

# 3D-GIS 数据表示和空间插值方法研究

易善桢 李琦

(北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871)

**摘要** 空间数据表示方法和空间数据插值方法是 3D-GIS 研究的基本问题。文中采用基于地学复形的 3D 空间数据表示方法, 对地学目标抽象表示为点、线、面和体 4 种类型。提出了基于地学复形空间的表示方法。为解决可视化和目标体重建问题, 分析了基于地学复形的各种插值方法。具体实现了二维地学复形三角网的生成和 2 种三角网的插值方法。在华北地区钻孔地层厚度等值线生成的应用中, 三角网插值方法比其它插值方法更符合地质规律。

**关键词** 3D-GIS 数据表示 空间数据插值 单纯形 地学复形

## 0 引言

3D-GIS 是对具有三维地理参考坐标的地球信息进行输入、存储、编辑、查询、空间分析和模拟的计算机系统。3D-GIS 是在 80 年代末期发展起来的, 早期的系统有 Earthvision, Geocad, Stratamodel, lynx 等, 这些系统主要是可视化的模型系统。3D-GIS 已开始被用于石油天然气、水文及地质勘察、海洋、沉积、环境监测、地下水工程等方面<sup>[1]</sup>。

3D-GIS 的研究有两个方向: ① 利用三维几何和 CAD 领域的可视化, 构成 3D-GIS 中交互式的模型和可视化系统。三维几何造形技术已很成熟, 例如 CSG 和边界表达法, 但它没有考虑空间拓扑关系, 不能对空间几何目标进行管理和空间查询及分析。② 开发 3D-GIS 数据管理和空间分析功能, 它从数据库方面进行考虑。两个方向进一步连接将导致新的 3D-GIS 结构<sup>[2]</sup>。

目前大多数 3D-GIS 的数据模型是基于体素的 (voxel-based)。而基于矢量数据模型的系统比较少。矢量模型对复杂的 3D 空间目标的数据管理会有更成熟的数据库解决方法, 并可应用类似于 SQL 的查询语言进行空间操作访问。迅速发展的虚拟现实技术也为 3D-GIS 数据矢量模型表示提供了可能。

在地球科学领域与 3D-GIS 相似的系统有很多, 如地球科学制图和模拟系统 GMMS (Geoscientific Mapping and Modelling System)。它为地球科学家提供了设计任务、数据存储和可视化的工作环境。

## 1 3D-GIS 数据表示方法和插值方法

在 3D-GIS 研究中, 数据表示方法 (数据模型和数据结构) 是一个关键问题。由于 3D 目标和应用的复杂性, 一种数据结构很难满足各种需要。如前所述, 3D 空间数据表示方法有栅格类型和矢量类型, 栅格类型如立体栅格图象, 栅格八叉树等, 这种结构简单, 便于各种空间叠加操作; 缺点是占用大量存储空间, 数据精度低, 没有空间拓扑关系, 不利于空间查询。矢量类型如边界表示法, 优点是数据精度高, 所占存储空间小, 有一定的拓扑关系; 缺点是空间计算复杂。因此开发一种新的表示方法, 能综合上述各结构的优点, 克服其缺点, 是目前 3D-GIS 数据表示研究的热点。目前这种新的表示方法称之为混合数据结构。本文中研究的数据表示是以点、线段、三角形、四面体这些单纯形来表示空间实体, 这种结构称为单纯形数据结构 SDS (Simplicial Data Structure)<sup>[3]</sup>, 在二维平面上的面用 TIN 表示 (三角形非规则网 Triangulated Irregular Network), 在三维空间中的体用四面体网 TEN。

一种好的数据表示方法有利于空间数据的插值。传统的方法有多项式拟合、克里格等方法。随着计算机图形学和 GIS 的发展, 各种新的插值方法及人机交互技术应运而生。本文是在单纯复形数据结构 (包括三角形网) 的基础上, 应用三角形网的插值方法, 虽然这种方法已在 DEM 中应用, 但作为在三维地层厚度和属性的插值方面还是首次。

