

文章编号: 1000-050X(2000)04-0294-98

面向目标的栅格矢量一体化三维数据模型^{*}

边馥苓¹ 傅仲良¹ 胡自锋¹

(1 武汉测绘科技大学信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要 首先对现有的三维空间数据模型进行了讨论, 分析了栅格、矢量和混合数据模型的特点, 提出了一种面向目标的栅格矢量一体化数据模型。该模型将栅格数据以矢量方式进行组织, 从而同时具有矢量和栅格数据模型的优点, 也克服了目前普遍应用的混合模型所存在的缺点。还提出了一种三维空间的三级栅格划分和行次序编码方法。该方法存储空间小, 便于快速索引和计算。最后, 给出了具体的数据结构。

关键词 三维 GIS; 空间数据模型; 栅格; 矢量; 一体化; 面向目标; 数据结构

分类号 P208 文献标识码 A

随着 GIS 应用的不断深入, 涉及到三维的自然和人为现象的处理已越来越多, 而目前流行的 GIS 软件绝大多数都是以二维空间数据模型为基础的, 难以满足三维空间表达和处理的需要。

近几年来, 许多学者对三维 GIS 的数据模型和数据结构进行了大量的研究。就研究过程来看, 其主要经历了 3 个阶段。在研究的初期, 人们主要将研究集中在栅格表示方法上, 提出了以八叉树为代表的栅格数据模型。这种数据模型将三维空间划分成规则的、体积相等的体元, 以体元作为表示空间实体的最小单元, 具有结构简单、便于空间分析的特点, 但其表达空间位置的几何精度低, 也不适合于表达和分析实体之间的空间关系, 同时, 其数据量较大, 处理速度慢。因此, 近年来, 人们又开始重视矢量表示方法的研究, 并提出了基于 BR、TIN 和 TEN 等表示方法的矢量数据模型, 具有代表性的三维矢量数据模型包括: Molenaar 提出的一个形式化三维数据结构 (FDS); Carlson 提出的一个网络边界表示模型; Bak 和 Mill 提出的一个典型的地学管理资源系统 (GRMS); Victor、Chen X. Y 和 Pilout 等提出的一个基于不规则四面体格网的三维矢量数据模型。这类模型将二维 GIS 矢量数据模型的点、线、面基元扩展到体, 具有表示目标精确、数据存储格式紧凑、数据量小、处理速度快、能显式地描述空间实体之间的拓扑关系等特点, 而且图形输出美观, 容易实现几何变换等空间操作, 但其对空间分析

不利, 不便于空间索引。由于三维 GIS 的应用领域非常广泛, 不同的应用目的对空间目标所进行的操作和分析千差万别, 采用单一的栅格或矢量数据模型难以进行有效的空间数据表达或分析。

鉴于栅格与矢量数据模型的优劣互补性, 目前, 人们又提出了将栅格和矢量数据模型进行集成或混合的数据模型。这种数据模型将栅格和矢量数据集中在同一个系统中, 以分别表示相同或不同的空间实体。矢量数据用于精确表示实体空间位置和实体之间的拓扑关系, 进行实体空间几何变换等; 栅格数据用于进行实体的空间分析和操作。矢量和栅格数据的结合通过数据转化来实现。这类模型有: 用于城市三维构模的 TIN + CSG 模型 (李清泉, 1998); 基于多种表示的 CSG + Octree 模型 (Li R, 1994); 基于 TEN + Octree 的混合模型 (李清泉, 1998); 基于 TIN + Octree 的混合模型 (史文中, 1996); 以矿山应用为背景的矢量与栅格集成面向对象的三维数据模型 (龚健雅, 1997) 等。

空间数据模型的集成充分利用了不同的数据模型在表示不同空间实体时所具有的优点, 实现了对三维地理空间现象的有效、完整的描述。但是, 也存在数据量大、必须在两种表示方法之间不断进行转换以保持表示的一致性的问题, 并且不同模型之间的转换有时只能是近似的甚至是不成立的。如 TEN 只能近似地转换到八叉树, 而八叉树不能转换到 CSG 模型。

