

# 基于标识变化的时空推理

王生生<sup>1)</sup> 刘大有<sup>1)</sup> 谷方明<sup>1)</sup> 吕倩楠<sup>1)</sup> 温长吉<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(吉林大学计算机科学与技术学院符号计算与知识工程教育部重点实验室 长春 130012)

<sup>2)</sup>(吉林农业大学信息技术学院 长春 130118)

**摘 要** 空间变化是空间信息处理中的热点问题,标识变化是空间变化的关键问题之一.但是现有工作侧重表达,知识推理能力较弱.为此,研究了基于标识变化的时空推理问题.给出了基于多段图和集合论的标识变化形式化语义,在此基础上定义了二元关系模型.针对基本关系约束满足问题,提出了构造性求解算法,并证明了代数封闭算法可解;针对全关系约束满足问题,提出了一致场景算法.理论分析和实验应用均表明该方法能有效解决信息不完整、不准确情况下的标识变化表示与推理问题,对此类问题其它同类模型尚不能很好解决.

**关键词** 时空推理;标识变化;约束满足问题;代数封闭算法;弱复合

**中图法分类号** TP18 **DOI号**: 10.3724/SP.J.1016.2012.00210

## Identity Change Based Spatio-Temporal Reasoning

WANG Sheng-Sheng<sup>1)</sup> LIU Da-You<sup>1)</sup> GU Fang-Ming<sup>1)</sup> LV Qian-Nan<sup>1)</sup> WEN Chang-Ji<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(Key Laboratory of Symbolic Computing and Knowledge Engineering of Ministry of Education,

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

<sup>2)</sup>(School of Information Technology, Jilin Agriculture University, Changchun 130118)

**Abstract** The spatial change is a hot-spot in spatial information processing. The identity-based change is one of the key problems in spatial change. The previous works focused on the representation, and can be improved in the knowledge based reasoning. So we study the identity change based spatio-temporal reasoning. Formal semantics of the identity-based change is given based on multi-stage graph and set theory. A binary relation model is defined. With regard to the basic relation, a constructive algorithm for constraints satisfaction problem is proposed and the algebraic-closure algorithm is proved sufficiently. As for the full relation, a consistent scene algorithm is provided. Theoretical analysis and experiment both show this method can solve the representation and reasoning of the identity change with incomplete or incorrect information, while the previous works couldn't deal with them.

**Keywords** spatio-temporal reasoning; identity-based change; constraints satisfaction problem; algebraically-closed algorithm; weak composition

## 1 引 言

空间变化指被观察对象的空间属性随时间发生

变化的现象.这是一种很普遍的现象,它可能是自然现象,如气象云图、海面温度的变化,也可能是人为产生的,如车辆运动轨迹等.针对空间变化数据的研究工作分两类,一类是针对底层原始数据的定量研

收稿日期:2009-06-28;最终修改稿收到日期:2011-12-30.本课题得到国家自然科学基金重点项目(61133011)、教育部留学回国人员科研启动基金、吉林大学科学前沿与交叉学科创新项目(200903178)、吉林大学种子基金资助.王生生,男,1974年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为时空推理、模式识别等. E-mail: wss@jlu.edu.cn. 刘大有,男,1942年生,教授,博士生导师,主要研究领域为时空推理、知识工程、数据挖掘等. 谷方明(通信作者),男,1978年生,博士,讲师,研究方向为数据挖掘. E-mail: gufm@jlu.edu.cn. 吕倩楠,女,1987年生,硕士研究生,研究方向为时空数据库. 温长吉,男,1979年生,博士研究生,研究方向为模式识别.

究,另一类工作是研究从原始数据中抽象出来的定性数据. 近年来定性空间变化研究逐渐兴起<sup>[1-9]</sup>,它是指定性空间属性(如拓扑关系)的离散变化. 定性空间变化往往是实际应用中用户所更关心的,比直接反馈给用户数值信息更有意义,亦有研究称这种定性变化为事件(event)<sup>[4-5,9]</sup>.

标识变化是定性空间变化的主要研究内容. 标识(identity)指空间变化中被观察对象的(显式或隐式的)身份识别标志. 基本的标识变化包括创建、消失、分裂、融合和无变化. 标识变化用一种纯符号系统表达空间变化,非常简洁高效,能反映空间变化的最本质特征,因而成为各类定性空间变化研究的核心内容.

现有定性空间变化模型<sup>[1-9]</sup>能从不同角度描述空间变化过程,但是这些模型都是以表示为主,知识推理能力较弱. 定性约束满足方法(QCSP)是时空推理领域中一种很有效的知识推理方法<sup>[10]</sup>. 目前针对定性空间变化的 QCSP 研究还未见报道. 为更好地解决空间变化的知识推理问题,本文针对定性空间变化的最核心问题——标识变化,首次开展基于 QCSP 的时空推理研究. 我们对基于标识的时空变化采用两层表达:第 1 层用多段图表达完整的空间变化过程,每段对应一个时间点的快照;第 2 层采用二元关系模型描述个别时空对象间的时空关系. 由于第 2 层的关系模型能表达不精确、不完备的时空信息,需要定性推理机制来判断现有信息的一致性和推断未知信息,这是本文的主要目标. 最后,通过应用实例,说明了本文工作的应用前景.

