

## 3 维 GIS 空间建模方法评述

王彦兵<sup>1)</sup> 吴立新<sup>2)</sup> 李小娟<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100037) <sup>2)</sup>(东北大学 3S 与数字矿山研究中心, 沈阳 110004)

**摘 要** 3 维(3D)空间建模方法是 3D GIS 研究的核心和难点之一,是建立 3D GIS 的基础。迄今为止,3D 空间建模方法多种多样,建模对象不同,建模方法也随之不同。根据 3D 空间建模研究的对象,以地球表面为界分为地理空间建模和地质空间建模两大类,并通过现有 3D 空间建模方法的对比研究,提出了现有 3D 空间建模研究的关键问题。

**关键词** 3 维建模 地理空间 地质空间

**中图法分类号:** P208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2007)08-1430-05

## On 3D GIS Spatial Modeling

WANG Yan-bing<sup>1)</sup>, WU Li-xin<sup>2)</sup>, LI Xiao-juan<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Laboratory of 3D Information Acquisition & Application, Capital Normal University, Beijing 100037)

<sup>2)</sup>(Center for GIS/GPS/RS & Digital Mine Research, Northeastern University, Shenyang 110004)

**Abstract** 3D Spatial Modeling is the key to 3D GIS, and is the basis of 3D GIS. All kinds of 3D spatial modeling methods are different according to the differences of modeling objects. Based on the difference of spatial modeling objects, 3D spatial modeling methods are divided into two kinds. One is Geographical Spatial Modeling, and the other is Geological Spatial Modeling. Based on the comparison and contrast of all the 3D spatial modeling methods, this paper also presents some key issues on 3D spatial data modeling.

**Keywords** 3D modeling, geographical space, geological space

## 1 引 言

随着计算机科学技术与空间信息技术的发展, GIS 处理的空间数据已经不再仅仅是指以地球表面空间位置为参照的自然地理数据,其理论与应用研究已经在 3D 空间上逐渐向地表以下、地表以上不断延伸<sup>[1]</sup>。对于这些 3D 空间信息的处理通常简化为 2D 投影模型,随着各类研究在广度、深度上的不断扩展和深化,这种处理方式由于不能够真实地反映与刻画自然界复杂的 3D 空间对象,缺乏动态处理和时空分析的能力,存在很大的局限性。因此,在计算机技术以及虚拟现实(virtual reality, VR)技术

快速发展的基础上,以及利用 GIS 有效实现几何信息和属性信息的集成和支持空间分析的重要功能<sup>[2]</sup>,通过建立 3D GIS 来实现空间对象的 3D 空间分析和各类信息的集成管理是一条必由之路。

由于专业应用限制和工作重点不同,现有 3D GIS 往往局限在某一领域的研究范围内,仅仅以某一类空间数据为研究对象。其建模方法以地球表面为界,分别处理与地球相关信息(Geo-information)的不同部分,分为以地球表面及以上为研究对象(即地理空间,geographical space)的 3D 地理空间建模方法(3D geographical modeling),和以地球表面及以下为研究对象(即地质空间,geological space)的 3D 地质建模方法(3D geological modeling, 3DGM)。

**基金项目:**北京市教委科技发展面上项目(KM200710028014)

**收稿日期:**2007-03-28;改回日期:2007-04-29

**第一作者简介:**王彦兵(1972~),男,讲师。2005 年于中国矿业大学(北京)获得大地测量学与测量工程专业博士学位。主要从事 3D GIS、3D GMS 和地理信息系统应用与开发等方面的教学与科研工作。E-mail: wybenu@sina.com

## 2 3D 空间建模方法分析

模型是现实世界的本质反映或科学抽象,反映事物的固有特征及其相互联系或运动规律<sup>[3]</sup>。在3D GIS建模中,地物的位置和形态都是处于3D立体空间中,它们都占有各自的空间,因此,3D的空间对象是一群空间对象的集合。2D GIS建模和3D GIS建模之间的差异在于前者将地物的属性作为空间位置的域,属性值的变化映射到位置的变化之中,后者将地物作为对象,每个对象均具有自身的属性值。

