信息系统的出现, 而逐渐形成的. 地理信息系统是使用计算机技术将传统的纸制地图变成计算机化的电子地图, 从而大大方便了人们对地图的使用和查询. 但二维地理信息比传统的纸图在可视化程度方面并没有得到实质性的改善, 因而三维地理信息系统是人们一直追求的梦想. 然而, 制约地理信息三维可视化的主要矛盾来自于计算机的硬件和软件两个方面的发展. 在计算机硬件方面, 由于三维可视化需要进行大量的消隐和着色运算, 而开发出能完成这类算法的硬件并不是一件容易的事, 过去, 很长一段时期, 专用芯片曾迟迟不能问世就是例证; 在软件方

面, 由于缺少统一的接口标准, 使得人们在实现三维可视化时, 不得不将大量的工作投入到设计三维显示的算法上. 但随着三维图形硬件芯片<sup>[1,2]</sup>的出现和OpenGL<sup>[3]</sup>、Direct3D<sup>[4]</sup>三维软件标准的建立, 地形三维可视化逐渐由梦变成了现实.

地形的可视化是一门研究数字地形模型 (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, 它属于计算机图形学的一个分支. 除了计算机图形学外, 计算几何也是它重要的基础知识. 它的应用涉及地理信息系统 (GIS)、虚拟与现实 (VR)、战场环境仿真、娱乐与游戏、地形的穿越飞行 (flythrough)、土地管理与利用、气象数据的可视化等领域.

文献[5]~文献[8]虽然曾从不同的角度, 对地

形可视化和相关问题作过一些综述,但缺少系统的比较,本文将比较全面地介绍和讨论地形可视化方面,国内外学者的研究成果和文献资料,并给出对这些研究成果的评价。

## 1 数字地形的表示和转换

数字地形通常有等高线、格网和三角网 3 种不同的表示方法.其中等高线的表示方法被广泛用在各种地图和现代地理信息系统中,它是用二维手段表示三维物体的常用方法;而用格网来表示地形高程域的数据是随着计算机的出现而提出的,它实际是用一个二维数组来表示地形的高程,其格网的宽和高通常是缺省的;用不规则三角网来表示地形,人们最初是凭直觉,认为它能节省存储空间<sup>[9,10]</sup>和进行某些计算:如通视计算<sup>[11,12]</sup>,以及可借助于它来表示地形中悬崖、沟壑等特殊复杂地形的造型.文献[11]对数字地形下了这样一个定义:

数字地形为对  $X-Y$  平面域  $D$  进行划分  $\Sigma$  之后,得到一个平面区域的集合  $\mathcal{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$  和定义在  $\mathcal{R}$  上的一个连续函数族  $\mathcal{F}, z = f_i(x, y), i = 1, 2, \dots, m$ , 组成的二元组  $\mathcal{F}(\Sigma, \mathcal{F})$ . 若  $R_i$  与  $R_j$  相邻,则在公共边界处有  $f_i = f_j$ . 我们称数字地形的面为每个  $f_i$  函数的图,数字地形的边与节点为每个函数  $f_i$  对划分  $\Sigma$  的边与节点的约束.由于对应  $n$  个节点的平面划分  $\Sigma$  组成  $O(n)$  的边数和区域数,因此,具有  $n$  个节点的数字地形的空间复杂性是  $n$  的线性函数.

等高线的数据结构通常是一种矢量结构,高程作为矢量的 ID,在 ID 之后,便是等高线的  $XY$  对,如 ARC/INFO 的 GENERATE 文件<sup>[13]</sup>.用等高线图直接生成三维地形有两种方法:一种采用称为 Tiling<sup>[14,15]</sup> 的技术;一种是直接用 Delaunay<sup>[12,16,17]</sup> 三角形对等高线上的点进行三维地形的造型.但直接用等高线来进行地形造型有一个明显的缺点,就是造型留有明显的等高线的台阶痕迹,因此地形造型是不连续光滑的.所以,目前通常不采用这种方法,而将等高线转换成格网数据,这就是我们通常说的数字高程模型 DEM.

格网地形实际上就是一个二维数组,其元素为格网节点上的高程值,或高程加属性的值.一般从等高线转换到格网地形,通常需要找到格网节点周围等高线上的点,然后进行插值计算.插值的算法有多

种多样,但无论采用哪一种方法,都取决于精度与时间之间的平衡.目前人们关心的不再是采用哪一种插值方法以及精度,而是如何快速地找到格网节点周围等高线上的点,这在进行大范围等高线图到 DEM 的插值时显得十分重要.如果采用盲目搜索法,对一个  $M \times N$  格网,等高线的的数据量是  $S$ ,在最坏的情况,其算法的复杂度是  $O(M \times N \times S)$ .当  $S$  很大时,就无法忍受.