## 2 相关工作

较早的定性空间变化建模工作是针对时空数据模型的研究,参见 1999 年 Abraham 和 Roddick<sup>[1]</sup>的综述,快照、时空历史图、面向对象模型等很多时空模型都包括了对定性空间变化的表达. 2000 年, Renolen<sup>[2]</sup>将定性空间变化归纳为 7 种:创建、改变、消失、再生、分裂、合并和重置. 同年, Hornsby 和 Egenhofer 研究了标识变化,他们的工作可以描述更复杂的标识历史变化,如忘记和回想<sup>[3]</sup>. 同年, Chen 等人<sup>[4]</sup>面向土地划分应用研究了基于事件的时空变化模型,他们提出的模型侧重变化产生的因果关系. 2005 年, Worboys<sup>[5]</sup>给出了面向事件的地理现象描述方法. 2006 年, Egenhofer 和 Wilmsen<sup>[6]</sup>研究了定性空间变化和拓扑关系的相互影响,他们只

考察了一个具体特例:单个区域和分裂区域之间的各种可能关系. 同年, Worboys 和 Duckham<sup>[7]</sup>研究了地理传感器网络中的定性空间变化表示. 2008 年, Klippel 等人<sup>[8]</sup>给出了基于概念邻域图的定性空间变化表示. 2009 年, Jiang 等人<sup>[9]</sup>基于树变换映射,研究了基于事件的平面区域拓扑变化描述.

以上工作,从不同角度刻画了定性空间变化,他们都显式或隐式地包含了基本标识变化. 但这些研究是从定性描述角度出发,只提供了对空间变化的定性描述,部分工作提供了面向特定用途的推理策略(如概念邻域图). 上述工作的知识推理能力较弱,尚无法实现一致性检查、更新知识和最小表示等知识系统的基本功能.

本文工作是在时空推理(spatio-temporal reasoning)领域开展时空变化表示与推理研究. 主要目标是表达时空变换过程,即在文献<sup>[1-9]</sup>基础上增加知识推理. 由于约束方法简洁、高效、实用,本文采用基于约束的时空推理方法,从定性时空变换的最基本问题——标识变化入手,开展时空推理研究.

## 3 标识变化模型

现有的标识变化模型<sup>[1-9]</sup>的主要问题是,它们都没有形式化的语义,都是基于自然语言、图形描述或者无形式化语义的代数表示. 这导致基于模型的完备可靠推理工作难以开展. 我们提出了一种基于多段图的空间变化过程描述,进而赋予其集合语义.

**定义 1**(空间变化过程).

空间变化过程是一个有向多段图  $G=(V, E)$ , 节点集合  $V$  划分为  $N+1$  个段,  $0 \leq t(i) \leq N$  表示节点  $i$  的段号;  $E$  是有向边集合, 每条边只连接相邻段节点.

图 1 是一个空间变化过程的例子. 图中每个段代表一个时间快照, 节点表示标识. 如果  $(a, b) \in E$  且  $(b, a) \in E$ , 则称  $(a, b)$  为双向边. 参照标识和空间变化过程的物理意义, 我们给出空间变化过程的集合语义.

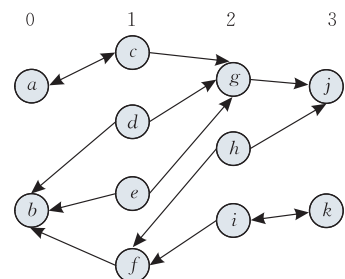


图 1 有向多段图用于表达基于标识的空间变化

**定义 2**(空间变化过程的集合语义).

$G=(V,E)$  是空间变化过程, 对其中的每个节点  $i$  赋予集合语义  $Set(i)$ , 若  $(a,b) \in E$  则  $Set(a) \subseteq Set(b)$ , 即  $a$  是  $b$  的一部分. 反之亦然, 即若  $Set(a) \subseteq Set(b)$  则  $(a,b) \in E$ .

根据定义 2, 图 1 中的有向边  $d \rightarrow b$  表示  $d$  是  $b$  的一部分, 因而不是  $d$  合并到  $b$ , 而是  $b$  分裂出  $d$ . 集合语义满足如下基本公理.

**定义 3**(基本公理).

(1) 标识独立性公理

$$t(i) = t(j) \rightarrow Set(i) \cap Set(j) = \emptyset.$$

(2) 封闭世界公理

任意 2 个段  $t_1$  和  $t_2$ ,  $i_1, \dots, i_m$  是  $t_1$  段节点,  $j_1, \dots, j_n$  是  $t_2$  段节点. 则

$$Set(i_1) \cup \dots \cup Set(i_m) = Set(j_1) \cup \dots \cup Set(j_n).$$

基本公理(1)保证了同一个时间快照内标识是独立的. 基本公理(2)可视为物理世界的物质不灭定律. 它并不排斥创建和消失. 创建、消失可以通过在每段增加一个特殊节点  $X$ , 创建等于从  $X$  节点分裂, 消失等于合并到  $X$  节点. 为了满足集合语义和基本公理下, 空间变化过程中的边必须满足如下条件.

