本体辅助的定性空间关系推理机制*

马雷雷，李宏伟，梁汝鹏，李　丽
（信息工程大学 地理空间信息学院，郑州 450052）

摘　要：引入本体论思想研究空间关系描述与推理，目的是为了实现地理空间信息的共享和互操作。从地理本体的概念出发，建立了符合常识空间认知的空间关系描述模型。以河南省行政区划、交通、旅游景点为基础数据，构建了空间关系本体实例库；自定义了空间关系推理规则，并实现了规则的 SWRL 表达；设计了基于本体的定性空间关系推理总体框架，并结合应用实例进行了推理实验，有效地验证了空间关系本体推理机制的可行性。

关键词：地理本体；常识空间认知；空间关系；规则表达；推理
中图分类号：TP181　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3695(2013)01-0049-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.011

Ontology-aided qualitative spatial relation description and reasoning mechanism

MA Lei-lei, LI Hong-wei, LIANG Ru-peng, LI Li
(*Institute of Geospatial Information*, *Information & Engineering University*, *Zhengzhou* 450052, *China*)

Abstract: This paper imported the ontology theory to study spatial relation for realizing the geographic information sharing and interoperability. It constructed the spatial relation description model according with the concept of geo-ontology. It established a spatial relation ontology instance base based on region, traffic and scenery data of Henan province. Self-defined and expressed spatial relation reasoning rules. Designed a qualitative spatial relation reasoning frame based on ontology and an did experiment for reasoning correspondingly combing with application instances. It validated effectively the feasibility of spatial relation reasoning mechanism.

Key words: geo-ontology; commonsense spatial cognition; spatial relation; rule expression; reasoning

0　引言

目前，空间关系的研究忽略了人类的常识空间认知，描述的空间关系难以被计算机理解，空间关系推理过程中存在较为严重的语义冲突。近年来，随着空间关系和地理本体理论的发展，国内外已有为数不多的学者涉足空间关系本体领域，Coenen提出了空间关系推理中核心本体的概念；曹菡[1]在 Coenen 核心本体的基础上，构建了通用空间关系表示核心本体（SRC-ontology）；Casati 等人提出利用部分—整体学、位置论和拓扑学三个理论工具来形式化表示地理空间实体间的空间关系；黄茂军[2]针对 OWL 表示地理本体的不足，在 Casati 三个基本理论工具的基础上扩展了 OWL，使其构建的地理本体能够表达空间特征；宋佳[3]研究了基于 GML 的时空地理本体模型。将地理本体理论引入空间关系描述与推理的研究中，有利于解决空间推理过程中的语义异质问题，实现空间关系知识的共享和重用，使得推理结果更好地被大众理解和接受。

1　基于本体的空间关系定性描述

1.1　地理本体和空间关系本体概念

地理本体是对地理领域被共享概念的形式化说明，它是一种特殊的领域本体，通过获取地理领域内部一致的知识，被一个群体所接受和共享，并且支持地理领域知识的重用。地理本体具有层次性、空间性和社会性三个方面的特征。其中空间特征是地理本体本身所特有的，是地理本体区别于一般信息本体的重要特征之一[4]。

空间关系本体（spatial relation ontology，SROntology）是地理本体理论与空间关系研究相结合的产物，它是指能够定性表达语义信息、属性特征和空间特征（主要指拓扑、方位、距离等空间关系）的地理本体。地理本体包含复杂的拓扑关系、度量关系和位置关系。空间关系本体是地理本体空间关系特征的具体体现。

1.2　空间关系本体模型构建

搭建一个通用的符合常识空间认知[5]的空间关系本体模型是本文的特色，也是进行定性空间关系推理的基础。基于 geo-ontology 的空间关系模型如图 1 所示。

拓扑关系模型基于 RCC 理论而定义；方位关系模型基于圆锥模型而定义，地理空间中的方位关系是用途最广泛更贴近人们生活和符合常识空间认知的一种空间关系；度量关系模型主要以距离关系来定义，其探讨的是定性距离的描述。

模型中的各类空间关系用地理本体的 ObjectProperty（对象属性）来表达，属性中有两个重要的基类都是 GeoFeature 本体类的约束 domain 和 range。依据空间关系的自反、对称和传递等特性而设置相关属性约束，这些特性在 OWL 中均提供了建模原语。

收稿日期：2012-06-16；**修回日期**：2012-07-23　　**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(40871183,41140012,41271392)
作者简介：马雷雷(1987-)，男，山东滕州人，博士研究生，主要研究方向为地理空间本体、地理信息服务理论(gisxiaomage@163.com).

