

GIS 中拓扑和方向关系推理模型

何建华,刘耀林

(武汉大学 资源与环境科学学院,湖北 武汉 430079)

An Integrated Model for Topology & Direction Relation Reasoning

HE Jian-hua, LIU Yao-lin

(The School of Resource and Environment Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: GIS is powerful for data collection and management, but its analysis & reasoning ability is limited. Deeply analyse, we can find that the inconsistency of GIS spatial data representing and reasoning model as well as the independence with each other are the root of evil. The ultimate aim of this paper is to work out an integrated model for topology and direction relation reasoning, so that we can realize the spatial relations reasoning easily and accurately.

Key words: topology relation; direction relation; spatial reasoning

摘 要: 当今 GIS 在空间分析、建模和推理方面的能力极其有限,究其原因,现有 GIS 空间数据表达不直接支持推理运算,空间关系推理模型相互独立且运算复杂,准确性不高。本文在深入研究现有空间拓扑关系和方向关系推理模型的基础上,基于 Cobb 的空间拓扑关系模型的基本思想,建立了拓扑关系矩阵 $Top_{X_2 \times X_2}$ 、 $Top_{Y_2 \times X_2}$ 和方向关系矩阵 $Dir_{3 \times 3}$ 并将拓扑和方向关系推理计算统一到空间目标的 MBRs (Minimum Bounding Rectangles) 的比较运算上来,达到了简化推理运算和统一建模实现拓扑和方向关系的联合推理,丰富了空间关系推理的语义,提高了推理的准确性。

关键词: 拓扑关系;方向关系;空间推理

1 引 言

随着地理信息系统应用深入,不仅要求 GIS 具有一般管理和分析功能,还需要有进一步空间预测和推理能力。但地理信息系统的发展现状正如 Yee Leung 所说:“目前地理信息系统提供了一个强大的数据输入、存储、检索和显示的环境而他们的分析、建模和推理能力受到了很大限制,他们基本上处于数据丰富而理论缺乏的境地”。究其原因,现有 GIS 空间数据表达不直接支持推理运算,即当前 GIS 的数据表达与现存空间推理的表

达方式不一致,因此研究一种与当前 GIS 数据表达一致的空间推理模型成为 GIS 进一步发展的当务之急。

对空间关系的研究主要包括拓扑、方向和度量关系,这 3 类空间关系主要由空间实体的几何特征所决定,它表达空间实体之间的一种约束。其中,拓扑关系是指在拓扑变换下的拓扑不变量。度量关系是指用度量空间中的某种度量尺度来描述目标之间的关系,如目标间的距离、远近等。随着智能导航、机器人、计算机视觉、影像理解等技术在 GIS 中应用的推广,GIS 中空间关系的表达

收稿日期:2003-07-25;修回日期:2003-11-20

作者简介:何建华(1974-),男,湖北孝感人,博士研究生,主要研究方向为土地信息的智能化处理。

和推理得到了一定的发展,其中空间关系的定性推理和形式化描述方法引起了广泛的关注,基于点集拓扑的 2×2 、 3×3 拓扑矩阵模型得到了一致的公认^[1]。定性的空间方向关系作为空间拓扑关系的补充也成为当前智能 GIS 研究的热点问题。度量关系主要集中在欧氏空间的距离关系研究,近年也在模糊空间和粗糙空间等数据挖掘领域出现了一些诸如空间模糊近似等度量关系。但是这些描述和模型都是各自独立的,而人们对空间目标间关系的认识通常是同时考虑目标间的拓扑、方向和距离关系的,因此这种以相互独立的模型来描述有着内在联系的目标间空间关系的 3 个方面是不符合人类认知逻辑的,必须将这些独立的模型结合起来形成一个统一的空间关系的表达和推理模型。

