

## 地理空间中的空间关系表达和推理

刘瑜<sup>1</sup>, 龚咏喜<sup>1</sup>, 张晶<sup>2</sup>, 高勇<sup>1</sup>

(1. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 2. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100037)

**摘要:**针对地理空间中的应用, 归纳了在空间关系的表达与推理中不同于人工智能领域研究的一些特点; 在人工智能领域, 更注重建立形式化的推理系统; 而在地理信息科学中, 则需更关注地理空间的特点以及地物的地理语义。该文基于地理空间和地理现象的本质且顾及地理空间认知, 总结了地理空间中空间关系表达和推理的特点, 具体包括空间的有限性、地球的球面特征、地物的地理语义、地物形状的复杂性、面状地物、特殊的空间关系、空间关系的层次性与尺度相应原则、不确定性、三维与时态特性九方面; 进而介绍了地理空间关系表达的两个应用, 即地理信息检索和基于对象的图像分析。该文的探讨可为地理信息科学中的相关研究提供方向性指导。

**关键词:**空间关系表达和推理; 地理空间; 地理语义; 地理信息检索; 基于对象的图像分析

**中图分类号:**P208 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-0504(2007)05-0001-07

### 0 引言

目前, 定性空间推理 (Qualitative Spatial Reasoning, QSR) 成为人工智能 (Artificial Intelligence, AI)、GIS 等领域的研究热点, 根据文献[1]中的定义, 定性空间推理是在定量坐标数据缺失的前提下, 根据已有的定性空间论断, 生成新的空间论断。定性空间推理的一个重要特征就是它需要与人的空间认知相符<sup>[2]</sup>, 因为在人类的空间知识获取、加工和空间决策过程中, 通常不是基于定量的坐标和关系, 而是基于场所及场所之间的定性关系。因此, QSR 需要紧密集成认知和计算两方面的研究<sup>[3]</sup>。

在定性空间推理中, 定性空间关系尤其是二元定性空间关系的形式化表达及其组合是研究的核心内容。通常, 二元定性空间包括拓扑 (Topological) 关系、主方位 (Cardinal Direction) 关系和定性度量 (Qualitative Metric) 关系。对于拓扑关系, 主要表达模型有区域连接演算 (Region Connection Calculus, RCC)<sup>[4]</sup> 和 9-交模型 (9-Intersection Model, 9-IM)<sup>[5]</sup>, 其中, RCC 主要针对面状对象之间的拓扑关系, 而 9-IM 可描述点、线对象参与的拓扑关系。对于主方位关系, 有锥形法、投影法、双交叉方法、矩形代数、最小外包矩形法等。普通的方位关系蕴含“相离”的拓扑关系, 而文献[6]提出内方位关系, 表达了当一个对象被另一个面状对象包含时所具有的方位关系。人们采用一些定性谓词 (如“远”、“近”等) 来表达定性度量关系, 通常认为它不具备普通定量度

量关系的基本特性, 如对称性和三角不等式<sup>[7]</sup>, 并且与环境尺度以及对象的尺寸有关。在进行空间推理时, 需将度量关系与其他空间关系相结合。

在人类的空间认知和空间知识表达中, 三类空间关系具有不同的特点。Piaget 等<sup>[8]</sup>研究表明, 拓扑关系最易被识别, 但在进行空间定位时, 拓扑关系也最为粗糙; Mark<sup>[9]</sup>认为, 主方位关系和度量关系是对“相离”拓扑关系的一种精化。因此, 在一些空间定位的研究中, 主要集中于基于度量关系和主方位关系的定位<sup>[7,10]</sup>。对于每种关系, 可识别出一些联合完备且两两排斥的基本关系。如根据 RCC8, 两个面状地物之间可以有相离 (DC)、相邻 (EC)、相交 (PO)、完全被包含 (NTPP)、相切被包含 (TPP)、完全包含 (NTPP<sup>-1</sup>)、相切包含 (TPP<sup>-1</sup>) 和重叠 (EQ) 8 种拓扑关系; 基于 MBR 模型, 两个连通的对象之间可以有 218 种方位关系, 如果不要求对象的连通性, 则基本关系的数目有 512 种。这些基本关系集合并构建一个可推理系统奠定了基础。