## 2 基于单纯复形的 3D-GIS 的数据表示方法

传统的 CAD 空间数据表示方法缺乏对空间关系和查询的定义。三维空间中的拓扑关系复杂,在空间数据表示中,由于拓扑空间关系的重要性以及几何运算的有效性,我们考虑用单纯复形的表示方法。目前, Martin Breunig 等人用单纯复形作为空间数据集成的一种过渡性数据表示方法,其它数据表示方法通过单纯复形表示方法进行相互转换。单纯复形是点集拓扑学中的一种拓扑模型。

单纯形根据维数可分为 4 种,如图 1 所示。

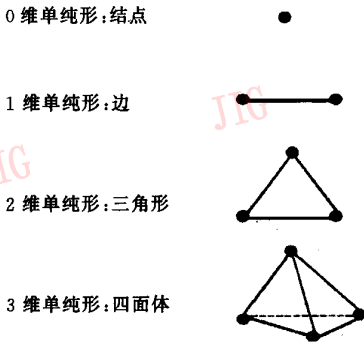


图 1 4 种单纯形

单纯形  $S$  的定义<sup>[4]</sup>: 设  $P_0, P_1, \dots, P_m$  是  $R_n$  ( $m < n$ ) 中的线性无关的点组, 则  $R_n$  中所有表示为  $P = \lambda_0 P_0 + \lambda_1 P_1 + \dots + \lambda_m P_m$  的点  $P$  的集合称为  $m$  维单纯形, 记为  $S_m$ 。其中  $\lambda_0 + \lambda_1 + \dots + \lambda_m = 1, \lambda_i > 0$ 。  $m$  维单纯形  $S_m$  也可表示为:  $S_m = \{ P | P = \lambda_0 P_0 + \lambda_1 P_1 + \dots + \lambda_m P_m \in R_n \}$

一个单纯形由比它低维的单纯形组成。一个单纯复形  $C$  是单纯形的有限集, 它满足下列条件:

- (1) 当  $S_m \in C$ , 并且  $S_i \subset S_m$ , 则有  $S_i \in C$ 。
- (2) 当  $S_m, S_i \in C$ , 并且  $S_m \neq S_i$ , 则有  $S_m \cap S_i = \phi$ 。

其中  $S_m, S_i$  是  $C$  中的任意 2 个单纯形。

单纯形有以下特性:

- (1) 两个单纯形的交或是空  $\phi$ , 或是 2 个单纯形的边界(指对一个空间属性的划分)。
- (2) 在二维单纯形中, 每个 1 维单纯形(边)至多是 2 个 2 维单纯形(三角形)的公共边。
- (3) 在三维单纯形中, 每个 2 维单纯形(三角形)至多是 2 个 3 维单纯形(四面体)的公共面。

$d$  维单纯复行  $C_d$  的边界是  $d-1$  维的单纯复形。

在 CAD 领域中的空间数据表示方法没有考虑空间关系, 不能进行有效的几何操作, 对任意多边形的边、面或体的交、包含等操作是非常费时的。并且几何体中很少一部分同查询是有关的。我们采用单纯形把几何体分解成子几何结构如三角形, 而仅仅在这种子几何结构上执行操作等方法, 使计算变得非常容易。如三角形的交可归结为简单的面和线的交。

用单纯复形作为 3D-GIS 空间表示的基础, 还有以下原因:

- (1) 它可以用一致的模型表示点、线、面、体。
- (2) 表面由二维单纯形(三角形)来构造, 体由三维单纯形(四面体)来构造, 因为四面体总是凸的, 并且由最少而且固定数量的面、边、点组成。四面体的面由三角形组成, 三角形也是凸的。因此体分解成单纯形, 它包括最简单的几何特性。

(3) 在地质学中, 常常有不规则测量点分布, 它们作为规则的栅格表达往往是不精确的。不规则测量可用三角形不规则网(TINs)来插值, 并且三角形不规则网表示也适合地质地层模型和断层的表示。

