

地理信息系统中空间对象间拓扑关系的推理*

刘亚彬, 刘大有

(吉林大学 计算机科学与技术学院, 吉林 长春 130023);

(符号计算与知识工程教育部重点实验室, 吉林 长春 130023)

E-mail: yabinl@public.cc.jl.cn

http://www.jlu.edu.cn

摘要: 首先讨论了地理信息系统中空间对象的空间数据模型, 然后定性地分析了空间对象点与点、点与线和点与区域之间的拓扑关系, 并给出了空间对象拓扑关系的推理算法, 最后, 将模糊技术与空间对象之间的拓扑关系的推理算法结合起来, 使其可以方便地处理地理信息系统中的模糊性和不确定性。

关键词: 空间推理; 空间对象; 拓扑关系; 地理信息系统; 模糊技术

中图法分类号: TP311

文献标识码: A

空间推理是指利用空间理论和人工智能技术对空间对象进行建模、描述和表示, 并据此对空间对象间的空间关系进行定性或定量的分析和处理的过程^[1]。目前, 空间推理被广泛应用于地理信息系统 GIS (geographic information system)、机器人导航、高级视觉、自然语言理解、工程设计和物理位置的常识推理等, 并且正在不断地向其他领域渗透, 其内涵非常广泛。空间推理的研究在人工智能中占有很重要的地位, 是人工智能领域的一个研究热点^[2,3]。GIS 是一个能够收集、存储、处理和显示地理信息的计算机程序系统^[4]。在 GIS 的层次矢量数据模型中, 基本的空间对象是点、线和区域。目前的 GIS 具有较强的数据输入、存储、检索和显示能力, 但缺乏处理不确定性数据的能力, 也缺乏较强的分析和推理能力^[5]。

1 GIS 中空间对象的空间数据模型

1.1 矢量数据模型

空间数据模型包括栅格数据模型和矢量数据模型^[5]。矢量数据模型将空间分成由线条(边界)包围的不规则的形状单元。在一个坐标空间中, 这些线精确地连接确定的点。在矢量数据模型中, Spaghetti 是最简单的一种。一个空间对象被表示为一个具有 X-Y 坐标的逻辑记录, 或者是数字文件中的一个 X-Y 坐标串。例如, 一个点被编码为具有特定 X-Y 坐标的单元, 一条线是一串 X-Y 坐标对, 一个区域被表示为一个多边形。该模型没有对空间对象之间的拓扑和空间关系进行编码。

拓扑数据模型弥补了 Spaghetti 数据模型的不足, 它用拓扑概念对空间对象和它们之间的关系进行了概念化。基本的空间对象是线, 也称为链, 每个链是一个由起始节点到终止节点的点系列; 一个节点是一个或多个链的交点; 多边形由起始节点和终止节点重合的封闭链来界定。但这种数据结

* 收稿日期: 2000-03-22; 修改日期: 2001-07-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69883003); 国家 863 高科技发展计划项目基金资助(863-306-ZB05-01-2); 国家教育部博士点基金资助项目

作者简介: 刘亚彬(1965-), 男, 辽宁锦州人, 博士生, 副教授, 主要研究领域为知识工程, 空间推理; 刘大有(1942-), 男, 河北乐亭人, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为知识表示, 知识工程, Agent 系统, 空间推理, 专家系统, GIS。

构的创建和更新需要花费更多的时间.在拓扑模型中,数据被分为多个层,每一层存储一个被拓扑编码的空间对象文件.

三角剖分不规则网 TIN(triangulated irregular network)拓扑数据模型通常采用一组互连的、不规则的三角面来表示地形表面.基本元素也是节点(点)、边(线)和多边形(三角形).这种数据模型的意图是用不规则三角形网来镶嵌空间,使得诸如斜率、高度和山脊等地形信息能够有效地存储.对于复杂地形,需要使用更多的较小三角形面元.对于简单地形,只需使用较少的较大三角形面元.

1.2 栅格数据模型

栅格数据结构将空间概念化为镶嵌在其中的具有规则形状和大小的单元(区域)的有限集合.空间和非空间属性记录在这些单元中.点被表示为具有行-列位置的一个单元,线被描述为具有同一值的连续单元的序列,区域是具有相同值的单元集合.因为每个单元只能有一个值,所以其属性被分别存储在各自的层(文件)中.根据分辨率的值,栅格文件可能非常大,因此,必须采用可以有效数据压缩的数据结构.

FORTRAN 中的数组是一种普通的栅格数据模型的数据结构.但是,它太简单,并且没有数据压缩能力.游程编码和二叉树是具有数据压缩能力的栅格数据结构.由于我们在定性地分析了空间对象点与点、点与线和点与区域之间的定性空间关系和描述空间对象点与点、点与线和点与区域之间的拓扑关系和空间关系推理算法时,都是利用矢量数据模型,所以,这里我们就不再详细介绍栅格数据模型了.

