

# 空间目标的拓扑关系及其 GIS 应用分析

邓敏<sup>1)</sup> 刘文宝<sup>2)</sup> 黄杏元<sup>1)</sup> 孙电<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>( 南京大学城市与资源学系, 南京 210093 ) <sup>2)</sup>( 山东科技大学地球信息科学与工程学院, 青岛 266510 )

**摘要** 拓扑关系是 GIS 中空间目标之间最基本也是最重要的关系之一, 在空间数据建模、空间查询、分析、推理、制图综合、图像检索和相似性分析等过程中起着重要的作用。在综合研究空间关系文献基础上, 从方法论的角度论述了精确和不精确空间目标间拓扑关系的描述方法及其最新进展, 并简要分析了拓扑关系在 GIS 空间查询、推理和分析中的应用。

**关键词** 地理信息系统 拓扑关系 不确定性 形式化

中图法分类号: P208 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961( 2006 )12-1743-07

## Modeling Topological Relations of Spatial Objects and Its Applications in GIS

DENG Min<sup>1)</sup>, LIU Wen-bao<sup>2)</sup>, HUANG Xing-yuan<sup>1)</sup>, SUN Dian<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>( Department of Urban and Resource Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093 )

<sup>2)</sup>( Institute of Geosciences and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510 )

**Abstract** Topological relationship is one of the most important theoretical topics related to GIS modeling, and it plays a key role in many geo-technical fields such as spatial data modeling, spatial query, spatial analysis, spatial reasoning, and cartographic generalization. To motivate further research and applications of the theory, this paper reviews the formalisms and formal models of topological relations. First, the approaches that describe topological relations under certainty are briefly examined. Then the developing progress toward topological relations with uncertainties is explored in terms of research methodologies, including broad boundary approach, fuzzy set approach, random set approach, and rough set approach. Moreover, some applications of the theory in spatial query, spatial analysis and spatial reasoning, are basically introduced. Finally, several issues are highlighted for future investigations.

**Keywords** geographic information system, topological relations, uncertainty, formalism

## 1 引言

近年来空间关系理论已在地理信息系统、智能导航、机器人、计算机视觉、影像理解、图片数据库和 CAD/CAM 等领域引起普遍关注。国际地理信息科学界目前的相关研究主要集中在空间关系的语义问题、空间关系的形式化描述、基于空间关系的查询与

分析, 以及空间推理等方面。由于拓扑关系是在语义层次上最重要的一种空间关系, 已有的绝大部分研究是针对拓扑关系的。拓扑关系是一种不随空间旋转、平移、放大/缩小等变换而发生改变的定性空间信息。现有的 GIS 软件对拓扑关系的处理模式有两种: 一是在数据结构中隐含地表达( 即结点、弧段、多边形之间的关联拓扑关系或称邻接拓扑关系); 二是在数据结构中根本不考虑, 需要时根据所

基金项目 国家自然科学基金项目( 40501053 40471109 ) 基础地理信息与数字化技术山东省重点实验室开放研究基金项目( SD040201 ) 测绘遥感信息工程国家重点实验室基金项目( WKL040304 )

收稿日期 2004-03-31 改回日期 2006-01-10

第一作者简介 邓敏( 1974 ~ ) 男, 教授, 现就职于中南大学测绘与国土信息工程系。2003 年于武汉大学获摄影测量与遥感专业博士学位。主要研究领域为空间关系理论及应用、GIS 空间数据质量与不确定性理论。在国内外学术期刊发表论文 40 余篇。E-mail: lsdmin@polyu.edu.hk

给定的具体条件临时地、动态地生成(即利用目标边界位置信息并借助计算几何学的方法进行推断得到)。在拓扑关系的描述和区分上,已经有一些较为成熟的模型,如 Egenhofer & Franzosa 的 4/9 交模型<sup>[1,2]</sup>和 Randell 的 RCC(区域连通演算)模型<sup>[3]</sup>。随着 GIS 应用的深入,确定性的空间关系理论已经不能满足现实需求,不确定性空间关系理论已经引起重视。当前主要是讨论由空间目标边界位置不确定性引起的拓扑关系认知方面的不确定性,并利用不同的数学方法对不确定性目标建立不同的拓扑关系形式化描述模型。

## 2 精确目标间的拓扑关系模型

### 2.1 交集模型

矢量空间中基于点集拓扑学的交集模型发展较早。Güting 首先应用点集运算定义了两个空间目标间的拓扑关系集<sup>[4]</sup>,但这些关系既不排除也不完备。Egenhofer & Franzosa 基于目标分解的方法提出了 4 交模型,这是一个由空间目标  $A$  的内部、边界与空间目标  $B$  内部、边界的交集形成的二值拓扑关系模型,形式化表达为<sup>[1]</sup>

$$S_{4R}(A, B) = \begin{bmatrix} A^0 \cap B^0 & A^0 \cap \partial B \\ \partial A \cap B^0 & \partial A \cap \partial B \end{bmatrix}$$