在单纯复形的表示方法中, 地学中的各种点目标由 0 维单纯形表示; 线目标由 1 维单纯形, 即线段表示; 面目标由 2 维单纯形即三角形网表示, 包括平面三角形网和空间立体三角形网; 体目标由 3 维单纯形表示, 即四面体网(TENs)。

## 3 地质体的单纯复形表示和数据模型

地质体的表示除了几何信息和拓扑信息外, 还有属性信息。本文中对于点目标, 还加上特性信息。属性是指一个地物目标所属的地物类别, 是对地物的分类和编码, 有专门的地学编码模型。不同于属性, 目标点的特性是指该点的物理化学性质或场值, 例如重力、磁力、元素异常等。用单纯复形表示地质体的方法, 称为地学复形<sup>[2]</sup>, 用 GC 表示。

地学复形 GC 是一个单纯复形, 有明确的拓扑(邻接关系)和几何信息(3D 坐标), 有一个标识码 ID, 以及加上 0-, 1-, 2-, 3-维单纯形上的属性、特性和方法(操作)。

地质对象可概括为 0 维的点, 1 维的面, 2 维的线, 3 维的体。

(1) 0 维对象: 包括结点和地质定义点。结点只表示线与线、线与面等的连接关系, 没有属性。地质定义点如钻孔的测量点, 不仅包括几何位置, 还包括地学属性以及物理化学特性。0 维对象用 0 维地

学复形表示 0-GC。

(2) 1 维对象:包括边和线。边是 2 个 0 维对象的连线,是基本的一维对象,构成三角形或多边形的边。线由多条边组成,它可能是线状地物的一部分,也可能是面状地物的边界。边本身一般没有属性,但如果线本身就是一个线状地物,它也可以有属性。地质定义的线状地物由若干边组成,例如地层线和断层线,有属性相连。一维对象可以由一维地学复形 1-GC 表示。

(3) 2 维对象:包括拓扑面和地质定义的面。

① 拓扑面,构成地质体的边界面,具有拓扑关系,没有属性。

② 地质定义的面,是指面状地物,具有属性,例如地层面和断层面。

二维对象可由二维地学复形 2-GC(即三角形网 TINs)表示。

(4) 3 维对象:是地质定义的体,具有属性,例如岩体,矿体,地层体。用三维地学复形 3-GC(即四面体网 TENs)表示。

用基于地学复形的数据结构及拓扑关系,采用面向对象的技术,对空间目标体抽象为点、线、面和体四种类型。

对于点目标,用 0 维 GC 表示;线目标,用 1 维 GC 表示;面目标,用 2 维 GC 表示(平面三角形网和曲面三角形网);体目标,用 3 维 GC 表示(四面体网)。

点目标由结点坐标  $(x, y, z)$ 、属性和各种特性确定;线目标由结点连接成的线段组成,包括属性;面目标可分为二维平面和三维平面及曲面,由三角形网和属性组成。体目标可直接由结点(分为边界点和内部点)生成四面体网,也可由表面目标通过拓扑关系(表面的左右体)形成体目标。由表面形成体,同二维 GIS 中由弧段构成多边形一样,表面(例如地层面和断层面)有左体目标和右体目标。一个表面是由边界点和内部点形成的三角网,其中边界点的连线形成边界,根据边界点的连接方向由右手法则确定一个表面的法方向,由此可确定表面的一侧为左边体,另一侧为右边体。

## 4 基于地学复形的几种插值方法探讨

本文研究的基于地学复形的插值方法,在二维情况下是基于平面三角网的插值,在三维情况下是基于空间三角形和四面体的插值。可用于等值线的生成和等值面的生成以及三维可视化。

### 4.1 基于平面三角网的地物特性(或几何面)的插值方法

一个平面控制点  $P$  可由一个三元组表示,即  $(x, y, f)$ ,  $f$  表示各种特性,例如  $f$  可以是地层厚度  $h$ ,或深度,或其它各种物理化学特性。

