

# 分形内插与 DELAUNAY 三角网结合的 三维地形可视化数据模型\*

陶 闯

(武汉测绘科技大学摄影测量与遥感系图象图形教研室 武汉 430070)

**摘 要** 为了有效地实现 GIS 分析中地形数据的可视化,本文提出了分形内插与 Delaunay 三角网结合的三维地形可视化数据模型。该模型不仅能满足几何精度,保持地形特征,而且具有表面质感理想的可视化效果。该模型的空间分辨率可以由尺度、位置和时间参量来调节,具有多尺度表达、局部加密表达和时空动态表达的特点。该模型适于 GIS 的可视化操作与分析。

**关键词** 可视化,分形, Delaunay 三角网,地形模型,统计内插,动态构网

## 1 引言

三维空间数据的可视化是当前 GIS 研究的一个重要方向,其中作为基础地理信息的数字地形的可视化,在 GIS 分析与应用中具有很重要的意义。地形数据的可视化主要包括两方面技术:一是建立三维地形表面的可视化数据模型;二是真实感地形图像绘制。真实感地形图像绘制技术在计算机图形学中已有较为丰富的研究,市场上亦有大量的商品化软硬件出售,故本文着重讨论地形的可视化数据模型问题。

通过采集的离散高程点数据建立一个数字式地形表达模型(即 DTM),主要有二条途径:一是通过数据内插建立规则格网的 DTM;二是直接由原始数据点按一定原则连接建立不规则三角网 DTM。在第一条途径中关键技术是内插。一般较为常用的内插方法有滑动拟合法,有限元法,多面函数法等,这类内插方法我们统称为几何内插。几何内插最主要的特点是引入了平滑性约束条件。由于一般 DTM 质量评价标准采用的是标准方差这类统计量,因此这类几何内插方法得到的 DTM 具有较好的几何精度。然而通过几何内插重建的地形表面其可视化效果不理想:地形表面过于光滑,无地表质感。此外,数据点多少以及分布状况对内插结果影响很大,不同内插方法得到的 DTM 不同,且数据点较少时,重建的地形有较大的失真。

不规则三角网 DTM 的生成无需内插过程,因而能很好地保持原始数据点精度,而且三角网能较好地顾及地形特征线。用三角网表达地形模型,实际上是用许多三角小平面来逼近地形表面,在真实感绘制中,平面较易实现拼接、消隐和求交等可视化操作。然而直接将不规则三角网 DTM 作为可视化模型,显然由于三角平面过于稀疏,所生成的

\* 国家“八五”重点科技攻关项目、国家自然科学基金和测绘遥感信息工程国家重点实验室项目资助

收稿日期:1994年8月15日;收到修改稿日期:1995年3月3日

可视化图像会出现明显的斑块和皱折痕迹。在三角网 DTM 生成中,如何自动构网是这条途径中最重要的技术,即根据何种原则从散乱数据点中建立最佳的三角网,同时能有效地顾及各类地形特征。

我们认为,在地形模型表达的上述两条途径中,仅仅考虑地形表面的高程几何特征,而忽视了地形表面的纹理特征。但我们希望有一种能保持地形表面纹理特征的内插方法。分形内插是近来许多学者较为关注的一种内插方法,Goodchild 认为分形布朗随机过程是至今为止最好的描述真实地形的随机过程<sup>[1]</sup>,Mark<sup>[2]</sup> 的验证实验亦表明,分形内插合成的地形具有与真实地形相同的功率谱密度。分形内插得到的地形可视化效果很好,在地形模拟运用中已取得了巨大的成功,分形内插的特点是能在少量的数据点条件下,生成具有粗糙质感的地形表面,同时地形表面在总体上具有尺度无关特征。然而,分形内插也仅是从统计意义上反映地形的微结构纹理特征,且该内插方法不是直接拟合原始数据点,因而几何精度较低,此外,分形内插不能顾及地形特征。本文将这类具有保持地表纹理特征的内插称为统计内插。

一个有效的地形可视化数据模型应具有如下几个特点:① 满足一定的几何精度;② 保持各类地形特征;③ 有理想的可视化效果;④ 便于可视化操作与分析。为了实现具备上述特点的地形可视化模型,本文提出了分形内插与 Delaunay 三角网结合的一种三维地形可视化数据模型。