**定义 4**(边约束).

除了第  $N$  段节点, 任何节点  $i$  连接到其右段的边必须满足如下条件之一:

- (a)  $i$  发出 1 条边, 再无其它边.
- (b)  $i$  接收 2 条或更多边, 再无其它边.
- (c)  $i$  连接一条双向边, 再无其它边.

除了第 0 段节点, 任何节点  $i$  连接到其左段的边也必须满足以上条件之一. 根据边约束连接节点的边在一个方向(左或右)上只有以上 3 种构型是允许的. 边约束是通过枚举各种可能情况得到的.

**定理 1.** 一个原子空间变化过程如果满足基本公理(1)并且满足边约束, 则它满足基本公理(2).

证明. 边约束允许的 3 种情况分别对应 3 种基本标识变化, 以向右为例, 依次是合并、分裂和无变化. 每种单独的变化都满足基本公理(2). 而原子空间变化过程中这些基本标识变化是独立的, 所以基本公理(2)在整个变化过程中也成立. 证毕.

从上述讨论可知, 在定义 3 的前提假设下, 定义 1 的多段图能完备表达标识变化. 该方法只对信息完整的空间变化过程有效, 下面将给出的二元关系模型 BRC, 是针对信息不完整的空间变化描述提出的. 表 1 定义了节点  $a$  和  $b$  间的标识变化的二元关系, 这里考虑了两方面因素: 一方面是整体-部分关

系, 通过空间变化过程(定义 1 的多段图)中是否有从  $a$  到  $b$  的路径来体现; 另一方面是时态关系, 通过  $t(a)$  和  $t(b)$  的大小比较实现, 等价于点代数 PA<sup>[10]</sup> 的片断.

表 1 表达标识变化的基本二元关系

共享标识	关系类型		
	$t(a) < t(b)$	$t(a) = t(b)$	$t(a) > t(b)$
$a \rightarrow b$	NB	EQ	NA
$b \rightarrow a$	( $a$ 在 $b$ 前, 标识无变化)	( $a$ 和 $b$ 相等)	( $a$ 在 $b$ 后, 标识无变化)
$a \rightarrow b$	MG	违背公理	SPi
$b \Rightarrow a$	( $a$ 合并到 $b$ )		(从 $b$ 分裂出 $a$ )
$a \Rightarrow b$	SP	违背公理	MGi
$b \rightarrow a$	(从 $a$ 分裂出 $b$ )		( $b$ 合并到 $a$ )
$a \Rightarrow b$	DB	DS	DA
$b \Rightarrow a$	( $a$ 在 $b$ 前, 标识不同)	( $a, b$ 同时时间, 标识不同)	( $a$ 在 $b$ 后, 标识不同)

表 1 中“ $\rightarrow$ ”表示“有路径到”, “ $\Rightarrow$ ”表示“没有路径到”. BRC 包括了 10 种基本(或原子)关系  $\{NB, EQ, NA, MG, SP, MG_i, SP_i, DB, DS, DA\}$ . 从定义可知, BRC 是 JEPD (Jointly Exhaustive and Pairwise Disjoint) 关系. BRC 全关系由其 10 种基本关系的幂集构成, 共  $2^{10}$  种关系. 如  $\{NB, EQ, NA\}$ ,  $\{MG_i, SP_i\}$ ,  $\emptyset$  都在其中. 所有基本关系的并集关系用“ $*$ ”表示, 表示完全未知关系.

## 4 标识变化约束满足推理

### 4.1 约束满足问题

约束满足问题(CSP)是时空推理中的典型问题. 标识变化的 CSP 定义如下.

**定义 5**(BRC 约束满足问题).  $CSP(R) = (V, \Theta)$  是一个约束满足问题, 其中  $V$  为变量的有限集合  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,  $\Theta$  为  $V$  上的二元约束关系集合, 形如  $x_1 r x_2, r \in R$ , 并且  $R$  为 BRC 的子集. 称  $CSP(R)$  是一致的(或称可满足, 可解, 可实现)当且仅当能找到一个空间变化过程  $G=(V', E)$  满足  $V \subseteq V'$  并且  $G$  能满足  $\Theta$ . 亦称  $G$  为  $CSP(R)$  的一个解(或模型).

### 4.2 构造性求解算法

对于基本 BRC 的约束满足问题, 我们给出了如下的构造性算法. 该算法不仅能判定基本 BRC 约束是否一致, 还能构造出一个满足约束的空间变化过程.