2 点与点之间拓扑关系的推理

2.1 点与点之间拓扑关系推理的传统方法

点与点之间拓扑关系的推理就是判断两点之间是否重合.它有着广泛的应用.例如,我们要判断分别位于两幅具有相同比例尺和基准框架视图上的两个点是否重合或者是否为同一个点.这里,我们可以假设这两幅图分别是同一地区的、具有相同基准框架的航磁和重力测图^[7].

点与点之间拓扑关系推理的传统方法是根据两点之间的欧氏距离来判断两个点是否重合或者是否为同一个点,如果空间两个点之间的欧氏距离小于或等于一个确定的阈值,则认为两个点重合或者为同一个点;否则,认为两个点不重合或者不是同一个点^[5].

2.2 引入模糊技术后的点与点之间拓扑关系的推理方法

值得注意的是,首先,点的位置本身往往存在着某种程度的模糊性和不确定性.例如,在第 2.1 节给出的例子中,最后得到的航磁和重力测图是在对原始测图进行数字化处理后得到的^[7].在进行数字化处理过程中可能就引入了某种程度的模糊性和不确定性.而第 2.1 节给出的传统方法是一种精确的方法,使用精确的方法来处理带有模糊性和不确定性的数据,这样做本身就是不切实际的,在很多情况下不能有效地判定点与点之间的空间关系,甚至得出错误的结论.其次,当我们要在一些点中查找一个与已知点相同的点时,使用传统方法很可能找不到这样的点(这个已知点与其他所有点的欧氏距离都不小于事先确定的阈值)或者找到的点多于 1 个(与已知点的欧氏距离小于事先确定的阈值的点多于一个).

为了更加切合实际并且更加有效地对点与点之间的拓扑关系进行推理,我们利用模糊技术,根据两个点之间的欧氏距离 $d_{p,q}$ 和事先确定的阈值 ϵ 定义一个隶属函数来描述两个点之间的重合程

度或同一程度。

$$\mu_{p,q} = \begin{cases} 1, & d_{p,q} \leq \varepsilon \\ e^{-k\left(\frac{d_{p,q}-\varepsilon}{\varepsilon}\right)}, & d_{p,q} > \varepsilon \end{cases}, \quad (1)$$

其中 $K > 0$ 。

当 p 和 q 之间的欧氏距离 $d_{p,q} \leq \varepsilon$ 时, $\mu_{p,q} = 1$, p 和 q 的重合程度或同一程度为 1, 认为 p 和 q 重合或 p 就是 q ; 当 p 和 q 之间的欧氏距离 $d_{p,q} > \varepsilon$ 时, $\mu_{p,q} < 1$, $\mu_{p,q}$ 随着 p 和 q 的欧氏距离 $d_{p,q}$ 的增加而减小, 即 p 和 q 的重合程度或同一程度随着 p 和 q 的欧氏距离 $d_{p,q}$ 的增加而减小, 可见, 这样定义的 $\mu_{p,q}$ 更符合人的直觉, 更切合实际, 更易于表示具有模糊性和不确定性的点与点之间的拓扑关系。

3 点与线之间拓扑关系的推理

3.1 点与线之间拓扑关系推理的传统方法

点与线之间的拓扑关系推理就是判断点是否位于线上。它有着广泛的应用。例如, 点可以表示金矿的位置, 线可以表示一条地质断裂^[7] (根据综合信息解译原理与矿产预测图编制方法, 金矿经常位于地质断裂上)。

点与线之间拓扑关系推理的传统方法是根据点到线之间的欧氏距离来判断点是否位于线上, 如果点到线之间的欧氏距离小于或等于一个确定的阈值, 则认为点位于线上; 否则, 认为点不位于线上^[5]。