在定性空间推理研究中, 关系组合表 (Composition Table, CT) 发挥了重要作用<sup>[11]</sup>, 文献[12]给出基于 RCC8 的拓扑关系组合, 文献[13]讨论了包含点线几何体的拓扑关系组合。对于方位关系, 文献[14]提出基于锥形法及投影法的主方位关系组合, 文献[15]给出基于 MBR 的主方位关系组合。此外有学者考虑了不同类型空间关系的组合, 如拓扑关系与度量关系的组合<sup>[16]</sup>, 方位关系与度量关系的组合<sup>[7,17,18]</sup>, 以及拓扑关系与方位关系的组合<sup>[19]</sup>等。

收稿日期: 2007-07-20; 修订日期: 2007-08-27

基金项目: 国家高科技研究发展计划 (863 计划) 项目 (2007AA12Z216); 国家自然科学基金项目 (40701134)

作者简介: 刘瑜 (1971-), 男, 副教授, 主要研究方向为地理信息科学, 已发表论文 60 余篇。E-mail: liuyu@urban.pku.edu.cn

基于空间关系及其组合的定义,可以建立一个形式化的推理系统。在AI的研究过程中,知识表达的重要性日益彰显。但通常形式化同人的知识表达和推理之间存在着矛盾,即越贴近人的认知,越难以被形式化。AI中对QSR的研究在很多情形下已成为“为形式化而形式化”,而忽略了地理空间以及人的空间知识表达的具体特点。为建立具有智能性和符合人的常识性认知的GIS应用,需探讨地理空间知识表达,无疑地理空间关系在其中占据重要位置。因此,本文在探讨地理空间、地物语义和地理空间认知特点的基础上,对地理空间关系表达和推理研究中需注意的问题进行了枚举和讨论,并指出其与AI领域中相关研究的异同及今后可能的研究方向。

## 1 地理空间关系的表达和推理

### 1.1 地理空间和地理空间认知

在定性空间推理中,通常假定对象所嵌入的空间为度量空间或欧氏空间,其中度量空间的定义是:对于集合 $X$ 中任意一对点 $x$ 和 $y$ ,存在一个与之关联的实数 $d(x, y)$ ,称为 $x$ 到 $y$ 的距离,且满足如下性质: $d(x, y) \geq 0$ ,  $d(x, x) = 0$ ,  $d(x, y) = d(y, x)$ ,  $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$ 。而欧氏空间则是定义了内积操作的向量空间,它也属于度量空间。无论是度量空间,还是欧氏空间,都是可以进行严格数学定义的空间,可认为是对地理空间的抽象。根据文献[20],认为地理空间具有以下特征:1)是人可以在其中活动的空间,一些空间认知中研究的桌面空间则不属于地理空间;2)其取决于地球表面,但在认知中经常被抽象为一个二维平面,这与通常GIS中的空间数据表达一致。在地理空间中,空间认知的获取途径主要有实际体验、地图和文本3种,文献[8]和[21]给出空间认知的发展过程。空间认知最终以认知地图的形式表达,可以认为认知地图是现实世界中地图在记忆系统中的对应物,它具有以下特征:多为矢量形式;具有分层和分片的特征;其中存在对现实世界的扭曲,这种扭曲通常体现为地物形状及空间关系的简化,反映了人类对现实世界认知的特点。

### 1.2 地理空间关系表达和推理的特点

在GIS中,空间关系主要具有以下作用:1)计算两个地物的关系,得到关系谓词;2)判断两个地物是否具有某种特定的空间关系,从而得到布尔数值;3)根据某个地物同另一个(或多个)参照地物的关系,判断该地物的空间分布,即空间定位问题<sup>[22]</sup>。因此,GIS及地理信息科学中的空间关系表达与人工智能领域

