

一种用于常识空间信息处理的定性空间关系模型*

宋小华^{1,2,3}, 欧阳彤^{1,2+}

¹(吉林大学 计算机科学与技术学院, 吉林 长春 130012)

²(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)

³(空军航空大学 数学应用中心, 吉林 长春 130022)

Qualitative Spatial Model Used for Processing Spatial Information in Commonsense

SONG Xiao-Hua^{1,2,3}, OUYANG Dan-Tong^{1,2+}

¹(College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China)

²(Key Laboratory of Symbolic Computation and Knowledge Engineering of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130012, China)

³(Center of Mathematics for Applications, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

+ Corresponding author: E-mail: ouyangdantong@163.com

Song XH, Ouyang DT. Qualitative spatial model used for processing spatial information in commonsense.

Journal of Software, 2012, 23(9): 2311–2322 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4136.htm>

Abstract: In spatial information processing, spatial information is usually combined with various spatial relationships, which are often dynamic. To represent and reason with these complex spatial relationships effectively, a novel model topology-direction-size calculus (TDSC) is proposed, which is integrated with multi-aspects qualitative spatial relations. Then, a framework for dealing with dynamic qualitative spatial relations is proposed. First, a base relation set which integrated with multi-aspects is constructed. Next, the algorithm of constructing composition table is proposed for reasoning, which allows the reasoning result of original model to still be used in new model. To handle the dynamic spatial relations, the neighborhood partition graph (NPG) is proposed, and an algorithm is given to generate the GNP. Using this algorithm, one can get the new model's GNP easily. Finally, the framework for handling dynamic spatial relations is proposed, which is based on the new model TDSC and its GNP. An example is used to show the framework is correct and effective.

Key words: qualitative spatial reasoning; spatial information in commonsense; neighbor partition graph

摘要: 在空间信息处理中,一些常识空间信息通常结合多方面空间关系,而且这些空间关系是动态变化的.为了有效地表示这些复杂的空间关系,并对其进行推理,提出了一种结合拓扑、方向和大小关系的空间信息处理模型 TDSC (topology-direction-size calculus),并基于 TDSC 模型提出了处理动态空间关系变化的表示推理框架.首先,利用同对象多属性的方法建立了融合大小、拓扑和方向关系的完备互斥基本关系表示;然后提出了复合表生成算法和

* 基金项目: 国家自然科学基金(60973089, 60873148, 61170092, 41001302, 61103091); 国家教育部博士点专项基金(20100061110031); 吉林省科技发展计划基金(20101501, 20100185, 20090108, 20080107, 201101039); 浙江师范大学计算机理论与应用省部共建重点学科开放基金; 吉林大学“985 工程”研究生创新基金(20080242); 欧盟合作项目(155776-EM-1-2009-1-ITERAMUNDUS-ECW-L12);

收稿时间: 2011-02-23; 修改时间: 2011-06-24, 2011-08-09; 定稿时间: 2011-10-08

推理算法,使得原有模型中表示和推理结果可以直接在新模型中使用.同时提出处理动态空间关系的邻域划分图,给出了邻域划分图的自动生成算法,以及 TDSC 模型的邻域划分图.最后给出基于 TDSC 模型邻域划分图表示和推理框架,并结合实例说明框架的正确性和有效性.

关键词: 定性空间推理;常识空间信息;邻域划分图

中图法分类号: TP18 **文献标识码:** A

因为精确的空间信息难以得到或难以准确表示,在自然语言理解、人机交互和机器人导航等诸多领域,需要处理的空间信息,特别是常识信息很多都是定性的.在人工智能系统、地理信息系统、计算机视觉、自然语言理解等诸多领域,定性空间信息的表示和推理是其核心问题^[1].

自然语言描述空间信息通常包含不同方面的空间关系,例如,我们在听天气预报时经常会听到类似这样的描述:“一股来自西伯利亚的冷空气的前锋今天上午已经移动到了新疆北部,预计它会向东移动并继续加强.”诸如此类的空间信息描述在我们生活工作中非常常见.此外,这些空间信息还受其他因素影响而产生变化.因此,在同一模型下对这些不同方面定性空间信息进行相容表示,并清晰刻画空间关系的变化受什么因素影响,就变得非常重要,这也一直是困扰相关研究学者的重要问题.

在这诸多问题中,最重要的就是如何使得新建立的模型能够最大限度地包含所有人们在不同方面对空间信息已有的约定俗成表示.也就是说,这个新模型必须要有足够的表达能力,能够清晰刻画拓扑、方向、大小等人们早已习惯的空间关系表示.虽然定性空间推理在单方面空间关系模型上已经有了深入的研究,但是不同方面的空间关系模型采用的抽象层次不同,这就使得结合变得非常困难.例如:人们在研究拓扑关系和大小关系时,习惯将对象抽象成一个区域^[2,3];而在研究方向关系时,则习惯将空间对象抽象成点^[4,5].此外,不同方面的表示还相互约束.例如:已知两个空间对象在拓扑上是包含关系,则它们之间的大小关系必然是已经确定的.若已知两个空间对象在拓扑上是相离关系,则它们在方向上就不可能为相等关系.

为有效处理这些包含多方面关系的定性空间信息,众多学者都尝试建立一种能够处理结合不同方面关系的定性空间信息处理新方法.Gerevini 提出路径一致算法来处理结合拓扑和大小关系约束的问题^[6];李三江在结合拓扑关系和方向关系方面做了相似的工作^[7];Falda 为处理结合定性关系和度量关系的约束,构建了空间定性代数(spatial qualitative algebra)^[8].这些方法都侧重于研究不同方面空间关系之间约束的相容性,虽然算法在结合确定的某两方面定性空间约束方面具有很好的效果,但是因为算法都是根据确定方面空间信息的固有性质确定的,缺乏通用性,很难在已有框架下进一步扩展.

此外,定性空间信息通常都是变化的,伴随着时间和动作等信息.这就要求新模型必须能够确定空间关系与动作或时间的关系,而且能够有效地对空间信息、动作变化以及时间信息进行表示和推理.