2 GIS 中空间推理概述

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^[2]。本文主要利用空间推理理论技术研究空间对象间空间关系的推理,包括空间拓扑关系推理、空间方向关系推理和空间距离关系的推理。传统 GIS 使用完全定量的方法表示和推导空间信息。定量表示为科学计算提供了依据,然而定量的方法需要空间目标几何信息的完全描述,不能处理本身固有不完全、不精确的空间地理信息。不精确的地理信息、有限的计算精度以及误差的组合传播都会给定量方法带来严重影响。人们已经意识到定量的方法是空间认知和推理的一种不恰当表示,基于欧几里德几何、直角坐标系和矢量代数的定量空间推理形式化系统与人们熟悉的直观推理过程相差甚远,空间信息的定量处理方式明显与人们处理空间概念的方式不同,不符合人们的空间认知结构^[3]。对于拓扑和方向关系来说,人们对他们的概念不仅依赖于目标的绝对位置,而且依赖于空间目标的相对大小、形状以及相邻目标的位置、参照系等,也就是说空间目标间的关系是处在一定环境中的,并且目标间的拓扑和方向关系是相互联系的,因此本文拟采用定性和定量相结合的方法来联合考虑空间对象之间的拓扑和方向关系。由于空间关系的几何计算会消耗大量系统资源,急剧地降低系统效率而使推理变得不可接受。必须采取策略提高推理效

率,本文试图从两个方面来解决这一问题。首先,对空间关系推理中所涉及的空间对象进行抽象、简化,在不影响推理正确性的前提下,通过抽象、简化空间对象达到对象间空间关系推理计算的简化;其次,对空间关系的表达和计算进行简化,在保证空间对象间关系描述完整性的前提下,简化空间关系类型达到简化空间关系推理的目的。

基于以上考虑,本文拟采用最小边界矩形 MBR (Minimum Bounding Rectangle) 作为空间拓扑和方向关系推理模型。由于 MBR 对某些凹多边形的简化太粗略^[4],有时会出现推导出的空间对象间关系与实际不符甚至矛盾的情况,因此本文对 MBR 采用线性四叉树方法进一步划分成 MBRs,以克服 MBR 的限制。

3 空间拓扑关系推理

3.1 空间拓扑关系表达模型

空间数据建模、空间查询、空间分析、空间推理等许多方面在 GIS 中扮演着重要角色。然而,由于存储空间的限制和空间关系的复杂性,还不可能显式地表达所有空间目标间的空间关系,如当前所广泛采用的空间数据拓扑建模中也只表达了邻接、包含等部分空间关系。因此,必须建立一种有效的拓扑关系推理机制并构造相应的操作,从底层的空间数据结构来获取这种高层的空间关系语义信息。

目前,GIS 中实用的拓扑关系表达模型主要有两种。一种是当前为大家所广泛采用的,由 Engenhofer 等人提出的 9 元组模型 (9I),以此为基础建立空间关系的操作。该模型是将空间目标分解为边界、内部和外部,通过比较两空间目标的边界、内部和外部的交集,来分析他们之间的空间关系。然而,由于该模型中空间目标的外部(即“补”)具有无限性,从而导致了一些难以处理的问题,如难以直接计算与操作,无法更进一步地区分空间邻近与相离关系,缺乏可操作的实用工具等。尽管在 SDTS(空间数据转换标准)中,许多空间关系可以使用两个 9I 模型的基元进行定义,但却难以从空间数据中直接计算这些基元。针对这一问题,陈军等提出用空间目标的 Voronoi 区域替代 9I 模型中空间目标的“补”,发展了基于 Voronoi 的空间关系 9 元组模型—V9I 模型。尽管如此,该模型仍然是基于点集拓扑理论的,其计算的复杂性和表达的不准确性导致其在空间推理

中很难广泛使用。另一种是 Cobb 提出的通过将 Allen 的时态关系模型扩展到 2 维的方法^[5],利用一个二元组 $[r_x, r_y]$ 来表达空间目标间拓扑关系, r_x 和 r_y 分别表示 X 、 Y 方向两空间目标间的拓扑关系,每 1 维即为 Allen 定义的 7 个关系谓词(Before, meets, overlaps, starts, during, finishes and equal)及其反,共 13 种,这样 Cobb 的拓扑模型就有 169 种拓扑关系。本文即采用该拓扑关系模型进行空间拓扑关系的表达和推理。该模型很好地满足了 GIS 空间推理模型所应具有的两个基本条件:空间对象简化,以空间对象的 MBR 对空间对象进行简化;空间关系语义丰富,169 种空间拓扑关系基本包括了两个空间对象之间的可能拓扑关系。

