

集成多方面信息的定性空间推理及应用*

王生生⁺, 刘大有, 谢琦, 王新颖

(吉林大学 计算机科学与技术学院, 吉林 长春 130012)

(吉林大学 符号计算与知识工程教育部重点实验室, 吉林 长春 130012)

Integrating Multi-Aspect Information for Qualitative Spatial Reasoning and Application

WANG Sheng-Sheng⁺, LIU Da-You, XIE Qi, WANG Xin-Ying

(College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China)

(Key Laboratory of Symbolic Computing and Knowledge Engineering of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130012, China)

+ Corresponding author: Phn: 86-431-5166479, Fax: 86-431-5166479, E-mail: wang_sheng_sheng@163.com

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

Received 2002-12-05; Accepted 2003-06-10

Wang SS, Liu DY, Xie Q, Wang XY. Integrating multi-aspect information for qualitative spatial reasoning and application. *Journal of Software*, 2003,14(11):1857~1862.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1857.htm>

Abstract: Most previous qualitative spatial or spatio-temporal reasoning researches focused only on one single aspect and therefore were inadequate for realistic applications. A representation and reasoning technology integrating topology, size and time information are proposed and applied to a spatio-temporal geographical information system. The representations of topology, size and time are defined and their interdependence is studied. Then an algorithm TriRSAT which can solve the CSP of these three aspects of information is put forward. The representations are used in the constraint base and the TriRSAT is applied to the consistence check of the spatial-temporal data and query. The methods and theories integrating spatio-temporal information effectively can be potentially applied to spatio-temporal database and robot navigation.

Key words: qualitative spatial reasoning; constrain satisfaction problem; spatial-temporal GIS

摘 要: 以往的定性空间或时空推理工作多数面向单一时空方面,这不符合实际应用需要.提出了集成拓扑、尺寸和时间 3 方面信息的定性表示和推理技术,并应用到时空 GIS 中.给出了面向 GIS 的拓扑、尺寸和时间的表示方法,并研究了它们之间的依赖性.提出了集成这 3 方面信息的约束满足问题求解算法 TriRSAT.在时空 GIS 中,把定性时空表示用于约束关系库,把 TriRSAT 算法用于时空数据一致性检查和时空查询.应用结果显示,该理论和方法能有效地集成处理多方面时空信息,在时空数据库、机器人导航等领域有着广泛的应用前景.

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.69883003 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2001AA115160 (国家高技术研究发展计划(863))

第一作者简介: 王生生(1974—),男,吉林长春人,讲师,主要研究领域为空间推理,时空推理,GIS.

关键词: 定性空间推理;约束满足问题;时空 GIS

中图法分类号: TP18

文献标识码: A

定性空间推理(qualitative spatial reasoning,简称 QSR)是人工智能领域针对空间问题的研究方向.它研究空间信息的定性表示和推理,广泛应用于地理信息系统(简称 GIS)、机器人导航等领域.QSR 一般采用代数或逻辑方法描述拓扑、距离、方向等空间关系以及形状、尺寸等空间特征,并研究复合推理、约束满足问题、定性模拟等推理问题^[1].空间知识多数是粗粒度、主观的、不确定的,对空间问题进行定性分析往往比定量度量更有效.目前 QSR 所涉及的空间问题包括拓扑、方位、基数方向、命名距离、比较距离、尺寸、形状等方面,并且在每个方面都取得了一定的进展^[1,2].但以往的工作多数集中在单一的空间方面,而实际问题经常需要结合空间的多个方面加以考虑.并且,时间因素和空间因素往往相互关联,通常把空间和时态相结合的定性推理称为定性时空推理(QSTR).集成多时空方面的表示和推理工作开展得较早,其重要意义也得到广泛认同.有代表性的工作包括:1993 年,Galton 在 Allen 区间代数的基础上提出了能表示时间、空间和运动的集成逻辑^[3],2002 年,Alfonso 研究了集成拓扑和尺寸信息的空间表示和推理方法,给出了路径相容算法及正确性证明和复杂性分析^[4].同年,Bennett 等人用多维模态逻辑实现了拓扑和时间的集成表示^[5].但是,由于各类空间关系本身复杂而繁多,空间模型又与具体应用领域相关,集成多方面空间信息的研究工作难度较大,进展也比较缓慢,并且多数是纯理论研究工作,没有与实际应用相结合.传统的 GIS 受硬件和技术的限制忽略了时间特性,近年来对时空 GIS 的研究十分活跃.时空 GIS 是一类特殊的 GIS,它除了记录对象的空间属性和非空间属性以外,还存储时间特征,研究空间对象随时间变化的规律,应用于环境监测、灾害救援、天气预报等领域.QSTR 是时空 GIS 的支撑技术之一.本文研究了集成拓扑、尺寸和时间 3 方面信息的定性表示和推理技术,并应用于时空 GIS 系统.