平面控制点的三角剖分后,在  $xy$  平面上对  $f$  进行插值,一种简单的方法是线性插值,即由三角形的三个顶点  $P_1(x_1, y_1, f_1)$ ,  $P_2(x_2, y_2, f_2)$ ,  $P_3(x_3, y_3, f_3)$ , 确定一个小平面,然后利用平面方程进行插值。

### 4.2 基于三维空间表面的三角网的等值线插值方法

三角网方法不仅仅局限于平面上的三角网,对于空间上的一个曲面,可以用三维的三角网来近似表示。因此空间曲面上的等值线也可用三角网方法,这是传统方法做不到的。

三维空间曲面,例如有起伏的地表面、地下地层面、断层面等。对于这些表面上分布的特征(例如元素异常)的等值线生成,可以用三维空间三角网插值方法。这是基于二维地学复形的表示方法。三维空间上的二维复形在 2D-GIS 中实际是 2.5 维,因为它的坐标是  $(x, y, z)$ 。

### 4.3 基于四面体网(TENs)的等值面插值方法

四面体是三维地学复形,四面体网插值是体插值,它形成三维体数据,可用作地学体的可视化。给定三维空间中的一组观测点  $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ,用这些观测点连接成四面体,对空间进行四面体剖分,每个四面体均以 4 个观测点为其顶点,并且四面体不包含其它的观测点,即它是空间的一个划分。

对于四面体等值面的生成,首先在四面体单元中提取等值面片,这个小等值面片为一个三角形或四边形,然后用具有相同阶数的三角域或矩形域上的贝齐尔(Bezier)曲面代替四面体单元中的三角形或四边形等值面片,使相邻四面体单元中等值片保证某种连续性。

### 4.4 基于四面体网(TENs)的特性插值方法

对于物理化学特征的数据场的体数据生成和可视化,用三维空间数据点的值,可用基于四面体网的三维线性插值方法<sup>[3]</sup>。

### 4.5 基于平面三角网的属性边界的生成方法

由观测点生成属性图,传统的方法是在观测点

之间勾画属性边界。在三角形网中,可以根据三角形顶点的属性及其与邻近的三角形顶点的属性来确定属性的边界,即边界的插值。一种简单的插值方法是以不同属性的顶点的连线的中点为2个属性的边界点,2个相同属性的顶点之间没有边界点,通过连接边界点形成属性区域。

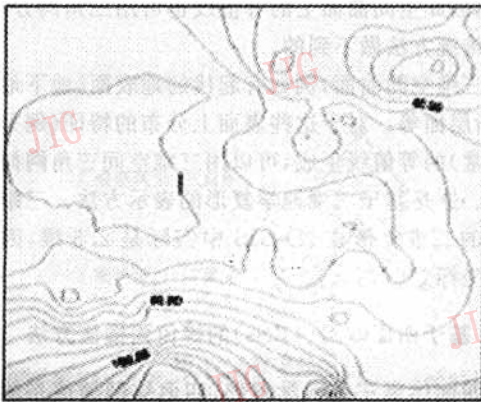
## 5 华北地区基于平面三角网的地层等值线生成

对华北地区府君山期地层钻孔厚度用克里格插值和平面三角网插值分别生成厚度等值线。

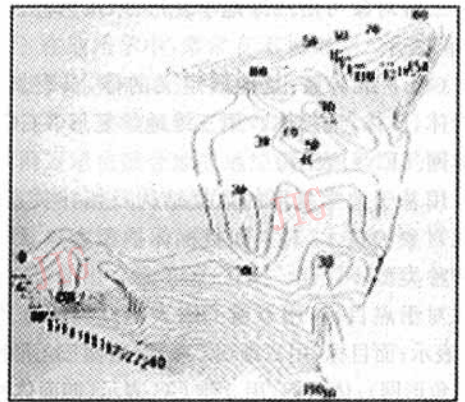
三角网等值线生成方法的关键是不规则观测点的三角网的形成,即三角剖分。等值线生成方法是:

给定一个值,从第一个三角形搜索,看该值是否在三角形某两顶点之间,如果是,则按线性插值,计算插值点的坐标,依次对每个三角形进行计算,直到回到起始点,形成封闭曲线,或到达边界,形成开曲线,如图2(b)。