**算法 1.** Solving-BC( $V, \Theta$ ).

输入: 基本 BRC 约束满足问题( $V, \Theta$ )

输出: 若  $\Theta$  一致返回空间变化过程  $G=(V', E)$ , 否则

返回 false

1. 检查  $\Theta$  的节点和弧段一致性(约束矩阵的对角线同一性和对称性);

2. 段划分  $//t(a)\{<, =, >\}t(b)$  是点代数的片段, 可  
//以用拓扑排序算法确定

通过把存在 (EQ) 关系的变量同一化, 可删除  $\Theta$  中 (EQ) 关系;

从  $(V, \Theta)$  中提取 PA 关系片段  $t(a)\{<, =, >\}t(b)$ ;

对该片段用拓扑排序算法<sup>[11]</sup>将变量划分成段, 拓扑排序算法无结果表示有环存在, 即有矛盾关系, 则返回 false;

把各段作为  $G$  中的顶点, 从 0 段开始依次放置;

3. 检查相邻段

根据  $\Theta$  确定相邻段之间的有向边;

对于  $G$  中每个节点  $i$ , 在左右两方向上, 检查下面的规则是否严格满足 1 条, 否则返回 false:

- (a)  $i$  发出 1 条边, 再无其它边;
- (b)  $i$  接收 1 条或多条边, 再无其它边;
- (c)  $i$  连接一条双向边, 再无其它边;
- (d)  $i$  没有边;

4. 检查间隔段(关系传递性)

for  $l=2$  to  $n-1$

for  $t=1$  to  $n-l$

$\{\forall i, j t(i)=t, t(j)=t+l$

$[\leftrightarrow]$

if  $(i \{NB\} j \in \Theta)$  and not  $(i \leftrightarrow j$  in  $G)$  then

$\{\text{if } (i \text{ 有到右段的边或 } j \text{ 有到左段的边})$  then  
return false;

Add 新节点  $i \leftrightarrow k_{t+1} \leftrightarrow \dots \leftrightarrow k_{t+l-1} \leftrightarrow j;$

$[\rightarrow]$

if  $(i \{MG\} j \in \Theta)$  and not  $(i \rightarrow j$  in  $G)$  then

$\{\text{if } (i \text{ 有到右段的边})$  then return false;

Add 新节点  $i \rightarrow k_{t+1} \rightarrow \dots \rightarrow k_{t+l-1} \rightarrow j;$

$[\leftarrow]$

if  $(i \{SP\} j \in \Theta)$  and not  $(i \leftarrow j$  in  $G)$  then

$\{\text{if } (j \text{ 有到左段的边})$  then return false;

Add 新节点  $i \leftarrow k_{t+1} \leftarrow \dots \leftarrow k_{t+l-1} \leftarrow j;$

$[\Leftarrow\Rightarrow]$

if  $(i \{DB\} j \in \Theta)$  and  $(i \rightarrow j$  in  $G$  or  $i \leftarrow j$  in  $G)$   
then return false; }

5. 补充新节点

检查每个节点  $i$ ,

if  $(i$  只从左段收到 1 条边) then 增加一系列新节点  
修正:  $k_0 \leftrightarrow \dots \leftrightarrow k_{t(i)-1} \leftrightarrow i;$

if  $(i$  只从右段收到 1 条边) then 增加一系列新节点  
修正:  $i \rightarrow k_{t(i)+1} \rightarrow \dots \rightarrow k_N;$

if  $(i$  没有边连接左段) then 增加一系列新节点修正:  
 $k_0 \leftrightarrow \dots \leftrightarrow k_{t(i)-1} \leftrightarrow i;$

if  $(i$  没有边连接右段) then 增加一系列新节点修正:

$i \leftrightarrow k_{t(i)+1} \leftrightarrow \dots \leftrightarrow k_N;$

设  $n$  为  $V$  中变量数目, 算法 Solving-BC 的时间复杂度是  $O(n^5)$ , 因为第 3 步时间复杂度是  $O(n^5)$ , 其它均为  $O(n^2)$ .

**定理 2.** 基本 BRC 的约束满足问题  $(V, \Theta)$  一致当且仅当 Solving-BC  $(V, \Theta)$  有解.

证明.

“ $\Leftarrow$ ”若 Solving-BC  $(V, \Theta)$  返回  $G = (V', E)$ , 则由算法执行过程, 显然  $G$  同时满足  $\Theta$  和边约束. 虽然步 3 中规则比边约束稍弱, 但不影响二元关系一致性, 如果存在差异可以在步 5 中修复. 所以,  $G$  是空间变化过程,  $G$  是解,  $(V, \Theta)$  一致.

“ $\Rightarrow$ ”  $(V, \Theta)$  一致, 不妨设存在解  $G1 = (V1, E1)$ , 下面我们将检查算法各步, 确认不会返回 false, 并且算法各步生成的  $G$  始终满足  $G \subseteq G1$ .

(1)  $\Theta$  全局一致, 必然节点、弧段一致, 可通过.

(2)  $\Theta$  一致, 其上的点代数片段也必一致, 故无矛盾. 若  $G1$  的段号分配和算法得到  $G$  不同, 可以调整相同, 即从 0 起, 紧凑安排, 因为前后关系是相对关系, 绝对段号只要不违背相对关系可任意分配. 故  $G \subseteq G1$  成立.

(3)  $\Theta$  只有基本 BRC 关系, 由定义知  $\Theta$  可唯一确定  $V$  节点相邻段的边, 故  $G1$  和  $G$  内  $V$  节点相邻段的边是相同的,  $G \subseteq G1$  成立.  $G1$  满足边约束,  $G$  也满足, 此步的约束比边约束弱, 因此无 false 返回.