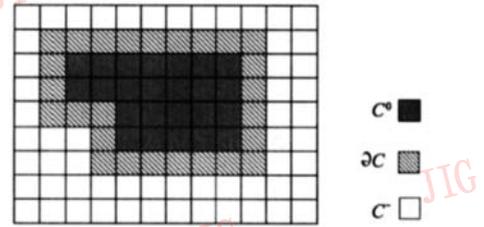
在交集内容取值为空或非空的情况下,利用 4 交模型可描述 2 种点/点关系、3 种点/线关系、3 种点/面关系、16 种线/线关系、13 种线/面关系和 8 种简单面/面关系。由于 4 交模型在线/线、线/面两类关系区分上容易导致混淆,Egenhofer & Herring 在 4 交模型的基础上纳入目标外部构建了 9 交模型<sup>[2]</sup>:

$$S_{9R}(A, B) = \begin{bmatrix} A^0 \cap B^0 & A^0 \cap \partial B & A^0 \cap B^- \\ \partial A \cap B^0 & \partial A \cap \partial B & \partial A \cap B^- \\ A^- \cap B^0 & A^- \cap \partial B & A^- \cap B^- \end{bmatrix}$$

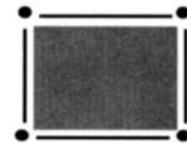
利用 9 交叉模型能够区分出 2 种点/点关系、3 种点/线关系、3 种点/面关系、33 种线/线关系、19 种线/面关系和 8 种简单的面/面关系。这些被区分的拓扑关系既是相互排斥的,在一定的分类层次上亦是完备的。但是 4 交模型和 9 交模型在区分两个面目标间拓扑关系时没有任何改善。为此,Clementini 提出了基于维数扩展的 4 交和 9 交模型,分别用 0D、1D 和 2D 来区分空间目标内部、边界之间交集为点、线和面的情形<sup>[5]</sup>。Egenhofer<sup>[6]</sup>基于 9

交模型进一步探讨了复杂面目标间的拓扑关系。此外,Chen 等人针对 9 交模型中目标的外部范围太大(即除了目标本身的其余所有空间),提出了用空间目标的 Voronoi 区域取代 Egenhofer 定义的目标外部,并称之为 V9I 模型<sup>[7]</sup>。这种定义一方面有利于空间操作与实现;另一方面克服了目标内部、边界、外部之间构成的线性关系,从而能够区分更多的空间关系。

近年来,栅格空间  $Z^2$  下的区域拓扑关系也有研究。例如,Egenhofer & Sharma 借鉴矢量空间  $IR^2$  中的 9 交模型的构造方式,提出了基于 4 邻域(或称 4 连通)概念定义目标边界,从而建立了栅格区域间的拓扑关系模型<sup>[8]</sup>,如图 1 所示。但这种方法存在拓扑上的矛盾,一是因为边界不是线状要素,而是一个宽度为 1 的带状要素,根据点集拓扑学可知,它不具有欧氏空间中约旦曲线的拓扑特性;二是因为在一些情况下,相交关系与相接关系、相接关系与相离关系之间容易导致混淆。随后,Winter 对栅格区域的拓扑定义提出了一种改进方法,该方法可以利用矢量空间  $IR^2$  下定义的 9 交模型来描述栅格区域的拓扑关系<sup>[9]</sup>。



(a) Egenhofer 等人(1993)对栅格区域的拓扑区分



(b) Winter(1998)对栅格区域的拓扑区分

图 1 栅格区域形式化描述的两模式

Fig. 1 Two kinds of topological definitions for a raster region

### 2.2 RCC 模型

基于逻辑的 RCC 模型是一个通过逻辑运算来描述拓扑关系的模型。Randell 等人首先运用区域连接演算(RCC)理论来表达空间区域的拓扑特性和拓扑关系<sup>[3]</sup>,并发展了一种基于空间逻辑的推理机制,也称空间逻辑模型。RCC 模型是以区域为基

元,而不像点集拓扑学中以点为基元,区域可以是任意维,但在特定的形式化模型中,所有区域的维数是相同的。例如,在考虑 2 维情形时,区域边界和区域间的交点将不被考虑。RCC 模型假设一个原始的二元关系  $C(A, B)$  表示区域  $A$  和  $B$  连接,关系  $C$  具有自反性和对称性,可以根据点在区域中来给出关系  $C$  的拓扑解释。使用关系  $C$  可以定义 8 个基本关系,如果不考虑区域的边界,则只可区分 5 个关