1 单方面时空信息表示

1.1 拓扑关系

QSR 中的拓扑关系模型分为点集拓扑和区域拓扑两大类,都有比较完整的理论体系.本文采用区域拓扑中最著名的区域连接演算 RCC(region connection calculus)理论^[1].RCC 理论以连接算子 $C(x,y)$ 为基础,它表示“区域 x 和 y 至少共用一点”.由 $C(x,y)$ 推导出 RCC-5,RCC-8,RCC-15 等多种拓扑关系模型,分别应用于不考虑边界、考虑边界及时态等多种情况. $\{DC,EC,PO,TPP,NTPP,TPPI,NTPPI,EQ\}$ 是 8 种 JEPD(互不相交且无遗漏)基本 RCC-8 关系,可以组合成 2^8 种关系,其集合用 RCC-8 表示.

定义 1. 拓扑关系的表达形式是 (A,R,B) , $R \in \text{RCC-8}$,表示空间对象 A,B 在时刻 t 的拓扑关系属于 R .

定义 2. 复合关系 $R_1 \circ R_2 = \{r \mid \exists A,B,C[A R_1 B \text{ and } B R_2 C \text{ and } A r C]\}$.

复合关系的定义对本文的拓扑、尺寸和时间关系都适用.复合关系推理是 QSR 的基本操作,又称为

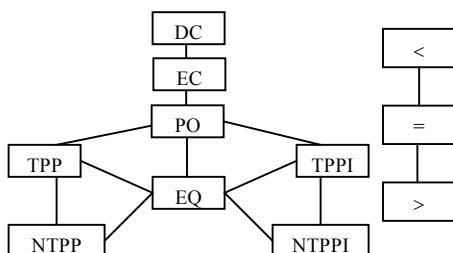


Fig.1 CNG of RCC-8 and size

图 1 RCC-8 和尺寸关系的 CNG

BISP(basic step of inference process),它是进行约束满足等推理的基础.一般情况下,复合关系由复合表直接查得.对于基本关系较少的模型,复合表一般是手工建造的.基本关系规模比较庞大的模型,如宽边界模型有几十种基本关系,就需要研究自动构造复合表技术了.

概念邻域图(conceptual neighborhood graph,简称 CNG)是 QSR 中的另一个重要概念,它源自定性推理.CNG 由节点和弧段构成,节点是基本关系,如果两节点间有弧段连接表示可以通过对象的连续形变从一种关系直接变化到另一种关系.RCC-8 和尺寸关系的 CNG 如图 1 所示.

定义 3. 邻域函数.

$nbr(R) = \{\text{在概念邻域图上和 } R \text{ 有弧段直接相连的所有基本关系} \mid \text{基本关系 } r \in R\}$.

定义 3 适用于本文的拓扑和尺寸关系.

1.2 尺寸关系

尺寸是空间对象的另一项重要特征,它本身是一个度量空间(metric space)下的概念,并且与空间对象的维数相关^[4,6].例如,一维空间对象的尺寸用长度衡量,二维对象用面积衡量,三维对象用体积衡量.本文提出的定性尺寸关系是指两个同维空间对象尺寸间的定性比较关系.

定义 4. 定性尺寸关系的表达形式是 $(A, S, B)_t, S \subseteq \{<, =, >\}$,表示空间对象 A, B 的尺寸在时刻 t 的定性比较关系.尺寸关系包括 3 个基本关系 $\{<, =, >\}$,可以组合成 2^3 种尺寸关系 $\{\emptyset, <, =, >, \leq, \geq, \neq, *\}$.其复合表见表 1.

