

基于规则知识的空间推理研究

沙宗尧¹ 边馥苓¹ 陈江平¹ 江聪世¹

(1 武汉大学空间信息与数字工程研究中心, 武汉市珞喻路 129 号 430079)

摘要: 在一般空间推理的基础上, 提出了空间推理扩展, 即基于规则知识的空间推理。该方法结合了人工智能的基本原理, 继承并发展了空间推理的方法学, 其推理过程建立在空间知识与模型集成的基础上, 以规则知识为推理控制, 因而更符合实际, 具有更大的灵活性。实例验证了本方法的正确性。

关键词: GIS; 知识表示; 空间推理; 空间决策支持

中图法分类号: P208; TP18

GIS 系统正在从传统的以数据管理为目标的应用阶段向空间分析、决策的深层应用方向发展, 空间推理是进行空间分析与决策的重要手段, 一直是 GIS 理论和实践研究的热点问题。地理信息系统管理的空间数据不仅有属性信息, 还有拓扑信息和几何信息^[1]。通常讨论的空间推理, 其基础正是建立在这些显式或隐式的属性信息、拓扑信息和几何信息的基础上, 采用某种算法或演绎方法, 从已经存在的空间信息中提取事实, 并根据这些事实知识进行空间设计与规划。

空间推理分为定量空间推理 (quantitative reasoning) 和定性空间推理 (qualitative reasoning)。定性空间推理是处理常识性空间知识的一种人工智能方法, 由于空间知识是一类重要的知识, 并且本质上是定性的, 因而定性空间推理研究成为空间推理研究的主流^[2], 目前已发展了公理化、代数、几何约束满足和基于模型的推理等方法。公理化方法以逻辑学为基础, 通过一组基本的关系和谓词, 建立一类空间概念和关系的公理和推理规则, 以此表示并处理空间知识。代数方法把空间关系作为项来处理, 在构造出基本空间关系的原子复合表后, 既可以利用约束满足算法, 通过实现关系集的复合运算完成推理, 也可以建立全部关系集复合运算的完全复合表, 通过查表实现推理。几何约束满足方法充分表示并利用几何领域的约束, 通过约束满足方法实现空间知识的表示和推理。基于模型的方法是首先建立空间

知识的一种模型, 然后把空间推理问题归纳为经典的定性推理问题。这些方法组成了空间推理的方法学基础。既然空间推理是处理空间知识的一种人工智能方法, 因此, 建立一个完备而合理的空间关系、知识表达和推理系统是空间推理进行的前提条件。通过知识组织与表达, 将经过推理以及从外界获取的知识存储到知识库中, 为空间推理再次利用。

一般的空间推理将空间推理过程用到的普遍规则或知识固化在程序中, 对多变的外部环境, 其灵活性很差。在一般空间推理的基础上进行空间推理扩展, 即在空间知识库、模型库与数据库的支持下, 以规则知识和面向对象的知识表示为基础进行空间推理分析, 称为基于规则知识的空间推理 (rule-based spatial reasoning), 是空间推理研究方法的继承与发展。

1 空间推理及其扩展

1.1 空间推理的基本涵义

空间数据库有许多不同于关系数据库的特性, 它带有拓扑、方位和距离信息, 通常以复杂的多维空间索引结构组织, 常需要空间推理、几何计算和空间知识表示技术。空间推理是利用空间理论和人工智能技术对空间对象进行建模、描述与表示, 并据此对空间对象间的空间关系进行定性或定量分析和处理的过程。空间推理中需要应用

空间分析的各种手段、算法,从空间数据中提取出隐含于这些数据中的某些事实与关系,并以图形和文字的形式直接地加以表达,为现实世界中的各种应用提供科学、合理的结论。由于空间推理面对的数据特征是多维的,因此空间推理要比单纯的属性数据约束推理更具复杂性和隐含性。与人工智能中提出的推理类似,空间推理可以是正向的,也可以是反向的,正向的推理由存在推理发现事实,反向的推理由设想推理到存在状态。空间推理从几何、使用和功能三个方面研究空间知识的表示和处理,其研究工作包含视觉对象的识别、认知图和路径规划、人类比喻的模拟和定性物理的可视化四类,研究范围涉及计算机视觉、空间任务规划、移动机器导航、大型数据库的表示和索引技术等^[2]。