针对这个问题,我们在拓扑模型 RCC8^[2]和锥型方向关系模型^[4]基础上,提出了结合拓扑、方向和大小关系的空间关系表示模型.给出了基于新关系表示的约束推理算法,新推理算法可以在已有模型的约束推理结果基础上对新关系进行推理,实现对习惯的空间表示和推理的兼容.提出的邻域划分图,用于表示定性空间模型中基本关系变化和动作之间的联系.给出了邻域划分图的构造算法,根据算法构造了新模型的邻域划分图,详细分析了新模型邻域划分图的性质.最后给出了利用新模型及其邻域划分图对定性空间关系及动作的推理算法和应用实例.

本文第 1 节介绍定性空间推理的相关工作.第 2 节给出结合拓扑、方向和大小关系的空间关系的定性空间信息处理新模型 TDSC.第 3 节给出基于新模型的推理算法和应用实例.最后给出结论.

1 相关工作

在定性空间推理的研究中,通常用空间对象之间的相对关系来描述空间情景,这种相对关系称为定性空间关系,简称空间关系.根据关注的不同空间属性,空间关系可以分为拓扑关系、方向关系、大小关系、远近关系等.其中最重要,也是研究最深入的是拓扑关系和方向关系.

对给定的空间域 D , 域 D 中包含的对象通常是无限的, 因此对象间的空间关系也是无限的. 所以, 研究定性空间关系通常采用有序对 (D, B) 来表示. 其中, D 表示给定的空间域; B 是在 D 上的一个有限的完备互斥 (jointly exhaustive and pairwise disjoint, 简称 JEPI) 原子关系 (或称基本关系) 集合, 用来表示 D 中任意两个对象之间的关系. 当 D 中任意对象之间的空间关系确定时, 则必可以用 B 中一个确定的原子关系来准确描述, 而且仅能用一个原子关系来描述. 如果两个对象之间的空间关系是不确定的, 则可以用原子关系的并集来描述. 这样, 两个对象间所有可能的空间关系所构成的集合就是 B 的幂集, 用 2^B 表示.

给定空间域 D 和 D 上的完备互斥关系集合 $B = \{R_1, \dots, R_n\}$, 域 D 中两个空间对象 a 与 b 的关系是 R , 若在域 D 中存在对象 c , 满足 aR_1c 和 cR_2b , 即 $R = R_1 \bullet R_2$, 则称关系操作符号 \bullet 为复合, 或存在性复合^[9]. 同样, 给定空间域 D 及 D 上的完备互斥关系集合 $B = \{R_1, \dots, R_n\}$, a, b 和 c 是空间域 D 中的 3 个对象, 若已知 aR_1b 和 bR_2c , 根据关系的语义得到 aR_3c , 则 $R = R_1 \circ R_2$, 其中, 关系操作符号 \circ 称为弱复合或相容性复合^[9].

对于同一个域中相同的完备互斥关系集合, 存在性复合项总是相容性复合项的子集. 因此, 相容性复合项中的原子关系的数目总是要多于存在性复合项中的原子关系数目. 虽然存在性复合项推理更准确, 但在实际中, 相容性复合项更直观, 也更容易得到. 所以在对象较简单时 (如不考虑带洞和不连通情况时), 通常用相容性复合代替存在性复合^[9]. 所有原子关系通过存在性复合或者相容性复合, 可以构成一个 $n \times n$ 的复合表或者弱复合表. 这样, 就可以用复合表和相容性算法^[10, 11] 对给定的约束网络进行自动推理.

因此, 建立一个空间关系演算首先要确定表示空间对象的抽象层次, 即对象的属性, 然后根据对象的属性给出对象之间的完备互斥的原子关系集合及其复合表.

1.1 拓扑关系模型(区域连接演算)

拓扑关系不仅需要考虑对象整体之间的关系, 还要考虑对象整体中部分之间的关系. 因此, 用对象占用的区域来表示空间对象要比用点表示空间对象更符合人们对拓扑关系的直观感觉^[1].

在用区域表示空间对象的拓扑模型中, Randell 等人提出的区域连接演算 (region connection calculus, 简称 RCC)^[2] 最著名, 其中完备互斥关系集合中有 8 个原子关系的区域连接演算称为 RCC8. 如图 1 所示, 8 个原子关系分别是 $\{DC, EC, PO, TPP, TPPI, NTPP, NTPPI, EQ\}$, 分别表示两个空间对象之间的空间拓扑关系是相离、相切、相交、内部相切、内部不相切、内部相切的逆、内部不相切的逆和相等.

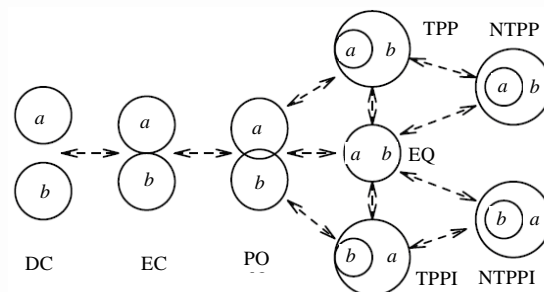


Fig.1 RCC8's relations and CNG
图 1 RCC8 关系及其概念邻域图

2003 年, 李三江证明了 Randell 给出的复合表是相容性复合表, 同时给出了各个复合项是存在性复合的条件^[3]. 此后, 他进一步说明了当域中区域不能有洞, 域中区域不能有多于两个的连通分支, 域中区域不能有多于两个的连接的分枝, 这 3 个条件满足时, 相容复合表才等同于存在复合表^[9]. 在下文中, 我们考虑的空间对象所占的区域都是满足这 3 个条件的简单区域.

1.2 方向关系模型(锥型方向关系演算)

定性方向关系是定性空间推理中另一个重要的研究内容. 方向模型通常要考虑 3 个方面: 目标对象、参照

对象和参照系.根据实际中的不同需求,对象的抽象层次和参照系的选择不尽相同,这使得定性关系模型的形式非常多样.在二维平面中,我们通常习惯用点代表空间对象来描述方向关系.基于区域的方向关系虽然在近距离描述空间关系时较精确,但并不符合人们习惯上的方向描述^[12,13].