文献[18]提出了采用分块的方法来组织数据,其时间的复杂度是  $O(M \times N + P)$ ,  $P$  是每个块里的数据,文献[19]对这种方法进行了改进,采用与格网尺寸一样大小的块来划分块,但这种方法容易出现数据的跑偏,同时,块越小,内存的消耗就越大,这对于大范围和大数据量等高线的格网插值是不可行的.文献[20]提出了采用四叉树的方法来组织数据,但没有给出其研究结果.中国农大在他们的项目中,采用了这种方法,但没有公开发表结果.

文献[9]提出的方法是先将等高线的数据生成 Delaunay 三角,然后再根据已有的 Delaunay 三角网,进行格网插值.通常 Delaunay 三角生成算法的时间复杂度可以达到  $O(S \cdot \log S)$ <sup>[21]</sup>,其中  $S$  为等高线的数据量.用该方法生成三角网后,关键是如何判断格网节点落到哪一个三角形中.如果采用盲目搜索,显然是不行的.如果在已有的 Delaunay 三角网中,保存有三角形与三角形的邻接关系,那么文献[22]提出了一种十分巧妙的定向搜索法.这种搜索法只要计算搜索点与三角形某一边构成的三角形的面积,并通过判别面积的符号,就可决定点是否落在三角形中,或决定下次要搜索的三角形.一旦找到格网节点所在的三角形,就可根据该三角形或临近三角形来插值,以得到高程值.由于生成格网的过程是按逐行进行的,那么,这种方法的时间复杂度近似于  $O(S \log S + M \times N)$ .这种方法的优点在于:它不仅快速,而且克服了一般快速方法容易产生的数据跑偏,同时,还可以很容易地将高程控制点参与到格网插值中去,ESRI 的 Arc/Info 的 TIN 模块就是采用这种方法.

三角网的数据结构是 3 类数字地形表示中最复杂的.人们通常要在时间与内存之间找到平衡.一方面,要想在三角形的修改时,能快速搜索到需要的数据,就得采用复杂的数据结构,而另一方面,复杂的数据结构需要消耗更多的内存.由此可见,内存与时间对地形可视化同等重要.文献[5],文献[9~11],

文献[23~29]都提出了各自的数据结构,但文献[5],文献[9~11],文献[23~28]的数据结构只是Guibas-Stolfi提出的数据结构<sup>[29]</sup>的一种变形. Guibas-Stolfi提出的数据结构分为边的数据结构和三角形的数据结构,其中边的数据结构包含边相邻的两个三角形的4条边的指针和两个节点的指针,共6个指针.而三角形的数据结构则包含3个相邻三角形的指针和三角形本身3个节点的指针,共6个指针. Lee和Schochter<sup>[30]</sup>还证明,对于 $N$ 个平面点集的Delaunay三角剖分,三角形的数量为 $N_t = 2(N-1) - N_h$ ,边的数量为 $N_e = 3(N-1) - N_h$ .  $N_h$ 为平面点集凸壳(Convex Hull)上的点的数量. 所以, $N$ 个平面点集的内存量近似为 $((N_t + N_e) \times 4) \times 6 + N \times 2 \times 4$ . 这里设指针占4byte,每个节点占两个4byte的浮点数. 这样,总内存近似为128Nbyte. 有关格网数据到三角网的转换在下面各章中还要详细地讨论.

至于采用什么样的数据结构来表示地形才具有优越性,现在学术界仍有不同的看法. 原来人们认为,用三角网表示地形可以节省空间,但从上面的计算我们完全有理由产生怀疑了. Kumlér<sup>[31]</sup>曾经提出,三角网数据的数据量大约为格网地形的3~10倍. 事实上,格网地形每个点通常只要用2byte的整型数来表示就可以了. 但从显示的角度来看,三角网的地形有极大的优势,因为大部分三维显示设备的显示速度只与三角形的数量有关,而几乎与三角形的大小无关,而且格网地形简化到三角网地形后,还使三角形的数量大大减少,这样也可以大大提高显示的速度.

## 2 地形的简化

地形的简化是地形可视化中重要的内容. 从目前已发表的文献来看,关于从格网地形到格网地形简化的讨论比较少,而地形的简化通常是指从格网地形到三角网地形或从三角网地形到三角网地形的简化,而本文要讨论的地形简化是从格网地形到三角网地形的简化. 正如前一节所述,由于显示的需要,这种地形的简化是十分必要的. 地形的简化可以分为两类方法:一类是由粗到细的简化(Refinement),或叫精细法,另一类是由细到粗的简化(Decimation),或叫删繁法.

(1) 由粗到细的简化. 该方法的工作过程通常

是一个递归的过程,即先用一组比较少的点去拟合格网地形,然后根据精度和数据量的要求,再插入更多的点去拟合地形. 最典型的方法是一种称为贪婪插入(Greedy Insertion)的方法. 贪婪法又分为串行贪婪法和并行贪婪法,每次只插入一个点到已有的三角网中的方法叫串行法,一次插入多个点到已有的三角网的方法叫并行法.