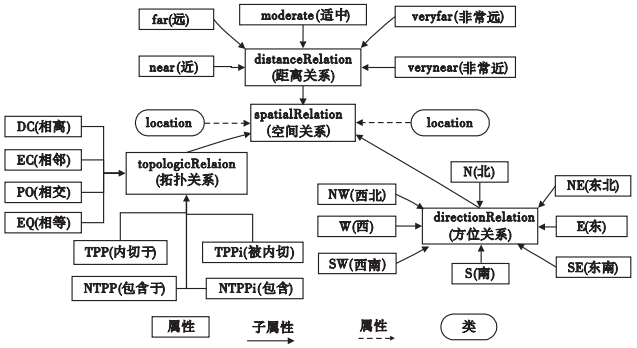

图1 基于geo-ontology的空间关系模型

1.3 空间关系本体的形式化表达

选择 OWL 作为空间关系本体的描述语言。OWL 语言能够为模型提供形式化的概念描述,具备完善的语法和语义,具有直观丰富的表达能力,并具有一定的逻辑推理功能,此外还能描述地理概念并能够表达属性及其特征。

以下代码说明了用 OWL 表达地理本体中空间关系的方式:

a)拓扑关系的 OWL 表达:

```
〈owl:TransitiveProperty rdf:ID = "NTPP"〉//"包含于"
  〈owl:inverseOf〉
    〈owl:TransitiveProperty rdf:ID = "NTPPi"/〉
  〈/owl:inverseOf〉
  〈rdfs:range rdf:resource = "#GeoFeature"/〉
  〈rdfs:subPropertyOf rdf:resource = "#topologicRelation"/〉
  〈rdfs:domain rdf:resource = "#GeoFeature"/〉
〈/owl:TransitiveProperty〉
```

上述声明了拓扑关系属性 NTPP,其 domain 和 range 均为 GeoFeature 本体类,NTTP 自反于 NTPPi,并且具有传递性(transitive)。

同理可以得出方位关系和距离关系的 OWL 表达。

b)方位关系的 OWL 表达:

```
〈owl:TransitiveProperty rdf:ID = "SE"〉//"东南"
  〈rdfs:range rdf:resource = "#GeoFeature"/〉
  〈rdfs:domain rdf:resource = "#GeoFeature"/〉
  〈rdfs:subPropertyOf rdf:resource = "#directionRelation"/〉
  〈owl:inverseOf〉
    〈owl:TransitiveProperty rdf:ID = "NW"/〉
  〈/owl:inverseOf〉
〈/owl:TransitiveProperty〉
```

c)距离关系的 OWL 表达:

```
〈owl:ObjectProperty rdf:ID = "near"〉//"近"
  〈rdfs:range rdf:resource = "#GeoFeature"/〉
  〈rdfs:domain rdf:resource = "#GeoFeature"/〉
  〈rdfs:subPropertyOf〉
    〈owl:ObjectProperty rdf:about = "#distanceRelation"/〉
  〈/rdfs:subPropertyOf〉
  〈/owl:ObjectProperty〉
```

2 基于本体的定性空间关系推理

2.1 本体空间推理工具(Jess)和规则语言(SWRL)

Jess 推理引擎是基于 Java 语言的 CLISP 推理机。其中 CLISP 是一种相对基础性的推理工具,它是基于产生式的前向推理,并且是性能良好的推理引擎。实际应用中很多上层的推理任务都需要映射到 CLISP 引擎上进行推理。Jess 推理引擎由事实库、规则库和推理引擎三个主要部分组成。Jess 推理引擎采用经典的 Rete 算法。只要系统可以为 CLISP 提供本领域内的特有领域规则和事实信息(其中前者以产生式形式给出,后者以 Assertion 形式给出),Jess 或 CLISP 就可以处理各种领域本体的推理任务。