Frank 提出的锥型方向关系模型^[4]是定性方向关系中研究最多的模型.锥型方向关系是以空间对象的质点或重心作为抽象对象,选择绝对参照系,这样可以区分 8 个主方向:东、南、西、北、东南、东北、西南、西北.在这个 8 个关系的基础上,加入了“等于”方向,就构成了在二维空间上点之间关系的完备互斥集合.

Ligozat 在 Frank 的锥型模型基础上提出了主方向代数^[14].在 Ligozat 主方向关系代数的基础上,Renz 将其泛化构造了星型代数(star algebra)^[15].星型代数是半定性的表示模型,可以根据实际需要人为设定一个角度对空间平面进行划分,从而得到一个星型的方向划分图.星型代数的提出,使定性表示和定量表示之间的界限变得模糊了,在表示的精确性与推理的复杂度之间取得平衡.

2 一种结合方向关系、大小关系和拓扑关系的定性空间信息处理新模型 TDSC

在定性空间推理领域找到一种通用的方法,结合不同的空间关系模型是定性空间推理领域未来工作中的重要组成部分和挑战^[1].建立新的空间关系模型主要有以下几个步骤:

- (1) 根据实际需要确定空间对象的抽象层次,即对象属性;
- (2) 根据空间关系的语义建立完备互斥的关系集合;
- (3) 建立基本关系之间的复合表或弱复合表;
- (4) 利用路径相容算法和复合表对空间关系约束进行推理.

从上述步骤可以看出,若想建立一个结合不同方面空间关系的模型,首先要确定合适的抽象属性来表示空间对象.如果单纯以点来表示空间对象,会造成拓扑关系表示能力不足.而单纯以区域来表示空间对象,会使新原子关系数目非常巨大,增大了推理的困难.

针对上述问题,我们提出了一种结合拓扑关系、大小关系和方向关系的定性空间信息处理新模型(topology-direction-size calculus,简称为 TDSC).

在新模型 TDSC 中,我们规定同一空间对象同时有两种抽象属性:区域和点.当计算拓扑关系和大小关系时,考虑的是空间对象占据的区域;当计算方向关系时,考虑的是空间对象的代表点(如质点或重心).这种同对象用不同抽象层次来表示在自然语言描述中是很常见的.例如,在国际事务的相关报道中,通常以一国首都来表示这个国家或者地区.而在处理领土争端时,则考虑的是这个国家的领土占有的区域.所以,用同一对象的两个属性(即两个抽象属性)来共同表示同一空间对象非常符合人们的习惯,表示也非常自然.

2.1 新模型 TDSC 的完备互斥基本关系

首先,考虑构造结合拓扑关系和大小关系(区域所占据面积大小的比较)的新模型基本关系.著名的拓扑关系模型 RCC8^[2]中,有部分关系本身就包含大小关系,例如 TPP, EQ, NTPP 等,但对 DC, EC, PO 这 3 个拓扑关系,则并不能区分大小关系.因此,先将拓扑关系 RCC8 的原子关系细化.

完备的大小关系只有 3 个: $R_{size}=\{<, >, =\}$.我们将 RCC8 中不区分大小关系的 DC, EC, PO 这 3 种关系与大小关系结合,可以得到 9 个划分更细致的新关系,再加上原有的 TPPI, NTPP, NTPPI, EQ, 就得到了结合大小关系和拓扑关系的新模型 $R_{RCC8-SIZE}$. $R_{RCC8-SIZE}=\{DC_<, EC_<, PO_<, DC_>, EC_>, PO_>, DC_<=>, EC_<=>, PO_<=>, TPP, TPPI, NTPP, NTPPI, EQ\}$.从上述分析中可以看出,改进的新模型 $R_{RCC8-SIZE}$ 是完备互斥的.

$R_{RCC8-SIZE}$ 中共有 14 个原子关系,各原子关系的表示如图 2 所示.其中,灰色表示对象 a ,白色表示对象 b ,而关系 R 是 $R(a,b)$ 的缩写.例如, $DC_<$ 是关系 $DC_<(a,b)$ 的缩写,表示 a 比 b 小且 a 与 b 是相离关系.在 $R_{RCC8-SIZE}$ 的基础上,结合 Frank 的锥型方向关系模型^[4]中的基本关系,就得到了结合拓扑关系、大小关系和方向关系的空间信息处理新模型 TDSC.新模型 TDSC 总共包含 107 个基本关系,构成了完备互斥关系集合 $R_{RCC8-SIZE-Direction}$,见表 1.为了表示方便,用 Direction-topology-Size 的形式来表示.例如, $N-DC_<(a,b)$ 表示 a 在 b 的北部,且 a 与 b 是相离(即 DC)关系,且 a 的面积比 b 小.与前面一样,新模型的表示中用 $N-DC_<$ 作为关系 $N-DC_<(a,b)$ 的简写.

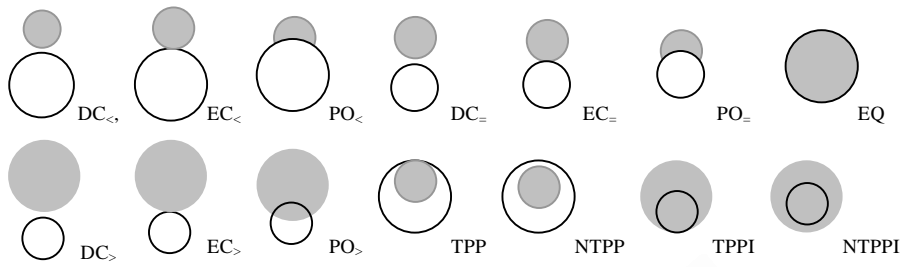


Fig.2 Basic relations of $R_{RCC8-SIZE}$

图 2 $R_{RCC8-SIZE}$ 关系表示图

Table 1 New model TDSC's basic relations

表 1 新模型 TDSC 的基本关系表示

	DC _{<}	EC _{<}	PO _{<}	DC ₌	EC ₌	PO ₌	DC _{>}	EC _{>}	PO _{>}	TPP	NTPP	TPPI	NTPPI	EQ
N														
S														
E														
W														
NE														
NW														
SE														
SW														
B														