Fowler和Little<sup>[32]</sup>首先提出了这种方法,该方法是一种混合并行插入方法,算法的开始是使用一个 $2 \times 2$ 的模板对格网地形进行滤波,留下来的点便作为特征点用来生成初始的三角网,接下来,就计算每个三角网所对应的最大误差点,然后将这些最大误差点中超过阈值的点,插入到三角形网中,但Fowler和Little并没有给出他们方法的时间复杂度. 接着,De Floriani和她的研究小组在这方面也做了许多研究,并给出了一个串行贪婪法的算法<sup>[23]</sup>. 该方法比Fowler和Little的方法更易实现和明确. 该算法每次扫描整个格网数据,先找到一个与现有三角网绝对误差最大的点,然后将这样点插入到三角网中. 这种方法的时间复杂度为 $O(n^2)$ ,但她没有给出这一算法的细节和数据结构. 可是,在他们后来的工作中<sup>[24]</sup>,对原来的方法进行了修正和进一步的描述,并提出了Delaunay,即将每次生成的三角网放到一个层次型的数据结构中,以形成一个由粗到细的三角网金字塔.

后来,人们的简化算法<sup>[33~36]</sup>大多是在De Floriani和Fowler的贪婪法基础上进行改进,如Garland-Heckbert<sup>[37]</sup>就是在De Floriani工作的基础上,对贪婪法进行了两项改进,使时间复杂度减少到 $O((m+n) \log m)$ ,是目前串行贪婪法中速度比较快的一种.

在贪婪法简化地形中,三角形的生成一般是采用Delaunay三角剖分,而Rippa<sup>[38,39]</sup>则采用Lawson<sup>[17]</sup>的最大最小准则来计算数据相关(Data Dependent)三角形. 通常在采用Delaunay三角剖分时,一个点的插入,需要先找到该点所在的三角形,然后优化与这个三角形有关的影响三角形<sup>[10]</sup>. 而确定数据相关三角形,只需根据两个三角形组成的四边形对角线是否满足Lawson条件,来决定是否交换对角线,而与周围三角形无关. 这种方法,一般认为容易产生细长的三角形.

(2) 由细到粗的简化. 与由粗到细法相比,这类方法是先由格网地形数据生成比较多、细的三角形网,再在这个基础上进行三角形网的简化. 其中启发

式(Drop Heuristic)方法是 Lee<sup>[40]</sup> 首先提出的. 该方法先将格网地形的每个小矩形分成两个三角形, 这就形成了初始的三角形网; 然后, 利用节点的邻接点, 生成 Delaunay 三角形, 并求得节点与 Delaunay 三角形的误差, 如果误差大于给定的阈值, 则节点保留, 否则被删除. Lee<sup>[41]</sup> 并将这种方法与由粗到细的贪婪法进行了比较, 认为这种方法在精度上比贪婪法要高. Scarlatos-Pavlidis<sup>[34]</sup> 则提出了等曲率的由细到粗的方法. 这种方法是通过收缩高曲率的三角形、合并共面相邻的三角形和交换边的方法, 以达到简化三角形网的目的.

Hoppe<sup>[42, 43]</sup> 采用与 Lee 相同的方法来构造初始的三角形, 然后使用边崩溃(Edge Collapse)的方法简化三角形网, 为了减少在形成初始三角形时的数据量, 采用了先将地形分块, 并对每块进行简化, 然后再将简化后的块进行合并的方法.

由细到粗的方法虽然在精度方面要比由粗到细的方法高, 但形成初始三角形所需的内存往往是很困难的. 因为要在三角形网上进行简化, 三角形网又需要保持拓扑关系, 而三角形网中的拓扑关系是最费内存的. 如果按上一节中一个节点 128byte 计算, 一幅  $2\,000 \times 2\,000$  格网地形初始三角形所用的内存为 512M.

另外, 还需要提到的是 Chen-Guevara<sup>[44]</sup> 提出的重要点方法, 该方法将生成三角网地形的过程分为两步: 第 1 步用一个  $3 \times 3$  的模板对格网地形进行滤波, 将所谓的重要点留下来, 将不重要点删除; 第 2 步将留下来的点生成 Delaunay 三角形网, 并将高程值赋给每个节点. 这种方法, 生成三角形网的速度比较快, 但由于滤波是根据一个  $3 \times 3$  的模板进行的, 由于没有全局的精度控制, 因此对小范围的变化比较敏感.

