

# 三维地理信息系统中的数据结构\*

李清泉 李德仁

(武汉测绘科技大学地球科学与测量工程学院, 武汉市珞喻路 39 号, 430070)

**摘要** 分析了空间数据的维数及其表示, 讨论了三维地理信息系统中两类不同的空间数据结构, 即基于表面表示的数据结构和基于体表示的数据结构。分析了边界表示(BR)、结构实体几何法(CSG)、非均匀有理 B 样条(NURBS)、八叉树(Octree)和不规则四面体(TEN)等空间数据结构的特点和应用。

**关键词** 空间数据结构; 三维; 地理信息系统

**分类号** TP311.2

## 1 空间数据的维数与表示

在 2D GIS 中, 空间数据的采集、处理与表示是基于一个平面, 即通过平面上的  $X$ 、 $Y$  轴对研究对象进行定义, 描述的是 2D 对象, 如海岸线、地块。由于 2D GIS 只能处理 2D 数据, 对于 3D 数据的处理通常是将  $Z$  值当作一个属性常数, 如 DEM 数据。其处理也是将高程数据看成一个属性值, 进而将其抽象为 2D 数据进行分析、处理。在这种情况下, 对于一对  $(X, Y)$  值, 只允许一个  $Z$  值。这种方式定义的是一个没有折皱的表面, 这对大部分地形方面的应用是没有问题的。但是在许多地学研究中, 人们所要研究的对象是充满整个 3D 空间的, 如大气污染、洋流、地质模型等, 必须用一个  $(X, Y, Z)$  的 3D 坐标系来描述。在 3D GIS 中, 研究对象是通过空间  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴进行定义, 描述的是真 3D 的对象。每一组  $(X, Y, Z)$  值表示一个空间位置, 而不是 2D GIS 中每一组  $(X, Y)$  值表示一个空间位置。研究对象可以归纳为 4 类, 即点、线、面和体。其中的线不仅包括 2D GIS 中的平面曲线, 还包括 3D 中特有的空间曲线; 面不仅包含 2D 平面, 还有 3D 中的空间曲面; 而体则是 3D 中特有的研究对象。由此可以看出, 2D GIS 是 3D GIS 在空间上的一个简化, 3D GIS 是 2D GIS 在空间上的延伸, 其复杂程度也远远高于 2D GIS。

由于真 3D 的模型仍然要在 2D 的计算机屏幕上显示, 从而引入关于显示(visualisation)的问题。显示可分为 2D、2.5D 和 3D。

2D 显示是一个图形, 它将  $Z$  值定义的表面投影到 2D 平面。由于  $Z$  值通常是连续变化的, 常将其进行分组, 用分组的界线进行显示, 如等高线图。对于  $Z$  是多值的情况就无法显示, 如等高线图上的陡坎, 此时等高线通常省略, 代之以专用符号表示。2.5D 显示是一个等比例的模型。此时  $Z$  值定义的表面投影到  $X, Y, Z$  坐标系, 3 个轴均显示出来, 使得 3D 对象具有真实感。但是一个 3D 对象的 2.5D 显示只能是一个单值面的显示, 对于一组  $(X, Y)$  值具有多个  $Z$  值不能进行正常的处理, 这种显示只是空间对象在一个平面或界面或一个观测角度的状态。因此, 只有 2D 的操作能在 2.5D 的显示上进行。3D 显示是一个体模型。此时, 多个  $(X, Y, Z)$  观测值结合在一个体范围内, 实现了多个  $Z$  值的显示。这种显示类似于人类居住的物理空间, 可以

收稿日期: 1995-10-20。李清泉, 男, 31 岁, 讲师, 博士生, 现从事三维地理信息系统的理论和应用研究。

\* 测绘遥感信息工程国家重点实验室开放研究基金资助项目, 编号 WKL(95)302。

进行真 3D 操作。

在目前的 GIS 分析中,通常只用 2D 和 2.5D 来表示 3D 现象,特别是 3D 空间中的表面。对于这样的表示,2.5D 技术提供了一个好的机会去观察模型。由于计算方便,较好地满足了一些应用要求,因而运用比较普遍。如地下土层由于其厚度相对面积来说可以忽略,就可以用一个面来表示,这种第 3 维的压缩不会引起显著的信息丢失。2.5D 的表面显示对于界面来说同样适合。但是,这些对象只能在对于一组  $(X, Y)$  没有多个  $Z$  值出现的情况下才能处理。因此,2.5D 显示只限于具有空间连续性的对象。对于某一给定的位置有多个  $Z$  值的情况,尽管可以用多个相邻的表面来表示,这种状况仍给分析带来一些困难。实际上,如果表面交叉将难以进行有效的管理,而且对于提取空间对象的 3D 特征也是比较困难的。