空间推理是空间决策支持实践环节的重要步骤和手段,由于原始的比较凌乱的数据可以通过空间推理得到易于理解的信息,因此空间推理在空间决策支持中具有十分重要的地位^[3]。

1.2 基于规则知识的空间推理

空间推理表现为演绎、表达变换、条件推理三种基本形式。笔者认为,空间推理有深层的推理,也有浅层的推理,浅层次的空间推理不需要预先知道的领域或认知知识的支持,所以一般不涉及领域知识的表示与利用问题,而深层次的推理结合了人工智能技术,涉及到空间知识的获取、表达与利用,或称为基于规则知识的空间推理。文献[4]列出的11项属性被认为是空间推理的关键属性,即为一种深层次的空间推理,前者是当前空间推理研究的主流,而后者还没有引起足够的重视。

知识可以从空间数据本身内在的规律提取的知识(以下称为事实性知识),也可以是人为规定的或常识性的认知知识。事实性知识主要是针对空间数据中的空间关系(如位置关系、拓扑关系和方向关系)和空间实体的内在属性信息特征(如多边形的面积、周长等)。常识性知识是附加在空间实体之上的另一类知识,是人们实践中各类经验的总结,这类知识一般都是与空间实体密切相关的,在空间推理中同样起着非常重要的作用。按照常识性知识的性质,可以分为控制性知识与内容性知识,控制性常识知识在空间推理过程中起过程控制作用,内容性常识知识直接给出推理的结论,不具有下级控制能力,例如控制性知识可以触发事件,而内容性知识是空间推理的终点。本文中的规则知识泛指常识性认知知识,其中控制性常识知识用产生式规则表示,而内容性常识

知识用面向对象方式表达。

尽管在空间推理中通过提供的规则知识可以有效地进行空间推理,但是推理的手段、计算过程仍有赖于推理模型的支持。在解决复杂的空间决策问题时,既需要知识支持,也需要专业模型支持。所以要求基于规则知识的空间推理也要提供一种与模型的集成方法,可以通过规则知识为中介将数据库、空间分析和推理模型集成在一起。

2 空间推理扩展部件的表示

如上所述,基于规则知识的空间推理需要集成知识处理部件、模型部件及空间数据库,其中知识表达与模型表示是系统集成的核心,空间数据库的数据组织可以采用现有的方法,本文的第4部分实例中采用的是具有拓扑关系的 Arc/Info 的 coverage 数据格式,因为该数据格式可方便提取出各类空间拓扑关系和属性约束信息,这些信息组成了空间推理的事实知识。下面以知识表达与模型库设计为内容讨论这两个部件的组织。

2.1 知识表达方法

传统的谓词逻辑、产生式规则、语义网络和框架等以及基于案例或事例知识表示、模型知识表示和面向对象知识表示等方法均已在专家系统中得到应用,基于规则的知识表示是人工智能领域应用最广泛的技术,而面向对象的知识表示也具有自身的优点,本文采用规则知识表示与面向对象的知识表达混合表示方式来形式化空间推理中所涉及的空间规则知识。

按照面向对象的思想,对象是类的一个实例,具有共同特征属性和方法的对象组成类,每一个对象都具有一个惟一对象标识、一组对象属性和方法组成的数据模型。面向对象的空间知识表示的基础是知识单元,知识单元将空间知识和作用其上的知识处理方法封装在一起,作为一个整体来使用的知识类,其定义如下。

```

CLASS KnowledgeUnit: PUBLIC Super-
KnowledgeUnit
// KnowledgeUnit 继承 SuperKnowl-
edgeUnit, 知识单元的内部联系
{ // 属性部分
UnderKnowledgeUnit Unit1; // 通过知识单
元的外部联系
Pointer Pt; // 指向子类的指针
... // 对象的其它属性
// 方法部分

```

```

KnowledgeUnit1 (); //构造函数
~KnowledgeUnit1 (); //析构函数
RuleAdd();
RuleDelete();
RuleModify ();
... //定义的其他方法
}