3D空间对象模型化的过程是一个从空间模型到概念模型到逻辑模型以及3D表达的过程。3D GIS是在对2D GIS中所定义的点、线、面3类空间对象增加空间信息的同时,又增加了另一类空间对象,即形成点、线、面、体4类空间对象。由于空间维数的扩展,使得同一类对象在几何和拓扑上产生较大差异,如面类对象中的地质层面,体类对象中的地质体、建筑物等。因此,3D空间数据模型的建立要更加复杂。

许多专家和学者就3D空间建模问题进行了大量的研究,提出了各种3D空间数据模型。根据其研究对象可分为3D地理空间建模、3D地学空间建模两大类。

### 2.1 地理空间建模

在3D GIS的研究过程中,许多学者针对地球表面及其以上的地理空间对象进行3D建模,提出了许多有价值的建模思想。最早对3维空间实体进行建模研究的是 Molennar 提出的3D形式化数据结构(3D formal data structure, 3D FDS),它是 Molennar 在原2D拓扑数据结构的基础上定义的一种基于3D矢量图的形式化数据结构(图1所示)。

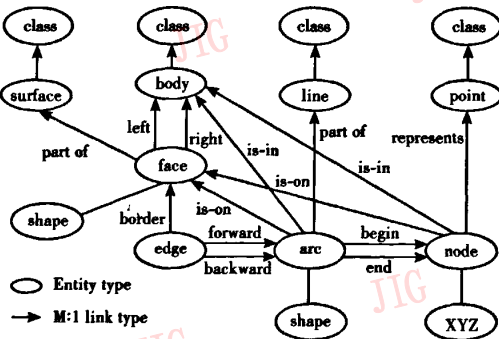


图1 3D形式化数据结构

Fig. 1 3D formal data structure

该模型定义了4类基本空间对象(elementary objects):点、线、面和体(point, line, surface, body),以及4种基本几何元素(primitives):结点、弧、边和面(node, arc, edge, face),并显式地表达结点和体、弧段和体、结点和面、弧段和面间的 is-in, is-on 等拓扑关系<sup>[4,5]</sup>。3D FDS 是对单值的矢量地图的表达,即任意一个几何元素都是对其相同维数的空间对象的描述。

在3D FDS研究基础上,一些学者进一步深入研究,提出了  $n$  元组模型<sup>[6]</sup>、简化空间模型(simplified spatial model, SSM)<sup>[3]</sup>、城市数据模型(urban data model, UDM)<sup>[7]</sup>、面向对象3D数据模型<sup>[8]</sup>等等各类数据模型。

### 2.2 地质空间对象建模研究

国内外地质与GIS领域对地质空间对象建模方法的研究可以归纳为表面模型、体模型和集成模型3类构模方法。具体的包括:TIN与Grid模型、断面模型、B-Rep模型、线框模型、多层DEM模型、CSG模型、八叉树模型、TEN不规则四面体模型、块段模型、实体模型、GTP模型、TEN+Octree模型等等。

#### 2.2.1 表面模型

表面模型侧重于描述3D空间实体的表面,它并非真正的3D模型,是2.5维的,有很多方法可以用来表达表面,如等高线模型、网格模型、三角网模型等,最常用的表面构模技术是基于采样点数据构造的TIN模型,以及考虑到采样密度和分布的非均匀性,经内插处理后形成的Grid模型。这两种模型一般用于地形表面构模,也可用于层状矿床构模<sup>[9]</sup>。

#### 2.2.2 体模型

体模型基于3D空间的体元分割,体元的属性可以独立描述和存储,可以进行3D空间操作和分析。体模型包括:TEN模型、八叉树模型、实体模型、棱柱体模型等。其中TEN模型是一种采用不规则体元表达3D空间实体的代表性建模方法,八叉树模型是采用规则体元表达3D空间实体的代表性模型。