空间数据结构是 3D GIS 的核心。根据 3D 数据结构的几何特征,将数据结构分为两大类:一类是基于表面表示的数据结构;另一类是基于体表示的数据结构。在下面的内容里,将对这两类数据结构进行讨论。

## 2 基于表面表示的数据结构

基于表面表示的数据结构有格网结构(grids)、形状结构(shape)、面片结构(facets)和边界表示(BR)等。

### 2.1 格网结构

格网结构是 DEM 中常用的一种结构。地形表面被划分成规则的  $m \times n$  格网,如图 1。每个格网点上有一个高程值相对应,其基本元素是一个点,主要用于 DEM 中等高线的 2.5D 表示。

### 2.2 形状结构

形状结构通过对象表面点的斜率来描述,基本元素是表面上各单元所对应的法线向量(如图 2),主要用于表面的 3D 重建。其基本思想是以像素的明暗变化反映地形坡度的变化,通过坡度变化可以求出像素之间的高差变化,最终确定地形的 3D 表面。

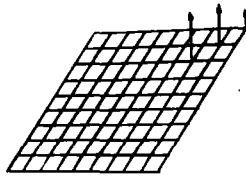


图 1 格网结构

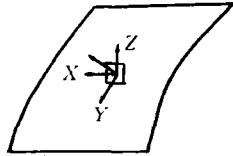


图 2 形状结构

### 2.3 面片结构

面片结构是用不同形状的面片近似表示一个对象的表面。面片的形状有正方形、规则三角形、不规则三角形和泰森多边形等。其中,不规则三角形(TIN)是最常用的一种面片,它具有许多特点,如在绘制等高线时避免了“鞍部点问题”;计算坡度等地形参数容易实现;不规则的点分布符合采样的实际情况;可以根据表面的复杂程度变化三角形的大小,以消除多余数据并保持较好的近似。把高程值结合到每一个三角形的顶点,便形成 2.5D 表示。图 3 是利用 TIN 进行 2.5D 地形表示的例子。

### 2.4 边界表示

边界表示是一个分级表示方法。空间的任一对象可以分解为 4 类元素的组合,即点、线、面和体,每一类元素由几何数据、分类标志以及与其他类元素的相互关系(拓扑关系)来描述。图 4 是一个基于边界表示的 3D GIS 的数据结构。在实际应用中,为了将观测数据转换成边界表示,元素间的关系必须确定下来。而地学的研究对象通常是未知的,因而这个过程非常困难,有

时甚至不可能实现。另外,边界表示对于布尔操作难以进行,整数特征的计算也很费时。就其特点,边界表示主要用于CAD/CAM系统以及工程等方面的应用。

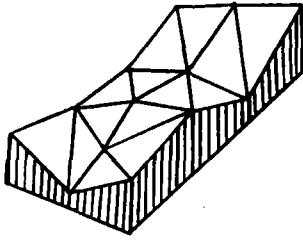


图3 面片结构

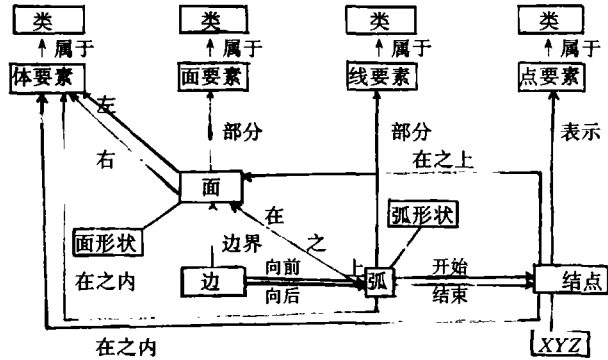


图4 边界表示的数据结构

### 2.5 非均匀有理B样条(NURBS)函数

采用函数法表示地学表面,具有节省存储空间、计算机处理简便易行,并可以保证空间唯一性和几何不变性等优点。非均匀有理B样条函数是B样条函数的一种,具有如下特点:

- 1) B样条的优点均保留;
- 2) 透视不变性——控制点经过透视变换后生成的曲面与先生成曲面再变换是等价的;
- 3) 球面等的精确表示——其它B样条方法只能近似地表示球面形状,而NURBS不仅可以表示自由曲面,还可以精确地表示球面等形状;
- 4) 更多的形状控制自由度——NURBS给出更多的控制形状的自由度,可用来生成多种形状。