SWRL(semantic Web rule language),即语义网规则语言,作为万维网联盟的一个建议,SWRL 是基于语义网表达知识规则的。SWRL 由高度抽象的 Horn-like 句法构成,SWRL 所有的规则以 OWL 概念(类,属性,实例)的形式来表达,可以说它是 OWL 知识库与 RuleML 的高度融合,较好地把地理本体库与规则结合起来,具有强大的推理能力,广泛应用于各种本体推理实践中。SWRL 主要由 Imp、Atom、Built-in、Variable 四个基本部分构成,需要遵循的规范格式为 antecedent→consequeat。其中 antecedent 代表推理前提的基本形态,consequent 代表推理结果[6]。

2.2 自定义空间关系推理规则

为了推导出两个空间实体间可能的空间关系,本文构建了空间关系组合表,目的就是为了直观地建立推理规则集。以拓扑关系为例,NTPP 关系具有传递性,DC、EC 和 PO 关系具有对称性,$NTPP_i$ 和 TPP_i 与 NTPP 和 TPP 是自反的。在构建的空间关系本体中,拓扑关系推理参考组合表构建相关规则,但并不是每个规则必须要明确定义,大部分的规则可以通过定义的下述规则集推出:

规则 T_1 $TPP(X,Y) \wedge DC(Y,Z) \rightarrow DC(X,Z)$

规则 T_2 $NTPP(X,Y) \wedge DC(Y,Z) \rightarrow DC(X,Z)$

规则 T_3 $NTPP(X,Y) \wedge EC(Y,Z) \rightarrow DC(X,Z)$

规则 T_4 $NTPP(X,Y) \wedge TPP(Y,Z) \rightarrow NTPP(X,Z)$

规则 T_5 $TPP(X,Y) \wedge NTPP(Y,Z) \rightarrow NTPP(X,Z)$

其他的规则来源于拓扑关系本身具有的自反性、对称性、传递性和相等性等相关公理。例如规则

$TPP_i(X,Y) \wedge NTPP_i(Y,Z) \rightarrow NTPP_i(X,Z)$

源于下述规则:

a) $TPP_i(X,Y) \rightarrow TPP(Y,X)$(自反关系)

b) $NTPP_i(Y,Z) \rightarrow NTPP(Z,Y)$(自反关系)

c) $NTPP(Z,Y) \rightarrow TPP(Y,X)$(规则 T_4)

d) $NTPP(Z,X) \rightarrow NTPP_i(X,Z)$(自反关系)

对于方位关系,采用的是圆锥模型,具有传递性和自反性。距离关系也是以定性形式表示的,故也可以建立相应的规则。例如:

规则 F_1 $E(X,Y) \wedge SE(Y,Z) \rightarrow E(X,Z), SE(X,Z)$,

规则 F_2 $NW(X,Y) \wedge NW(Y,Z) \rightarrow NW(X,Z)$

规则 D_1 $far(X,Y) \wedge veryfar(Y,Z) \rightarrow veryfar(X,Z)$

规则 D_2 $near(X,Y) \wedge moderate(Y,Z) \rightarrow moderate(X,Z), far(X,Z)$

这里定义的规则是有限的,还需要进一步完善规则库,把上述规则用 SWRL 语言表达出来,并借助特定的推理机制进行定性空间关系本体推理。

2.3 基于本体的空间关系推理机制

本文研究了基于空间关系本体的推理机制(图 2)。鉴于 Jess 推理引擎不能直接解析空间关系 OWL 本体和 SWRL 规则,需要对 OWL 格式的空间关系本体和 SWRL 格式的空间推

理规则进行相关的格式转换。

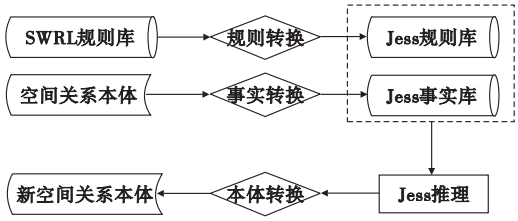

图2　基于SWRL的空间关系本体推理机制

基于 SWRL 的空间关系本体推理机制主要包括以下两个转换:a)空间关系本体到 Jess 事实库的转换,生成符合 Jess 推理引擎格式的新的空间关系本体库;b)从 SWRL 规则库到 Jess 规则库的转换,生成基于 Jess 推理引擎的规则库。