中相应研究存在较大差异。一般AI中注重空间关系的形式化表达并建立一个可推理系统,而GIS中则更需顾及地理空间的特点以及地物的具体形状和语义。地理空间关系表达和推理具有如下特点。

1.2.1 空间的有限性 除了尺度特征的差异外,在普通空间认知和AI的研究中,通常不假定几何对象所嵌入空间的有限性,例如,不论是根据锥形法还是MBR法,主方位关系都没有限定参照地物的影响范围。但在实际应用中,对空间的表达往往是有边界的。造成空间表达的有限性主要有3方面因素:1)地理空间,即地球表面所确定的范围是有限的;2)认知地图的片断性决定了认知空间是有限的,因而对空间知识的加工推理往往是在相应片断所规定的范围内进行;3)在空间知识表达和传输过程中,需要设定一个语境范围,其可以是自然的(如华北平原),也可以是人为的(如河北省)。空间的有限性增强了主方位关系的定位能力,它不仅影响主方位关系的表达,也使定性度量关系变得有意义。定性度量关系取决于陈述关系时上下文空间的尺度,如校园尺度上的“远”未必比城市尺度上的“近”绝对距离更大;如果不限定空间范围,则无从定义“远”和“近”等定性度量关系。

1.2.2 地球的球面特征 基于地球的球面特征,为能够在二维平面上表达各种地理现象,必须进行相应的投影变换。在通常的投影变换下,拓扑性质和拓扑关系保持不变,但是主方位关系和度量关系却不具备这种特征。图1a表示在正轴圆锥投影下基于MBR法的主方位关系模型,图1b则表示在地理坐标(经纬度)下的等距线。因此,尽管地理空间推理中涉及的地物是嵌入到平面中的,但在很多大尺度应用中(如对主方位关系及度量关系的检测),并不能简单地将嵌入空间视为基于笛卡尔坐标系表达的二维空间。目前,已有学者研究顾及地球球面特征的空间关系表达和空间推理<sup>[23,24]</sup>。

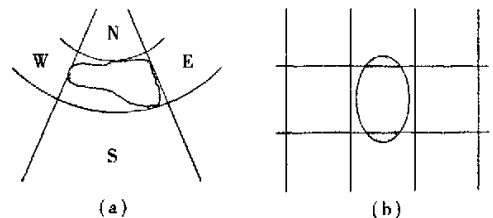


图1 考虑地球球面特征的主方位关系和度量关系  
Fig. 1 Cardinal direction relations and metric relations with considering the spherical Earth's surface

1.2.3 地物的地理语义 在通常的空间推理研究中,参与的对象被抽象为不具有地理语义的几何体,

如点、线或面。然而,地理空间中的所有地物都具有特定的地理语义特征。例如,对于一条河流,在地理空间认知中其并不仅仅是一条线(小比例尺地图)或一个面(大比例尺地图),而是包含了更为丰富的特征,如其构成(包括河床、河漫滩、水流)及功能等。河流具有一定的空间分布和形状特征,其形状狭长且宽度具有不均匀性,其边界则因季节变化具有模糊性。上述属性表达了河流这类地物的本体(Ontology)。由于地物空间属性和非空间属性在空间认知中的紧密耦合,在地理空间推理中需要同时表达基于几何体的空间推理和地理语义推理,才符合人的地理空间认知。例如,如果河流和道路都被抽象为线状地物,其相交具有不同的地理语义。道路与道路的相交意味着路口、立交桥或环岛;道路与河流的相交则让人联想到桥梁;而河流与河流的相交则表明支流的汇入,且多数情况下这种相交是单侧的。此外,在空间关系(尤其是二元空间关系)中,地物的地理语义导致参与地物认知角度的不对称性,即要求相对于目标地物,参照地物必须大、稳定且便于识别。例如,对于“大楼的东侧有一棵小树”和“小树的西侧有一幢大楼”,显然前者更符合空间认知。但在抽象过程中,大楼和小树分别被抽象为多边形和点,难以体现其在空间关系表达中所扮演的不同角色。