系。在 RCC 模型中,它们分别被称之为 RCC-8 和 RCC-5 关系集,如图 2 所示。此外, Cohn 等人以区域的凸壳为基元,得到了 23 个互不相交且完备的关系,即 RCC-23。如果不区分不连接( DC )和外部连接( EC )两种关系,则缩减为 RCC-15<sup>[10]</sup>。在 GIS 中, RCC 模型仅仅适合于描述空间面目标间的拓扑关系,而不能用来描述有关点、线目标间的拓扑关系。

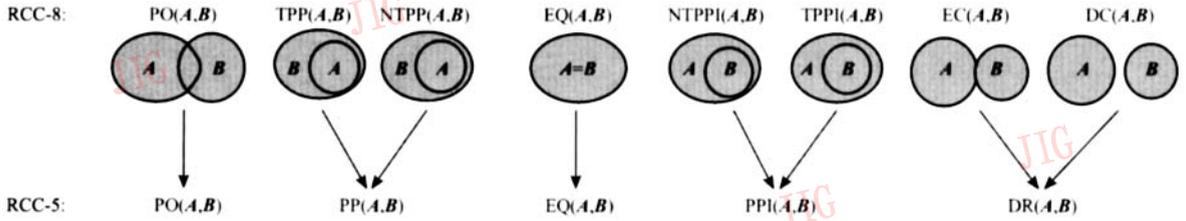


图 2 RCC 模型区分的区域拓扑关系示例

Fig. 2 Topological relations between two regions in terms of RCC model

### 2.3 空间代数模型

Li 等人基于空间代数方法提出了空间代数模型<sup>[11]</sup>,用于描述空间目标间拓扑关系。其基本思想是利用多个空间代数算子,例如并、交、差、反差等,对两个目标进行操作运算,结果可用一个数学函数来表达。与 RCC 模型不同,这种代数模型更适合于描述空间点、线和面目标间的拓扑关系。在区分能力上,比上述提到的各种模型都要强,能区分更多的拓扑情形。后来,通过纳入空间目标的 Voronoi 区域间的代数运算, Li 等人改进了初始代数模型,构建了 Voronoi 空间代数模型<sup>[12]</sup>,从而能区分出更多的空间邻近关系。

### 2.4 模型的区分性度量

区分拓扑关系的标准是拓扑不变量。基于这个思想, Egenhofer & Franzosa<sup>[13]</sup>提出了一组拓扑不变量来表达和判定两个面目标间的等价拓扑关系,这组不变量分别是交分量的维数、交分量的类型(如相接、交叉等)、交分量类型与外部邻域之间的关系,以及交分量的序。 Clementini & Felice<sup>[14]</sup>建立了一组描述 2 维线目标间拓扑关系的拓扑不变量,它们分别是交分量的内容、交分量的个数、交分量类型、交分量序列、共线性度量,以及交分量连接方向。邓<sup>[15]</sup>深入分析了拓扑关系的描述方法,提出了一个广义模型,并构建了描述 2 维线、面目标间拓扑关系的不变量,建立了具有不同区分能力的形式化表达模型。虽然拓扑关系区分的唯一标准是拓扑不变

量,但不同的拓扑不变量能够表达不同的图形结构特性。因此,拓扑不变量的构建与选择取决于对拓扑关系分辨的程度要求以及所需区分的拓扑信息。例如,在一般的应用中只需判断目标间普通的拓扑关系(如相交、包含、相接等),故利用 4 交、9 交或者 RCC 模型即可<sup>[15]</sup>。当需要更为详细的拓扑关系信息时,如一个线型目标穿越一个区域多少次,则需要通过引入一些能区分和表达这类拓扑信息的不变量,并建立相应的分析模型。

## 3 不精确目标间的拓扑关系模型

关于 GIS 中目标位置不确定性的处理已经提出了一些方法,主要是基于带(如 Epsilon 带和误差带)和模糊集的概念。带主要用于表达区域边界的不确定性,最简单的带模型是  $\epsilon$  带模型<sup>[16,17]</sup>。另一个模型则是基于概率分布的误差带模型,它的宽度是变化的<sup>[18]</sup>。对于具有这种不确定性边界的区域, Cohn & Gotts 称之为“鸡蛋-蛋黄”区域( Egg-yolk regions )<sup>[19]</sup>,而 Worboys 称之为模糊区域( Vague regions )<sup>[20]</sup>,即一部分确信属于这个区域,另一部分则可能属于这个区域。大多数的不确定性拓扑关系模型也是基于这些概念建立的。