##### (1) TEN模型

不规则四面体(TEN)模型<sup>[10,11]</sup>采用面向单纯形的方法来描述3D空间对象。同3D FDS一样,TEN模型有4类几何元素(tetrahedron, triangle, arc, node),但它包含真正的3D几何元素(tetrahedron)。不规则四面体(TEN)作为描述空间对象的基本体元素,把任意一个3D空间对象剖分成一系列邻接但

不重叠的不规则四面体,通过四面体间的邻接关系来反映空间对象间的拓扑关系。空间对象由四面体组成;表面空间对象由三角形组成;线类对象由弧组成;点类对象由结点组成。模型的构成遵循结点是弧段的边界,弧段是三角形的边界,三角形是四面体描述的边界,TEN 的概念模型如图 2 所示。

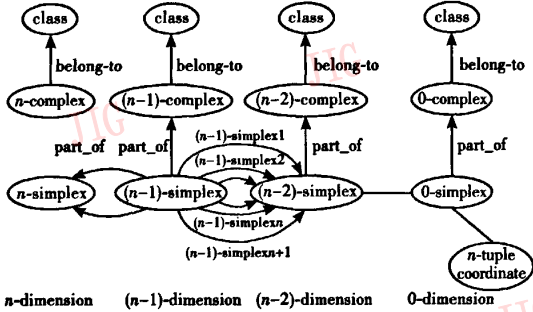


图 2 四面体格网:  $n$  维概念模型  
Fig. 2 TEN:  $n$ -dimensional conceptual model

TEN 模型适用于地形、土壤、地质体等不规则体的描述。由于该模型使用了单纯复形 (simplex-complex) 的概念<sup>[12]</sup>,被认为可以描述 3D 空间存在的拓扑关系。但是,TEN 模型在建模过程中将空间对象剖分成一系列邻接,但不重叠的不规则四面体,这在理论上是可行的,但实现这一过程的算法还不是很成熟。

(2) 八叉树

八叉树结构 (Octree) 是由四叉树结构 (Quadtree) 推广到 3D 空间而形成的一种 3D 栅格数据结构。八叉树结构将 3D 空间区域分成卦限,且在树上的每个节点处存储 8 个数据元素。当卦限中所有体元的类型相同时 (即为均质体),该类型值存入相应的节点数据元素中。非均质卦限再分卦限,节点相应数据元素指向树中下一个节点,如此细分到每个节点所代表的区域都是均质体为止。八叉树模型作为一种栅格数据模型,其特点是结构简单,操作方便,有关空间的操作和空间分析运算容易实现,尤其是能够表示地质对象内部属性的空间变化。但是,八叉树结构不能精确表达地质对象的几何边界,且数据存储量大,有时会造成很大的数据冗余,原始采样数据一般也不保留,也不适合于表达和分析空间对象之间的空间关系<sup>[13]</sup>。

(3) 集成数据模型

3D GIS 在对 2D GIS 所定义的对象基础上增加

了体类对象,形成点、线、面和体 4 类空间对象,空间维数的扩展使得同一类空间对象在几何和拓扑上产生较大差异,如面类对象中的地质层面,体类对象中的建筑物、矿体等。采用单一的数据模型很难实现对各种类型的空间对象进行有效的描述,通常通过建立混合数据模型实现特定的目的<sup>[14]</sup>。