### 3 多分辨地形模型

多分辨地形模型<sup>[5, 27, 45]</sup> 是地形可视化研究的又一重要内容. 正如前面所论述的那样, 由于地形的显示范围大, 往往要在内存与显示精度(分辨率)之间作出一个权衡. 如在进行飞机的飞行模拟时, 要穿越一个宽约 10km, 长约 1 000km 的带状地形. 按 50m 的网格计算, 就是一个  $200 \times 20\,000$  的格网节点的地形. 如果格网不加简化就全部送到显示设备中, 任何机器也难以承受(共有  $8 \times 10^6$  个三角形). 为了提高显示的速度, 在实际飞行模拟时, 显示窗口只是占整

个地形的很小一部分, 如果只显示与窗口显示有关的部分数据, 就可以提高显示速度, 这就是地形显示中要研究的视相关(View Dependent)技术. 另外, 还可以采用离视点近的地形有更多的细节, 而离视点远的地形细节可以少一点的方法, 采用这种称为层次细节(Level of Details)的方法, 同样也可以提高显示的速度. De Floriani<sup>[5]</sup> 认为, 地形多分辨模型在不同分辨率之间, 内存不能有太多的重复; 不同分辨率之间的切换必须是有效和快速的. 下面介绍两种多分辨率地形模型:

#### 3.1 基于三角形剖分的层次模型

De Floriani<sup>[24]</sup> 首先提出了用层次结构来描述地形的的方法. 她用所谓的一分三(Ternary)的办法, 来分割和建立层次三角形模型. 在她的层次模型中, 根三角形用  $\tau_0$  来表示,  $\tau_0$  是一个能覆盖地形域  $D$  的三角形, 它是由在地形域中再插入一个与三角形具有最大误差的点  $P$  后所形成的三角网组成. 在后续的步骤中, 对于每个三角形  $t_j$ , 如果  $E(t_j) > \epsilon$ , 则这个三角形被分裂(其中,  $E(t_j)$  为地形与三角形的误差,  $\epsilon$  是一个误差阈值). 然后将该分裂三角形通过插入与三角形上具有最大误差的点  $P$  后, 再连接  $P$  与三角形的另外 3 个点, 当所有的三角形分裂完成后, 再将  $\tau_j$  节点插入到层次  $H$  中, 并当所有在层次  $H$  中的三角形都满足误差阈值后, 层次模型便完成. 该算法的时间复杂性为  $O(Nn)$ ,  $n$  为层次的数量. 正如 De Floriani 自己指出的那样, 用一分三的方法建立层次三角形的最大问题是不可避免的细长三角形, 从而使地形的拟合精度下降.

因此 Scarlatos-Pavlidis<sup>[33~35]</sup> 又提出了用自适应层次三角形方法来建立层次三角形模型. 与一分三的方法相比, 该方法与分裂三角形在规则上有所不同. 他们是将一个三角形的分裂分为 5 种情况, 即如果  $P$  为插入点,  $E(\text{int}(t_j))$  为三角形  $t_j$  与地形的最大误差,  $E(e_1)$ ,  $E(e_2)$ ,  $E(e_3)$  为三角形  $t_j$  的 3 个边与地形的最大误差,  $\epsilon$  为层次  $i$  的误差阈值, 那么

① 当  $E(\text{int}(t_j)) > \epsilon$ , 并且  $E(e_1)$ 、 $E(e_2)$ 、 $E(e_3) \leq \epsilon$  时, 通过连接三角形  $t_j$  的 3 个顶点与  $P$  形成 3 个新三角形;

② 当  $E(e_1) > \epsilon$ , 并且  $E(\text{int}(t_j))$ 、 $E(e_2)$ 、 $E(e_3) \leq \epsilon$  时, 连接  $e_1$  与  $e_1$  相对的顶点, 将  $t_j$  分裂成两个三角形.

③  $E(\text{int}(t_j)) > \epsilon$ , 并且  $E(e_1) > \epsilon E(e_2)$ 、 $E(e_3) \leq \epsilon$  时, 连接 3 个顶点到  $P$ , 同时, 连接  $P_1$  到

$P$ , 形成4个新三角形。

④ 当  $E(e_1)、E(e_2) > \epsilon$ , 并且  $E(e_3) < \epsilon$  时, 连接  $P_1$  到  $P_2$ , 并连接  $P_1$  (或  $P_2$ ) 到相对的边  $e_1$  (或  $e_2$ ), 将  $t_j$  分裂成两个三角形。

⑤ 当  $E(e_1)、E(e_2)、E(e_3) > \epsilon$  时, 连接  $P_1$  到  $P_2$  和  $P_3$ , 连接  $P_2$  到  $P_3$ 。