### 3.1 宽边界模型

Clementini & Di Felice 采用 9 交模型对模糊空间目标进行了分析<sup>[21]</sup>,在点集拓扑学的基础上给出

了模糊区域的定义,将不确定性区域看作具有宽边界的区域,并建立了一个代数模型,即

$$S_9(A, B) = \begin{bmatrix} A^0 \cap B^0 & A^0 \cap \Delta B & A^0 \cap B^- \\ \Delta A \cap B^0 & \Delta A \cap \Delta B & \Delta A \cap B^- \\ A^- \cap B^0 & A^- \cap \Delta B & A^- \cap B^- \end{bmatrix}$$

在一定的约束条件下,利用该模型可以区分 44 种拓扑关系。Cohn & Gotts 在 RCC-5 的基础上提出了“鸡蛋-蛋黄”模型<sup>[19]</sup>,即

$$S_9(A, B) = \begin{bmatrix} F(\gamma(A), \delta(B)) & F(\gamma(A), \epsilon(B)) \\ F(\epsilon(A), \delta(B)) & F(\epsilon(A), \epsilon(B)) \end{bmatrix}$$

在上述矩阵中,每个元素是 RCC-5 关系中的一个,其中  $A$  和  $B$  是两个不确定性区域,  $\gamma(A)$ ,  $\gamma(B)$  分别是  $A$ ,  $B$  的蛋黄,  $\epsilon(A)$ ,  $\epsilon(B)$  分别是  $A$ ,  $B$  的蛋壳,  $F$  为不确定性区域间的关系映射函数。通过考虑蛋黄运算中的约束,可以确定 46 种空间关系。Roy & Stell 对蛋黄模型进行了一般化扩展,将 RCC 空间关系扩展到不确定性区域,基于 Lukasiewicz 代数给出了处理空间不确定性的代数方法<sup>[22]</sup>。Erwig & Schneider 利用基于点集拓扑的精确模型,将不确定性区域表示为一对不相交区域,通过模糊空间操作的形式化模型定义了多种模糊相交关系<sup>[23]</sup>。需要指出,宽边界表达方法是一种伪拓扑定义方法,因为宽边界并不满足欧氏空间中约旦曲线的拓扑特性,即:  $\Delta A \neq \overline{A \cap A^-}$  和  $\Delta B \neq \overline{B \cap B^-}$ 。

### 3.2 模糊集模型

模糊目标是指现实世界中一类连续分布变化的地理现象,如地形、大气压力和商业区等,它适合于用场模型表达。场模型能有效地表示地理现象的空间非匀质性,它是以模糊集理论作为数学工具并利用属性隶属函数来确定目标的边界。因此,现有研究中大部分是将模糊目标建模为模糊集,并利用截集和确定性情况下的关系模型来判断模糊区域间的拓扑关系。在 Zhan 的模型中<sup>[24]</sup>,每个截集对应于一个确定的区域。对于一个给定的拓扑关系  $R$ ,利用满足关系  $R$  的截集区域对的数目除以所有截集区域对的数目,来确定一对不确定性区域为关系  $R$  的隶属程度。Chen 基于 9 交模型,将内部、边界和外部之间交的取值由  $\{0, 1\}$  扩展到区间  $[0, 1]$ ,从而便于相交关系的定量表达<sup>[25]</sup>。Molenaar 从存储在 GIS 数据库中的实际空间数据出发,视一个空间目标为由结点(Node)、边(Edge)和面(Face)基本要素组成,基于句法(Syntax)建立了 2 维空间中基本要

素之间的模糊关系表达函数<sup>[26]</sup>。在 Molenaar 的研究基础上, Dijkmeijer 等人研究了模糊面要素间的两种基本拓扑关系,即相交和相接关系<sup>[27]</sup>。Schneider 利用离散模糊区域的隶属函数,建立了离散模糊区域间拓扑关系的 9 交模型<sup>[28]</sup>,从而可以方便地计算两个模糊区域间不同拓扑关系的隶属程度。刘等人<sup>[29, 30]</sup>通过引入模糊集的支集和核等概念,分析了模糊目标的形态结构模式,并给出了模糊目标的内部、边界和外部的形式化描述方法,并在此基础上建立了模糊区域间拓扑关系描述的参数模型。Tang & Kainz<sup>[31]</sup>基于模糊空间结构提出了一个描述模糊目标间拓扑关系的形式化模型,它是一个由模糊目标内部、边界的边界、边界的内部以及外部等 4 个基本元素相互之间的交集构成的。利用这个模型可以区分 152 种模糊区域之间的拓扑关系。Dutta<sup>[32]</sup>、Esterline<sup>[33]</sup>等人给出了 RCC 数理逻辑的模糊扩展,为每个空间关系定义了隶属函数,模糊逻辑适合于用自然语言来描述不精确的空间数据。