## 2 三维地形可视化数据模型

该模型的建立分为三个步骤,即依次建立骨架特征模型、动态精化模型和分形细化模型。首先由地形特征点、线、区域和边界组成一个初始的广义 Delaunay 三角网(即骨架特征模型),然后按照一定的精度原则以及可视化分析需要动态地逐次向网中加入数据点,并重新组网,形成更精化的模型(即动态精化模型),最后在精化的三角网基础上,对三角网作分形内插,递归地将三角网细分,形成最终的分形细化模型。利用此模型作真实感绘制处理,即可得到逼真的三维地形表面的可视化图像。

前已述及,生成三角网 DTM 的关键是构网技术,目前已提出许多构网算法,理论证明<sup>[3]</sup>,在所有的构网原则中 Delaunay 三角网是其中最优的三角网构网原则。Delaunay 三角网能最大限度地保证网中三角形满足近似等边(角)性。Delaunay 三角网定义为<sup>[3]</sup>;组成 Delaunay 三角网的每个三角形不包含数据点集当中除构成该三角形三顶点以外的任何其他点。对于任意给定的离散数据点集, Delaunay 三角网的网形是唯一的。

然而一般的 Delaunay 三角网理论不能适用于具有特征线和非凸边界域的构网,故我们对具有特征线的任意边界的 Delaunay 三角网给予了重新定义(称为广义 Delaunay 三角网)。推证了广义 Delaunay 三角网仍具有最优性,并且提出了一种动态构网算法。下面即以此算法建立骨架特征模型和动态精化模型。

### 2.1 骨架特征模型

建立数据点平面坐标的一个外轮廓矩形,此矩形作为三角网的边界,矩形 4 顶点高程值取为高程基准值。根据动态构网算法,从特征点特征线和特征区上的顶点出发,进行无

交叉的互递,从而形成一个自由三角网。然后,根据 Delaunay 三角网的圆准则对自由网作优化,得到由地形特征构网的且满足 Delaunay 特性的三角网。如图 1(a)、(b) 示。该三角网模型表达了该区域地形的骨架轮廓。