自适应层次三角形的方法避免了部分三角形变长的弊病, 但仍没有彻底解决这个问题。

在层次 Delaunay<sup>[26]</sup> 和金字塔三角形<sup>[28]</sup> 模型中, 是通过 Delaunay 三角形来维护每个层次上的三角形的。由于 Delaunay 三角形的数学性质, 使得 Delaunay 三角形可以避免细长三角形的出现。但应该看到, 在二维平面里的三角形优化并不等于在三维空间里的三角形也是优化的。而数据相关<sup>[38, 39]</sup> 三角形模型则是将地形的  $Z$  值考虑进去, 并按 Lawson<sup>[17]</sup> 准则进行三角形的优化, 这样既可以有效地避免狭长三角形的出现, 又可以考虑地形的三维空间优化。这是目前采用的三角形层次模型中比较好的一种方法。

在地形的多分辨模型应用中, 一个令人棘手的问题是, 在不同分辨率地形三角网之间切换时出现的“跳动 (popping)”现象。Hoppe<sup>[43]</sup> 提出了使用形态学 (Geomorphs) 变形的方法来实现不同分辨率地形三角网的切换。Hoppe<sup>[42, 43]</sup> 将他的连续格网 PM (Progressive Mesh) 的概念引入到地形的显示中, 即任意一个分辨率三角形格网  $O(n)$ , 是通过一个较粗的  $M^0$  和一系列的细化变换  $\{vsplit_0, \dots, vsplit_n\}$  实现的。其中,  $vsplit$  叫节点分裂。同时,  $M^n$  也可以通过一系列的简化变换  $\{ecol_0, \dots, ecol_n\}$ , 记录下变换轨迹而得到简化。在进行两个分辨率地形三角网的切换时, 还可以通过一个时间参数去控制三角形的变形, 这样, 就可以避免在地形穿越飞行时, 因不同分辨率地形三角网切换而出现的“跳动”现象。

### 3.2 基于树数据结构的模型

事实上, 基于树模型也是一种层次模型, 但为了讨论方便, 我们将它单独看成是一种新的多分辨模型。众所周知, 四叉树模型是很著名的一种数据结构<sup>[22, 46-49]</sup>, 而四叉树划分是通过递归的方法将一个矩形区域不断地进行一分四的划分, 直到某一种条件得到满足时, 这种划分才停止。这种四叉树划分是一种由顶向下的方法。如果用  $\epsilon$  表示四叉树划分的误差阈值,  $E(q_j)$  为矩形区域  $q_j$  与地形的最大误差, 那么, 四叉树的划分通常可以分为以下三步:

① 用原始地形区域的四个角点和四条边的中点进行一分四的划分, 并将这一划分送到四叉树的根节点作为四叉树的初始化。

② 在后续各步中, 对每个矩形区域  $q_j$ , 如果满足  $E(q_j) > \epsilon$ , 那么,  $q_j$  则继续通过插入矩形区域的中点和4个边的中点进行递归划分。

③ 当所有矩形区域都满足  $E(q_j) < \epsilon$  时, 则划分被停止。

但四叉树划分模型带来两个问题: 一是用四叉树划分的地形节点数必须是  $2^n$ , 即节点的数量必须是2的整数次方; 二是, 由于每个被四分的矩形区域大小都不一样, 因此, 在矩形块与矩形块交界处会出现地形表面的不连续, 这在地形显示时, 会出现空洞。第一个问题我们可以通过重新增加或减少地形的格网来避免; 对第二个问题, Von-Barr<sup>[50]</sup> 提出了使用限制四叉树 (Restricted Quadtree) 的方法加以解决。这种方法实际上是对四叉树划分模型进行了扩展, 即当某一区域与其邻接区域不连续时, 可通过对该区域的四叉树节点使用6种模式进行细分, 以满足与邻接区域连续性的要求。

针对四叉树划分模型存在的问题, Evans<sup>[51]</sup> 和 Duchaineau<sup>[52]</sup> 等提出了采用直角三角形剖分地形的办法。该方法是通过生成一个二叉树的数据结构来建立直角三角形层次网:

① 树的根表示矩形地域, 这是二叉树中唯一表示矩形的节点。然后, 将地形剖分成两个直角三角形作为初始三角形。

② 对每个直角三角形  $t_j$ , 如果  $E(t_j) > \epsilon$ , 则利用直角三角形  $t_j$  斜边的中点和斜边相对的直角三角形顶点的连线, 将该直角三角形分成两个新的直角三角形。由于新的直角三角形的形成, 会影响地形的连续性和使地形出现非三角化 (nontriangular), 所以, 要对周围的三角形进行类似于  $t_j$  的分裂, 而这种分裂只要进行有限次。

③ 当所有的直角三角形满足给定的精度要求时, 这种三角形的分裂就停止。

实际上, 四叉树划分地形的方法和二叉树划分地形的办法都是一种基于层次模型的划分。当给定某一精度要求时, 即可通过遍历四叉树和二叉树来生成地形的表面, 并与基于三角形的层次模型显示一样, 通常根据视点到地形的距离来选择某一层中的三角形集合。如前所述, “跳动”现象同样存在于基于树数据结构模型中, 如 Lindstrom<sup>[53]</sup> 等提出的