3.2 空间拓扑关系组合运算

拓扑关系的组合运算是指给定参照目标 A 和 B 之间及 B 和 C 之间的拓扑关系,需推导 A 与 C 之间拓扑关系的运算。通常目标 A 和 C 之间的拓扑关系是一确定的拓扑关系或为可能关系集。Cobb 的空间拓扑关系模型的基本思想:利用 MBR 来简化空间对象,通过计算出的两 MBR 的拓扑关系作为空间对象间的拓扑关系。具体地,它是通过两 MBR 的角点坐标满足一序列的限制条件来解求其空间拓扑关系。假定 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) 分别表示 MBR 的左下角和右上角坐标,则关系 $A [overlaps, meets] B$ 可定义为: $\{Ax_1 < Bx_1, Bx_1 < Ax_2 < Bx_2, Ay_1 = By_2\}$ 。拓扑关系的组合运算即是对这些限制条件进行比较求解新的限制条件。当我们直接用这一模型进行拓扑关系

的组合运算时,得到的可能关系集合可能包含较多的元素,即推理的不确定性程度很大。如 $A [before, before] B, B [before, before] C$,通过对其限制条件进行解析,发现 A 与 C 的可能拓扑关系集为全部 169 种拓扑关系。则说明这种空间推理模型效率是很低的。为提高该模型空间推理的准确性,本文采用以下策略对该模型进行改进:

1. 用对两 MBR 角点坐标求差运算代替比较运算;
2. 构造 2×2 拓扑关系矩阵表达 MBR 间拓扑限制条件。

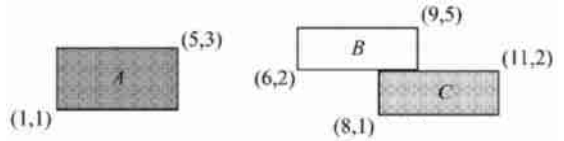


图 1 目标间空间拓扑关系

Fig. 1 Spatial topology relation

令 $x_{ij} = Ax_i - Bx_j, y_{ij} = Ay_i - By_j, i, j = [1, 2]$, 则图 1 中目标 A 与 B, B 与 C 间拓扑关系限制条件转化为 X 、 Y 方向两个 2×2 的矩阵

$$\text{Top X}(A, B) = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5 & -8 \\ -1 & -4 \end{bmatrix}$$

$$\text{Top Y}(A, B) = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3 & -4 \\ +1 & -2 \end{bmatrix}$$

由于 $x_1 < x_2, y_1 < y_2$, 当 $x_{11} < 0$, 则 $x_{12} < 0, y_{11} < 0$, 则 $y_{12} < 0$, 对 13 种拓扑关系分别计算上述矩阵得到表 1。

表 1 目标间拓扑关系表达

Tab. 1 The expression of spatial topology relation

图示							
谓词	before	meets	equals	overlaps	starts	finishes	during
语义	相离	相接	相等	相交	同始	同终	包含
拓扑矩阵	$\begin{bmatrix} - & - \\ - & - \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} - & - \\ 0 & - \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} - & - \\ + & - \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & - \\ + & + \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} - & - \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} - & - \\ + & + \end{bmatrix}$

注:表中仅列出 1 维方向上的 7 种拓扑关系,另外 6 种通过 $A [overlaps, meets]^{-1} B = B [overlaps, meets] A$ 方式得到;对于 2 维的情况,在 X 和 Y 方向上分别应用上述 13 种拓扑关系即可得到相应的拓扑表达 Top X 和 Top Y 。

因此,求 A 、 C 之间的拓扑关系即是求 A 、 C 间的 $x_{ij} = AB - x_{ij} - BC$ 和 $y_{ij} = AB - y_{ij} - BC$ 的值,得到拓扑关系矩阵 $\text{Top X}(A, C) =$

$\begin{bmatrix} -3 & -3 \\ -2 & -2 \end{bmatrix}$, $\text{Top Y}(A, C) = \begin{bmatrix} -4 & -4 \\ -3 & +1 \end{bmatrix}$, 对照上表即知其拓扑关系 $A [before, overlapedby] C$, 即通过 A 、 B 及 B 、 C 之间的拓扑关系可惟一确定