根据第 1.1 节, 线是连接的坐标点序列, 它实际上是由一些直线段组成的。令线 L 是由节点 p_1, p_2, \dots, p_n 连接组成的, 它们的坐标分别是 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, 令 p_0 的坐标是 (x_0, y_0) , 则可计算出点 p_0 到 $L_{i,i+1}$ ($L_{i,i+1}$ 是连接 p_i 和 p_{i+1} 的线段) 或其延长线的欧氏距离 $d_{i,i+1}$, 并可根 $d_{i,i+1}$ 判断点 p_0 是否位于 $L_{i,i+1}$ 或其延长线上, 如果 $d_{i,i+1} \leq \varepsilon$ (ε 是事先确定的阈值), 则认为 p_0 位于 $L_{i,i+1}$ 或其延长线上; 当 $d_{i,i+1} > \varepsilon$ 时, 则认为 p_0 不位于 $L_{i,i+1}$ 或其延长线上。值得注意的是, 为了说明 p_0 位于 $L_{i,i+1}$, 还必须判断点 p_0 是否落在直线段 $L_{i,i+1}$ 上。为此, 必须对坐标分量进行比较, 假设直线段 $L_{i,i+1}$ 两个端点 p_i 和 p_{i+1} 的 x 分量不等 (否则所有分量均相等, 那么直线段 $L_{i,i+1}$ 的两个端点 p_i 和 p_{i+1} 重合, 直线段 $L_{i,i+1}$ 退化为一点), 那么当 $x_0 - x_i$ 与 $x_0 - x_{i+1}$ 符号相反时, p_0 位于直线段 $L_{i,i+1}$ 上; 否则, p_0 位于 $L_{i,i+1}$ 的延长线上, 而不是位于直线段 $L_{i,i+1}$ 上。可见, p_0 位于 $L_{i,i+1}$ 上必须同时满足两个条件: $d_{i,i+1} \leq \varepsilon$ 并且 p_0 落在直线段 $L_{i,i+1}$ 上。

3.2 引入模糊技术后点与线之间拓扑关系的推理方法

由于空间点 p_0 和线 L 的位置本身往往存在着某种程度的模糊性和不确定性。为了更加切合实际以及更加有效地对点与线之间的拓扑关系进行推理, 我们充分利用模糊技术, 定义一个隶属函数来描述点 p_0 对线的隶属程度。具体方法如下:

首先, 判断 p_0 是否可能位于 (由于这时还没有计算 $d_{i,i+1}$, 所以我们说可能位于) 直线段 $L_{i,i+1}$ 上, 只有当 $x_0 - x_i$ 与 $x_0 - x_{i+1}$ 符号相反时, p_0 才可能位于 $L_{i,i+1}$ 上; 否则, p_0 不可能位于 $L_{i,i+1}$ 上。然后, 我们利用 $d_{i,i+1}$ 和 ε , 根据模糊技术来定义 p_0 对 $L_{i,i+1}$ 的隶属程度:

$$\mu_{i,i+1} = \begin{cases} 1, & d_{i,i+1} \leq \varepsilon \\ e^{-k\left(\frac{d_{i,i+1}-\varepsilon}{\varepsilon}\right)}, & d_{i,i+1} > \varepsilon \end{cases}, \quad (2)$$

其中 $K > 0$ 。

当 p_0 到 $L_{i,i+1}$ 的欧氏距离 $d_{i,i+1} \leq \epsilon$ 时, $\mu_{i,i+1} = 1$, p_0 对 $L_{i,i+1}$ 的隶属程度为 1, 认为 p_0 位于 $L_{i,i+1}$ 上; 当 p_0 到 $L_{i,i+1}$ 的欧氏距离 $d_{i,i+1} > \epsilon$ 时, $\mu_{i,i+1} < 1$, $\mu_{i,i+1}$ 随着 p_0 到 $L_{i,i+1}$ 的欧氏距离 $d_{i,i+1}$ 的增加而减小.

4 点与区域之间拓扑关系的推理

点与区域之间的拓扑关系推理就是判断点位于区域内、位于区域外或者位于区域的边界上. 它有着十分广泛的应用. 例如, 当我们要确定一幅视图上的点与一个特定的区域的拓扑关系时, 就要判断这一点与区域之间的定性空间关系. 这里, 点可以表示待定的矿井的位置, 区域可以表示一个汇水盆地^[7].

根据第 1.1 节, 区域被表示为一个多边形, 编码为具有相同起点和终点, 以此来限定其边界的闭环线. 令区域 P 是由封闭线 L 围成的, L 是由点 $p_1, p_2, \dots, p_n, p_1$ 组成, P 实际上是一个以 p_1, p_2, \dots, p_n 为顶点的多边形; 令 p_0 的坐标是 (x_0, y_0) , 则 p_0 与 P 之间拓扑关系的推理主要是根据 p_0 和 P 的位置来判断: p_0 是位于 L 之上 (即位于 P 的边界上), 或者 p_0 位于 P 之外, 或者 p_0 位于 P 之内. 判断 p_0 否位于 L 之上的方法在前面已经讨论过了, 这里就不再赘述, 下面我们主要讨论判断 p_0 是位于 P 之外还是位于 P 之内的方法.