需要注意的是,新模型 TDSC 中对拓扑和大小关系是通过区域来描述的,而包含的关系方向是以区域的圆心来描述的,在实际中,通常也可以用重心或其他代表点来表示。

这样,新模型 TDSC 可以很容易描述自然语言中的部分容易产生歧义的表达,例如在汉语中,会说“外蒙古在中国的北方”,也会说“内蒙古在中国的北方”。在英文中,不同的介词会很容易将两者区分;但在中文里,如若缺乏相应的背景知识,就会产生歧义。在新模型 TDSC 中,前一句话可以表示为 N-EC_<(外蒙古,中国);而对后一句话则表示为 N-TPP_<(内蒙古,中国)。从这个例子中可以看出,对两种同语法结构,语句形式相似,而完全不同意思的描述,用 TDSC 模型中的基本关系可以很清晰地区分。

2.2 新模型TDSC的复合表生成和基于复合表的推理

从表 1 可以看出,TDSC 中的基本关系符合人们对空间关系的认知习惯,但是并非 $R_{RCC8-SIZE}$ 中的所有原子

关系与方向关系结合都可以得到形如 $R_{RCC8\text{-}SIZE\text{-}Direction}$ 的基本关系.新模型并非是 3 种模型的简单组合,它依赖于两种抽象对象的不同空间关系的语义解释.

与单方面空间关系的模型一样,根据基本关系的语义可以构建出 TDSC 的复合表,但构建一个 107×107 的复合表本身就非常繁琐,更不用说利用这种复合表来进行推理了.新模型 TDSC 的原子关系是结合 RCC8 关系、大小关系以及锥型方向模型关系得到的.而这些模型都有着类似的复合表以及相同的推理算法.因此,对 TDSC 关系的演算就可以分解成对各自演算的推理,然后将得到的不同空间关系合并并在 TDSC 空间关系下.这种形式能够最大限度地保证习惯使用的空间关系原有的表示和推理结果在新的表示和推理中继续适用.

为使拓扑关系、大小关系和方向关系在统一表示下进行推理,我们提出算法 $TDS(X, R_{RCC}, R_{size}, R_{dir})$,若所有已知的空间约束关系一致,则可以得到一致的 $R_{RCC\text{-}size\text{-}dir}$ 约束关系集合;如果不一致,则返回为空.

算法. $TDS(X, R_{RCC}, R_{size}, R_{dir})$.

输入:空间抽象对象变量 $X = \{x_1, \dots, x_m\}$,

在 X 上的拓扑约束集合 $R_{RCC} = \{R_1, \dots, R_m\}$,

在 X 上的大小关系约束集合 $R_{size} = \{S_1, \dots, S_k\}$,

以及在 X 上的方向约束集合 $R_{dir} = \{D_1, \dots, D_p\}$;

输出:如果网络相容,返回相容的 TDSC 空间关系;

如果不相容,则返回空.

1. 分别对 $R_{RCC}, R_{size}, R_{dir}$ 进行约束求解得到最小约束网络 $R'_{RCC}, R'_{size}, R'_{dir}$
2. 令关系集合 S 为空,
3. 对 X 中每个关系对 (x_i, x_j) ,找到其在 $R_{RCC}, R_{size}, R_{dir}$ 中对应的 $R_{RCC}(x_i, x_j), R_{size}(x_i, x_j), R_{dir}(x_i, x_j)$;
4. 对 $R_{RCC}(x_i, x_j), R_{size}(x_i, x_j)$ 做结合操作得到关系 $R_{RCC\text{-}size}(x_i, x_j)$
5. 对 $R_{RCC\text{-}size}(x_i, x_j)$ 和 $R_{dir}(x_i, x_j)$ 做结合操作得到关系 $R_{RCC\text{-}size\text{-}dir}(x_i, x_j)$
6. 若 $R_{RCC\text{-}size\text{-}dir}(x_i, x_j)$ 不存在,则返回为空;否则,将其加入 S .

在算法 TDS 中,如果某关系集合中无变量对 (x_i, x_j) 的关系表示,则用所有可能关系来表示.

如果已知空间关系都用 $R_{RCC\text{-}size\text{-}dir}$ 表示,则可以利用结合表先将其分解为 $R_{RCC}, R_{size}, R_{dir}$ 的集合,然后分别对其约束网络求解,求解后再将其还原为 $R_{RCC\text{-}size\text{-}dir}$ 表示.算法描述如下:

算法. $TDSC(X, S)$.

输入:空间抽象对象变量 $X = \{x_1, \dots, x_m\}$,

用 TDSC 空间约束关系描述的空间约束 $S = \{s_1, \dots, s_m\}$;

输出:如果网络相容,返回相容的 TDSC 空间关系;

如果不相容,返回空.

1. 令集合 $R_{RCC}, R_{size}, R_{dir}$ 为空;
2. 对 S 的每一个关系 $s(x_i, x_j)$,利用结合操作表将其分解,得到对应的 $R_{RCC}(x_i, x_j), R_{size}(x_i, x_j), R_{dir}(x_i, x_j)$,并分别将其加入到集合 $R_{RCC}, R_{size}, R_{dir}$ 中;
3. 调用算法 $TDS(X, R_{RCC}, R_{size}, R_{dir})$

有了算法 TDS 和算法 TDSC,无论原有的空间约束用已有模型表示还是用新模型表示,都可以对其进行推理,从而实现了在同一表示框架下对多方面的定性空间关系进行表示和推理.

2.3 新模型TDSC的邻域划分图

在许多情况下,需要处理的空间信息都是动态变化的,处理动态定性空间信息最著名的是 Freksa 在研究时间区间代数^[10]时提出的概念邻域图^[16].在后来的定性空间推理的诸多模型中,概念邻域图成为研究空间关系动态变化的重要手段^[2,4].概念邻域图可以很直观地表示原子关系之间的联系.在一个模型的概念邻域图中,各原子关系用节点表示,若两个原子关系可以直接变换,则这两个原子关系用一个双箭头线段连接起来.这样,节点与连接节点的弧线就构成了概念邻域图.从概念邻域图中可以非常直观地看到哪些原子关系可以直接变化,但

是却无法得知空间关系为什么变化,哪些因素使得它们变化.而这些问题在实际应用中非常重要.