```

以上表示中, 通过知识单元的继承与定义实现了知识单元间的内在联系和外在联系。

2.2 模型库表示

模型库的表示主要有 3 种方法^[5]。

1) 数据方式, 即模型是从输入集到输出集的映射, 用模型参数集合确定这种映射关系, 模型可描述为由一组参数集合和表示模型特征、结构特征的数据集合的框架, 输入数据集在关系框架下进行若干关系运算, 得出输出数据集。

2) 逻辑方式, 是一种基于人工智能的表示方式, 主要有谓词逻辑、语义网络、逻辑树和关系框架等几种方法。比较常见的是谓词逻辑表示法。该方法把模型分解为 4 个基本要素: 模型结构、约束集、参数集和变量集, 每一部分可用相关谓词表示, 将数值计算隐含在谓词中, 当定量计算的模型用逻辑形式表达后, 可以与定性的知识统一起来,

用谓词演算的方法, 实现对问题的求解。

3) 程序方式, 包括输入、输出格式和算法在内的完整程序就可以表示一个模型, 通常一个模型是以子程序存贮的, 每个子程序往往带有通用的程序结构。本文在进行空间推理中应用的模型采用第一种方式与第二种方式的结合, 实际将两种方式均以数据库的数据表为存储纽带, 从而可以方便地实现推理模型的维护。在实例研究中, 建立模型库时, 采用的策略为: 如果是连续数值计算, 则采用数据方式; 如果是离散数值计算或逻辑判断, 则采用逻辑方式, 逻辑方式用类似于经典的产生式规则来表示模型, 解决用数据模型表示时比较难以处理的一类推理问题, 这样数值计算与逻辑判断就可以很好地结合在一起了。建立模型时要解决操作模型的语法与语义问题, 分别定义如下。

1) 数据表示方式, 其语法规义定义如表 1。可见, 数据表示方式解决的是需要精确计算的推理, 这类问题涉及的模型因子主要是连续的数值型, 可以用表达式(函数)来描述。具体数值从空间数据库中获取。

2) 逻辑表示方式, 其语法规义定义如表 2。逻辑表示的模型有两类重要的因子, 即分段因子

表 1 模型的数据表示语法规义定义

Tab. 1 Grammar and Implication Definition of Model Based on Data Expression

内容	操作符 1	操作符 2	操作符 3	操作符 4	操作符 5	连续因子	数据类型	...
语法	+	-	×	÷	∨	$C(i)$	$T(n)$...
语义	加	减	乘	除	乘方	因子 i	类型 n	...

表 2 模型的逻辑表示语法规义定义

Tab. 1 Grammar and Implication Definition of Model Based on Logical Expression

内容	操作符 1	操作符 2	操作符 3	操作符 4	操作符 5	分段因子	离散因子	规则知识标号	...
语法	+	-	×	÷	∨	$B(i)$	$D(i)$	$K(n)$...
语义	加	减	乘	除	乘方	分段因子 i	离散因子 i	规则 n	...

与离散因子, 分段因子处理的是具有分段性质的因子计算, 例如气温的分段划分可以表示“冷”、“热”、“凉”等概念, 离散因子表示的概念如区域分类及我国的省市名称分类等。另外, 逻辑表示的模型还直接与知识库关联, 通过规则知识标号从知识库中获取规则知识, 获取的规则知识进一步指导模型的运行, 共同完成一类空间推理的任务。

语法规义定义是模型管理与模型使用间的一种协议, 从两者表示方法的语法规义的差别中发现两类模型表示的功能是有区别的, 前者负责数值计算(如实例研究中的监测点布局空间合理性度量计算), 而后者除了负责数值计算外, 还负责

与知识库的交互(如实例研究中建立行政区域多边形相邻关系表和行政隶属关系表)。

3 基于空间知识的推理过程

3.1 空间实体的状态空间

现实世界中的空间对象(或空间实体), 在特定时刻都存在惟一的状态, 该状态是由一组基本信息组成的, 称为空间实体的状态信息, 状态信息是一组变量, 该组变量对应的实际内容, 即形成该实体的状态空间。由此可见, 状态空间也可称为空间约束条件。我们提出状态空间的目的是可以