1.2.4 地物形状的复杂性 在AI领域的QSR研究中,为了构造一个可推理系统,通常要对地物形状进行简化抽象。例如,在基于MBR法的主方位关系中,具有空间范围的地物被抽象为一个矩形。如图2a,由于B点位于A的MBR中,它不会被判断为在线A的北部、西部或西北部,这与人的认知常识并不相符,原因是线状地物A的具体形状被忽略。一个更合理的表达是对于B在A的北部、西部及西北部都判断为真。在空间关系检测尤其是定位应用中,为达此目的,可以线上的每个点作为参照点,按照锥形法计算其对应的分布区域,然后对这些锥形区域进行叠加,从而得到目标点的可能分布区域。图2b是根据北方向对应的锥形区域叠加,从而对B在A北部的命题做出肯定判断。

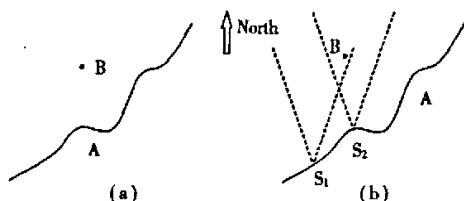


图2 地物形状对方位关系的影响  
Fig. 2 Cardinal direction relations depending on shapes of reference object

地物的形状除对主方位关系产生影响外,也对度量关系和拓扑关系产生影响。对于定量度量关系,地物的形状决定了采用何种度量方式,如质心到质心还是边界到边界;而定性度量关系又受地物尺寸的影响,即在相同的绝对距离下,两个大尺寸地物之间的定性距离被认为比两个较小尺寸地物之间的定性距离更近。对于拓扑关系而言,除了较为简单的点/点、点/线、点/面等拓扑关系外,线/线、线/面及面/面拓扑关系都因地物形状的复杂性而影响关系的认知和形式化表达。对于线/线关系,文献[5]归纳了33种简单线之间的拓扑关系和24种复杂线之间的关系,文献[25]从语言学的角度仅识别了10种线/线拓扑关系及其对应的英文表述,即存在没有被识别的线/线拓扑空间关系或不同胚的两种关系采用了同一种自然语言表达方式。而对于面/面拓扑关系,如图3所示的3种关系并非拓扑同胚,但在9-IM及RCC-8中,均没有对这3种拓扑关系(以及更多潜在的面/面拓扑关系)做出区分。

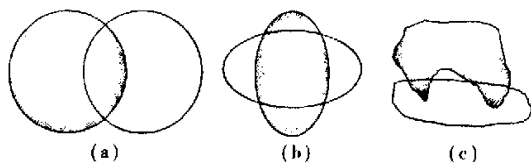


图3 RCC和9-交模型不能分辨的面/面拓扑关系  
Fig. 3 Area/area topological relations that cannot be distinguished by the RCC or 9-IM

1.2.5 面状地物 现实世界中大多数地物呈面状(如河流、城镇等),在特定的比例尺下,这些地物被抽象为线或点。这个抽象过程取决于地物的尺寸和制图的比例尺,而这些地物可称为类点地物(Point-Like Object, PLO)和类线地物(Line-Like Object, LLO)。图4示意了尺寸阈值为d条件下类点地物和类线地物,尽管其实际是面状地物,但在空间认知中,通常采用点或线所拥有的空间关系来表述PLO或LLO有关的关系。例如,命题“道路与河流穿越”的表达借用了线/线拓扑关系(图5a)。如果考虑河流和道路为面状地物,其实际拓扑关系为交叠(RCC-8表示为PO,9-IM表示为Overlap,图5b),但仅用交叠表达穿越关系不充分,必须考虑参与地物的形状特征。换言之,当用线/线拓扑关系表达LLO之间的关系时,这种关系并非纯粹的拓扑关系,即它不具备在连续拓扑变换下保持不变的性质。如图5c与图5b同胚,但用穿越描述这两个地物的关系却不恰当。