基于四叉树的连续层次细节(Continuous Level of Detail)法也同样存在“跳动”现象。Lindstrom 提出的方法是先将地形格网生成四叉树数据结构,但这个四叉树的数据结构并不像以前层次模型中用一个事先指定的分辨率或误差  $\epsilon$  去建立地形的多分辨模型,而是将格网从顶到底全部分割。至于采用什么样的三角形去拟合地形,完全是根据显示时视点(相机)的变化和透视体的平截头体(Frustum)来进行选择。他同时提出了一个完全基于视点变化的节点和块的取舍模型。但从他们提供的程序运行来看,并没有很好地体现他们的这种思想,另外,这种数据结构的内存消耗太大,不适合大范围地形的显示。Duchaineau<sup>[52]</sup>等人的 ROAM 算法与 Lindstrom 的工作有相似之处。

## 4 地形的真实性

地形的真实性是地形可视化的重要组成部分,随着计算机硬件和软件水平的不断提高,人们对地形的真实性要求也越来越高。除了利用光照技术使地形有明暗显示外,通常为了提高地形的真实性,还可以添加图象纹理(如叠加卫星照片、彩色地形图等)、分形纹理(利用分形产生植被和水系等)和叠加地表地物(道路、河流、建筑物等)。

(1) 图象纹理的叠加 在已有地形表面上叠加图象纹理(如卫星影像),这是公认的提高地形真实性的有效方法。但这一方法存在两个问题,其中一个问题是遇到了内存与速度之间的矛盾问题。由于加入了图象纹理,使得着色算法变得复杂化,明显影响了地形的显示速度,若在地形多分辨模型中加入多分辨的纹理<sup>[45, 53]</sup>,即,将图象分成多级分辨率,然后根据视点的变化来选择其中的分辨率,这是提高显示速度的有效方法,如在 OpenGL 中就专门提供一个函数 `glBuild2Dmipmaps()`,用来建立金字塔的图象分辨率,但这一方法需要大内存的支持;另一个问题是大尺寸图象的叠加问题,通常软件系统(如 OpenGL)只支持  $1024 \times 1024$  的图象尺寸。此时需要将大图象分成较小的尺寸,如  $64 \times 64$ ,然后分别进行叠加。

(2) 地物的叠加 将图象的纹理叠加在地形的表面,虽然可以增加地形显示的真实性。但在三维地理信息系统中,对地形中的建筑物、公路、河流、桥梁等需要进行三维空间造型,以生成空间三维实体。只

有这样,才能进行空间信息查询和层的管理。对于复杂的三维造型,许多商用地形可视化系统(如 MultiGen<sup>[54]</sup>)开发有专门的三维造型生成器 Creator。因此可先由该三维造型生成器生成各种地物,然后再贴在地形的表面。而对于非商用系统,一个有效的方法就是先利用现有的三维造型工具(如 3DMax)来造型,然后再导入到地形可视化系统中。对于简单的建筑物,可以将其多边形先用三角剖分<sup>[55]</sup>方法进行剖分,然后将其拉伸到一定的高度,就形成三维实体。而对于河流、道路、湖泊等地表地物,由于存在多边形的拓扑关系,如湖中有岛,所以这时的三角形剖分就要复杂得多,但限定型 Delaunay 三角形和确保型 Delaunay (Conforming Delaunay) 三角形<sup>[56~58]</sup>可以保证在三角形剖分过程中,将河流或湖泊中的岛保留,尤其是确保型 Delaunay 三角形可以通过插入新的点,既保留了多边形的边界线,又保证剖分后的三角形具有良好的数学性质(没有扁平三角形)。在我们的项目中,还使用确保型 Delaunay 三角形生成了各种三维军队标号和三维汉字。

## 5 总结与讨论

地形的可视化,尤其是大范围、不规则地形的可视化,是一个极富挑战性的课题,尽管如前面讨论的那样,前人已做了很多这方面的工作,但真正实用且适合大范围地形可视化的算法还不多。目前首先要解决的是内存问题,无论是层次模型,还是树的模型,这些算法消耗的内存均是原始格网 DEM 的 10~20 倍;其次是显示的速度,要想在进行飞机飞行模拟时,穿越地形飞行至少要有 10psf 以上的速度。虽然地形范围很大,但在视区范围内的地形是有限的,所以基于视相关的算法是大范围内地形可视化的必由之路,由于二叉树和四叉树的数据结构具有规范、搜索快的优点,又能适合随着视点的变化而进行连续、动态的地形显示,所以,它们是一种在地形可视化中可以优先考虑的方法。但这种数据结构不适合不规则地形的显示。目前,对于非矩形边界线的地形,分段矩形化也许是较好的选择。与此同时,由于地形可视化有着广泛的应用前景,且软件的商业市场也大有可为,相信在未来几年里,将有更多的商业软件问世。