收稿日期: 2000-04-07。

*教育部高等学校博士点专项科研基金资助项目 (96049802); 湖北省自然科学基金资助项目 (99J171)。

本文提出一种面向目标的一体化矢量栅格数据模型。该数据模型采用矢量栅格化方法,将目标的点、线、面、体等矢量基元用栅格体元的有序集合表示,用目标矢量的栅格体元的集合运算来代替对矢量数据的操作和分析,因而该模型既具有矢量和栅格数据的特点,又实现了面向目标的表示。

1 面向目标的栅矢一体化思想

通过分析可知,矢量数据模型的优点在于它表达位置精度高以及显式地建立目标的空间关系的能力,而栅格数据模型的优点的根本所在是它将整个空间划分为规则的、有序的、大小相等的子空间(体元),因此,如果将矢量数据模型表示实体的空间关系的方式与栅格数据模型对空间的划分方式结合起来,并尽可能提高栅格划分精度,那么所建立的数据模型将同时具有矢量和栅格数据的优点。

基于这样的设想,本文将整个三维空间划分为规则的、大小相等的、互不重叠的 $2^n \times 2^n \times 2^n$ 个基本小立方体,将三维目标定义为点、线、面、体4种类型,每种类型的目标均由小立方体填充。地物的表示采用面向目标的方法,每个地物只记录组成它的体元的集合,其中,点目标用所对应的栅格体元(小立方体)的位置编码表示,线目标由弧段的三维路径所经过体元以串行方式描述,而面以所通过的三维体元表达,体则以其所包含的三维体元表示。同时,点、线、面、体以一种层次结构和空间关系相互联系,即体由面组成,面由线构成,线由点表达。对于线与线、面与面、体与体之间的公共点、线和面,可同时在两个目标中记录。在空间处理方面,与位置相关的叠置、布尔运算、求交、连通性分析、缓冲区分析等采用栅格方法,而地物之间的空间位置关系的计算和查询等则采用矢量的方法,并基于它们的子空间构成和空间关系进行。

一体化模型与栅格模型的区别在于:①栅格模型通过将目标的标识符作为栅格体元的属性值来表示目标,属于一种面向栅格元素的方法;而一体化模型是在地物对象中记录地物所在的栅格元素的集合,栅格元素不必具有属性值,属于一种面向目标的方法。这对于叠置、求交等运算,只需通过集合操作就能实现。②栅格模型对所有实节点(不管其属于哪一个目标)按照其内在的空间顺序进行存储,对目标的空间索引和目标之间的关系

的表达只能依赖于体元的属性以及体元之间的相邻和连通关系进行推理,不利于目标的空间关系分析,而一体化模型是对目标的子空间按照层次化的结构进行组织。

一体化模型与矢量模型的不同是:①矢量模型对子空间(点、线、面、体)的划分是不规则的、无序的,而一体化模型则相反;②矢量模型对目标只表示其端点(线)、边界线(面)和表面,而一体化模型除此以外,还对目标内部整个空间进行填充、表达。

2 栅格矢量一体化模型

2.1 三维空间目标的定义

为了有效地表达三维空间目标及其拓扑关系,结合栅矢一体化模型的特点,本文将三维空间目标分为点状目标、线状目标、面状目标和体状目标4种基本类型,可分别定义如下。

1)点状目标。点状目标是一个零维空间目标,用来表示点状地物和节点的空间位置。其空间位置由对应体元的栅格坐标确定,可表示为: $P=[X, Y, Z]$ 。

严格来说,栅格体元具有大小,但是用体元表示点状目标可忽略其大小信息。以下线状目标和面状目标同理。事实上,这种做法是可行的,当栅格划分达到某一精度时,体元的大小对于一个点来说也是可以忽略不计的。

2)线状目标。线状目标是一维空间目标,它包括线状地物、拓扑弧段和无拓扑弧段。弧段是不可分支的线段,其形状可以是直线和折线。它可表示为体元的有序集合: $L=\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, P_i 为体元。对于拓扑弧段,还定义其起点和终点: $LB=[P_1]$ 和 $LE=[P_n]$, 其他点 $P=\{P_i | i \neq 1, n\}$ 称为内点。线状地物是一条和几条弧段的集合。