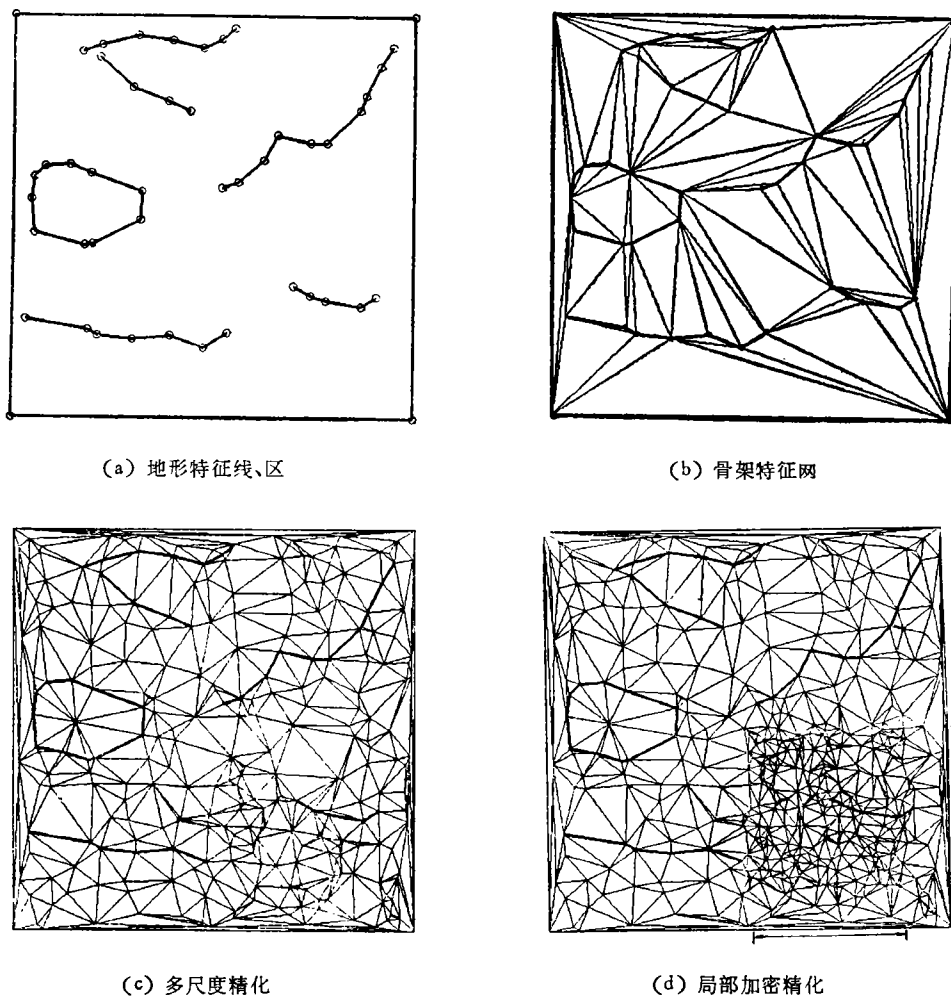


图 1 Delaunay 三角网模型建立

Fig. 1 Constructing a Delaunay triangulation model

## 2.2 动态精化模型

动态构网是指在网中加入新数据点时,只需对网的局部作优化调整,调整后的新网仍保持 Delaunay 网的最优性,无需对所有数据点重新构网。这一特点非常适于地形数据的多尺度表达、局部加密表达和时空动态表达,在可视化操作与分析中这几种表达技术十分重要。

### 2.2.1 多尺度精化

在地形模型的动态显示中,如果所有的数据点都加入模型,则将极大地增加运算量,影响显示速度,即使在高档工作站上,对模型作平移、旋转等操作,亦都会发生滞后现象。

引入多尺度模型是解决这一问题的有效办法,在动态显示中,用户关注的是浏览和检索,因此不需要过于丰富的细节。在本模型中,我们用以下两条原则对数据点作筛选,只将那些对模型表达影响较大的点入网。① 设  $f_i(x,y)$  为已建三角网中某三角形的平面方程,欲入网的高程数据点为  $z(x,y)$ ,当  $(x,y)$  落入  $f_i(x,y)$  的平面投影中,插入误差为:

$$\varepsilon = |z(x,y) - f_i(x,y)|$$

当  $\varepsilon > \varepsilon_0$  (几何阈值),该点入网。② 若该点插入后,判断由该点引起的原三角网中应被删除的三角形个数  $n$ ,若  $n > n_0$  (结构阈值),则该点入网。以上两条原则旨在保持三角网的几何和结构精度,只要满足其中一项,该点即可入网。实际中可根据需要,调整  $\varepsilon_0$  和  $n_0$ ,使多尺度精化模型既满足一定精度,又降低数据量(图 1(c))。

### 2.2.2 局部加密精化

由于地形模型可能很大,在可视化分析中用户可能对某个局部感兴趣,因此在某个局部需要更加丰富的细节。这样要求可视化模型的空间分辨率应该是随位置而变化的。Delaunay 三角网能非常容易地实现这项操作。设用户的关心区域为  $Q_i$ ,当数据点  $z(x,y)$  落入此区域中,  $(x,y) \in Q_i$ ,则该点入网,否则该点是否入网由上述的多尺度原则来判定(图 1(d))。

### 2.2.3 时空动态精化

GIS 正向四维时空模型发展,四维可视化研究亦是一个关键环节。通过多尺度精化和局部加密精化可以实现一个空间分辨率随尺度和位置而变化的可视化模型。下面引入时间分量来实现时空动态精化。将数据点按时间分组,然后依次将各组数据逐次入网,入网点的筛选仍由多尺度精化和局部加密精化原则而定,以此形成一个动态序列的地形模型。当前一时刻的模型形成以后,后一时刻的数据点入网时,将作如下三个操作:加新点,删旧点,改旧点。加入原网中不存在的新点,可由插入分裂办法实现;删除新网中不存在的一个先前旧点,则实际上是插入新点的逆过程,如图 2 示,旧点删除后,则留下一个包含旧点的多边形,以圆准则在多边形内组网(先形成自由网,再做对角线优化)即完成此操作;改造旧点是因为新旧模型中同一点的位置或高程发生了改变,改旧点操作即是删旧点加新点的一个组合。

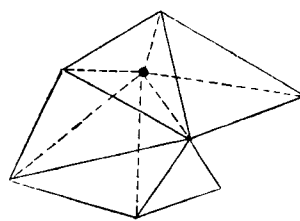


图2 从三角网中删除一点的操作

Fig. 2 An operation of deleting a point from the triangulation

## 2.3 分形细化模型

在上述建立的数据模型上作分形内插,即得到分形细化模型。内插方法主要分三大类:傅立叶变换法,递归细分法和噪声合成法。这三类方法各有特点,傅立叶变换法能生成严格满足 fBm 性质<sup>[9]</sup>的表面;递归细分法计算快,易实现近 fBm 表面;噪声合成法可以生成表面统计性随位置而变化的不同地形表面。本文拟用递归细分法,理由为:① 此法能与 Delaunay 三角网模型很好地结合;② 具有任意分辨率的递归动态显示特点;③ 计算快,程序代码简洁。一般的递归细分法所合成的图像会出现“皱褶”现象。下面我们