地推导出 A 与 C 之间的拓扑关系。

4 空间方向关系推理

4.1 空间方向关系模型

在 GIS 应用研究领域,国内外许多学者已经对空间方向关系模型进行了大量的研究。其目的就是为获取方向关系语义,映射自然语言谓词到几何地理结构,并进行推理和评估。由于人们习惯语义中方向关系描述的模糊性与数学表达的困难性,方向关系的计算还没有形成普遍适用的模式,目前主要集中在点模型和最小边界矩形两种方向关系模型的研究上。

点模型有两种实现形式:锥形法 (cone) 和投影法 (projection)。这两个模型都是细分参考点的周围空间为 4 个不相交的相等的区域,投影法水平分割而锥形法则旋转 45°。对每区域赋予东北、东南、西北和西南 (投影法) 或东、南、西和北 (锥形法),为得到更精确的方向关系可对其再进行细分得 8 或 16 方向。

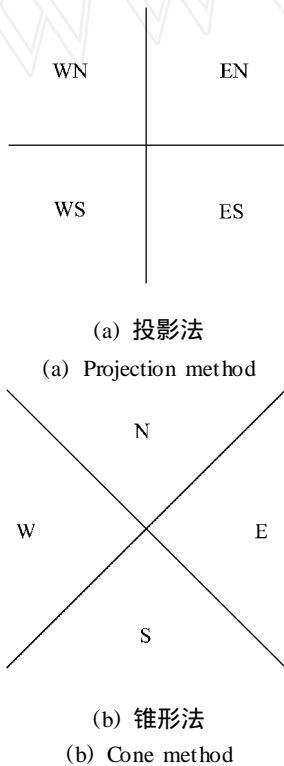
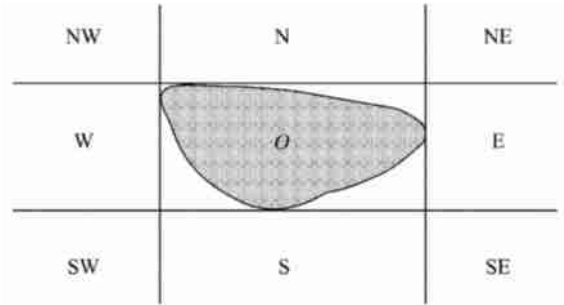


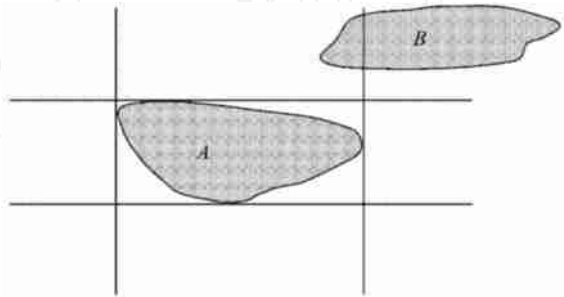
图 2
Fig. 2

最小边界矩形模型则是基于扩展 Allen 的时态关系模型,比较两目标的最小边界矩形的方向关系。本文为寻求一种空间拓扑、方向关系的统一推理模型,故采用基于 Goyal 和 Egenhofer 提出

的在最小边界矩形基础上改进成的方向关系拓扑矩阵模型^[6]。该模型通过延伸目标的 MBR 的边,将空间划分为 9 个区域,分别表示为北、东北、东、东南、南、西南、西、西北和目标 MBR 所在的中心方向。如图 3(a) 所示。



(a) 参考对象空间方向分区
(a) Space division



(b) 参考对象 A 与目标 B 间方向关系
(b) Direction relation of A and B

图 3
Fig. 3

通过记录目标对象落在参考对象的哪个区来描述目标间的方向关系,即考察参考对象的 9 个方向片与目标对象之间的交集是否为空来判断方向。由此构造了一个 3 × 3 的方向矩阵 dir_{3 × 3}来表达这 9 个交集是否为空。

$$Dir(A, B) = \begin{bmatrix} NW_A & B & N_A & B & NE_A & B \\ W_A & B & O_A & B & E_A & B \\ SW_A & B & S_A & B & SE_A & B \end{bmatrix}$$

在该方向关系矩阵中至少有一个元素为非空,并且非空元素必定相邻。对图 3(b) 所示 A 与 B 之间的方向关系矩阵为

$$Dir(A, B) = \begin{bmatrix} & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & \end{bmatrix}$$