### 3.3 随机模型

空间目标位置观测中产生的空间数据存在随机性,导致了数字空间目标间拓扑关系的不确定性。Winter 基于几何集合的随机边界,使用随机集幂函数推导出拓扑关系的概率分布表达式<sup>[34]</sup>。刘等人在假定空间数据不确定性分布为正态分布的情况下,导出了拓扑关系的分布服从 Rayleigh 分布,并给出了随机点、线和面间拓扑关系定量判定方法<sup>[35]</sup>。随后, Winter 在假定空间目标位置不确定性很小(相对于目标本身)的情况下,基于不精确目标间的形态距离,利用统计分类方法来处理拓扑关系的不确定性,定量地分析了不精确目标间的拓扑关系,并且定义具有最大概率的那种拓扑关系为目标间的拓扑关系<sup>[36]</sup>。这种表达与 Egenhofer 提出的交集模型在定性区分上是等价的。Chen 在假定空间目标位置不确定性为  $\epsilon$  带的情况下,利用数学形态学的“膨胀”和“侵蚀”算子,发展了动态 9 交模型<sup>[37]</sup>,但通过这种方法得到的拓扑关系通常不具有唯一性。

### 3.4 粗集模型

粗集理论作为表示不确定性的另一种手段已逐渐用于解决空间不确定性问题。Ahlqvist 等人将粗集理论应用于 GIS 数据的分类研究<sup>[38]</sup>。Bittner 将其应用于定性空间推理中,结合定性空间表示和粗集理论提出了空间目标的粗定位(rough location)模型,并利用粗集理论的上近似和下近似概念定义了

不确定性空间目标及相互间的基本运算(  $\wedge_{\max}$ ,  $\wedge_{\min}$ ,  $\vee_{\max}$ ,  $\vee_{\min}$  )<sup>[39]</sup>。随后 Bitter & Stell 在上述研究基础上将 RCC-5 关系扩展到区域之间的近似关系<sup>[40]</sup>。基于 RCC-5 和 RCC-8, 在空间关系格的基础上推理得到近似区域的空间关系集, 并给出了 RCC-5 的两个等价的扩展方法。Worboys 基于粗集思想对地理空间中多分辨率的空间结构给出了一个形式化的描述框架, 并给出了连接和部分—整体关系的模糊扩展, 使得空间关系在六元素格中取值<sup>[41]</sup>。

## 4 拓扑关系在 GIS 中的应用

拓扑关系是 GIS 空间推理、查询与分析的基础, 直接影响 GIS 的发展与应用。下面主要从 GIS 空间推理、查询与分析 3 个方面来论述拓扑关系理论在 GIS 中的应用。

### 4.1 拓扑关系与空间推理

推理是根据已知的事实和规则来推断出新事实的一个过程。GIS 中空间推理的关键问题是如何利用存贮在数据库中的基本空间信息, 并结合相关的空间约束来获取所需的未知空间信息。它涉及到空间目标的特性以及推理的逻辑表达。其中空间特性包括拓扑性质、形状、大小、方向、距离等。根据已知信息与未知信息的结合类型, Egenhofer<sup>[42]</sup>、Sharma<sup>[43]</sup>等人将空间推理分为同类空间推理 (homogeneous spatial reasoning)、异类空间推理 (heterogeneous spatial reasoning) 和混合空间推理 (mixed spatial reasoning) 3 种类型。Egenhofer 发展了一种集成拓扑关系信息的形式化方法, 并利用 9 交模型建立了定性拓扑关系之间推理的组合表<sup>[42]</sup>, 用于回答如下形式的问题: “给定 3 个空间目标  $A$ 、 $B$  和  $C$ , 并且知道  $A$  与  $B$  之间、 $B$  与  $C$  之间的拓扑关系, 那么  $A$  与  $C$  之间的拓扑关系是什么?” Sharma<sup>[43]</sup>提出了拓扑关系和方向关系集成表达的空间推理方法, 并发展了拓扑关系与方向关系间推理的组合表。Hong<sup>[44]</sup>建立了拓扑关系与距离关系推理的组合表。

### 4.2 拓扑关系与空间查询

空间数据库包括表达空间目标分布的空间数据 (位置数据和拓扑关系数据) 和非空间数据 (属性数据)。传统关系数据库的查询语言如 SQL、Que1 只是提供了对简单数据类型 (如整数或字符) 的相等或排序等操作, 而不能有效地支持包含空间数据的空间查询以及处理。为了解决空间数据库在空间查