对于转换 a),Jess 推理机不能直接解析 OWL 格式的空间关系本体,要实现空间关系推理,需要将其转换为 Jess 支持的格式。构建的空间关系本体中,除了地理实体类、属性和实例外,还存在一些公理(axiom),这些都需要进行相应的转换。具体转换流程如下:

a)导入空间关系本体,提取空间关系本体中建立的类、属性、实例、相关约束和公理等。

b)将转换 a)中提取出的 OWL 格式的相关信息等转换为 Jess 事实。

对于转换 b),Jess 推理引擎无法直接解析 SWRL 规则,需要将其转换成 Jess 可以解析的规则。具体转换流程如下:

a)依次导入自定义的 SWRL 空间关系推理规则。

b)将 SWRL Imp 中的推理结果(head)和推理前的基本形态(body)提取出来作为 SWRL 的 Atom。

c)将 SWRLAtom 表示成 Jess 推理引擎支持的格式(通过 SWRLRuleEnginBridge 类来实现),处理完毕后导入 Jess 推理引擎。

上述两个转换完毕后,再经过 Jess 推理进行简单的本体转换,最终就可以得到推理出的新的空间关系本体。新的空间关系本体增加了地理空间实体概念之间的语义关联,完善了原有的 OWL 空间关系本体知识库。

3　实验分析

实验数据采用河南省行政区划、交通和旅游数据,利用 Protégé 3.4.8 软件构建空间关系本体实例库,利用 Protégé-OWL 的 SWRL 编辑器进行空间关系本体推理规则的编辑,利用 Jess 软件执行定性空间推理,利用 Visual Studio 2008、SuperOjbects 6.0 软件进行图形用户界面开发,实现地图操作和图形用户界面演示等功能。

具体实验流程如下:

a)构建空间关系本体实例库并实现其 OWL 表达

利用 Protégé 3.4.8 软件构建空间关系本体实例库如图 3 所示。

以推理并查询陇海线在河南省境内所经地级市的旅游景点为例介绍了空间关系本体推理应用,验证了本文建立的模型和规则。涉及到的相关 OWL 描述主要为地级市与相关旅游景点的包含关系、铁路线与其所经过地级市的相交关系,其中相交关系的 OWL 表达如下:

〈Railroad rdf:ID = "陇海线"〉

〈RailroadName

rdf:datatype = "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"〉

陇海线〈/RailroadName〉

〈PO rdf:resource = "#洛阳市"/〉

〈PO rdf:resource = "#商丘市"/〉

〈PO rdf:resource = "#三门峡市"/〉

〈PO rdf:resource = "#开封市"/〉

〈PO rdf:resource = "#郑州市"/〉

〈FeatureID rdf:datatype = "http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int"〉

201001〈/FeatureID〉

〈/Railroad〉

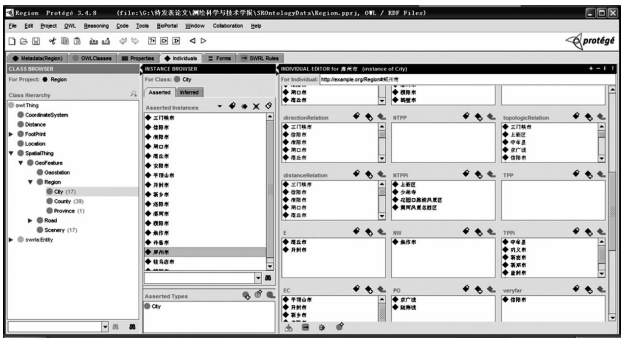

图3　空间关系本体实例库构建界面

b)自定义 SWRL 空间关系推理规则

涉及到的 SWRL 规则 S_1 核心为 City(?x) ∧ Scenery(?y) ∧ Railroad(?z) ∧ NTPP(?y,?x) ∧ PO(?z,?x) → Through(?z,?y)(图 4),表示若旅游景点 y 包含于地级市 x,并且铁路与地级市 x 相交,则可推出铁路沿线在河南省境内所经地级市的旅游景点为 y。