## 参 考 文 献

- 1 <http://www.washedashore.com/terrain/LargeTextures/index.html>.
- 2 苏旅. 新一代3D芯片技术大特写. 微型计算机DIY, 1999(10): 13~ 18.
- 3 <http://www.sgi.com/software/opengl/datasheet.html>.
- 4 <http://www.microsoft.com/>.
- 5 De Floriani *et al.* Multiresolution models for topographic surface description. <http://www.disi.unige.it/person/DeflorianiL/publications.html>.
- 6 Heckbert P S, Garland Michael. Survey of polygonal surface simplification algorithms. Multiresolution Surface Modeling Course SIGGRAPH'97, 1997. 5. <http://www.cs.cmu.edu/~ph>.
- 7 Nielson Gregory M. Tools for triangulations and tetrahedrizations and constructing functions defined over them. Scientific Visualization: Overviews, Methodologies, and Techniques. IEEE Computer. Soc. Press, 1997.
- 8 潘志庚, 马小虎, 石教英. 多细节层次模型自动生成技术综述. 中国图象图形学报, 1998(9): 754~ 759.
- 9 Macedonio G. An algorithm for the triangulation of arbitrarily distributed points: Applications to Volume Estimate and Terrain Fitting. Computer & Geosciences, 1991, 17(7): 859~ 874.
- 10 Tsai Victor J D. Delaunay triangulations in TIN Creation: An overview and a linear-time algorithm. Int. J. Geographical Information Systems, 1993, 7(6): 501~ 524.
- 11 De Floriani, Paola Magillo. Visibility algorithm on triangulated digital terrain models. Int. J. Geographical Information Systems, 1994, 8(1): 13~ 41.
- 12 Lee. J. Analyses of visibility sites on topographic surface. Int. J. Geographical Information Systems, 1991, 5(4): 413~ 429.
- 13 ESRI Arc/info User Manual, <http://www.esri.com/>.
- 14 Choi Y K, Park K H. A heuristic triangulation algorithm for multiple planar contours using an extended double branching procedure. Visual Computer, 1994, (10): 372~ 387.
- 15 Keppel E. Approximating Complex surface interpolation technique for construction 3D objects from serial cross-sections. CVGIP, 1989, 48(1): 124~ 143.
- 16 Delaney B. Sur la sphere vide: Bull. Acad. Science USSR VII, Clas. Sci. Mat. Nat., 1934, 793~ 800.
- 17 Lawson C L. Software for C<sup>1</sup> surface interpolation. Mathematical Software III, New York: Academic Press, 1977, 161~ 194.
- 18 王永明. 地理信息系统方法. 北京: 军事科学出版社, 1997. 3.
- 19 解放军郑州测绘学院. 技术报告, 1998.
- 20 王永明. 一种快速DEM的生成算法. 计算机应用与软件, 1998. 4.
- 21 Su Peter, Drysdale Robert L Scot. A comparison of sequential delaunay triangulation algorithms. Proceedings of the Eleventh Annual Symposium on Computational Geometer, ACM, 1995, 61~ 70.
- 22 Garganini I. An effective way of represent quadtree. CACM, 1982, 12: 905~ 910.
- 23 De Floriani *et al.* A delauna-based method for surface approximation. In: Eurographics'83, 1983, 333~ 350.
- 24 De Floriani *et al.* A hierarchical data structure for surface approximation. Computer and Graphics, 1984, 8(2): 475~ 484.
- 25 De Floriani *et al.* Data structures for simplicial multi-complexes. <http://www.disi.unige.it/person/DeflorianiL/publications.html>.
- 26 De Floriani *et al.* Delaunay-based representation of surface defined over arbitrarily shaped domains. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1985, (32): 127~ 140.
- 27 De Floriani *et al.* Hierarchical triangulation for multiresolution surface description. ACM Transactions on Graphics, 1995, 14(4): 363~ 411.
- 28 De Floriani A pyramidal data structure for triangle-based surface description. IEEE Computer Graphics and Appl., 1989, 9(2): 67~ 78.
- 29 Guibas Leonidas J, Stolfi Jorge. Primitives for the manipulation of general subdivisions and the computation of voronoi diagrams. ACM Transactions on Graphics, 1985, 4(2): 74~ 123.
- 30 Lee D T, Schachter B J. Two algorithms for constructing a delaunay triangulation. Int. J. Computer Info. Sci., 1980, 9(3): 219~ 242.
- 31 Kumler Mark P. An intensive comparison of triangulated irregular network (TINs) and digital elevation models (DEMs). Cartographica, Monograph 45, 1994, 32(1):
- 32 Fowler Robert J, Little James J. Automatic extraction of irregular network digital terrain models. Computer Graphics (SIGGRAPH'79 Proc.), 1979, 13(2): 199~ 207.
- 33 Scarlatos Lori, Pavlidis T. Hierarchical triangulation using cartographic coherence. CVGIP: Graphical Models and Image Processing, 1992, 54(2): 147~ 161.
- 34 Scarlatos Lori, Pavlidis T. Optimizing triangulations by curvature equalization. In: Proc. Visualization'92, IEEE Computer. Soc. Press, 1992, 333~ 339.
- 35 Scarlatos Lori. Spatial data representations for rapid visualization and analysis. PhD thesis, CS Dept. State Univ. of New York at Stony Brook, 1993.
- 36 Schmitt Fracis, Chen Xin. Fast segmentation of range images into planar regions. In Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'91), IEEE Computer. Soc. Press, 1991, 710~ 711.
- 37 Garland M, Heckbert P S. Fast Polygonal Approximation of Terrenes and height fields. Tech. Report of CMU-CS-95-181, 1995. 9. <http://www.cs.cmu.edu/~garland/scape>.
- 38 Rippa Shmuel. Long and thin triangles can be good for linear interpolation. SIAM J. Numer. Anal., 1992, 29(1): 257~ 270.
- 39 Rippa Shmuel. Adaptive approximation by piecewise linear polynomials on triangulation of subsets of scattered data. SIAM J. Sci. Stat. Computer, 1992, 13(5): 1123~ 1141.