下面的方法既适用于 P 是凸多边形的情况, 又适用于 P 是凹多边形的情况, 甚至还适用于 P 内部有孔的情况. 具体方法是, 从 p_0 作一射线至无穷远:

$$\begin{cases} x = x_0 + u \\ y = y_0 \end{cases}, \quad (3)$$

然后求射线与多边 P 的交点个数, 进而根据交点个数来判断 p_0 是位于 P 外还是位于 P 内. 若有奇数个交点, 则 p_0 位于 P 内; 若有偶数个交点, 则 p_0 位于 P 外. 如图 1(a) 所示, 射线 a 和 c 分别与多边形有两个和 4 个交点, 为偶数, 故判断 A 和 C 在多边形外. 而射线 b 和 d 分别与多边形有 3 个和 1 个交点, 为奇数, 故判断 B 和 D 在多边形内. 当射线穿过多边形顶点时, 必须加以特殊对待. 如图 1(b) 所示, 射线 f 过顶点, 它与边 6 和边 7 都交于一点, 若将交点计为两个, 则还错误地判断 F 在多边形外. 若规定射线过顶点时将交点数计为 1, 则又会错误地判断点 E 在多边形内. 正确的方法是, 若共享顶点的两边在射线的同一侧, 则交点计数加 2; 若共享顶点的两边分别在射线的不同一侧, 则交点计数为 1. 例如, 边 7 和边 8 都在射线 e 的一侧, 交点计数为 2; 边 1 和边 2 都在射线 e 的另一侧, 交点计数为 2; 故可判断 E 和 I 均在多边形外. 同理可求得 G 和 H 与多边形的交点计数分别为 1 和 3, 所以可以判断 G 和 H 在多边形内.

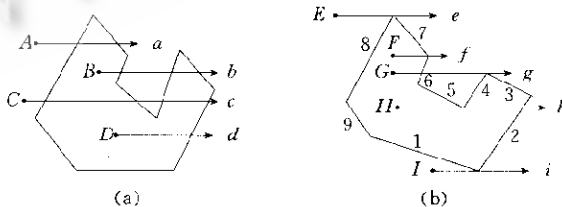


Fig. 1 Illustration of reasoning of relation about point-area
图1 推断点—区域关系的示意图

5 小 结

目前的 GIS 具有非常强的数据输入、存储、检索和显示能力, 但是它的分析和推理能力却十分

有限,缺乏判断空间对象之间关系的综合理论和处理模糊数据的能力。提高GIS分析和推理能力,使GIS可以处理模糊数据和进行模糊查询是目前的GIS亟待解决的问题。从空间对象的拓扑关系来看,空间对象的拓扑关系包括点与点、点与线、点与区域、线与线、线与区域和区域与区域之间的拓扑关系。在本文中,我们着重讨论了点与点、点与线和点与区域之间的拓扑关系,还可以利用模糊技术推断线与线、线与区域和区域与区域之间的拓扑关系。

References:

- [1] Liu, Ya-bin, Liu, Da-you. A review on spatial reasoning and geographic information system. *Journal of Software*, 2000,11(12):1598~1606 (in Chinese).
- [2] Takashi, Matsuyama, Toshikazu, Wada. Cooperative spatial reasoning for image understanding. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1997,11(1):205~227.
- [3] Geologic, U.S. Survey. 1998. <http://nsdi.usgs.gov/nsdi/>.
- [4] Renz, J., Nebel, B. On the complexity of qualitative spatial reasoning: a maximal tractable fragment of the region connection calculus. *Artificial Intelligence*, 1999,108(1~2):69~123.
- [5] Yee, Leung. *Intelligent spatial decision support systems*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlin, 1997.
- [6] Zadeh, L. A. The birth and evolution of fuzzy logic. *International Journal of General System*, 1990,17:95~105.
- [7] Wang, Shi-cheng, Wang, Yu-tian. *Method of Compiling Maps of Synthetic Information*. Changchun: Jilin University Press, 1989 (in Chinese).

附中文参考文献:

- [1] 刘亚彬,刘大有. 空间推理与地理信息系统综述. *软件学报*, 2000,11(12):1598~1606.
- [7] 王世称,王於天. *综合信息解译原理与矿产预测图编制方法*. 长春:吉林大学出版社,1989.

Reasoning of Topology Spatial Objects in GIS*

LIU Ya-bin, LIU Da-you

(College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130023, China);

(Symbol Computation and Knowledge Engineering Key Laboratory of the Ministry of Education, Changchun 130023, China)

E mail: yabinl@public.cc.jl.cn

<http://www.jlu.edu.cn>

Abstract: In this paper, the spatial data models and data structures in geographic information system (GIS) are first discussed. Then the topological relations about point-point, point-line and point-area of spatial objects are qualitatively analyzed. The reasoning algorithms of topological relations of spatial objects are also given. Finally, the fuzzy techniques are applied in reasoning algorithms of topological relations of spatial objects in order to solve fuzziness and uncertainty in the GIS easily.

Key words: spatial reasoning; spatial object; topological relation; geographic information system; fuzzy techniques

* Received March 22, 2000; accepted July 4, 2001

Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No. 69883003; the National High Technology Development 863 Program of China under Grant No. 863-306-ZB05-01-2; the National Research Foundation for the Doctoral Program of Higher Education of China