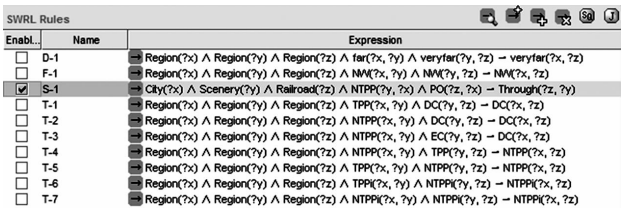

图4　自定义SWRL规则库界面

c)定性空间关系推理

经过定性空间推理(图 5),可以得出陇海线在河南省境内所经地级市的所有旅游景点。

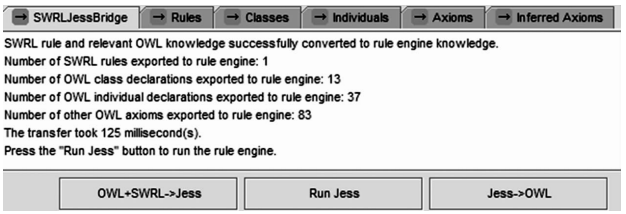

图5　定性空间关系推理操作界面

推理结果可用 OWL 语言描述如下:

〈Railroad rdf:ID = "陇海线"〉

〈Through rdf:resource = "#仰韶文化遗址"/〉

〈Through rdf:resource = "#小浪底水库"/〉

〈Through rdf:resource = "#白马寺"/〉

〈Through rdf:resource = "#关林"/〉

〈Through rdf:resource = "#龙门石窟"/〉

〈Through rdf:resource = "#少林寺"/〉

(下转第 55 页)

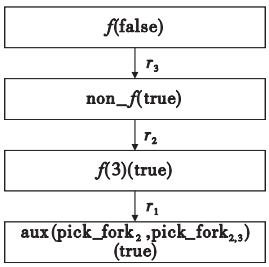

图3　性质 f 关于回答集 M 的反例

由图 3 可知,f 为 false 是因为在 P 的规则 3 中,non_f 为 ture(non_f 在回答集中),依次类推,最终找出 f 不在回答集中的原因是由于原子 aux(pick_fork$_2$,pick_fork$_{2,3}$)在回答集中,即在并发到第三步时,哲学家 1 和 2 同时拿起了 fork$_2$,使得性质不满足。由此,反例找出。

通过上述的例子可以看出,利用图形对反例生成技术研究的一些优点是:a)很直观地给用户指出某原子产生的原因或者不存在的原因;b)本文方法是在原先 justification 图调试方法上的创新,解决了原先 justification 图对含有变量的 ASP 程序无法生成反例的问题,从而完善了基于 ASP 的 CSP 并发验证框架。

4　结束语

本文在基于 ASP 的 CSP 并发系统验证框架下进行了 CSP 系统性质反例生成技术研究。把 ASP 程序支撑原因分析技术引入该框架,给出了一种生成系统性质反例的算法。实验分析结果表明,该方法可以有效地给出性质反例。未来将根据生成的反例对 ASP 程序进行调试,并评估调试过程对已验证性质的影响。

参考文献:

[1] HOARE C A R. Communicating sequential processes[EB/OL]. (2004). http://www.usingcsp.com/cspbooks.

[2] Formal Systems (Europe) Ltd. Failures-Divergence refinement: FDR2 user manual[EB/OL]. (1999). http://www.formal.demon.co.uk.

[3] GARAVEL H, LANG F. NTIF: a general symbolic model for communicating sequential processes with data [C]//Proc of Formal Techniques for Network and Distributed Systems. 2002:276-291.

[4] CLARKE E M, GRUMBERG O, PELED D A. Model checking[M]. Cambridge: MIT Press, 2000.

[5] BOUCHENEB H, GARDEY G, ROUX O H. TCTL model checking of time Petri nets[J]. Journal of Logic and Computation, 2009, 19(6):1509-1540.