该方向关系矩阵模型功能表达 2⁹ = 512 种可能的组合,根据上述提及的方向关系矩阵所具有的约束条件,矩阵中非空元素必相邻且矩阵中元

素不能全空,其中只有 218 种情况是有效的。

4.2 方向关系的组合运算

方向关系组合运算是指给定参照目标 A 和 B 之间及 B 和 C 之间的方向关系,需推导 A 与 C 之间方向关系的运算。方向关系矩阵模型为凹多边形之间的方向关系提供了更多的细节,但是当目标处在参考对象的多个方向片时,它不能描述具体的分配关系,同时它的方向关系推理准确程度不高,且需要进行一系列的复杂运算。为提高表达和推理的准确度,并能和拓扑关系推理统一到同一模型,本文对该模型从以下两方面进行改进:

1. 对目标对象的 MBR 采用线性四叉树算法进一步细分,得到目标 MBR 在参考对象各方向片的比例分配;
2. 采用拓扑矩阵 $Top X_2 \times 2$ 和 $Top Y_2 \times 2$ 推导方向关系矩阵确定两对象之间的方向关系。

对 MBR 作线性四叉树划分可采用两种方法。一种是事先设定最小矩形单元的阈值,凡划分的矩形大于该阈值且有目标对象部分落入矩形内即进行进一步划分,直到划分矩形小于阈值要求,该方法操作简单但缺乏灵活性,图形形状差异较大的不易得到较满意的结果;另一种方法就是通过设定目标和该目标对应的 MBR 的面积比 r_s 的阈值 r_0 来确定是否需要再对其进行四叉树划分,每划分一次后即计算每一个叶子节点的 r_s ,若 $0 < r_s < r_0$,则继续进行划分,否则停止继续划分,该方法灵活,能充分刻画不同形状的图形,近似精度相对较高。本研究即采用后一种方法进行目标的线性四叉树划分,得到目标的 MBRs。具体划分过程如图 4 所示,则得目标 A 的 MBRs = {11, 12, 13, 3, 4}。

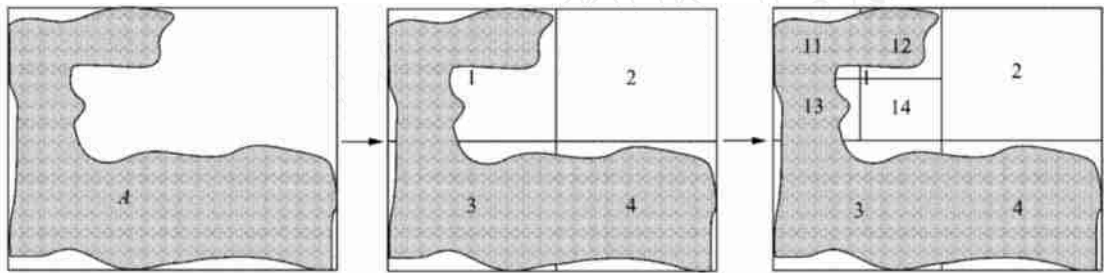


图 4 MBR 四叉树划分
Fig. 4 MBR's quad-tree division

通过以上改进,方向关系矩阵中的元素就是目标在参考对象所在的方向片区域的面积比例,用与拓扑关系组合运算相同方法进行方向关系的

组合运算。作线性四叉树划分后的方向关系矩阵计算如图 5 所示。

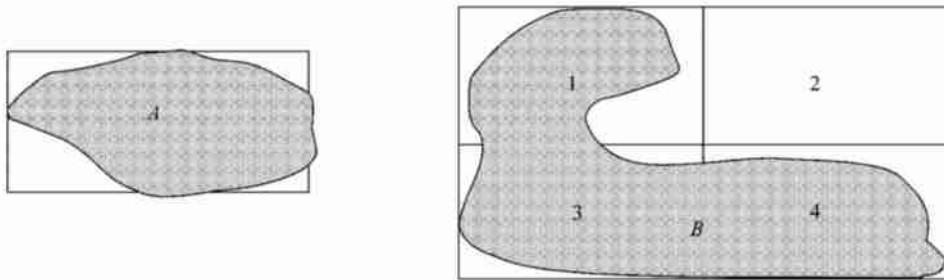


图 5 基于 MBRs 的方向关系矩阵计算
Fig. 5 The computation of directional relation matrix based on MBRs