询、分析与处理中的应用问题, 则需要空间查询语言的支持。为此, 许多学者提出了空间查询语言设计的构架, 但大部分研究都是对传统关系数据库 SQL 进行扩展<sup>[45, 46]</sup>。为了构造空间查询, ARC/INFO 中通过 Macro 语言方式将 9 交模型描述的结果 (分离、相接、相交、包含/包含于、覆盖/覆盖于、相等) 加入到查询命令中, Oracle 中是把 9 交模型与 SQL 相结合, 为用户和 GIS 软件提供一个灵活的接口, 使查询功能扩展到空间域<sup>[47]</sup>。Egenhofer 等人<sup>[48]</sup>称这种具有空间查询功能的 SQL 为空间 SQL。

### 4.3 拓扑关系与空间分析

空间分析在某种程度上是处理空间实体间的相互关系, 例如叠置分析处理多个空间目标之间的相交、覆盖等拓扑关系, 网络分析处理空间目标的拓扑邻接与关联; 一致性分析检验同一目标在多重表达中是否产生拓扑矛盾。在这些应用分析中, 拓扑信息通常被视为最基本的一类空间信息。Egenhofer 等人研究了多重表达中空间图形结构的一致性评价问题, 并以空间目标本身的拓扑特性和目标间的拓扑关系作为评判指标<sup>[49]</sup>。从时空的角度来看, 地理空间信息都是随时间变化的, 这种变化不仅仅是空间目标的几何位置、形状、大小的变化, 也可能包括目标间拓扑关系的变化。Winter 基于拓扑关系变化定量地分析了两个不同空间图形结构的相似性程度<sup>[50]</sup>。Ragia & Winter 以拓扑差异和几何差异为指标比较分析了两个表达同一区域的数据集的数据质量<sup>[51]</sup>。

## 5 结 论

目前大多数不精确目标间拓扑关系的形式化模型都是基于目标集合内、外边界来描述。由于采用的数学方法不同, 它们的定义和表达方式也不相同。此外, 这种描述方式并不能真正刻画地理现象边界的不确定性, 尤其是对目标内、外边界的确定非常困难。例如, 模糊模型中不确定边界的隶属度函数, 粗集表达模型中目标上近似和下近似都难以确定。

拓扑关系建模时应充分结合人类的认知模式, 使模型的描述方式更符合人们对拓扑信息的表达和认知方式, 尽量缩小认知和模型描述之间的差异。在模型表达时, 需要更准确、更全面地刻画空间目标间的关系, 这有赖于各种数学理论及方法, 或几种理论及方法的综合使用。同时还应考虑与 GIS 的充分