3)面状目标。面状目标是一个二维目标,包括无拓扑曲面、拓扑曲面和面状地物,可用来表示三维空间的面状地物和体状目标的表面。

曲面由它经过的体元的集合表示: $A=\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, 同时也可表示为一条或多条边界弧段的集合, $A=\{L_1, L_2, \dots, L_n\}$ 。在一体化模型中,这两种表示同时存在。体状目标同此。

4)体状目标。体状目标指任意形状的三维空间体状地物。它由所包括的体元的集合表示: $V=\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, 同时也可由一个或多个曲面的集合 $V=\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 来描述。

2.2 一体化模型

根据以上的定义,本文提出的面向目标的栅

格矢量一体化数据模型如图 1 所示。

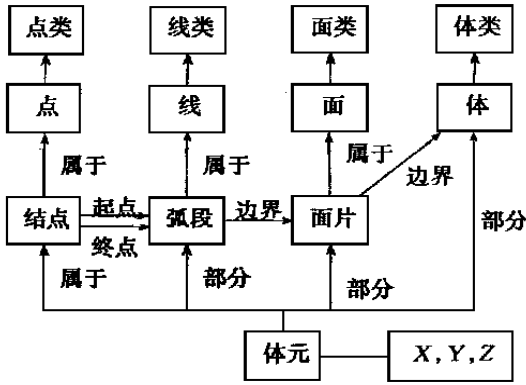


图 1 栅格矢量一体化的三维空间数据模型

Fig. 1 A Vector and Raster Integrated 3D Spatial Data Model

一般来说, 一个三维空间数据模型应该能够描述目标的几何、语义和拓扑关系, 并且数据结构应尽可能简单, 数据量应小。可以看出, 在该模型中, 只需存储目标体元一种栅格数据, 目标的位置、形状和拓扑关系等信息都可以得到描述, 且目标层次简单、清晰, 实现了栅格与矢量的面向目标的一体化表示。

3 一体化空间数据结构

3.1 三级栅格划分

一个值得注意的问题是, 一体化模型的基础是对三维空间进行栅格划分。为了保证表示目标的精度, 通常采用较高的空间分辨率, 但是, 其结果是数据量大大增加, 这直接影响了计算和查询速度。尽管一体化模型采用了面向目标的表示方法, 但其仍然是难以接受的。谈国新(1998)在讨论二维空间数据结构时提出了一种空间栅格的三级划分策略。本文将其扩展到三维空间的栅格划分。

第一级划分首先将所涉及的三维空间划分为规则的 $M_1 \times M_1 \times M_1$ 个部分。其中 M_1 应取 2 的整幂次方(下面的 M_2, M_3 同样), 其大小一般根据三维空间的范围来确定。

第二级划分是在第一级划分的基础上进行的。它将第一级划分的每一个立方块(简称块)又划分为 $M_2 \times M_2 \times M_2$ 个子块。 M_2 的大小应适当, 因为其直接影响到数据量的大小。

第三级划分又是在第二级划分的基础上进行的。它将每一个子块划分为 $M_3 \times M_3 \times M_3$ 个细块。第三级的划分主要是为了进一步提高目标位置的表达精度, 特别是在线划、面和体的边界处, 使其接近矢量数据的精度, 所以 M_3 的取值应较

大。由于这一级划分是在目标边界所经过的基本块上进行的, 所以不会显著地增加数据量。

3.2 行次序编码法

在进行三级栅格划分后, 空间目标点的三级栅格位置编码方法是一个重要问题。Morton 码是现有使用最广泛的一种编码。一般认为, 行次序编码法在关键字值计算、开窗显示等方面优于 Morton 码(谈国新, 1998), Morton 码在像元相关性查询处理方面的有效性对于面向目标存储的一体化模型来说用处不大。

假设某一空间点的三级行次序编码为 $[N_1, N_2, N_3]$, 其中 $0 < N_1 < M_1^3, 0 < N_2 < M_2^3, 0 < N_3 < M_3^3$; 其矢量坐标为 $[x, y, z]$, a_i 为第 i ($i = 1, 2, 3$) 级划分分辨率, 则有:

$$N_i = [z_i / a_i] \times M_i \times M_i + [y_i / a_i] \times M_i + [x_i / a_i]$$