[6] GELFOND M, LIFSCHITZ V. The stable model semantics for logic programming[C]//Proc of the 5th International Conference on Logic Programming. 1988:1070-1080.

[7] De ANGELIS E, PETTOROSSI A, PROIETTI M. Synthesizing concurrent programs using answer set programming[C]//Proc of the 26th Italian Conference on Computational Logic. 2011:85-98.

[8] EL-KHATIB O, PONTELLI E, SON T C. Justification and debugging of answer set programs in ASP[C]//Proc of the 6th International Symposium on Automated Analysis-Driven Debugging. 2005:49-58.

[9] PEMMASANI G, GUO Hai-feng, DONG Yi-fei, *et al*. Online justification for tabled logic programs[C]//Proc of the 7th International Symposium on Functional and Logic Programming. 2004:24-38.

(上接第 51 页)

〈Through rdf:resource = "#黄河风景名胜区"/〉
〈Through rdf:resource = "#花园口旅游风景区"/〉
〈Through rdf:resource = "#相国寺"/〉
〈Through rdf:resource = "#龙亭"/〉
〈FeatureID rdf:datatype = "http://www.w3.org/2001/XMLSchema-JHJint"〉
201001〈/FeatureID〉
〈/Railroad〉

d)图形用户界面显示与表达

图形用户界面(图 6)部分实现了图形化分层显示空间关系本体知识库中的具体实例,设置查询条件,点击推理实例查询按钮,可以将推理结果输出并在图中高亮显示,做到了定性空间推理与图形用户界面的交互。

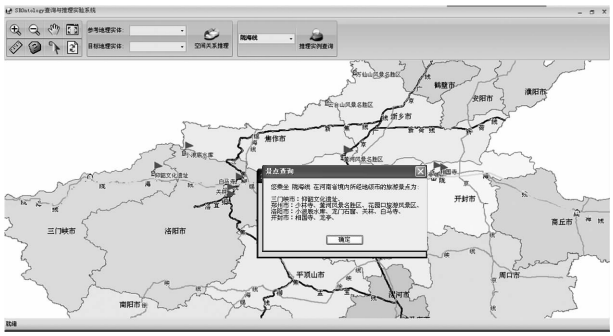

图6　图形用户界面

经过上述实验可知,基于本体的空间关系推理在一定程度上能够解决传统空间关系推理过程中的语义异质问题,并且推理的过程与人的常识性空间认知相符合。

4　结束语

当前 GIS 软件中显式表达的空间关系是有限的,构建一套有效的空间关系推理机制势在必行。空间关系推理本质上还是一种知识推理,但是因其缺乏层次概念,无法充分表现类别关系,只能应用于特定环境,不利于共享和重用。为此,本文引入本体概念,研究地理本体中空间关系的表达和推理机制,通过具体实例进行了验证,最终目的是实现地理空间信息的共享和互操作。

下一步要实现空间关系本体的自动构建,简化空间推理过程;加入时间元素,初步实现时空本体推理;解决推理结果的不确定性问题,排除一些冗余的推理结果,使空间关系本体推理更符合人类的常识空间认知。

参考文献:

[1] 曹菡. 空间关系推理的知识表示与推理机制研究[D]. 武汉:武汉大学,2002:12-13.

[2] 黄茂军. 地理本体空间特征的形式化表达机制研究[J]. 武汉大学学报:自然科学版,2005,30(4):337-340.

[3] 宋佳. 基于 GML 的时空地理本体模型构建及应用研究[J]. 地球信息科学学报,2009,11(4):442-451.

[4] 李宏伟,成毅,李勤超. 地理本体与地理信息服务[M]. 西安:西安地图出版社, 2008:20-28.

[5] 李淑霞,安敏,李宏伟,等. 常识空间认知研究与地名本体设计[J]. 测绘科学技术学报,2011,28(6):450-453.

[6] PAN J Z, STOILOS G, STAMOU G, *et al*. f-SWRL: a fuzzy extension of SWRL[C]//Lecture Notes in Computer Science, Vol 3697. Berlin: Springer, 2005:829-834.