则 A, B 间的方向关系矩阵 $Dir(A, B)$ 由 $Dir(A, 1)$ 、 $Dir(A, 3)$ 和 $Dir(A, 4)$ 与各自面积权重的乘积组合而成,即 $Dir(A, B) = 1/3 \times Dir(A, 1) + 1/3 \times Dir(A, 3) + 1/3 \times Dir(A, 4)$ 。

5 拓扑关系和方向关系的统一推理模型

经过以上论述可发现,单独使用方向关系推

理或单独使用拓扑关系推理,推理结果的精度将会受到影响或推理结果谓词的空间关系语义不够

丰富,如图 6(a)所示。

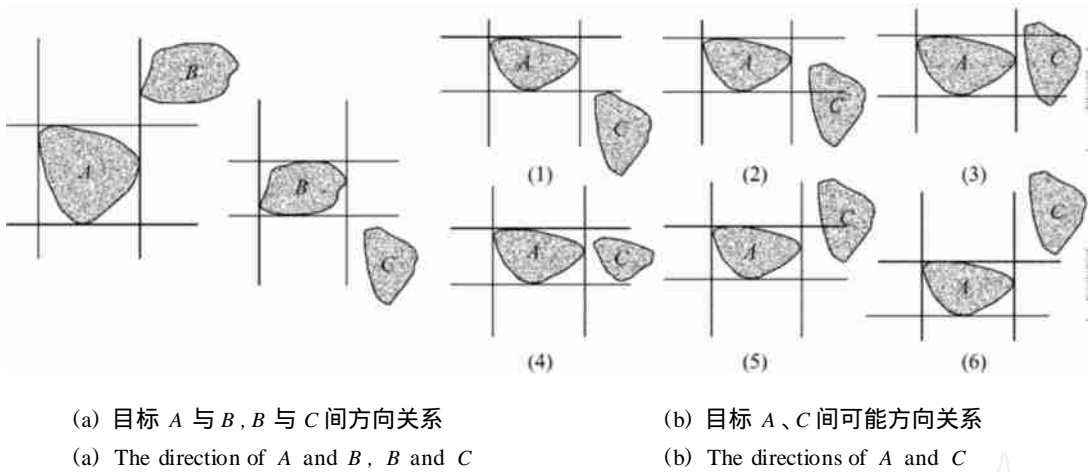


图 6
Fig. 6

目标 A、B、B、C 间的方向关系矩阵分别为

$$\text{Dir}(A, B) = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\text{Dir}(B, C) = \begin{bmatrix} \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

单独利用空间方向关系的组合推理,可推出目标 A、C 间的空间方向关系为如图 6(b) 所示的 6 种空间方向关系中的一种,即他们间的方向关系是不确定的。当加入空间拓扑 $\text{Top } Y(A, B) = \text{meets}$, $\text{Top } Y(B, C) = \text{before}$, 则目标 A、C 间方向关系只能是最后一种情况,即目标 C 位于目标 A 的东北方向。由此可见联合运用目标间的方向

关系和拓扑关系,能提高推理的准确性。

进一步分析本文研究的方向关系和拓扑关系的表达、推理模型可以发现,不论是 Cobb 的空间拓扑关系模型,还是基于最小边界矩形的方向关系模型,其最终还是归结为比较目标对应 MBRS 的角点坐标差,即 x_{11} 、 x_{12} 、 x_{21} 、 x_{22} 和 y_{11} 、 y_{12} 、 y_{21} 、 y_{22} 。对于拓扑关系矩阵 $\text{Top } X_2 \times 2$ 和 $\text{Top } Y_2 \times 2$ 则是由这 8 个元素直接组成,根据其为正、负或零得到 169 种可能拓扑关系组合。对于方向关系矩阵 $\text{Dir}_3 \times 3$, 则是由上述 8 元素的组合来表达的,具体组合情形归纳于表 2。因此,进行目标间的拓扑和方向表达和推理时就可直接利用求解上述 8 元素的符号得到。