许多学者提出了一些空间数据模型集成的方法。文献[14]针对城市、海洋等领域的应用提出 3 种不同的空间数据模型集成方法:TIN 与 CSG 集成用于满足城市 3D 构模的需要,TIN 用来描述地形,CSG 用来描述建筑物;八叉树与 TEN 的混合模型用于地质、矿山、海洋等领域,如在描述具有断层的地质构造时采用该混合结构较为合适;矢量栅格集成的 3D 空间数据模型<sup>[14]</sup>。文献[15]提出了 TIN 与 Octree 构模的方法:TIN 表达 3D 空间物体的表面,Octree 表达内部结构,用指针建立 TIN 和 Octree 之间的联系。文献[16]提出了一种基于多种数据模型的 3D GIS,包括 CSG、TIN、B-Rep、Octree 等数据模型,不同的数据模型存储在同一个数据库中进行管理;文献[17]以矿山为研究背景提出了矢量与栅格集成的混合数据模型,根据不同的需要选择不同的数据模型对空间对象进行表达等等。

### 3 3D 空间模型对比分析

根据上述对 3D 空间数据模型的介绍可见,对于 3D GIS 中数据模型的认识还未能达成一致,且还没有任何一种建模方法是通用的。在此对这些数据模型从几何元素、基本对象、应用领域及其优缺点进行对比,从而为 3D 空间数据模型的建立提供依据。3D 空间数据模型比较如表 1 所示。

3D GIS 的空间数据模型不论是矢量模型、栅格模型,还是混合模型,都有其优缺点。矢量模型模拟的基本对象为点、线、面、体 4 类对象,模型不同,所采用的几何构模元素不同,拓扑关系比较明确,但计算复杂。栅格模型采用隐含坐标的表示方式,只记录空间对象每一个单元的属性数据,主要有规则单元和不规则单元之分,空间操作简单,但是无拓扑关系描述,数据存储量大。混合模型可以兼顾矢量模型和栅格模型的优缺点,但操作复杂,空间关系表达困难。