利用 Delaunay 三角网特点对递归细分法作改进,以解决皱褶问题。

皱褶现象的本质是表面不满足 fBm 性质,递归细分法中常采用以周围两点的中点进行内插细分,这样内插过程是上下文无关的,因此不满足 fBm 性质,Miller<sup>[5]</sup>提出了一种块细分的改进方法,即内插点以周围 4 邻点的距离加权作分形内插,由于增加了上下文相关性,因此皱褶现象有较好的消除。本文提出一种基于 Voronoi 图顶点的三角细分法,同样消除了皱褶现象。

如图 3(a) 所示, Delaunay 三角网与 Voronoi 图(简称 V 图)是一一对应的<sup>[3]</sup>, V 图顶点就是三角形外接圆的圆心,且相邻 V 图顶点的连线必垂直平分三角形边。首先由三角形三顶点取平均计算其对应的 V 图顶点值,然后内插位于两 V 图顶点连线上的三角形边中点值,内插值仍以距离  $d$  加权(图 3(b)):

$$g_{mid} = (dV_1 + (1 - d)V_2) + \text{GAUSS}\left(0, \left(\frac{1}{2}\right)^{-h} \sigma\right)$$

式中,  $h$  为分维数对应的自相似参数 ( $h = 3 - D$ ),  $\sigma$  为方差参数,  $\text{GAUSS}(\mu, \sigma)$  为  $\mu$  均值  $\sigma$  方差的随机变量函数,地形表面质感效果可由  $h$  和  $\sigma$  调节,一般  $h$  在 0.6—0.95 间较合适。分别对三角形三边作内插,这样可生成一级内插图(图 3(c) 大圆点),然后再由常规的中点递归变位法<sup>[6]</sup>进一步内插细分(图 3(c) 中小黑点),得到最后的分形细化的地形可视化模型。

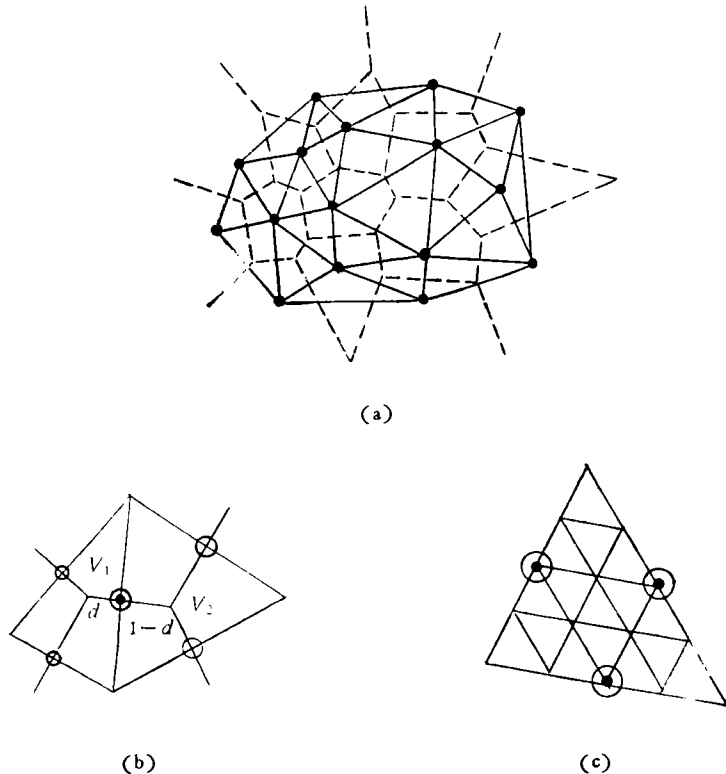


图 3 基于 Voronoi 图的分形三角细分内插  
Fig. 3 Voronoi diagram Based fractal triangular subdivision

### 3 三维地形的可视化

为了验证上述的地形可视化数据模型,我们在 PC-486 + Super VGA 视频卡上进行了可视化实验。消隐处理采用的是浮动水平线法<sup>[7]</sup>,观察方向取为平行于  $y$  轴。这样三维数据可平行投影到  $xz$  平面, $xz$  平面即作为屏幕显示平面。消隐时前排数据先投影,后排数据的投影  $z$  值若大于前排则显示,否则隐舍。