Table 1 Composition table of size relation

表 1 尺寸关系复合表

$\circ$	$<$	$=$	$>$
$<$	$\{<\}$	$\{<\}$	$\{<, =, >\}$
$=$	$\{<\}$	$\{=\}$	$\{>\}$
$>$	$\{<, =, >\}$	$\{>\}$	$\{>\}$

1.3 时间关系

时空 GIS 中的时间分为区间时间、序数时间、分支时间、环时间等很多类型,其表示和推理一般都比较复杂^[1,3,5].本文提出了一种新的时间关系表达方法,它基于空间关系的变化,表达简练、有效,便于推理.

定义 5. 时间关系的表达形式是 $(t_1, c, t_2)_{\text{TOPO|SIZE}(A,B)}, t_1 < t_2$.表示空间对象 A, B 在时间区间 $[t_1, t_2]$ 内,拓扑或尺寸关系(用 TOPO 或 SIZE 区分)变化的次数为 c . c 为 0 表示 A, B 在时间区间 $[t_1, t_2]$ 内拓扑或尺寸关系没发生变化; c 为 1,则可能变化到 CNG 上任何直接相邻的状态;当 $c > 1$ 时,情况比较复杂.

时间关系的复合运算规则如下:

$$(t_1, c_1, t_2)_{\text{TOPO|SIZE}(A,B)} \circ (t_2, c_2, t_3)_{\text{TOPO|SIZE}(A,B)} = (t_1, c_1 + c_2, t_3)_{\text{TOPO|SIZE}(A,B)}. \quad (1)$$

定义 5 是一种定量表示,也可以不指明具体的次数,而列举一些可能的变化次数或给定次数范围,从而形成一些更粗粒度的时间表示.下面是一种粗粒度的定性时间表示方法及复合表(见表 2).

Table 2 Composition table of qualitative time representation (* is the union of all relations)

表 2 定性时间表示复合表(*表示所有关系)

$\circ$	$<<$	$<=$	$=$	$=>$	$>>$
$<<$	$\{<<\}$	$\{<<\}$	$\{<<\}$	$\{<=<<\}$	$\{*\}$
$<=$	$\{<<\}$	$\{<<, <=\}$	$\{<=\}$	$\{<=<=<=>\}$	$\{<=>>\}$
$=$	$\{<<\}$	$\{<=\}$	$\{=\}$	$\{=>\}$	$\{>>\}$
$=>$	$\{<<, <=\}$	$\{<=<=<=>\}$	$\{=>\}$	$\{>>, =>\}$	$\{>>\}$
$>>$	$\{*\}$	$\{>=>>\}$	$\{>>\}$	$\{>>\}$	$\{>>\}$

定义 6. 定性时间表示.

$(t_1, 0, t_2)_{\text{TOPO|SIZE}(A,B)}$ 表示为 $(t_1, =, t_2)_{\text{TOPO|SIZE}(A,B)}$;

$(t_1, 1, t_2)_{\text{TOPO|SIZE}(A,B)}$ 表示为 $(t_1, <=, t_2)_{\text{TOPO|SIZE}(A,B)}$ 或 $(t_2, >=, t_1)_{\text{TOPO|SIZE}(A,B)}$;

$(t_1, c, t_2)_{\text{TOPO|SIZE}(A,B)}, c > 1$ 表示为 $(t_1, >>, t_2)_{\text{TOPO|SIZE}(A,B)}$ 或 $(t_2, <<, t_1)_{\text{TOPO|SIZE}(A,B)}$.

2 时空信息间的依赖性

2.1 拓扑和尺寸

RCC-8 拓扑关系和尺寸关系不是相互独立的^[4],关键在于只有较大物体才能包含较小物体.它们之间的依赖关系通过 RDS(R)和 SDR(R)分别给出(见表 3 和表 4).