结合,增强模型的实用性,以较好地解决实际应用问题。

在 GIS 空间关系领域中,3 维、时空、模糊、层次等拓扑关系的形式化描述模型与表达方法,以及基于空间关系的认知、推理和存取等方面都是近期的研究方向。

### 参考文献 (References)

- Egenhofer M, Franzosa R. Point-set topological spatial relations[ J ]. International Journal of Geographical Information Systems, 1991, 5( 2 ): 161 ~ 174.
- Egenhofer M, Herring J. Categorizing binary topological relationships between regions, lines and points in geographic databases[ A ]. In : A Framework for the Definition of Topological Relationships and An Approach to Spatial Reasoning within this Framework[ C ], Santa Barbara, CA, 1991 : 1 ~ 28.
- Randell D, Cui Z, Cohn A. A spatial logical based on regions and connection[ A ]. In : Kaufmann M, San Mateo( eds. ). Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on Knowledge Representation and Reasoning[ C ], New York : Springer-Verlag, 1992 : 165 ~ 176.
- Guting R H. Geo-relational algebra : A model and query language for geometric database systems[ A ]. In : Proceedings of the International Conference on Extending Database Technology[ C ], Venice, Italy, 1988 : 506 ~ 527.
- Clementini E, Di Felice P, Oosterom Peter van. A small set for formal topological relationships suitable for end-user interaction[ A ]. In : David Abel, Beng Chin Ooi ( eds. ). Advances in Spatial Databases[ C ], New York : Springer-Verlag, 1993 : 277 ~ 295.
- Egenhofer M, Clementini E, Di Felice P. Topological relations between regions with holes[ J ]. International Journal of Geographic Information Systems, 1994, 8( 2 ): 129 ~ 144.
- Chen J, Li C, Li Z. A Voronoi-based 9-intersection model for spatial relations[ J ]. International Journal of Geographical Information Science, 2001, 15( 3 ): 201 ~ 220.
- Egenhofer M, Sharma J. Topological relations between regions in  $R^2$  and  $Z^2$ [ A ]. In : Proceedings of the Third International Symposium on Advances in Spatial Databases[ C ], London : Springer-Verlag, 1993 : 316 ~ 336.
- Winter S, Frank A. Topology in raster and vector representation[ J ]. GeoInformatica, 2000, 4( 1 ): 35 ~ 65.
- Cohn A G, Bennett B, Gooday J, et al. Qualitative spatial representation and reasoning with the region connection calculus[ J ]. GeoInformatica, 1997, 1( 1 ): 1 ~ 44.
- Li Z, Zhao R, Chen J. An algebra model for spatial relations[ A ]. In : Proceedings of the 3<sup>rd</sup> ISPRS Workshop on Dynamic and Multi-dimensional GIS[ C ], Bangkok, 2001 : 170 ~ 177.
- Li Z, Zhao R, Chen J. A Voronoi-based spatial algebra for spatial relations[ J ]. Progress in Natural Science, 2002, 12( 7 ): 528 ~ 536.
- Egenhofer M, Franzosa R. On the equivalence of topological relations [ J ]. International Journal of Geographical Information Systems, 1995, 9( 2 ): 133 ~ 152.
- Clementini E, Di Felice P. Topological invariants for lines[ J ]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 1998, 10( 1 ): 38 ~ 54.
- Deng M. Extended models on topological relations in vector GISs : theories and methods[ D ]. Wuhan : Wuhan University, 2003. [ 邓敏. 矢量 GIS 中拓扑关系的扩展模型 : 理论和方法[ D ]. 武汉 : 武汉大学, 2003. ]
- Perkal J. On epsilon length[ J ]. Bulletin de l'Academie Polonaise Des Sciences, 1956( 4 ): 399 ~ 403.
- Chrisman N R. A theory of cartographic error and it's measurement in digital databases[ A ]. In : Auto-carto 5 : Fifth International Symposium on Computer-Assisted Cartography[ C ], Cristal City, Virginia, United States, 1982 : 159 ~ 182.
- Shi W, Liu W. A stochastic process-based model for positional error of line segments in GIS[ J ]. International Journal of Geographic Information Sciences, 2000, 14( 1 ): 51 ~ 66.
- Cohn A G, Gotts N M. The 'egg-yolk' representation of regions with indeterminate boundaries[ A ]. In : Burrough P, Frank A( eds. ). Geographic Objects with Indeterminate Boundaries[ C ], London : Taylor & Francis, 1996 : 171 ~ 188.
- Worboys M. Imprecision in finite resolution spatial data [ J ]. GeoInformatica, 1998, 2( 3 ): 257 ~ 279.
- Clementini E, Di Felice P. An algebraic model for spatial objects with indeterminate boundaries[ A ]. In : Burrough P, Frank A ( eds. ). Geographic Objects with Indeterminate Boundaries[ C ], London : Taylor & Francis, 1996 : 155 ~ 169.
- Roy A J, Stell J G. Spatial relations between indeterminate regions [ J ]. International Journal of Approximate Reasoning, 2001, 27( 3 ): 205 ~ 234.
- Erwig M, Schneider M. Vague regions[ A ]. In : Scholl M, Voisard A ( eds. ). Advances in Spatial Databases[ C ], New York : Springer-Verlag, 1997 : 298 ~ 320.
- Zhan F B. Topological relations between fuzzy regions[ A ]. In : Bryant B, Carroll J, Oppenheim D( eds. ), Proceedings of the 1997 ACM Symposium on Applied Computing[ C ]. New York : ACM Press, 1997 : 192 ~ 196.
- Chen X. Spatial relation between sets[ A ]. In : International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XVIII Congress [ C ], Vienna, Austria, 1996 : 99 ~ 104.
- Molenaar M. An Introduction to the Theory of Spatial Object Modeling [ M ]. London : Taylor & Francis, 1998.
- Dijkmeijer, Hoop. Topologic relationships between fuzzy area objects [ A ]. In : Kraak, Molenaar( eds. ). Advances in GIS researches II, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Spatial Data handling [ C ], London : Taylor & Francis, 1996 : 377 ~ 394.
- Schneider M. Finite resolution crisp and fuzzy spatial objects[ A ]. In : Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium on Spatial Data Handling [ C ], Beijing, China, 2000 : 3 ~ 17.