光照模型选用的是 Gouraud 模型<sup>[8]</sup>,该模型首先计算各投影点的灰度值,对其他点则用线性插值计算灰度。投影点的灰度值  $I$  为:

$$I = I_{\text{ambient}} + I_{\text{diffuse}} + I_{\text{specular}}$$

$$\begin{cases} I_{\text{ambient}} = B \cdot R \\ I_{\text{diffuse}} = P \cdot (I \cdot n) \cdot R \\ I_{\text{specular}} = P \cdot W \cdot (n \cdot r) \end{cases}$$

这里  $I_{\text{ambient}}$ 、 $I_{\text{diffuse}}$ 、 $I_{\text{specular}}$  分别为环境光强,漫反射光强和镜面反射光强。 $B$  为环境辐射光强, $R$  为物体反射率, $P$  为点光源光强, $W$  为镜面反射系数; $I$  为指向光源的单位向量, $n$  为物体表面的单位法矢, $r = 2(n \cdot I) \cdot r - I$  为中间向量。

图版 I 图 4 为一组三维地形的可视化结果,(a) 与 (b) 是同一地区不同时刻的地形数据的可视化,该数据模型经过了多尺度精化和时空动态精化处理。(c) 是局部加密精化数据模型的可视化,由图可见,其模拟火星表面粗糙起伏的质感较逼真。(d) 是一幅海岛图,这里采用了任意边界的 Delaunay 三角网模型。(e) 和 (f) 是同一地区的可视化模型,其中 (f) 的数据模型中引入了特征线以模拟火山口地貌,数据模型的建立则采用了顾及特征线的广义 Delaunay 三角网构网算法<sup>[9]</sup>,具体过程见图 1。

### 4 结论

通过构造骨架特征模型、动态精化模型和分形细化模型,实现了一个三维地形表面的可视化数据模型。

(1) 该模型将分形内插和 Delaunay 三角网模型有机地结合起来,通过分形内插可以有效地解决三角网模型可视性不好的问题;以 Delaunay 三角网建模则可以保持各类地形特征,同时满足地形的几何精度。

(2) 该模型采用了具有动态构网特点的插入分裂构网算法,可以实现模型的多尺度表达,局部加密表达和时空动态表达,因此该模型的空间分辨率可以由尺度、位置和时间来控制调节,这对 GIS 数据的可视化操作与分析极为有益。

(3) 文中提出的基于 Voronoi 图顶点的分形细分算法结合了 Delaunay 三角网特点,以上下文相关内插消除了图像显示中常见的皱褶现象,此外,分形内插可以在较少数据点情况下,生成总体轮廓相似且可视化较好的数据模型。

(4) Delaunay 三角网构网与分形细化算法均易实现平行化。

利用 Delaunay 三角网模型可以实现地形表面数据与地表地物数据的叠加,此外平

面 Delaunay 三角网模型可以扩展到高维,以表达更为复杂的 GIS 中的各类实体信息,因此 Delaunay 三角网模型与分形模型结合的进一步研究十分必要。

### 参 考 文 献

- [1] Goodchild M F Mark D M. The Fractal Nature of Geographic Phenomena, *Annals of Ass. of American Geographers* 1987, **77** (2);265—278.
- [2] Mark D M, Aronson P B. Scale-dependent fractal dimensions of topographic surfaces, *Mathematical Geology*, 1989 **16**(7); 671—683.
- [3] Preparata F P., Shamos, M. I., 庄心谷译,计算几何导论,北京: 科学出版社,1990.
- [4] 陶闯,陶本藻,分形布朗随机过程的统计分析及其应用前景,测绘通报,1994,(3).
- [5] Miller S P. The definition and rendering of terrain maps. 1986 *CG20*(4), 39—48.
- [6] Fournier A et al. Computer Rendering of Stochastic Models. *Commun. of the ACM*, 1982, **25**, 371—384.
- [7] Saupe D. Algorithms for random fractals, in the *Science of Fractal Image* (Peitgen eds.), Springer-Verlag, 1988.
- [8] 唐荣锡,等,计算机图形学教程. 北京: 科学出版社,1990.

## 3-D Terrain Visualization Model Based on the Combination of Fractal Interpolation and Delaunay Triangulation

Tao Chuang

(*Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*)

**Abstract** To efficiently implement the visualization of terrain data in GIS, a visualization model of 3-D terrain based on the combination of fractal interpolation and Delaunay triangulation is proposed. By means of the model, not only the geometry accuracy can be satisfied and the characteristic of terrain are preserved, but also the textures of terrain surfaces are nicely visualized. The spatial resolution of this model can be arbitrarily controlled by the scale, location and temporal parameters. The model is suitable for GIS visualization data handling and analyzing.

**Key words** Visualization, Fractal, Delaunay triangulation, Terrain model, Statistical interpolation, Dynamic triangulation construction