$$[x_1, y_1, z_1] = [x, y, z], i = 1$$

$$x_i = x_{i-1} \bmod a_{i-1}$$

$$y_i = y_{i-1} \bmod a_{i-1}, i = 2, 3$$

$$z_i = z_{i-1} \bmod a_{i-1}$$

式中, mod 表示取模; $[]$ 表示取整。

当 $M_1=2^5, M_2=2^4, M_3=2^5$ 时, 存储一个点位的行次序编码最大需存储空间 42bit; 而对于同一个空间点, 要达到同一精度, 如采用八叉树表示, 其八分层数为 14, 则 Morton 码 $M = q_{13}q_{12} \dots q_1q_0$, 其中每一个 q_i ($i = 0, \dots, 13$) 为一八进制数, M 最大也需占 $14 \times 3 = 42$ bit 存储空间。但是, 对于点、线和面来说, 一般采用三级划分, 以达到较高的点位精度, 即其编码为 $[N_1, N_2, N_3]$; 而对于线和面, 下一级栅格化只在上一级栅格化后所经过的块进行。对于体更只需对其表面进行同样的处理, 其内部点可以只进行第一级或第二级划分, 这样, 相对于八叉树 Morton 编码, 其总的存储空间较小。此时, N_2 或 N_3 可用 -1 来表示。

3.3 一体化数据结构

按照以上讨论, 三维空间目标的数据结构为:

表 1 结点的数据结构

Tab. 1 Data Structure of Node Point

标识码	所在弧段数	所在弧段	位置编码
P-ID	NumL	L-ID ₁ , L-ID ₂ , ...	(N ₁ , N ₂ , N ₃)

表 2 点状地物的数据结构

Tab. 2 Data Structure of Point Object

点状地物标识码	地物类型	位置编码
P-ID	Type	(N ₁ , N ₂ , N ₃)

表 3 弧段的数据结构

Tab. 3 Data Structure of Arc

弧段标识码	起点	终点	左边面	右边面	内点点数	点串位置编码
L-ID	P-ID	P-ID	A-ID	A-ID	NumP	(N ₁ , N ₂ , N ₃), ...

表 4 线状地物的数据结构

Tab. 4 Data Structure of Line Object

线状地物标识码	所包含的弧段数	所包含的弧段	地物类型	内点点数	内点位置编码
L-ID	NumL	L-ID _p , ...	Type	NumP	(N ₁ , N ₂ , N ₃), ...

表 5 面片的数据结构

Tab. 5 Data Structure of Face

面片标识码	所包含的边界弧段数	所包含的边界弧段	左边体	右边体	所在面状地物	内点点数	内点位置编码
A-ID	NumL	L-ID _p , ...	A-ID	A-ID	A-ID _p , ...	NumP	(N ₁ , N ₂ , N ₃), ...

表 6 面状地物的数据结构

Tab. 6 Data Structure of Surface Object

面状地物标识码	所包含的面片数	所包含的面片	地物类型	内点点数	内点位置编码
A-ID	NumA	A-ID _p , ...	Type	NumP	(N ₁ , N ₂ , N ₃), ...

表 7 体状地物的数据结构

Tab. 7 Data Structure of Body Object

体状地物标识码	所包含的边界面片数	所包含的面片	地物类型	内点点数	内点位置编码
V-ID	NumA	A-ID _p , ...	Type	NumP	(N ₁ , N ₂ , N ₃), ...

对于有拓扑和无拓扑的线段或面片, 可以通过在其左边面、右边面或左面体、右面体的标识码中存储一个特殊字段(如-1)来加以区别。

在上述数据结构中, 涉及到许多变长记录, 这对于用传统的关系数据库管理不利。目前, 已广泛采用的面向对象的数据管理系统使这一问题得到解决, 它不仅支持变长记录, 而且支持多对象的嵌套。

4 结 论

面向目标的栅格矢量一体化模型将栅格数据以矢量方式进行组织, 从而同时具有矢量和栅格数据模型的优点, 也克服了目前普遍应用的混合模型所存在的缺点, 应是未来三维空间数据模型研究的发展方向。面向目标的表示不仅有利于空间数据的计算机存储管理, 最主要的是使传统矢量模型中对矢量数据的求交等空间操作可以用简单的集合运算来代替, 大大减小了计算的复杂度。三级栅格划分策略不仅可以减少空间数据存储单元, 而且可以提高目标数据的空间查询和操作速度。当然, 规则的空间栅格划分需要动态地维护