- 29 Liu Wen-bao , Deng Min. Analyzing spatial uncertainty of geographical region in GIS[ J ]. Journal of Remote Sensing , 2002 , 6( 1 ) : 45 ~ 49. [ 刘文宝 , 邓敏. GIS 中地理区域位置不确定性分析 [ J ]. 遥感学报 , 2002 , 6( 1 ) : 45 ~ 49. ]
- 30 Liu W B , Xia Z G , Deng M. Modeling fuzzy geographic objects with fuzzy fields[ J ]. Geospatial Information Science , 2001 , 4( 4 ) : 37 ~ 42.
- 31 Tang X , Kainz W , Fang Y. Modeling of fuzzy spatial objects and topological relations[ A ]. In : Proceedings of the Second International Symposium on Spatial Data Quality [ C ] , Hong Kong , 2003 : 34 ~ 50.
- 32 Dutta S. Approximate spatial reasoning : integrating qualitative and quantitative constraints[ J ]. International Journal of Approximate Reasoning , 1991 , 5( 3 ) : 307 ~ 331.
- 33 Esterline A C , Dozier G , Homaifar A. Fuzzy spatial reasoning[ A ]. In : Mesiar R , Riecan B( eds. ). Proceedings of the International Fuzzy Systems Association World Congress[ C ] , Prague : Academia Press , 1997 : 162 ~ 167.
- 34 Winter S. Uncertainty of topological relations in GIS[ A ]. In : Ebner H , Heipke C , Eder K( eds. ). Proceedings of ISPRS Commission II Symposium : Spatial Information from Digital Photogrammetry and Computer Vision[ C ] , Bellingham : SPIE , 1994 : 924 ~ 930.
- 35 Liu Wen-bao , Deng Min , Xia Zong-guo. Determination of spatial relations between random objects in GIS[ J ]. Journal of China Coal Society , 2000 , 25( 5 ) : 455 ~ 460. [ 刘文宝 , 邓敏 , 夏宗国. 矢量 GIS 中随机目标间空间关系的判定 [ J ]. 煤炭学报 , 2000 , 25( 5 ) : 455 ~ 460. ]
- 36 Winter S. Uncertain topological relations between imprecise regions [ J ]. International Journal of Geographic Information Science , 2000 , 14( 5 ) : 411 ~ 430.
- 37 Chen X. Spatial relation between uncertainty sets [ A ]. In : International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing , XVIII Congress[ C ] , Vienna , Austria , 1996 : 105 ~ 110.
- 38 Ahlqvist O. Rough classification and accuracy assessment[ J ]. International Journal of Geographical Information Sciences , 2000 , 14( 5 ) : 475 ~ 496.
- 39 Bittner T , Stell J. A boundary-sensitive approach to qualitative location[ J ]. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence , 1998 , 24( 1 ) : 93 ~ 114.
- 40 Bittner T , Stell J. Rough sets in approximate spatial reasoning[ A ]. In : Ziarko W , Yao Y( eds. ). Rough Sets and Current Trends Computing[ C ] , Heidelberg : Springer-Verlag , 2001 : 445 ~ 453.
- 41 Worboys M. Computation with imprecise geospatial data[ J ]. Computer , Environment and Urban Systems , 1998 , 22( 2 ) : 85 ~ 106.
- 42 Egenhofer M J. Deriving the composition of binary topological relations[ J ]. Journal of Visual Languages and Computing , 1994 , 5( 2 ) : 133 ~ 149.
- 43 Sharma J. Integrated Spatial Reasoning in Geographic Information Systems : Combining Topology and Direction[ D ]. Orono , United States : The Graduate School , University of Maine , 1996.
- 44 Hong J H. Qualitative Distance and Direction Reasoning in Geographic Space[ D ]. Orono , United States : The Graduate School , University of Maine , 1996.
- 45 Frank A. Requirements for a database management system for a GIS [ J ]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing , 1988 , 54( 11 ) : 1557 ~ 1564.
- 46 Egenhofer M J. Spatial Query Languages[ D ]. Orono , United States : The Graduate School , University of Maine , 1989.
- 47 Shariff ABM , Egenhofer M J , Mark D. Natural-language spatial relations between linear and areal objects : the topology and metric of English-language terms[ J ]. International Journal of Geographical Information Science , 1998 , 12( 3 ) : 215 ~ 245.
- 48 Egenhofer M J. Spatial SQL : A query and presentation language[ J ]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering , 1994 , 6( 1 ) : 86 ~ 94.
- 49 Egenhofer M J , Clementini E. Evaluating inconsistencies among multiple representations[ A ]. In : The 6th International Symposium on Spatial Data Handling [ C ] , Edinburgh , Scotland , 1994 : 901 ~ 920.
- 50 Winter S. Location similarity of regions[ J ]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing , 2000 , 55( 3 ) : 189 ~ 200.
- 51 Ragia L , Winter S. Contributions to a quality description of areal objects in spatial data sets [ A ]. In : ISPRS Commission IV Symposium on GIS Between Visions and Applications[ C ] , Stuttgart , Germany , 1998 , 32 : 479 ~ 486.