形式化地表示空间实体的特征,从而有利于计算机空间推理的自动化。定义空间实体 A 的状态信息如下:

几何状态: $\text{SHAPE}(A) = \{\text{Points pts}\}$;

属性状态: $\text{VALUE}(A) = \{\text{attributes}\}$;

方位关系: $\text{DIRECTION}(A, O) = \{\text{direct}(i)\}$;

拓扑关系: $\text{TOPO}(A, O) = \{\text{topology}(i)\}$;

距离关系: $\text{LONG}(A, O) = \{\text{value} \mid \text{value} \geq 0\}$;

其中, A, O 为研究空间上的空间实体对象, i 为状态信息的索引值。上述 5 类信息中,前两类为一元关系,后三类为二元关系,理论上,在二维空间中,以上 5 类状态信息可以唯一地确定空间实体的状态,但是由于每类空间关系的空间概念、空间关系的公理完备性在不同的表示方法下其值域存在差异,所以具体形式也不相同,例如对于拓扑关系,可以采用 9-交模型、16-交模型、基于 Voronoi-多边形的拓扑表示^[9]。建立标准的、规范化的空间概念和空间关系的公理、推理规则是表示和处理空间状态信息的基础。

空间实体的状态空间可以是自然形成的,也可以是人工形成的,两者都是认识和改造空间对象不可缺少的。自然与人工分别对应着空间信息科学研究领域内的两类重要问题,其一是从自然存在空间实体的状态空间中发现某些有意义的规律;其二是按照人们的认识思路设计具有特定状态空间的空间对象,使之满足一定的空间约束条件。对于这两类重要的问题,前者对应的实例应用如矿山寻矿、制图综合、气候发展规律等,后者如区域规划、工业选址等问题。空间实体的状态空间是特定时间下的产物,这意味着其状态是可改变和可设计的。

3.2 基本推理过程描述

基于规则知识的空间推理过程即是在空间知识库、模型库、数据库的支持下感知空间数据库中的隐含信息,或在空间知识库、模型库、数据库的支持下能动手空间数据库并制造出满足特定要求的结果,该结果一般也以空间图形的形式表示。空间推理过程反映的是人类认识空间环境并改造空间环境的能动力。基于规则知识的空间推理过程由问题识别、模型调用、知识调用与控制、结果输出四个子过程组成。

1) 问题识别子过程是系统与系统使用者间的交互,需要解决的问题是自然语言的理解。本文仅提供在系统可以识别的情况下进行空间推理

并获取结果的过程。

2) 模型调用子过程是系统识别出具体的任务后自动调用一个或若干个处理模型,通过查找模型库中的元信息,可以对系统的模型进行定位并执行。由于模型在模型库中具有惟一标号,因此可以方便地找到解决推理任务的模型。

3) 知识调用与控制子过程是由模型触发的,其过程是根据模型要求的规则知识因子或内容知识因子从知识库中调用知识,如果该知识为规则控制知识,则可能会触发下一级模型的调用,触发从空间数据库中提取地物类型、空间拓扑信息、空间位置等,为空间推理提供预备知识。

4) 结果输出子过程是循环步骤 2)、3) 的执行结果,最终得到目标数据的推理结果,给出满足所提问题条件的图形输出或文字结论。

以上过程中,如何定位到各推理步骤所需要的相关知识及如何利用这些知识是问题的关键。规则知识以产生式方式出现,具有“if...then...”的格式,因而易于进行推理控制。而面向对象的空间知识表示中,以知识类的形式出现,由于知识类具有一定的层次结构,并且通过面向对象的封装、继承和消息机制实现知识类的联系与信息交换,因此可以方便地获取推理结果。