Table 3 The dependence from topology to size RDS(R)

表 3 拓扑对尺寸的依赖性 RDS(R)

R	DC	EC	PO	TPP	NTPP	TPPI	NTPPI	EQ
RDS(R)	$<, =, >$	$<, =, >$	$<, =, >$	$<$	$<$	$>$	$>$	$=$

Table 4 The dependence from size to topology SDR(R)**表 4** 尺寸对拓扑的依赖性 SDR(S)

S	<	=	>
SDR(R)	DC,EC,PO,TPP,NTTP	DC,EC,PO,EQ	DC,EC,PO,TPPI,NTPPI

2.2 时间和拓扑

时间和拓扑关系的依赖性主要体现在:在某时间段内,经过特定次数的变化后拓扑关系能够达到的范围.

函数 $RC(R,c)$ 表示 RCC-8 关系 R 变化 c 次后可能达到的所有基本关系集合:

$$RC(R,c) = \begin{cases} R, & \text{if } c = 0 \\ nbr(R), & \text{if } c = 1 \\ RC(nbr(R), c-1), & \text{if } c > 1 \end{cases} \quad (2)$$

函数 $RR(R_1, R_2)$ 表示 RCC-8 关系 R_1 变化到 R_2 可能经历的变化次数:

$$RR(R_1, R_2) = \{n \mid n \in N, R_2 \in RC(R_1, n)\}. \quad (3)$$

定义 7. 时间和拓扑关系的复合运算定义为

$$(A, R_1, B)_{t_1} \oplus_{RC} (t_1, c, t_2)_{TOPO(A,B)} = (A, RC(R_1, c), B)_{t_2}; (A, R_1, B)_{t_1} \oplus_{RR} (A, R_2, B)_{t_2} = (t_1, RR(R_1, R_2), t_2)_{TOPO(A,B)}.$$

除了直接用定义计算 RC 和 RR 以外,还可以用数论知识研究其中的规律,但这依赖于具体的 CNG. 比如,当 c 大于 2 倍基本关系数目时, RCC-8 的所有基本关系都能达到,而尺寸关系则与 c 的奇偶性相关.

在定性时间表示下, RC 为

$$RC(R, =) = R; RC(R, >) = RC(R, <=) = nbr(R); RC(R, >>) = RC(R, <<) = \{*\}. \quad (4)$$

RR 为

$$RR(R_1, R_2) = \begin{cases} = & \text{if } R_1 = R_2 \\ \{<=, >\} & \text{if } R_1 \in nbr(R_2) \\ \{<<, >>\} & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

2.3 时间和尺寸

尺寸和时间依赖关系的处理方法与拓扑和时间基本相同,类似地,定义 $SC(S,c)$, $SS(S_1, S_2)$ 和 $\oplus_{SC}, \oplus_{SS}$.

$$SC(S,c) = \begin{cases} S, & \text{if } c = 0 \\ nbr(S), & \text{if } c = 1 \\ SC(nbr(S), c-1), & \text{if } c > 1 \end{cases}$$

$$SS(S_1, S_2) = \{n \mid n \in N, S_2 \in SC(S_1, n)\},$$

$$(A, S_1, B)_{t_1} \oplus_{SC} (t_1, c, t_2)_{SIZE(A,B)} = (A, SC(S_1, c), B)_{t_2},$$

$$(A, S_1, B)_{t_1} \oplus_{SS} (A, S_2, B)_{t_2} = (t_1, SS(S_1, S_2), t_2)_{SIZE(A,B)}.$$

在定性时间表示下, SC 为

$$SC(S, =) = S; SC(S, >) = SC(S, <=) = nbr(S); SC(S, >>) = SC(S, <<) = \{*\}. \quad (6)$$

SS 为

$$SS(S_1, S_2) = \begin{cases} = & \text{if } S_1 = S_2 \\ \{<=, >\} & \text{if } S_1 \in nbr(S_2) \\ \{<<, >>\} & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

3 约束满足问题

约束满足问题是 QSR 及很多空间和时空领域的研究重点,前面定义的 3 种关系可以视为对空间对象的约束.最常用的空间约束满足问题是 RSAT^[1,4]问题.