这些特点无疑较好地适应3D GIS中有关面的表示需要。因此,NURBS对于地学表面的表示有很高的应用价值。

总的来说,这5种结构中,边界表示适于表示具有规则形状的对象,其它4种则适于表示具有不规则形状的对象。

## 3 基于体表示的数据结构

基于体表示的结构通过体信息来描述对象的内部,而不是通过表面信息。运用这样的表示,对象的体信息能够被表示、分析和观察。这类数据结构包括:3D栅格结构(arrays),针状结构(needle),八叉树(Octree),结构实体几何法(CSG)和不规则四面体结构(TEN)。

### 3.1 3D栅格结构

3D栅格是一个紧密排列充满3D空间的阵列,其元素值是0或1,1表示对象占有,0表示空。如图5所示,这个结构存储数据没有任何压缩,存储空间浪费很大,计算速度也较慢,一般只作为中间表示使用。

### 3.2 针状结构

针状结构是在对3D栅格进行改进的基础上产生的。如图6所示,该结构利用行程编码技术来减少存储空间的占用。具体做法是在每个(X,Y)位置,对其对应的Z方向进行行程编码,以达到压缩数据量的目的。

### 3.3 八叉树结构

八叉树结构是 2D 四叉树结构在空间的扩展,用层次式的 3D 空间子区域划分来代替大小相等、规则排列的 3D 栅格,如图 7。

八叉树的编码方法有 4 种,即普通八叉树、线性八叉树、三维行程编码和深度优先编码。其中,线性八叉树和三维行程编码由于数据压缩量大,操作灵活,在 3D GIS 中应用较多。八叉树结构有如下特点:

- 1) 八叉树结构适于表示体对象,通常认为是一个非原始的表达方法,即必须由其它表示(如 3D 栅格)转换生成;
- 2) 八叉树结构是一个近似表示,特别适于表示复杂形状的对象;
- 3) 对于布尔操作和整数特征的计算效率很高,明显优于边界表示;
- 4) 内在的空间顺序使得八叉树结构便于显示;
- 5) 不足之处是一般的几何变换难以进行,明显不如 BR 和 CSG 两种结构。

近年来,一些学者提出了“扩展八叉树”的概念,其目的是将矢量表示的优点与八叉树结合起来。在扩展八叉树中除了八叉树原有的结点类型,即实、空和灰以外,还增加了:

- 面结点——包含对象某一表面(平面)的一部分;
- 边结点——包含两个相邻的面以及公共边界;
- 顶点结点——包含多面体的一个顶点和与之相连的部分面和边界。

在实际应用中由于引入新的结点类型,减少了划分层次,达到了减小存储空间占用和提高布尔操作速度的目的。

### 3.4 结构实体几何法

结构实体几何法是用预先定义好的具有一定形状的基本体素的组合来表示对象,体素之间的关系包括几何变换和布尔操作。通常 CSG 表示可以用一个布尔树形式的组合操作来得到,如图 8 所示。

由于模型可以通过简单构模语句交互式地建立,CSG 是在 CAD/CAM 中最常用的构模技术,同时布尔操作和几何变换也很方便。如果采用参数形式的复杂体素,则构模范围会增大,而内存占用仍然很小。由于边界和面在 CSG 中没有明确定义,因而从表示产生图形显得困难。CSG 主要用于 CAD/CAM 系统,通常与 BR 结合

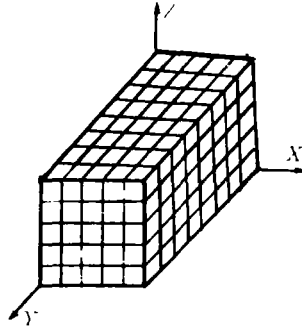


图 5 3D 栅格结构

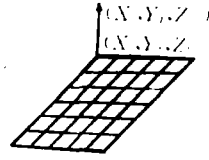


图 6 针状结构

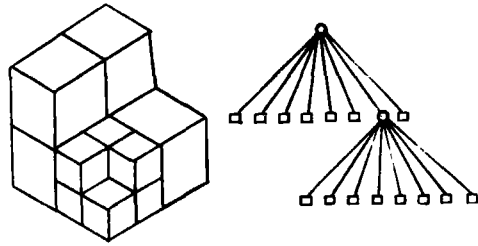


图 7 八叉树结构

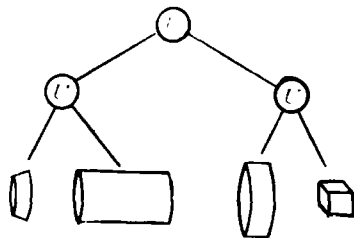


图 8 CSG 结构

起来使用。

### 3.5 不规则四面体结构

不规则四面体结构(TEN)是不规则三角形结构(TIN)向3D的扩展,以四面体作为最基本体素来描述对象。这种结构是以连接但不重叠的不规则四面体构成格网,如图9所示。该结构具有如下特点:

1)TEN 是基于简单的合成,即由点、线和面形成体。  
2)TEN 是基于线性的组合。TEN 的几何变换可以变为每个四面体变换后的组合。

3)TEN 可以看成是一种特殊的体元结构(不规则大小),许多体结构的优点,如快速几何变换对TEN也成立,而且它不需要像体结构那么多的存储空间。另一方面,TEN又可以看成是一种特殊的BR表示(最简单),一些BR结构的优点,如拓扑关系的快速处理,同样适用于TEN。

4)TEN 适用于快速显示。因为在3D空间每一个四面体相对观察点是独立的,能够用计算机图形学中最简单的算法来消除隐藏面。首先,根据对象的前后关系进行排序,然后从后向前绘制覆盖的不可见部分。

在TEN的应用中,曾经是难以解决的问题——TEN的生成,目前已取得突破。陈晓勇博士(1994)从3D数学形态学理论出发,发展了一套基于栅格的TEN生成算法。作者采用距离变换的方法成功地解决了TEN的生成问题,有关内容在另外文章作详细介绍。

在上述结构中,CSG适于表示规则形状的对象,3D栅格结构、八叉树和针状结构适于表示不规则形状的对象,而TEN则既可以用来表示规则形状的对象,也可以表示不规则形状的对象。

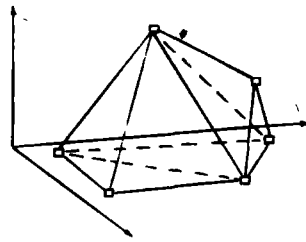


图9 不规则四面体结构

## 4 结 论

针对3D空间数据结构的发展,可以归纳如下几点结论:

- 1)八叉树结构是一种理想的栅格结构,在描述地学中不规则形状的对象时更显突出;
  - 2)在CAD/CAM中得到广泛应用的BR和CSG两种结构,由于难以适应地学中的一些特殊情况,难以得到广泛应用;
  - 3)矢量结构是今后一段时间3D GIS数据结构研究的重点,这是因为栅格结构的研究已日趋完善,从应用的角度又需要矢量结构,在矢量结构中以不规则四面体结构最具潜力;
  - 4)表面表示是3D GIS中不可缺少的重要内容,其中以非均匀有理B样条最为引人注目;
  - 5)基于体表示的栅格、矢量混合结构,并结合表面表示的3D GIS系统是今后发展的方向。将栅格、矢量和表面表示结合起来,充分利用不同结构的特点可以适应不同对象的需要。
- 此外,在3D空间数据结构的基础上发展4D空间数据结构也引起了人们的重视。

## 参 考 文 献

- 1 蔡士杰. 三维图形系统的原理与技术. 南京: 南京大学出版社, 1991.
- 2 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994.

- 3 David M. Octree: A Useful Data Structure for the Processing of Topographic and Sub-surface Data. Proceedings of ACSM-ASPRS Annual Convention, 1986. 104~113
- 4 Ferenc. The GIS Concept and 3-Dimensional Modeling. Computer, Environment and Urban System, 1994, 18(2): 111~121
- 5 Raper J F, Kelk B. Geographical Information Systems. Vol. 1. Longman Scientific & Technical, 1991. 299~317
- 6 Li R. Data Structure and Application Issues in 3D Geographic Information Systems. Geomatica, 1994, 48(3): 209~244
- 7 Chen X, Ikeda K. Three-Dimensional Modeling of GIS Based on Delaunay Tetrahedral Tessellations. ISPRS Commission I, 1994.

## Data Structure in 3D Geographic Information Systems

*Li Qingquan Li Deren*

(School of Geo-science and Surveying Engineering, WTUSM, 39 Luoyu Road, Wuhan, China, 430070)

**Abstract** In this paper the dimensions and visualisation of spatial data are introduced. Two kinds of spatial data structures in 3D GIS are discussed. One is based on surface representation and the other is based on solid representation. Included are: boundary representation (BR), constructive solid geometry (CSG), non-uniform reasonable B-spline surface (NURBS), octree and tetrahedral irregular network. The characteristics and possible applications of these structures are also analysed.

**Key words** spatial data structure; 3D; GIS

~~~~~  
(上接第 119 页)

A order and B order GPS network, the national astrogeodetic network has been checked. Through the strain analysis, the range and the feature of expanded and contracted deformation, wrest deformation and turn of the national astrogeodetic network have been shown clearly. According to the analysis result the authors present some suggestion for the choice of coordinate transformation model, and give a reasonable coordinate transformation model.

**Key words** astrogeodetic network; strain analysis; wrest; coordinate transformation