(4) 分情况讨论,

$[\rightarrow]$  在条件  $(i \{MG\} j \in \Theta)$  and not  $(i \rightarrow j$  in  $G)$  下,  $(i \{MG\} j \in \Theta) \Rightarrow G1$  中必有  $i \rightarrow k'_{t+1} \rightarrow \dots \rightarrow k'_{t+l-1} \rightarrow j$ . 这个链中可能存在部分  $\leftrightarrow$ , 但对下面的讨论无影响.  $k'_{t+1}, \dots, k'_{t+l-1}$  中没有节点会在  $V$  中. 否则, 若  $k'_{t+v} \in V$ , 则有  $i \{MG, NB\} k'_{t+v} \in \Theta$  and  $k'_{t+v} \{MG, NB\} j \in \Theta (1 \leq v \leq l-1)$ , 因为  $G1$  满足  $\Theta$ . 由于这两个约束的段距离都小于  $l$ , 在前面的  $l$  循环中必然会进行处理, 也就是  $G$  中会有  $i \rightarrow k'_{t+v}$  and  $k'_{t+v} \rightarrow j \Rightarrow i \rightarrow j$ , 与  $[\rightarrow]$  条件前提矛盾.  $i$  不能有边到其右段. 如果有边, 只能是  $k'_{t+1}$  (发出边至多 1 条),  $k'_{t+1}$  不在  $V$  中, 它是在前面步骤中被创建的.  $k'_{t+1}$  不可能是端点, 创建它的节点只能在右面(左节点刚讨论过), 所以  $k'_{t+1}$  有向右的边. 以上讨论可循环进行, 直到  $j$ . 所以  $G$  中有  $i \rightarrow j$ , 矛盾. 由此可知, 此处算法不会返回 false. 若  $i$  右侧无边, 则算法在  $G$  中创建一条新路径, 为了保证  $G \subseteq G1$ , 我们对  $G1$  做局部调整, 并且保证  $G1$  仍然是解.

[←] 讨论类似上面.

[↔] 在条件  $(i \{NB\} j \in \Theta)$  and not  $(i \leftrightarrow j \text{ in } G)$  下,  $(i \{NB\} j \in \Theta) \Rightarrow$  有  $i \leftrightarrow k'_{i+1} \leftrightarrow \dots \leftrightarrow k'_{i+l-1} \leftrightarrow j$  在  $G1$  中. 通过类似前面的讨论, 可以得到  $k'_{i+1}, \dots, k'_{i+l-1}$  均不在  $V$  中,  $G$  中  $i$  不能有边到其右段,  $j$  不能有边到其左段. 故不会返回 false. 由于双向链是排他并且唯一的, 算法在  $G$  中新建的  $ij$  双向链, 同  $G1$  必然是相同的. 故此步能保证  $G \subseteq G1$ .

[<≠>] 若  $(i \{DB\} j \in \Theta)$  and  $(i \rightarrow j \text{ in } G \text{ or } i \leftarrow j \text{ in } G)$  成立,  $G$  此时和  $\Theta$  冲突, 而  $G \subseteq G1$  成立, 推出  $G1$  不是解, 矛盾. 所以对一致的  $\Theta$  这个条件必然不能成立.

(5) 因为这步进行的调整对二元关系无影响,

所以这里在  $G$  中增加的节点和边, 或者就在  $G1$  中, 或者可以对  $G1$  做等价调整, 使它们一致.

最终, 能保证  $G \subseteq G1$  并且能满足  $\Theta$ , 则  $G$  也是一个解. 证毕.

### 4.3 弱复合表

在前面的构造性算法基础上, 通过时空推理方法, 我们将深入探讨 BRC 推理问题. 弱复合运算是时空推理的最基本操作.

弱复合运算:  $R \circ S = \{T \mid \exists a, \exists b, \exists c: R(a, b) \wedge S(b, c) \wedge T(a, c)\}$ .

BRC 的弱复合表可以由 Solving-BC 算法得到. 根据弱复合定义, 可以通过穷举所有 3 变量基本 BRC 约束网络, 得到 BRC 弱复合表(表 2).

表 2 BRC 的弱复合表

$R(b, c)$	$R(a, c)$										
	$R(a, b) =$	NB	EQ	NA	MG	SP	MGi	SPi	DB	DS	DA
NB	NB	NB	EQ, NA, NB	MG	SP	MGi	SPi	DB	DB	DB, DA, DS	
EQ	NB	EQ	NA	MG	SP	MGi	SPi	DB	DS	DA	
NA	EQ, NA, NB	NA	NA	MG	SP	MGi	SPi	DB, DA, DS	DA	DA	
MG	MG	MG	MG	MG	DB	EQ, MG, MGi, NA, NB	∅	DB, MG	DB	DB, DA, DS, SPi	
SP	SP	SP	SP	DB	SP	∅	DB, DA, DS, EQ, NA, NB, SP, SPi	DB	DB	DB, DS, DA, MGi	
MGi	MGi	MGi	MGi	DA, DB, DS, EQ, NA, NB, MG, MGi	∅	MGi	DA	DB, DA, DS	DA	DA	
SPi	SPi	SPi	SPi	∅	EQ, NA, NB, SPi, SP	DA	SPi	DB, DA, DS, MG	DA, SPi	DA, SPi	
DB	DB	DB	DB, DA, DS	DB	DB, SP	DB, DA, DS, SP	DB, DA, DS	DB, NB, MG, SP	DB, NB, MG, SP	*	
DS	DB	DS	DA	DB	DB, SP	DA, MGi	DA	NB, MG, SPi, DB	DS, EQ	NA, SPi, MGi, DA	
DA	DB, DA, DS	DA	DA	DB, DS, DA	DB, DS, DA, MGi	DA, MGi	DA	*	NA, SPi, MGi, DA	NA, SPi, MGi, DA	