定义 8. 给定一组空间约束 Θ , 形如 xRy , 其中 x, y 为空间对象, R 是空间关系. 确定 Θ 的相容性(consistency)问题叫做 RSAT. 如果一组空间关系 R^* 的 RSAT 问题能够在多项式时间内解决, 则称 R^* 为 RSAT 可处理的

(tractable).

Θ 包含了所有空间对象间关系的组合.如果对 x 和 y 的关系没有限制,则 $x\{*\}y \in \Theta$;如果 $xRy \in \Theta$,则 $yR^\circ x \in \Theta$, R° 是 R 的逆关系.定义 8 可以扩展到时间概念,把时间约束看作一类特殊的空间约束条件. Θ 也可以容纳多种类型的约束条件,本文中 Θ 包含了前面定义的 RCC-8、尺寸和时间约束. Θ 中时间约束采用定义 6 的定性时间表示,当然,采用定义 5 也可以.

算法 1. 算法 TriRSAT.

输入:约束集合 Θ 包括 3 类约束:拓扑约束 $(A,R,B)_t$;尺寸约束 $(A,S,B)_t$;时间约束 $(t_1,c,t_2)_{TOPO|SIZE(A,B)}$.

输出:true 表示 Θ 相容:false 表示 Θ 不相容.

```
(1) for 每个 $(x_i,R,x_j)_t \in \Theta$  DO
  (a) {oldR=R;
  (b) for 每个 $(x_i,S,x_j)_t \in \Theta$  DO
     $R=R \cap SDR(S)$ ;
  (c) for 所有  $k \neq i,j, (x_i,R_1,x_k)_t \in \Theta, (x_k,R_2,x_j)_t \in \Theta$  DO
     $R=R \cap (R_1 \circ R_2)$ ;
  (d) for 所有 $(x_i,R_3,x_j)_{t'} \in \Theta, (t',c,t)_{TOPO(x_i,x_j)} \in \Theta$  DO
     $R=R \cap RC(R_3,c)$ ;
  (e) if  $R=\emptyset$  return false;
    else if  $R \neq \text{oldR}$  goto (1);}
(2) for 每个 $(x_i,S,x_j)_t \in \Theta$  DO
  (a) {oldS=S;
  (b) for 每个 $(x_i,R,x_j)_t \in \Theta$  DO
     $S=S \cap RDS(R)$ ;
  (c) for 所有  $k \neq i,j, (x_i,S_1,x_k)_t \in \Theta, (x_k,S_2,x_j)_t \in \Theta$  DO
     $S=S \cap (S_1 \circ S_2)$ ;
  (d) for 所有 $(x_i,S_3,x_j)_{t'} \in \Theta, (t',c,t)_{SIZE(x_i,x_j)} \in \Theta$  DO
     $S=S \cap SC(S_3,c)$ ;
  (e) if  $S=\emptyset$  return false;
    else if  $S \neq \text{oldS}$  goto (1);}
(3) for 每个 $(t_i,c,t_j)_{TOPO(x,y)} \in \Theta$  DO
  (a) {oldc=c;
  (b) for 所有  $k \neq i,j, (t_i,c_1,t_k)_{TOPO(x,y)} \in \Theta, (t_k,c_2,t_j)_{TOPO(x,y)} \in \Theta$  DO
     $c=c \cap (c_1 \circ c_2)$ ;
  (c) for 所有 $(x,R_1,y)_{t_i} \in \Theta, (x,R_2,y)_{t_j} \in \Theta$  DO
     $c=c \cap RR(R_1,R_2)$ ;
  (d) if  $c=\emptyset$  return false;
    else if  $c \neq \text{oldc}$  goto (1);}
(4) for 每个 $(t_i,c,t_j)_{SIZE(x,y)} \in \Theta$  DO
  (a) {oldc=c;
  (b) for 所有  $k \neq i,j, (t_i,c_1,t_k)_{SIZE(x,y)} \in \Theta, (t_k,c_2,t_j)_{SIZE(x,y)} \in \Theta$  DO
     $c=c \cap (c_1 \circ c_2)$ ;
  (c) for 所有 $(x,S_1,y)_{t_i} \in \Theta, (x,S_2,y)_{t_j} \in \Theta$  DO
     $c=c \cap SS(S_1,S_2)$ ;
```

```
(d) if  $c=\emptyset$  return false;  
    else if  $c\neq oldc$  goto (1);}  
(5) return true;
```