4 应用实例

本文以空间布局规划为例,来讨论如何利用本文提出的基于规则知识的空间推理解决特定条件下的选点布局问题。

广州市从行政上可以划分为三级,即市—区县—乡镇(街道),市管辖若干个区县,每个区县管理若干个乡镇(街道),各级行政区域呈面状空间特征。现需要在各区县布局一些监测点,负责该区一些数据的采集,考虑到实际情况,并非每个乡镇都设置一个监测点,而是一个监测点负责若干个乡镇。由于数据是从野外人工采集的,要求监测点负责的乡镇空间相邻且尽量呈圆形分布,以方便采集。行政上要求乡镇级采集的数据到上级(区县)汇总,区县再向市级汇总。按照空间推理扩展原理,分别建立空间推理的知识库和模型库,其中前者将已知知识分类为如下的空间事实知识和常识性知识。

1) 事实性知识

①各等级行政区域间的拓扑关系,如空间包含、空间相邻、空间相离关系等;

②空间位置知识:各等级行政区域的几何位

置、形状, 表现为重(或中)心坐标、外围形状等;

③空间方位关系: 各等级行政区域间的方位关系, 本例中, 没有用到方位关系的知识;

④行政区域等级知识: 预先给各个行政区域赋予等级关系, 行政区域按等级分类, 并具有行政隶属关系。

2) 常识性认知知识

规则 1 每个区县至少有一个监测点。

规则 2 每个监测点不能跨区县, 由于要求逐级统计监测指标, 因此需要一个监测点只能监测隶属于该监测点所在区县的乡镇。

规则 3 相邻监测点数据采集的乡镇不能重叠。

规则 4 同一监测点管理的乡镇必须两两相邻。

规则 5 每个监测点最多能管理的乡镇是有限的, 由人工预先定义。

规则 6 监测点的位置位于乡镇行政中心所在地, 并假设乡镇行政中心为其边界组成的多边形重心。

规则 7 监测点位置到该监测点管理的各个乡镇欧式距离的和, 称为监测点布局空间合理性度量(如图 1), 其值越小, 效果越好。空间合理性度量需要从全局角度考虑, 所以要求所有监测点布局空间合理性度量的和最小。该条件表明, 需要设计出最优的空间布局, 从而减少人工采集数据的工作量(使所行走的可能路线最短), 即 $\sum (\text{length}(l_1) + \dots + \text{length}(l_2) + \dots + \text{length}(l_n))$ 最小, 其中 i 为特定监测点管理的乡镇数。

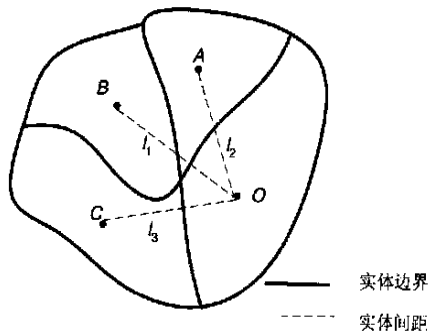


图 1 监测点布局空间合理性度量图

Fig. 1 Validity Index of Spatial Monitoring Points

规则 8 监测点最大数是预先定义的常数。

3) 推理模型库

模型 1: 采用逻辑方式来表示模型, 形成多边形相邻关系和行政隶属关系表。相邻关系表建立 $n \times n$ 的矩阵表, 由于该矩阵是稀疏的, 存取时对其进行了压缩; 行政隶属关系表建立 $n \times 2$ 的表

格, 表明每个乡镇隶属于哪一个区县, 第一列为乡镇名称, 第二列为区县名称, 其中 n 为乡镇数。

模型 2: 采用数据方式来表示模型, 计算监测点空间分布合理性度量, 以欧式距离的和为指标。模型计算的公式为 $((X_s - X_i)^2 + (Y_s - Y_i)^2)^{1/2}$, 其中, (X_s, Y_s) 表示给定监测点 s 的空间平面坐标, (X_i, Y_i) 为该监测点负责的乡镇 i 管理的行政区多边形重心。

采用如下的步骤实现选点布局。

①开辟缓存, 读取空间数据和行政隶属关系信息的事实知识;

②调用模型 1, 建立多边形相邻关系表和行政隶属关系表;

③读取规则 1 至规则 6, 调用模型, 若每个区县内已经有至少一个监测点, 则在某个区县内增加一个监测点, 否则在每个区县内都分配一个监测点;

④计算已分配的监测点数, 如果总监测点的分配数与可分配数相等, 转⑦;