### 4.4 代数封闭算法

代数封闭算法通过弱复合运算不断约简所有变量三元组内的关系, 最终达到稳定状态, 如果没有空约束关系出现就称为代数封闭.

**定理 3.** 基本 BRC 的约束满足问题  $(V, \Theta)$  一致当且仅当  $\Theta$  代数封闭.

证明.

“ $\Rightarrow$ ”  $\Theta$  全局一致必然局部一致, 因此代数封闭.

“ $\Leftarrow$ ” 我们将证明“若  $\Theta$  代数封闭, 则 Solving-BC  $(V, \Theta)$  有解”, 依次考察算法各步.

(1)  $\Theta$  代数封闭, 则节点和弧段一致, 通过.

(2) 对于点代数片段  $\{<, =, >\}$ , 代数封闭决定全局一致性. 所以  $\Theta$  上的点代数片段代数封闭, 且全局一致. 此步能通过.

(3) 弱复合表中  $R_1 \circ R_2 \neq \emptyset$  能起到同边约束一样的效果.  $\Theta$  代数封闭, 满足弱复合表, 自然能满足此步内的条件, 通过.

(4) 下面说明若  $\Theta$  代数封闭, 各条件下都不会返回 false.

[ $\rightarrow$ ] 在  $(i \{MG\} j \in \Theta)$  and not  $(i \rightarrow j \text{ in } G)$  成

立的前提下,如果  $i$  在  $G$  中有向右侧的边,则沿着  $\rightarrow$  边向右,必然链到  $v \in V, t(v) < t(j)$ . 因为被创建的节点不能做  $\rightarrow$  链端点;  $\rightarrow$  边每节点只能有一条,  $\rightarrow$  链是唯一的,若  $t(v) \geq t(j)$ ,则  $j$  必然在链内.  $G$  中有  $i \rightarrow v \Rightarrow i \{NB, MG\} v \in \Theta$ . 通过弱复合推理得到  $i \{NB, MG\} v \in \Theta, i \{NB, MG\} j \in \Theta, t(v) < t(j) \Rightarrow v \{NB, MG\} j \in \Theta$ . 则在前面的  $l$  循环里必然对  $v \{NB, MG\} j$  进行过处理,并在  $G$  得到  $v \rightarrow j$ . 那么  $G$  中,  $i \rightarrow v$  and  $v \rightarrow j \Rightarrow i \rightarrow j$ , 矛盾. 所以  $i$  在  $G$  中没有向右侧的边,不会返回 false.

其它(4)中情况讨论类似. 所以,弱  $\Theta$  代数封闭, Solving-BC( $V, \Theta$ ) 不会返回 false,  $\Theta$  全局一致,有解. 证毕.

代数封闭算法的实现和文献[12]中路径一致算法相同(替换复合操作为 BRC 弱复合),时间复杂度  $O(n^3)$ . 但它只能判定是否可满足,不能给出解(空间变化过程  $G$ ).

#### 4.5 一致场景算法

一致场景是指如果 BRC 全关系的约束满足问题是一致的,则给出一个约束的子集,该子集只包含基本 BRC 关系. 也就是对于一个不确定的约束知识库给出一个确定的解.

**定理 4.** BRC 全关系的约束满足问题 CSP (BRC) 是 NP 完全问题.

证明.

CSP(BRC) 属于 NP 难问题,因为它的两个片段,点代数和整体部分关系都是非凸的(参见 PA<sup>[10]</sup> 复杂度分析),点代数片段包括  $\{<, >\}$  关系,整体部分关系包括  $\{\rightarrow, \leftarrow\}$  关系. CSP(BRC) 属于 NP, 因为它的一个解(基本关系约束网络,即一致场景)可以用 algebraic-closure 算法 ( $O(n^3)$ ) 检测. 故 CSP (BRC) 是 NP 完全的. 证毕.

下面给出一个递归回溯算法求解 BRC 全关系约束满足问题的一致场景.