空间关系的变化通常与空间对象的动作紧密相关.例如,持续拉伸对象 A ,则 A 的面积增大,原先对象 A 与 B 之间大小关系是 A 小于 B ,而拉伸后则可能变为 A 等于 B 或 A 大于 B .拓扑和方向关系也是如此.因为拉伸 A 也可视为缩小 B ,这两个动作造成的 A 与 B 之间相对关系变化完全相同,故将这样两个相对的动作称为同类动作.虽然对于同一空间关系变化,同类动作无法区分,但通常参照对象大多无动作或动作较少,因此只考虑目标对象的动作即可.为说明动作和空间关系的联系,下面给出动作完备集的概念.

定义 1. 给定域 D 上的完备互斥关系集合 B ,动作集合 A ,如果概念邻域图中所有的相邻原子关系都可以通过集合 A 中的动作相互转变,则称集合 A 是互斥关系集合 B 的动作完备集.若在 B 上存在一个动作完备集 A^* 是在 B 上所有其他动作完备集的子集,则称 A^* 称为最小动作完备集.

从定义 1 中可以看出,因为概念邻域图中所有的弧都是双向的,因此在最小动作完备集中,如果包含动作 a ,则必然包含它的同类动作 a' .但是一个动作如果不包含相对的概念(例如向左、向右或者伸展、收缩等),那么动作 a 和它的同类动作 a' 则为同一个(例如像移动这样的动作).

定义 2. 给定域 D 上的完备互斥关系集合 B 、最小动作完备集 A ,概念邻域图中有原子关系 $x_i, x_j \in B, a_k \in A$,若 x_i 满足 $(x_i, a_k) \rightarrow x_j$ 或 $(x_i, a_k) \rightarrow x_j$,则称 x_i 为常态关系;若 x_i 只满足 $(x_i, a_k) \rightarrow x_j$,则称 x_j 为瞬时关系.其中, $(x, a) \rightarrow y$ 表示关系 x 在施加动作 a 后转变为关系 y .

常态关系和瞬时关系的主要区别是,瞬时关系的定义通常依赖于关键点,例如区域连接演算中的 EC 关系和 EQ 关系.若对其施加动作,则原来的关系会立即变化.而 DC,NTPP 等关系只有在接近临界状态时,对其施加动作才会变化为其他关系.为方便表示基本关系与动作之间的联系,下面给出邻域划分图的概念.

定义 3(邻域划分图). 邻域划分图 $G_{NPG}=(B,A)$,其中, $B=\{R_1, \dots, R_m\}$ 是域 D 上的二元完备互斥关系集合, A 是 B 的最小动作完备集.将 B 中所有原子关系的并映射到一个规则封闭的 n 向几何体上,其中,每一个方向表示一类动作.若两个方向相反,表示是同类动作.几何体的每一部分对应一个原子关系.若组成部分在方向 n 上相邻,表示其对应的原子关系可以方向 n 上的动作直接相互转换.则这个规则的 n 向几何体称为完备互斥关系集合 B 的邻域划分图.

邻域划分图可以很方便地表示空间关系与动作之间的联系.例如,在我们扩展的 $R_{RCC8-SIZE}$ 中,如果给定动作完备集 $A=\{\text{拉伸}, \text{收缩}, \text{靠近移动}, \text{远离移动}\}$,则可以用这 4 个动作完成所有 $R_{RCC8-SIZE}$ 原子关系之间的变化.因此,如图 3 所示,在 $R_{RCC8-SIZE}$ 的邻域划分图中,上下相邻的原子关系转变是通过移动动作来实现的.例如,当对象 A 小于对象 B 时,空间关系变化的序列 $DC_{<}-EC_{<}-PO_{<}-TPP-NTPP$ 可以通过 A 向 B 的移动动作得到.而左右相邻的原子关系则可以通过拉伸动作得到.例如,空间关系变化序列 $TPP-EQ-NTPP$ 可以将对象 B 不断拉伸,使其面积增大得到.



Fig.3 NPG of $R_{RCC8-SIZE}$

图 3 $R_{RCC8-SIZE}$ 的邻域划分图

若给定域 D 上的完备互斥关系集合 B 、最小动作完备集 A ,可以很容易得到原子关系集合 B 关于最小动作完备集 A 的邻域划分图 G .构造方法用算法 GreatNPG 给出:

算法. $CreateNPG(B,A,S)$.

输入:在域 D 上的完备互斥关系集合 B ,

最小动作完备集 A ,

相邻关系 $(x_i, a_k) \rightarrow x_j$ 的集合 S ;

输出:邻域划分图 G' .

1. 从 B 中任取未处理的原子关系 x_i ,从最小动作完备集 A 中任取未处理动作 a_k ,
2. 若 a_k 未标记,在 G' 上标记 a_k 的方向;若 $(x_i, a_k) \rightarrow x_j$ 在 a_k 方向上,在 x_i 后加入 x_j ,
3. 若 a_k 已标记,若 $(x_i, a_k) \rightarrow x_j$ 在 G' 的 a_k 方向上,在 x_i 后加入 x_j ,
4. 对 x_j 接着调用步骤 2,直到 $(x_n, a_k) \rightarrow x_n$ 或 $(x_n, a_k) \rightarrow x_i$.
5. 若有 $(x_n, a_k) \rightarrow x_n$,则表示此方向上动作 a_k 表示完毕.标记 a_i 处理完毕,
6. 若所有 a_i 处理完毕且标记 x_i 处理完毕,则所有 a_i 标记未处理.返回步骤 1.
7. 若有 $(x_n, a_k) \rightarrow x_i$,表示动作 a_k 使得原子动作序列是个圆,标记 a_i 处理完毕,
8. 若所有 a_i 处理完毕且标记 x_i 处理完毕,则所有 a_i 标记未处理.返回步骤 1.
9. 若所有 x_i 处理完毕,则返回 G' .