表 2 方向关系矩阵对应的约束条件

Tab. 2 The constraint of the direction matrix

方位	NW	N	NE	W	O	E	SW	S	SE
约束条件	$x_{11} > 0$ $y_{22} < 0$	$x_{12} < 0$ $x_{21} > 0$ $y_{22} < 0$	$x_{22} < 0$ $y_{22} < 0$	$x_{11} > 0$ $y_{12} < 0$ $y_{21} > 0$	$x_{12} < 0$ $x_{21} > 0$ $y_{12} < 0$ $y_{21} > 0$	$x_{22} < 0$ $y_{12} < 0$ $y_{21} > 0$	$x_{11} > 0$ $y_{11} > 0$	$x_{12} < 0$ $x_{21} > 0$ $y_{11} > 0$	$x_{22} < 0$ $y_{11} > 0$

6 结束语

针对目前 GIS 中空间方向关系和空间拓扑关系的表达模型难以与现有 GIS 的空间数据表达模型融合,空间推理算法复杂,以及现有空间关系推理模型相互独立,不顾及目标间空间关系三

方面的内在联系,导致空间推理的结果不准确,难以应用实施的缺憾,本文研究提出了以下几方面的改进方案:

1. 以空间目标的最小外接矩形,代替空间目标本身参与空间推理计算,简化空间目标和空间推理计算,为提高推理的正确性,对目标的 MBR

作线性四叉树划分;

2. 对基于 Cobb 的空间拓扑关系模型和方向关系模型进行了改进,形成拓扑关系矩阵 $Top X_{2 \times 2}$ 和 $Top Y_{2 \times 2}$ 以及方向关系矩阵 $Dir_{3 \times 3}$, 明晰了拓扑关系和方向关系的表达和推理方法;

3. 将拓扑关系矩阵 $Top X_{2 \times 2}$, $Top Y_{2 \times 2}$ 以及方向关系矩阵 $Dir_{3 \times 3}$ 统一到求解 x_{11} , x_{12} , x_{21} , x_{22} 和 y_{11} , y_{12} , y_{21} , y_{22} 这 8 个变量上来,简化了问题计算,统一了拓扑和方向关系的表达和推理模型。

由于空间关系的推理是一门多学科结合、综合复杂的问题,本文虽对现有的表达推理模型提出了一些改进,但这距离空间关系推理问题的满意解还很远,下一步的工作将集中在以下几方面:

1. 将空间拓扑、方向和距离关系结合,寻找一种统一的表达推理模型;

2. 将空间目标扩展到线目标,从 GIS 的数据结构上解决 GIS 空间目标的表达模型和目标间关系推理模型的不一致;

3. 用计算模型对推理模型进行评估,找出推理中的可能不一致性,并对推理的模糊性进行评估。

参考文献:

- [1] FRANK A U. Qualitative Spatial Reasoning about Distances and Directions in Geographic Space[J]. Journal of Visual Languages and Computing, 1992, 3(4): 343-371.
- [2] LIU Ya-bin, LIU Da-you. Reasoning of Topology Spatial Objects in GIS[J]. Journal of Software, 2001, 12(12): 1859-1865.
- [3] FRANK A U. Qualitative Spatial Reasoning: Cardinal Directions as an Example[J]. INT J Geographical Information Systems, 1996, 10(3): 269-290.
- [4] RENZ J. Qualitative Spatial Reasoning with Topological Information[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- [5] COBB M. An Approach for the Definition. Representation and Querying of Binary Topological and Directional Relationships between Two-dimensional Objects [D]. Tulane University, 1995.
- [6] GOYAL R, EGENHOFER M J. Cardinal Directions between Extended Spatial Objects [S/OL]. IEEE Transaction on Knowledge and Data Engineering, <http://www.spatial.maine.edu/~max/max.html>.
- [7] EGENHOFER J. Deriving the Composition of Binary Topological Relation[J]. Journal of Visual Languages and Computing, 1994, 5(2): 133-149.
- [8] DU Yun-yan, et al. Theoretic and Application Research of Geo-case Based Reasoning[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(2): 151-158.
- [9] CHEN Jun, et al. Qualitative Description and Reasoning of Spatial Distance and Direction[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition), 2001, 16(1): 68-72.
- [10] WINTERS S. Uncertain Topological Relations between Imprecision Regions [J]. IJGIS, 2000, 14(5): 411-430.