可见,3D GIS 在得到相当迅速发展时,由于地学数据的复杂性,以及应用的局限性,3D 空间

表1 3D空间数据模型比较  
Tab.1 Comparison of 3D spatial data model

| 类型     | 名称                           | 作者/年                | 应用领域          | 几何元素                                | 实体对象                            | 建模基础                 | 优点                              | 缺点                             |
|--------|------------------------------|---------------------|---------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 地理空间模型 | 3DFDS <sup>[4]</sup>         | Molenaar/1990       | 3D城市模型        | node, arc, face, edge               | point, line, surface, body      | 单值地图                 | 容易实现空间对象和非空间对象之间的连接             | 只能实现简单实体和规则实体的表达,难以表达复杂多样的空间对象 |
|        | n Tuple model <sup>[6]</sup> | Pigot/1992          | 地质工程、复杂建筑物    | 0-3 Cell                            | 0-3-Tuple Cell Complex          | 流形                   | 拓扑关系描述;易于维护                     | 难以表达复杂多样的空间对象                  |
|        | SSM <sup>[3]</sup>           | Zlatanova/2000      | 面向网络、可视化空间查询  | node, planar face                   | point, line, surface, body      | 单纯性概念                | 易于实体几何的抽象;数据遍历速度快;存储空间较小        | 动态更新和修复操作过程复杂;构造元素存在多值性        |
|        | UDM <sup>[7]</sup>           | Coors/2003          | 城市可视化         | node, triangle                      | point, line, surface, body      | 三角剖分                 | 数据遍历速度快;表面可视化;可以减少存储的空间         | 动态更新和修复操作过程复杂                  |
|        | OO3D <sup>[8,18]</sup>       | 史文中、杨必胜/2002        | 城市可视化         | node, segment, triangle             | point, line, surface, volume    | 面向对象建模               | 复杂空间对象的处理;支持细节层次模型;快速可视化        | 拓扑关系的存储不是显式的;3D空间分析功能比较弱       |
| 地质空间模型 | 3D-TIN                       | Abdul/2000          | 地质、地表地形       | node, line, surface, solid          | point, line, surface, body      | Single value map/FDS | 表面可视化                           | 实体内部无属性表示                      |
|        | Grid                         |                     | 地表地形          | 正方形、长方形                             |                                 | 面规则剖分                | 表面可视化;数据量小                      | 数据量大;                          |
|        | TEN <sup>[10]</sup>          | Pilouk/1996         | 地质信息、污染云      | node, arc, triangle, tetrahedron    | point, line, surface, body      | 单纯性概念;模糊边界           | 表面可视化;对不规则体和复杂曲面的描述具有优势         | 复杂实体的可视化更加复杂;增加数据的存储量          |
|        | Octree                       | Hunter/1978         | CAD/CAM 地质、海洋 | 立方体                                 |                                 | 体规则剖分                | 结构简单;能够表示对象内部属性的空间变化            | 不能精确表达地质对象的几何边界;数据存储量大;数据冗余    |
|        | Solid Model <sup>[19]</sup>  | Simon Houlding/1994 | 地质工程、采矿       | component                           | 地质体边界                           | 3元件构模                | 适于表达具有复杂内部结构的3D空间对象             | 人工交互工作量巨大                      |
|        | GTP <sup>[20]</sup>          | Wu LiXin/2004       | 地质工程          | 结点,边(TIN边,侧面),face(TIN面,侧面),GTP,对角线 | point, line, surface, body      | 体剖分                  | 拓扑完备性;适于地质体等不规则实体的3D描述;基于原始钻孔数据 | 难于进行复杂地质体的可视化                  |
| 混合数据模型 | TIN + CSC <sup>[14]</sup>    | 李清泉/1998            | 3D城市模型        | node, segment, triangle             | point, line, surface, body, DEM | 基于表面剖分               | 两种模型集成在一个用户界面                   | 难以表达复杂断层、褶皱和节理裂隙等精细地质结构        |
|        | TIN + Octree <sup>[15]</sup> | 史文中/1996            | 3D城市模型,地质工程   | node, segment, triangle, Octree     |                                 | TIN表达实体表面,Octree表达内部 | 拓扑关系搜索很有效,可以充分利用映射和光线跟踪等可视化技术   | 八叉树数据需跟随TIN数据的改变而改变,否则指针引起混乱   |
|        | TEN + Octree <sup>[14]</sup> | 李清泉 李德仁/1998        | 地质工程          | Octree, TEN                         |                                 | Octree整体描述,TEN局部描述   | 提高目标的表示精度,减少数据量                 | 难于建立空间对象间的拓扑关系                 |

建模的方法必须首先解决如下关键问题:(1) 建模的空间对象不再是各类模型中单一的地形、地理空间对象,或者地质空间对象,而要实现地理空间、地质空间的集成;(2) 数据模型必须能够进行任意空间对象之间的空间查询和空间分析。

## 4 结 论

综上所述,采用 3D GIS 表达地球空间是 GIS 发展的方向和趋势,3D 空间建模研究是 3D GIS 理论与方法研究的核心之一。根据建模对象的不同将现有的建模方法分为地理空间建模和地质空间建模两大类,通过现有建模理论与方法的对比分析,认为 3D 空间建模的研究进展是 3D GIS 发展的重要前提。对于 3D 空间建模而言要着重解决好两个关键问题,一是地学空间对象的完备性,要实现地理、地质空间实体的集成;二是拓扑关系的表达,这是空间查询和分析的基础。