**算法 2.** ConsistentScene( $V, \Theta$ ).

输入: CSP(BRC) = ( $V, \Theta$ )

输出: 如果  $\Theta$  一致, 返回 true, 并且返回的  $\Theta$  是一致场景; 否则, 返回 false

1. if not(algebraic-closure( $\Theta$ )) then return false;  
//若非代数封闭肯定不一致
2. if 存在  $x_i R x_j \in \Theta$  and  $R \notin BC$  then  
//R 非基本关系
3. { for 所有  $S \in R$  and  $S \in BC$  //穷举  $R$  内基本关系
4. {  $\Theta' = \Theta$ ; 在  $\Theta$  中将  $x_i R x_j$  替换为  $x_i S x_j$ ;
5. if ConsistentScene( $V, \Theta'$ ) then return true; }

6. return false; } //失败, 回溯

7. else return true; //  $\Theta$  只有基本关系, 且代数封闭,  
//则它是相容场景

**定理 5.** 若 BRC 全关系的约束满足问题 ( $V, \Theta$ ) 一致, 则算法 ConsistentScene ( $V, \Theta$ ) 返回一个一致场景, 否则返回 false.

证明.

若  $\Theta$  一致, 则 algebraic-closure( $\Theta$ ) 返回 true. 且  $\Theta$  存在一个由基本 BRC 关系构成的约束子集  $\Theta^*$ ,  $\Theta^*$  满足 algebraic-closure. 不难看出, 算法中递归穷举了所有可能一致的基本关系约束子集(只排除了非 algebraic-closure 的约束网络). 所以  $\Theta^*$  必然在搜索范围内, 算法至少能找到一个一致场景. 若  $\Theta$  不一致, 或者  $\Theta$  不满足 algebraic-closure ( $\Theta$ ), 或者  $\Theta$  不存在一致的基本关系约束子集, 两者算法均可停机并返回 false. 证毕.

设  $V$  中有  $n$  个变量, 考虑逆关系, 约束网络  $\Theta$  有  $n(n-1)/2$  组约束, 每个可取至多 10 种基本 BRC 关系. 则最坏情况下, 算法 ConsistentScene ( $V, \Theta$ ) 需搜索  $10^{n(n-1)/2}$  个基本 BRC 关系约束网络, 每个判定 algebraic-closure( $\Theta$ ) 需  $O(n^3)$ , 即时间上界为  $O(n^3 10^{n(n-1)/2})$ .

下面给出一个推理实例. 假定有 10 个地块, 命名为  $A$  到  $J$ , 它们可能存在于不同的历史时期, 由于年代久远, 只保存了如下不完整的证据:  $A$  和  $B$ ,  $C$  和  $D$ ,  $E$  和  $F$ ,  $G$  和  $H$ ,  $I$  和  $J$  分别存在于同一时期.  $A$  合并到了  $C$ ,  $D$  和  $F$  都合并到了  $H$ .  $B$  合并到了  $C$  或者  $B$  和  $C$  是同一块地的两个名称.  $E$  和  $J$  是同一块土地在不同时期的两个不同名字.  $F$  是  $C$  的一部分.  $E$  和  $G$  是从  $C$  中分裂出来的,  $I$  是从  $G$  中分裂出来的.

上述陈述, 可以用 BRC 描述, 应用 ConsistentScene 算法, 检测出上述事实是无矛盾的, 并且得到了一致场景描述, 进而运行 Solving-BC 算法, 得到了一个图 2 的具体变化过程描述.

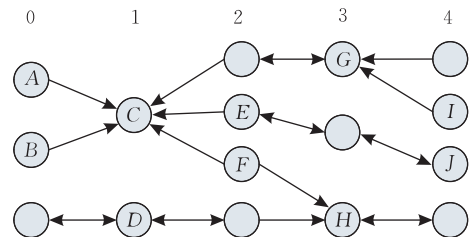


图 2 基于多段图的变化过程描述

若在上述事实中新增加: “ $G$  是  $D$  的一部分”, 则 ConsistentScene 算法返回假, 表示事实之间存在

冲突. 上述推理过程, 现有的方法都不能实现.

## 5 实现与应用

虽然已经开发出了如 SparQ<sup>[13]</sup> 等通用的时空推理工具, 代数封闭算法可以直接调用工具, 但本文大部分算法需要独立实现. 我们基于 Windows 环境, 用 Visual C++ 实现了本文算法, 并封装为推理工具 ISTR. ISTR 在国家 863 高技术项目“农业知识网格”中进行了测试. 从知识网格中可以获取的耕地使用变化的历史信息, 由于是多源集成的信息可能存在不一致. ISTR 可以从耕地标识变化角度检查数据一致性. 实际应用表明, ISTR 能够有效发现并更正标识错误. 除了数据校验, ISTR 还应用于对耕地时空变化的查询优化. 复杂的时空查询由多个变量构成, 变量之间组成了约束网络. 基于 ISTR 的查询优化体现在两方面: (1) 通过基于 ConsistentScene 算法的查询预处理, 事先过滤不一致的查询条件, 避免了不必要的时空数据库操作. (2) 在约束网络中去掉可由其它约束推导出的约束, 得到同原网络等价的最小表示, 从而降低查询条件数目, 提高查询效率. 实际应用表明, 上述优化措施显著提高了查询效率, 特别在查询变量多、条件复杂的情况下, 效果更明显. 本文方法还可以用于规划、视频挖掘、视频检索等领域.

## 6 结论和展望

本文首次提出了针对标识变化的时空推理方法, 弥补了定性空间变化推理研究的不足, 具有一定理论意义和应用价值. 同现有定性空间变化研究<sup>[1-9]</sup> 相比:

(1) 首次提供了知识推理功能, 可以进行一致性检查, 发现一致场景.