当给定完备互斥关系集 B 、最小动作完备集 A 、相邻关系 $(x_i, a_k) \rightarrow x_j$ 集合 S ,根据算法 $CreateNPG(B, A, S)$,可以得到 B 关于 A 的邻域划分图.虽然根据算法可以构造简单关系的邻域划分图,但是如果情况非常复杂,例如产生同一变化的有多种动作可能,那么动作在 G' 中的方向就会难以刻画.这就要求邻域划分图必须充分考虑原子关系和动作之间的相互作用.

新模型 TDSC 的邻域划分图如图 4 所示,整个圆柱体表示全域关系.圆柱分 3 层,从上至下依次表示 3 种大小关系 $\{<, =, >\}$,原子关系由上向下变化表示对象 a 在不断伸展(或对象 b 在不断缩小),由下至上变化表示对象 a 在不断缩小(或对象 b 在不断伸展).在每一层,由外向内表示拓扑关系变化.例如在第 1 层小于关系中,由外向内依次是: $\{DC_<, EC_<, PO_<, TPP, NTPP\}$,原子关系由外及内表示:对象 a 在不断向 b 靠近移动,而由内及外表示对象 a 在远离 b 移动.

每一层中的原子关系顺时针和逆时针方向上的变换表示方向关系的变化:最中间的小圆表示的是对象 a 和 b 在方向上是相等关系,即同一位置.其他 8 个顺时针依次是{西、西北、北、东北、东、东南、南、西南}.原子关系顺时针方向转换,表示对象 a 正在绕着 b 顺时针旋转,反之表示对象 a 正在绕着 b 逆时针旋转.在实际应用中,旋转移动并不是非常直观,局部的旋转移动有时用方向来表示更符合人们的习惯.例如,若对象 a 在对象 b 的正北方,这时如果对象 a 围绕对象 b 旋转,若 a, b 很远,则可近似视为 a 在向着 b 的东方(即旋转方向的切线相对于对象 b 的方向)移动;反之亦然.

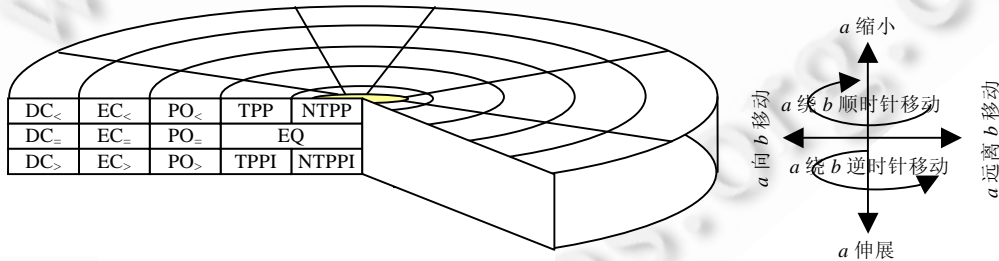


Fig.4 NPG of TDSC

图 4 新模型 TDSC 的邻域划分图

有了邻域划分图,结合拓扑、方向和大小关系的新模型 TDSC 中的各原子关系之间变化与动作之间的联系就可以很容易得到了.在实际应用中,当已经得知某一类空间关系时,也可以对现有的邻域划分图进行简化.例如,对象间的拓扑关系已经确定(例如对象 a 和 b 的拓扑关系确定是 DC)但方向关系和大小关系并不确定,那原子关系之间的变化只在一个类似钢管的环形柱形状的邻域划分图中相互变化.

如果对象间的方向关系确定而拓扑关系和大小关系不确定,则原子关系之间的变化遵从图 4 中的纵向剖面图.如果对象间的大小关系确定而拓扑关系和方向关系不确定,则分析起来要复杂一些.可以将 TDSC 的邻域划分图根据 A 与 B 大小关系的不同分解为 3 个二维的平面划分图:当 $A > B$ 时,则可以用图 5(a)来表示;当 $A = B$

时,则可以用图 5(b)来表示;当 $A < B$ 时,则可以用图 5(c)来表示.

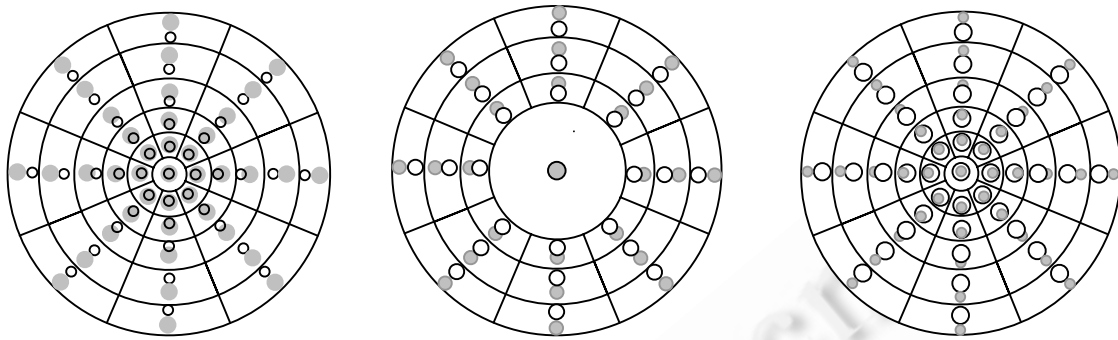


Fig.5 NPG of TDSC when size relations are determined

图 5 大小关系确定时的 TDSC 邻域划分图

从上述分析中可以看出,新模型 TDSC 的邻域划分图可以很容易根据需求得到简化后的邻域划分图.当已知部分空间关系时,这种简化的邻域划分图对提高推理效能是非常有帮助的.

3 基于新模型 TDSC 的常识空间信息处理

3.1 基于新模型 TDSC 的常识空间信息表示与推理

当给定的空间信息描述混合拓扑关系、大小关系和方向关系时,可以很容易用 TDSC 的基本关系表示,并利用复合表与邻域划分图进行推理,下面我们就给出基于 TDSC 模型进行表示和推理的框架.

定义 4. 基于 TDSC 的空间信息推理框架是一个 3 元组 (Σ, Q_0, A) , 其中:

- Σ : 常识空间信息描述, 是用 TDSC 关系描述的空间信息背景信息, 不随时间和动作而改变;
- Q_0 : 初始空间信息描述, 是用 TDSC 关系描述的初始状态的空间信息;
- A : 表示动作, 是一阶谓词的有限集合.