空间划分的一致性, 这给几何变换等操作带来一定的难度, 有待进一步研究。

参 考 文 献

- 1 李清泉. 基于混合结构的 3D GIS 数据模型与空间分析研究: [学位论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1998
- 2 杨树强, 陈火旺, 王 峰. 矢量和栅格一体化的数据模型. 软件学报, 1998, 9(2): 91~96
- 3 谈国新. 一体化空间数据结构及其索引机制. 测绘学报, 1998, 27(4): 293~299
- 4 龚健雅, 夏宗国. 矢量与栅格集成的三维数据模型. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(1): 7~15
- 5 Li R X. Data Structure and Application Issues in 3D Geographic Information System. Geomatics 1994, 48(3): 209~224
- 6 Molenaar M. A Topology for 3D Vector Maps. ITC Journal, 1992(1): 25~33
- 7 Pilout M, Tempfli K, Molenaar M. A Tetrahedron-based 3D Vector Data Model for Geoinformation. In: Advanced Geographic Data Modelling. Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, 1994(40): 129~140
- 8 Molenaar M. Status and Problems of Geographical Information Systems. The Necessity of a GeoInformation Theory. Photo and Research, 1991

边馥苓, 女, 59岁, 教授, 博士生导师。现从事GIS理论及应用研究。代表成果:《地理信息系统原理和方法》, 三峡工程测绘

管理信息系统, 深圳、南海、重庆、青海等关于城市规划、市政建设管理信息系统等20多项。

E-mail: fbian@wtusm.edu.cn

An Object-oriented Integrative 3D Data Model

BIAN Fuling¹ FU Zhongliang¹ HU Zifeng¹

(1 School of Information Engineering, WTUSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract In this paper, after discussing existing three dimensional spatial data models, the characters of vector data model, raster data model and hybrid model are analyzed. An object-oriented integrative 3D data model is put forward. The model divides 3D space into raster voxels. All 3D objects are filled with raster voxels. Object-oriented method is adopted for object expression. For every object, contained voxels only are stored. Point, line, surface and solid are linked by hierarchy structure and space relation. Common point and line and surface are simultaneously stored in adjacent objects. In the aspect of space process, raster method is adopted for operations related with position. Vector method is adopted for calculation and query of space relation.

The integrated model has the advantage of both vector and raster model. But it is different from raster model, vector model and hybrid model. Firstly, raster model connects voxels to expresses object through the attribute of voxels. But in the integrated model, raster elements have not attribute value. Voxels belonging to an object are orderly stored in a record. In other hand, raster model stores solid nodes in space order. The space index and expression of object relation depend on the attribute of voxels and reasoning by neighbor and connectivity. But the integrated model organizes sub-space of object by hierarchy structure. Secondly, in vector model, sub-space is divided irregularly and out-of-order, only expresses end point, boundary and surface of objects. But the integrated model fills and expresses interior spaces except for above elements. The difference from hybrid model is that hybrid model must simultaneously store raster and vector data. At the same time, transformation between raster and vector model is necessary, but sometimes it is difficult. In the integrated model, only raster data is stored, but the information about the position, shape, structure and topological relation, etc., can be described.

A remarkable problem is that the numbers of data is enormous and the computing and query speed is slow for raster division to 3D space. In this paper, a method of three-grade division of 3D space is proposed. A rough division is carried out in a first grade. The second and third division is respectively carried out based on above division. The purpose of the third division is to improve the expressive precision of object, the division is carried in boundary of object, such as points, lines and surfaces. So the numbers of data is not remarkably increased. Subsequently, a row-order code method is proposed. The code method is superior to Morton code in query calculation and window display. The storage space in need is also small.

Finally, the data structure of an integrated model is presented.

Key words 3D GIS; spatial data model; raster; vector; integrative; object-oriented; data structure

BIAN Fuling, female, 59, professor, Ph.D supervisor. Her main research is on the theory and applications of GIS. Her major achievements are "Principles and Methods of GIS", surveying and mapping management system in Three Gorges Project, etc. She is in charge of more 20 urban planning, land administration systems in Shenzhen, Nanhai, Chongqing, Qingdao, etc.

Email: fbian@wtusm.edu.cn