独立的尺寸或时间约束的都是 RSAT 可处理的,因为它们的关系实际上都是不等式,其约束是等价于不等式类型的线性约束.RCC-8 已经被证明不是 RSAT 可处理的,但它的部分子集是可处理的^[1].算法 TriRSAT 在形式上类似于经典的路径相容算法,只是除了考虑约束的传递性之外还考虑了不同类型约束间的依赖关系.如果不考虑拓扑关系,TriRSAT 是单纯的不等式约束满足问题,可以看作是通用线性约束的特例,能够在多项式时间内解决^[7].因此,当 Θ 中的拓扑约束完全包含于某个 RCC-8 的某个最大可处理子集时, Θ 的相容性可以在多项式时间内解决,否则 TriRSAT 是 NP 完全的.

4 应用及结论

本文的时空信息表示和算法 TriRSAT 已经应用于吉林大学的时空 GIS 系统 ST-CGIS,是国家高技术研究发展计划(863)项目“智能化农业信息系统集成开发平台”的一部分.ST-CGIS 能够对吉林省农安县示范区内近 10 年来的土地利用情况、土壤养分含量、化肥施用量、土壤类型等时空数据进行综合管理和分析预测.ST-CGIS 的时空数据采用快照模型在空间数据库和非空间关系数据库中存储,用地理码关联.同时把时空对象间的约束关系存储在约束关系库中.空间数据库采用吉林大学自主研发的组件式地理信息系统平台 CGIS 管理,属性、时间数据及约束关系用关系数据库 SQL-Server 管理.约束关系库的数据结构采用前面给出的表示方法.算法 TriRSAT 用于更新数据时检查整个时空数据库的一致性,同时也用于空间查询及时空分析预测.

本文提出了集成拓扑、尺寸和时间这 3 类信息的定性空间表示和推理方法,并应用于时空 GIS 系统 ST-CGIS.其中拓扑关系采用了 RCC-8 模型,尺寸和时间关系都提出了面向 GIS 的新模型,这两种模型具有表达简练、便于进行推理等特点.实际应用领域的空间信息是多元化的、综合的,集成多方面信息的定性空间推理技术具有很强的实用价值,在机器人导航、GIS、自然语言理解等领域都有着广泛的应用前景.下一步的工作是研究集成时间、拓扑、尺寸、方向和距离这 5 类信息的定性空间推理.

References:

- [1] Cohn AG, Hazarika SM. Qualitative spatial representation and reasoning: An overview. *Fundamental Informatics*, 2001,46(1~2): 1~29.
- [2] Yu QY, Liu DY, Xie Q. A survey of analysis methods of topological relations between spatial regions. *Journal of software*, 2003,14(4):777~782 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/777.htm>.
- [3] Galton A. Towards an integrated logic of space, time, and motion. In: Bajcsy R, ed. *Proceedings of the 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Chambery: Morgan Kaufmann Publishers, 1993. 1550~1555.
- [4] Gerevini A, Renz J. Combining topological and size information for spatial reasoning. *Artificial Intelligence*, 2002,137:1~42.
- [5] Bennett B, Cohn AG, Wolter F, Zakharyashev M. Multi-Dimensional modal logic as a framework for spatio-temporal reasoning. *Applied Intelligence*, 2002,17(3):239~251.
- [6] Wang SS, Liu DY, Yang B. Multi-Dimensional qualitative spatial query language MQS-SQL. *Acta Electronica Sinica*, 2002,12A:1995~1999 (in Chinese with English abstract).
- [7] Koubarakis M. Tractable disjunctions of linear constraints: Basic results and applications to temporal reasoning. *Theoretical Computer Science*, 2001,266(1-2):311~339.

附中文参考文献:

- [2] 虞强源,刘大有,谢琦.空间区域拓扑关系分析方法综述. *软件学报*,2003,14(4):777~782. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/777.htm>.
- [6] 王生生,刘大有,杨博.混合维定性空间查询语言 MQS-SQL. *电子学报*,2002,12A:1995~1999.