在这个表示框架中, Σ 和 Q_0 都是用 TDSC 关系表示的关系集合, 但 Σ 表示的对象间的关系不会因动作而改变, 例如省市间的地理关系; 而 Q_0 表示的关系会由对象的动作而变化, 例如人与场景之间的关系.

集合 A 是用一阶谓词表示的对象动作的集合, 即在邻域划分图中引起对象关系变化的动作. 所有的动作都可以用一阶谓词 $ACTION(O, act)$ 来表示, $ACTION$ 是谓词名, O 表示的是对象, act 表示的是对 O 的操作.

给定基于 TDSC 的空间信息推理框架后, 就可以对其进行推理了, 下面给出基于框架推理的定义.

定义 5. 称 ∇ 是一个空间信息结果集合为关于框架 (Σ, Q_0, A) 的推理结果, 当 ∇ 满足:

- (1) $Q_0 \cup A \Rightarrow Q_1$ (由邻域划分图求得);
- (2) $\Sigma \cup Q_1 \Rightarrow \nabla$ (由约束求解方法求得).

定义 5 给出了基于 TDSC 描述推理框架进行推理的定义. 由定义可以看出, 对框架 (Σ, Q_0, A) , 推理分为两步: 第 1 步, 首先求得动作集 A 对 Q_0 作用所产生的新状态集合; 第 2 步, 用新得到的状态集合和常识空间信息 Σ 一起推理, 得到最终的结果状态 ∇ . 其中, 第 1 步由邻域划分图得到蕴涵式, 也可以将所有的 TDSC 基本关系与完备动作集做笛卡尔乘积, 得到一张关于 TDSC 基本关系和动作的二维表, 利用表得到蕴涵式. 而得到的 Q_1 是 Q_0 在施加动作集合 A 后产生的. 因此, 得到 Q_1 后, Q_0 的关系就不再为真了. 因为 Q_1 与 Σ 都是用 TDSC 描述的空间关系, 因此调用算法 $TDSC(X, S)$ 可以很容易得到结果关系集合 ∇ .

下面给出利用 TDSC 描述的推理框架的推理算法.

算法. $QA(\Sigma, Q_0, A)$.

输入: 空间常识信息: Σ ,

初始状态描述: Q_0 ,

动作集合: A ;

输出:空间结果状态: Q_n .

1. 令 $S = \{\text{动作集合 } A \text{ 中的每一个对象 } x\}$
2. 对 S 中的每一个 x 在 Q_0 中找到对应的描述 Q_x ;
3. 对 S 中的每一个 x 在 A 中找到对应的描述 A_x ;
4. 在邻域划分图中找到每一个 $Q_x \wedge A_x$ 对应的 Q'_x
5. 对 $Q'_x \cup S$ 调用算法 $TDSC(X, S)$, 得到 ∇ .

需要注意的是,动作集合 A 中的动作必须是无序的,并且是可以同时进行的.如果动作是有序的,必须对每一次动作集合调用上述算法.

3.2 实例验证

下面利用本文提出的算法,针对引言中给出的关于新疆天气的自然语言描述“一股来自西伯利亚的冷空气的前锋今天上午已经移动到了新建北部,预计它会向东移动并继续加强”,给出具体的表示和推理过程.

下文中,用 XJ, GS, NM 分别来表示新疆、甘肃和内蒙.用 LKQ 来表示冷空气.由此,我们可以描述常识信息 (Δ),常识空间信息是不会因动作和时间而变化的约定俗成的空间描述:

$$W-EC_{>}(XJ, NM); NW-EC_{>}(XJ, GS); NE-EC_{>}(NM, GS).$$

文中描述的初始状态有 2 个,一是:冷空气来自于西伯利亚,这对推理未知信息并无帮助,所以不用刻画;另一个是:冷空气与新疆之间的空间关系是前锋已经到达了新疆北部.由此可以看出,前锋到新疆北部则整体亦在北部,但是还没有完全进来,在拓扑上为相交关系.而新疆面积如此之大,而从未有过新疆各地出现同一天气的情况.由此可以看出,冷空气小于新疆的面积.由此,可以刻画初始状态(Q_0):

$$N-PO_{<}(LKQ, XJ).$$

文中刻画的动作主要有 2 个,一是:冷空气向东移动;另一个是:冷空气会继续加强.可以将其视为冷空气的面积增大的动作.由此,可以得到动作集合(A):

$$\text{Move}(LKQ, E); \text{SizeChange}(LKQ, L).$$

根据上述描述,用邻域划分图来刻画变化后的状态(Q_1).推理过程为:

(1) 动作对初始状态的改变(由邻域划分法图)

$$N-PO_{<}(LKQ, XJ) \wedge \text{Move}(LKQ, E) \rightarrow NW-PO_{<}(LKQ, XJ) \vee NW-EC_{<}(LKQ, XJ).$$

求得变化状态(Q_1)

$$NE-PO_{<}(LKQ, XJ) \vee NE-EC_{<}(LKQ, XJ).$$

从上面的分析中可以看到,冷空气的面积通常不会大于新疆的面积,因此,考虑概念邻域图中关系的转变并未考虑 $\text{SizeChange}(LKQ, L)$ 的影响,因此只需要看图 5(c) 的情况就可以了.当需要考虑甘肃此类面积可能会比冷空气小的情况时,则需要结合图 4 中的情况综合考虑.

由此可知,当冷空气向东移动后,造成的结果是冷空气可能在新疆的东北部,其与新疆相交或者外切.其面积始终比新疆的要小.

变化后的状态 Q_1 与常识信息,可以由复合表推理得到最终的结果状态(∇).