华北地区钻孔地层数据用三角网等值线插值结果(图2(b))同已出版的华北府君山期岩相古地理图的结果一致,而克里格方法的结果有较大的差别(如图2(a)所示),趋势面方法差别更大。而对于控制点分布均匀的区域模拟数据,克里格插值和三角网插值方法都合适,克里格方法对局部反映更细致。三角网插值和四面体网插值适合于三维空间离散的不均匀分布点的情况。特别是基于平面三角网的属性边界的生成方法,可用于分类数据边界的插值。



(a) 克里格插值



(b) 三角网插值

图2 华北府君山期地层厚度的两种插值方法的等值线的对比

## 6 结论

本文提出了一种空间数据表示方法以及在这种方法下的各种空间插值方法。结合各种空间表示方法的分析,根据地学的复杂性和空间插值的需要,本文以地学复形作为空间数据表示方法。对三维地质现象抽象表示为点、线、面和体4种类型。基于地学复形的空间数据表示方法,提出了地学复形数据表示的数据模型。

本文研究了空间数据的插值问题。在基于地学复形的空间数据表示方法下,探讨了6种插值方法。其中基于三维空间表面的三角网等值线插值方法和基于平面三角网的属性边界生成方法是本文提出的新颖方法,可解决三维空间表面上的等值线生成问题,以及平面区域上由控制点属性生成区域属性的

问题。

有待解决的问题:3D-GIS数据表示方法只是提出了一种空间数据结构和数据模型,要具体实施3D-GIS的功能还需大量的工作,包括:

- (1) 空间关系的详细定义;
- (2) 空间几何算法,例如切割、合并等算法的设计;
- (3) 复杂地质体的表示,例如有空洞和交叉地质体的表示;
- (4) 对复杂情况下的空间数据进行专家参与的交互式插值,用这种插值数据进行地质目标体的三维重建。

## 参考文献

- 1 胡友元,黄杏元. 计算机地图制图. 测绘出版社, 1991.
- 2 孙家广等. 计算机辅助几何造型技术. 北京:清华大学出版社,

- 1991.
- 3 马洪兵. 地学数据场可视化研究:[学位论文]. 北京:北京大学, 1996.
  - 4 王来生等. 大比例尺地形图机助绘图算法及程序. 测绘出版社, 1993.
  - 5 熊金城. 点集拓扑讲义. 北京:高等教育出版社, 1981.
  - 6 Martin B. Integration of Spatial Information for Geo-Information Systems. Springer, 1996.
  - 7 Jonathan R. Three Dimensional Applications in Geographical Information System. Taylor & Francis, 1989.
  - 8 MennoTan K. Working with triangulated-based spatial data in 3D space. ITC Journal, 1992-1.
  - 9 Christopher B J. Map generalization with a triangulated data structure. Cartography and Geographic Information Systems, 1995,22(4).



**易善楨** 1989年毕业于浙江大学地球科学系遥感地质专业,1997年获北京大学遥感与地理信息系统研究所硕士学位,目前为该所博士生。主要从事遥感, GIS 和空间信息基础设施理论的研究。

**李琦** 北京大学遥感与地理信息系统研究所教授,博士生导师。主要从事遥感,地理信息系统,决策支持系统,空间信息基础设施等方面的研究。

## The Method of Data Presentation and Interpolation in 3D-GIS

Yi Shanzhen, Li Qi

(Institute of Remote Sensing & GIS, Peking University, Beijing 100871)

**Abstract** The method of data presentation and interpolation is a basic issue in 3D-GIS, which will affect the management of spatial data and spatial analysis. It's a key problem for many functions of 3D-GIS. Comparing several spatial data presentations, on the base of others research, the authors propose the simple based geospatial data presentation, abstract geobjects as point, line, surface, and body. Then their logical design and topological relation are given. For visualization and rebuilding of geobject, simple based interpolation methods are introduced.

**Keywords** Data presentation in 3D-GIS, Interpolation of spatial data, Simple, Geocomplex