⑤调用模型 2, 计算监测点布局空间合理性度量, 并按由小到大的顺序排序;

⑥读取规则 7, 在监测点布局空间合理性度量对应的监测点区县增加一个监测点, 转③;

⑦结束。

经过上述步骤, 通过规则知识控制下的模型与知识的循环调用, 得到最优的监测点布局如图 2。

5 结 语

利用地理信息系统的原理与方法可以方便地实现空间数据的存储、检索与管理, 但是数据分析能力有限^[7]。空间推理分析是一类重要的空间分析手段, 一直是 GIS 理论与应用研究的热点^[8], 但是一般的空间推理方法仅对空间对象内在的空间信息进行推理运算, 并没有与人们的常识性认知(或要求)结合, 而这类问题在实践中又是非常重要的。实践证明, 大量的实际应用还是与人们的常识性认知紧密结合的, 所以在进行空间推理分析时, 必然要考虑此因素。本文认为空间推理必须充分利用人工智能知识处理的理论成果, 将常识性认知纳入推理体系, 而不应仅仅是从空间数据存在的空间关系上进行推理分析, 所以空间推理应更多具有知识处理系统的特点。知识处理系统的核心是知识的获取、表达与利用, 本文在知识表达上采用了规则知识表示和面向对象的知识表示相结合的方式组织知识, 采用知识与

模型相结合的方式利用知识,达到有效地进行空间推理的目的。



图2 试验区域结构及选点布局结果图

Fig. 2 Result of Monitoring Points Distribution in the Research Area

参 考 文 献

- 1 Goting R H. An Introduction to Spatial Database Systems. *V LDB Journal*, 1994, 3(4): 357 ~ 399
- 2 廖士中, 石纯一. 定性空间推理的研究与进展. *计算机科学*, 1998, 25(4): 11 ~ 13
- 3 Talor K, Waler W, Abel D. A Framework for Model Integration in Spatial Decision Support Systems. *Int. J. Geographical Information Science*, 1999, 13(6): 533 ~ 555
- 4 刘亚彬, 刘大有. 空间推理于地理信息系统综述. *软件学报*, 11(12): 1 598 ~ 1 606
- 5 王 桥, 吴纪桃. 空间决策支持系统中的模型标准化问题研究. *测绘学报*, 1999, 28(2): 172 ~ 176
- 6 Chen J, Li C, Gold G. A Voronoi-based 9-intersection Model for Spatial Relations. *Int. J. Geographical Information Science*, 2001, 15(3): 201 ~ 220
- 7 Zeng T Q, Zhou Q. Optional Spatial Decision Making Using GIS: a Prototype of a Real Estate Geographical Information System (REGIS). *Int. J. Geographical Information Science*, 2001, 15(4): 287 ~ 306
- 8 Goentex O, Buchmann A. Research Issues in Spatial Database. *SIGMOD Record*. 1990, 19(1): 61 ~ 68

第一作者简介: 沙宗尧, 博士生. 现从事 GIS 应用、GIS 空间数据模型和数据挖掘研究.

E-mail: zongyaosha@163.com

Spatial Reasoning Based on Rule-based Knowledge

SHA Zongyao¹ BIAN Fuling¹ CHEN Jiangping¹ JIANG Congshi¹

(1 Research Center of Spatial Information & Digital Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract: Spatial reasoning, as an effective tool for GIS spatial analysis, has been attracting hot focuses from researches. The general method on spatial reasoning only takes spatial relations contained in spatial data into account, but this is not complete. Some requirements, which are also called general knowledge, can be regarded as a kind of special knowledge that should be met in spatial reasoning. In this paper, the method, or spatial reasoning of rule-based knowledge, for integrating spatial relations and general knowledge is discussed. This method inherits and extends the current spatial reasoning method to include a complete knowledge disposal system. Rule-based knowledge representation and object-oriented knowledge representation methods are used to express spatial and general knowledge. Knowledge and models for spatial reasoning are integrated together to complete spatial reasoning. Lastly, an case study on selecting monitor points for a hierarchy administrative region is detailed.

Key words: GIS; knowledge representation; spatial reasoning; spatial decision support