(2) 结合常识信息的结果状态推理(约束推理)

$$W-EC_{>}(XJ, NM); NW-EC_{>}(XJ, GS); NE-EC_{>}(NM, GS); NE-PO_{<}(LKQ, XJ) \vee NE-EC_{<}(LKQ, XJ).$$

对空间对象 LKQ 与 NM 调用算法 TDS , 可求得结果状态集合(∇)

$$R_{RCC} = \{DC, EC, PO, TPP, TPPI, EQ, NTPPI\}; R_{dir} = \{NE, N, NW, W\}; R_{size} = \{<, =, >\}.$$

进而可得 $R_{RCC-size} = \{DC_{<}, EC_{<}, PO_{<}, DC_{=}, EC_{=}, PO_{=}, DC_{>}, EC_{>}, PO_{>}, TPP, TPPI, NTPPI\}$, 从而得到 $TDSC$ 关系共 48 个,所有的关系在图 4 中邻域划分图都相邻,且都位于圆柱的北半边,总数不到全域关系的一半,在邻域划分图中很容易表示这些关系.调用 LKQ 与 GS 的方法与之类似.

综上所述,冷空气会在内蒙的西部、西北部、北部、东北部,还不会完全进入内蒙境内。

通过上述推理,可以完成自然语言中的空间信息描述,结合常识信息来推理新疆周边地区的天气状况.因给定的约束信息过少,所以推理中会产生一些冗余信息.当给出新的约束关系或加入新的常识信息,会使得冗余信息大量减少,从而提高推理的有效性.

4 结论与未来工作展望

本文基于人们习惯的空间信息认知表示,利用同对象多属性的表示方法建立了结合拓扑、方向和大小关系的空间信息处理模型 TDSC,并给出了完备互斥基本关系集合.同时提出了新模型的复合表生成算法和推理算法,使得在新算法中原有空间关系推理结果不用重新计算而直接使用.同时提出了用于处理动态空间关系邻域划分图,并利用新模型 TDSC 及其邻域划分图给出了动态定性空间信息表示和推理框架,并用实例说明了框架的正确性和有效性.

从最后的实例中可以看到,利用基于 TDSC 的表示推理框架可以有效减少冗余空间关系,但推理后得到的原子关系的基数依然比较大.这是因为新模型 TDSC 的复合表是在原有单方面空间关系复合表的基础上通过结合操作产生的,这使得根据实际需要构建结合多方面关系的新空间信息处理模型上具有通用性,但同时也造成了新构建的模型中基本关系的复合项中会存在冗余的原子关系,从而使得在某些情况下,通过推理得到的关系基数依然比较大.下一步需要研究如何在语义上减小复合表中的冗余原子关系.

References:

- [1] Cohn AG, Renz J. Qualitative Spatial Representation and Reasoning. In: Harmelen FV, *et al.*, eds. Handbook of Knowledge Representation. Elsevier, 2008. 551–596. [doi: 10.1007/3-540-70736-0_3]
- [2] Randell DA, Cui Z, Cohn AG. A spatial logic based on regions and connection. In: Mateo S, ed. Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Knowledge Representation and Reasoning: Morgan Kaufmann Publishers, 1992. 165–176.
- [3] Li SJ, Ying MS. Region connection calculus: Its models and composition table. Artificial Intelligence, 2003,145(1-2):121–146. [doi: 10.1016/S0004-3702(02)00372-7]
- [4] Frank AU. Qualitative spatial reasoning about cardinal directions. In: Mark D, White D, eds. Proc. of the Autocarto 10. Baltimore, 1991. 148–167.
- [5] Liu WM, Zhang XT, Li SJ, Ying MS. Reasoning about cardinal directions between extended objects. Artificial Intelligence, 2010,174(12-13):951–983. [doi: 10.1016/j.artint.2010.05.006]
- [6] Gerevini A, Renz J. Combining topological and size information for spatial reasoning. Artificial Intelligence, 2002,137(1-2):1–42. [doi: 10.1016/S0004-3702(02)00193-5]
- [7] Li S.J. Combining topological and directional information for spatial reasoning. In: Veloso MM, ed. Proc. of the IJCAI. Hyderabad, 2007. 435–440.
- [8] Falda M. Spatial reasoning with integrated qualitative-metric fuzzy constraint networks. Journal of Universal Computer Science, 2010,16(11):1390–1409. [doi: 10.3217/jucs-016-11-1390]
- [9] Li SJ, Ying MS. Qualitative Spatial Knowledge Representation and Reasoning. In: Liu DY, ed. Research in the Basic Problems of Knowledge Science. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. 152–166 (in Chinese).
- [10] Allen JF. Maintaining knowledge about temporal intervals. Communications of the ACM, 1983,26(11):832–843. [doi: 10.1145/182.358434]
- [11] Renz J, Nebel B. Qualitative Spatial Reasoning using Constraint Calculi. In: Aiello M, *et al.*, eds. Handbook of Spatial Logics. Springer-Verlag, 2007. 161–215. [doi: 10.1007/978-1-4020-5587-4_4]
- [12] Skiadopoulos S, Koubarakis M. Composing cardinal direction relations. Artificial Intelligence, 2004,152(2):143–171. [doi: 10.1016/S0004-3702(03)00137-1]
- [13] Skiadopoulos S, Sarkas N, Sellis T, Koubarakis M. A family of directional relation models for extended objects. IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, 2007,19(8):1116–1130. [doi: 10.1109/TKDE.2007.1046]

- [14] Ligozat G. Reasoning about cardinal directions. *Journal of Visual Languages and Computing*, 1998,9(1):23-44. [doi: 10.1006/jvlc.1997.9999]
- [15] Renz J, Mitra D. Qualitative direction calculi with arbitrary granularity. In: *Proc. of the Trends in Artificial Intelligence (Prcai 2004)*. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 65-74. [doi: 10.1007/978-3-540-28633-2_9]
- [16] Freksa C. Temporal reasoning based on semi-intervals. *Artificial Intelligence*, 1992,54(1-2):199-227. [doi: 10.1016/0004-3702(92)90090-K]

附中文参考文献:

- [9] 李三江,应明生.空间知识的定性表示与推理.见:刘大有,编.知识科学中的基本问题研究.北京:清华大学出版社,2006.152-166.



宋小华(1981-),男,新疆克拉玛依人,博士生,CCF 学生会员,主要研究领域为定性空间推理.



欧阳丹彤(1968-),女,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为基于模型诊断,模型检测,自动推理.