- 40 Lee J. Drop heuristic conversion method for extracting irregular network for digital elevation models. In: GIS/KIS'89 Proc., Volume 1, American Congress on Surveying and Mapping, 1989: 30~ 39.
- 41 Lee J. Comparison of existing methods for building triangular irregular network models of terrain from grid digital elevation models. Int. J. of GIS, 1991, 5(3): 267~ 285.
- 42 Hoppe H. Progressive mesh. Computer Graphics(SIGGRAPH'96 Proceedings). <http://research.microsoft.com/~hoppe/>.
- 43 Hoppe H. Smooth view-dependent level-of-detail control and its application to terrain rendering. <http://research.microsoft.com/~hoppe/>.
- 44 Chen Z T, Guevara J A. Systematic selection of very important points (VIP) from digital terrain model for construction triangular networks. Proceedings of AUTO-CARTO 8, Baltimore, MO, U. S. S, 1987, 50~ 60.
- 45 Heckbert P S, Garland Micheal. Multiresoluton modeling for fast rendering. In: Proceedings of Graphics Interface'94, 1994, 1~ 8.
- 46 Samet, H *et al.* Hierarchical data structures and algorithms for computer graphics. IEEE CG&A, 1989: 48~ 63.
- 47 周洞汝, 杨荣. 线性二叉树的一种改进最优构造算法. 计算机辅助设计与图形学学报. 1992, 4(1): 1~ 7.
- 48 Samet, H. Applications of spatial data structures. Addison Wesley, Reading, Maryland, 1990.
- 49 Samet, H. The quadtree and related hierarchical data structures. ACM Computing Surveys, 1984, 16(2): 187~ 260.
- 50 Von Herzen B Barr AH. Accurate Triangulations of Deformed. Intersecting Surface. Computer Graphics, 1987, 21(4): 103~ 110.
- 51 Evans William *et al.* Right triangular irregulay network. <http://www.cs.arizona.edu/people/will/>.
- 52 Duchaineau M *et al.* ROAMing terrain: Real-time Optimally adapting meshes. IEEE Visualization'97 Proceedings. <http://www.llnl.gov/graphics/ROAM/>.
- 53 Lindstrom P *et al.* Real-time, Continuous level of detail rendering of height fields. In: Proceedings of IEEE Visualization'98, 1998, 279~ 286.
- 54 <http://www.multigen.com/>.
- 55 Harrington S. 计算机图形学. 北京: 北京师范大学出版社. 1985, 271~ 276.
- 56 Chew L P. Guaranteed-Quanlity mesh generation for curved surface. Proceedings of the Ninth Annual Symposium on Computational Geometry, ACM 5, 1993, 274~ 280.
- 57 Ruppert J. A Delaunay refinement algorithm for quality 2-Dimensional mesh generation. Journal of Algorithm, 1995, 18(3): 548~ 585.
- 58 Shewchuk Jonathan Richard. Triangle: Engineering a 2D quality mesh generator and delaunay triangulator. CMU Technical Report. <http://www.cs.cmu.edu/>.
- 59 Staadt O *et al.* Fast multiresolution surface meshing. In: Proceedings of Visualization'95, 1995, 135~ 142.



王永明 1996年获清华大学博士学位, 1996年至1998年美国康奈尔大学博士后, 现为北京信息高技术研究所副总工程师. 主要研究方向为地理信息系统, 地形可视化.