(2) 提供了定性空间变化的二元关系表达, 直接在关系数据库中存储和管理, 便于实现应用; 现有方法都是基于图(包括树)的, 需要独立开发系统才能实现存储和管理.

由于本文工作是首次实现对定性空间变化的 QCSP 推理, 为了保证效率, 关系模型相对简单, 只表达了最基本的标识关系. 所以从语义上较现有模型稍弱, 这是为了提高推理效率在表达能力方面的

必要牺牲. 在后续的研究中, 将尝试加入更丰富的语义, 并寻找高效的推理算法.

## 参 考 文 献

- [1] Abraham T, Roddick J. Survey of spatio-temporal databases. *GeoInformatica*, 1999, 3(1): 61-99
- [2] Renolen A. Modelling the real world: Conceptual modeling in spatiotemporal information system design. *Transaction in GIS*, 2000, 4(1): 23-42
- [3] Hornsby K, Egenhofer M. Identity-based change: A foundation for spatio-temporal knowledge representation. *International Journal of Geographical Information Science*, 2000, 14(3): 207-224
- [4] Chen Jun, Jiang Jie. An event-based approach to spatio-temporal data modeling in land subdivision systems. *GeoInformatica*, 2000, 4(4): 387-402
- [5] Worboys M F. Event-oriented approaches to geographic phenomena. *International Journal of Geographical Information Science*, 2005, 19(1): 1-28
- [6] Egenhofer M, Wilmsen D. Changes in topological relations when splitting and merging regions//Riedl A, Kainz W, Elmes G. *Progress in Spatial Data Handling*. Berlin, Germany: Springer, 2006: 339-352
- [7] Worboys M F, Duckham M. Monitoring qualitative spatio-temporal change for geosensor networks. *International Journal of Geographical Information Science*, 2006, 20(10): 1087-1108
- [8] Klippel A, Worboys M F, Duckham M. Identifying factors of geographic event conceptualization. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, 22(2): 183-204
- [9] Jiang Jixiang, Worboys M. Event-based topology for dynamic planar areal objects. *International Journal of Geographical Information Science*. 2009, 23(1): 33-60
- [10] Vilain M, Kautz H A, Beek P G. Constraint propagation algorithms for temporal reasoning: A revised report//Weld D, Kleer J. *Readings in Qualitative Reasoning about Physical Systems*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1989: 373-381
- [11] Kahn A B. Topological sorting of large networks. *Communications of the ACM*, 1962, 5(11): 558-562
- [12] Renz J, Nebel B. Efficient methods for qualitative spatial reasoning. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2001, 15(1): 289-318
- [13] Wallgrün J O, Frommberger L, Wolter D, Dylla F, Freksa C. Qualitative Spatial Representation and Reasoning in the SparQ-Toolbox//Barkowsky T, Knauff M. *Proceedings of the International Conference on Spatial Cognition*. Berlin, Germany: Springer, 2006: 39-58



**WANG Sheng-Sheng**, born in 1974, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His research interests include spatio-temporal reasoning and pattern recognition.

**LIU Da-You**, born in 1942, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His research interests include knowledge engineering, spatio-temporal reasoning and data mining.

**GU Fang-Ming**, born in 1978, Ph. D., lecturer. His research interest is data mining.

**LV Qian-Nan**, born in 1987, M. S. candidate. Her research interest is spatio-temporal database.

**WEN Chang-Ji**, born in 1979, lecturer. His research interest is pattern recognition.

## Background

The spatial change is a pervasive phenomenon in oceanography, meteorology, environment and many other domains. It's also a research topic for video and image sequence analysis. Besides quantitative methods like spatio-temporal database, the qualitative spatial change also gains much concern. One of their common features is that they are all abstract data models. A certain changing procedure is represented by a graph. In this paper we give a binary relation model of identity based spatial change, which can be regarded as a knowledge model. There are few differences between a knowledge model and a data model. A knowledge model should satisfy some conditions such as: (1) A knowledge model represents some common patterns, while a data model simply records a single procedure. Tasks like query language or data mining require knowledge models. (2) A knowledge model supports incomplete or uncertain information, while most data models can't. (3) By using a knowledge model, reasoning methods can be performed to infer unknown information. Spatio-temporal Reasoning (STR for short), a subtopic of Artificial Intelligence, tackles the spatio-temporal

knowledge representation and reasoning. The representation and reasoning for temporal, spatial relations are studied in STR. Identity based change is the most prime form of spatial change. It is a key issue in object tracking of video, cadastre management etc. But knowledge model for identity based change has not been reported before.

This work is supported the major project of National Natural Science Foundation of China "The Research of Fundamental Theories and Applications for Complex Spatio-temporal Knowledge Intelligent Processing (61133011)". Our regroup has been working on spatio-temporal reasoning for many years. Many high quality papers have been published and some researches have been applied to agriculture and communication. We investigate the qualitative representation and reasoning for identity based change in this paper. Our method can be regarded as a knowledge model since it satisfies the three conditions listed above. It is useful to many applications like complex spatio-temporal query and reasoning with incomplete information.