### 参考文献 (References)

- 1 WU Li-xin, SHI Wen-zhong, Christopher Gold. Spatial modeling technologies for 3D GIS and 3D GMS[J]. *Geography and Territorial Research*, 2003, 19(1): 5 ~ 11. [吴立新, 史文中, Christopher Gold. 3D GIS 与 3D GMS 中的空间构模技术[J]. *地理与地理信息科学*, 2003, 19(1): 5 ~ 11.]
- 2 Aronoff S. *Geographic Information Systems: A Management Perspective* [M]. Ottawa, Canada: WDL Publications, 1995.
- 3 Zlatanova Siyka. 3D GIS for urban development [D]. The Netherlands: Austria and ITC, 2000.
- 4 Molenaar M. A formal data structure for 3D vector maps [A]. In: *Proceedings of EGIS'90* [C], Amsterdam, The Netherlands, 1990, 2: 770 ~ 781.
- 5 Rijkers R, Molenaar M, Stuiver J. A query oriented implementation of a 3D topologic data structure [A]. In: *Proceedings of EGIS'93* [C], Genoa, Italy, 1993, 2: 1411 ~ 1420.
- 6 Pigot S. A topological model for a 3-dimensional spatial information system [D]. Tasmania, Australia: University of Tasmania, 1995.
- 7 Coors V. 3D GIS in networking environments [J]. *CEUS Computers, Environment and Urban Systems*, 2003, 27: 345 ~ 357.
- 8 Yang Bi-sheng. 3D Visualization and Modeling for Digital City [D]. Wuhan: Wuhan University, 2002. [杨必胜. 数字城市的三维可视化与建模技术研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2002.]
- 9 WU Li-xin, SHI Wen-zhong. *The Theory and Algorithms of GIS* [M]. Beijing: Sciences Publication, 2003. [吴立新, 史文中. *地理信息系统原理与算法* [M]. 北京: 科学出版社, 2003.]
- 10 Pilouk M, Tempfli K. An object-oriented approach to the unified data structure of DTM and GIS [A]. In: *Proceedings of ISPRS* [C], Athens, USA, 1994: 460 ~ 466.
- 11 Tempfli K, Pilouk M. Practical photogrammetry for 3D-GIS [A]. In: *Proceedings of ISPRS* [C], Vienna, Austria, 1996: 859 ~ 867.
- 12 Egenhofer M J, Herring J R. Categorising Topological Relations Between Regions, Lines and Points in Geographic Databases. The 9-intersections: Formalism and its Use for Natural language Spatial Predicates [R], T R 94-1, California, USA: University of California, 1992.
- 13 Li Qing-quan, Li De-ren. Three dimensional run encoding (3DRE) for octree [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying And Mapping*, 1997, 22(2): 102 ~ 106. [李清泉, 李德仁. 八叉树的三维行程编码 [J]. *武汉测绘科技大学学报*, 1997, 22(2): 102 ~ 106.]
- 14 Li Qing-quan, Li De-ren. Research on the conceptual frame of the integration of 3D spatial data model [J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 1998, 27(4): 325 ~ 330. [李清泉, 李德仁. 三维空间数据模型集成的概念框架研究 [J]. *测绘学报*, 1998, 27(4): 325 ~ 330.]
- 15 SHI Wen-zhong. A hybrid model for three-dimensional GIS [J]. *Geoinformatics*, 1996, 1: 400 ~ 409.
- 16 Li R. 3D data structures and application issues in 3D geographic information systems [J]. *GEOMATIC*, 1994, 48(3): 209 ~ 224.
- 17 Gong Jian-ya, Xia Zong-guo. An integrated data model in three dimensional GIS [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1997, 22(1): 7 ~ 15. [龚健雅, 夏宗国. 矢量与栅格集成的三维数据模型 [J]. *武汉测绘科技大学学报*, 1997, 22(1): 7 ~ 15.]
- 18 SHI Wen-zhong, Yang Bi-sheng, Li Qing-quan. An object-oriented data model for complex objects in three-dimensional geographic information systems [J]. *International Journal of Geographic Information Science*, 2003, 17(5): 411 ~ 430.
- 19 Simon W. Houlding. 3D geoscience modeling—computer techniques for geological characterization [C], Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Publication, 1994.
- 20 Wu Li-xin. Topological relations embodied in a generalized tri-prism (GTP) model for a 3D geoscience modeling system [J]. *Computers and Geosciences*, 2004, 30(4): 405 ~ 418.