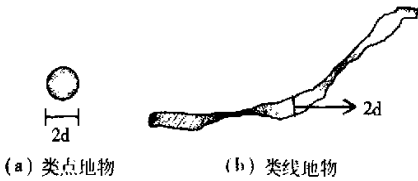


图4 类点地物和类线地物  
Fig. 4 Point-like objects and line-like objects

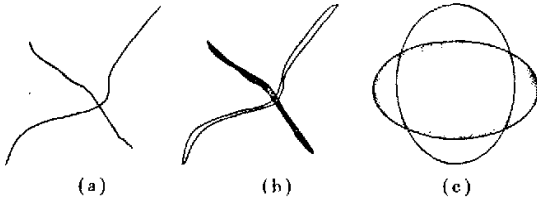


图5 类线地物之间的穿越关系  
Fig. 5 Cross relation between two LJOs

1.2.6 特殊的空间关系 空间推理中的空间关系多为二元关系,即无论是拓扑关系、主方位关系还是度量关系,表达的都是两个对象之间的关系。而在实际地物关系表达中,却存在多个对象参与的关系,最典型的是一种三元关系:“在……之间(Between)”(图6),其中图6a表示在两个具有空间延伸的地物之间的情形,图6b表示在一个点和一个具有空间延伸的地物之间的情形,图6c表示在两个点地物之间的情形。Between这种特殊的三元关系具有模糊性,尤其是在两个点之间的情形,文献[26]对Between进行了详细讨论。此外,空间关系还有“沿着(Along)”、“包围(Surround)”等<sup>[27]</sup>,它们同样见诸人类的地理空间认知和空间知识的表达中。

通常研究的空间关系都定义在二维空间中,参与对象可以是点、线、面等几何体。但在实际应用中,有些空间关系是定义在线性参照系统中,最常见的是定义在交通线路路段和点之间的关系。类似于二维空间,同样可以识别出拓扑、方位和度量3类关系。其中,拓扑关系类似于二维的时间代数<sup>[28]</sup>,而方位关系和度量关系受线性参照系统的约束作用,即方位和距离都是基于特定的线状地物表达的。它们常用于一些空间定位的表述,如“沿京广线石家庄以南50 km处”。

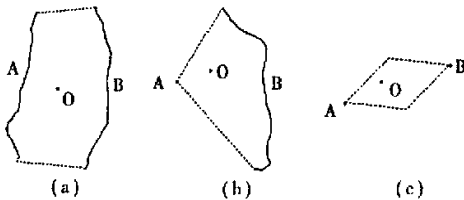


图6 一种三元空间关系——“之间”  
Fig. 6 A ternary spatial relation: between

1.2.7 空间关系的层次性与尺度相应原则 认知

地图具有分层和分片的特征,因此,文献[29]给出一个考虑分层与分片的空间数据元模型。由于认知地图的分层和分片,空间关系的表达和推理通常是在同一个层片内进行,造成空间关系表达和推理的尺度相应原则。图7为北京市的空间认知分层与分片结构示意图,根据该层片结构,可以得到几种不符合常识性认知的空间关系表达(表1)。

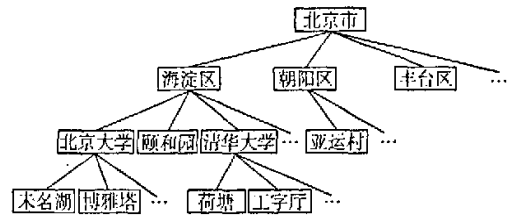


图7 空间认知分层与分片结构:以北京市为例  
Fig. 7 Hierarchical structure of spatial knowledge: Beijing as a case

表1 几种不符合常识性认知的空间关系表达  
Table 1 Some spatial expressions that are not accordant with commonsense cognition

空间关系表达	原因
博雅塔在北京市内	跨越多个层次
未名湖在工字厅的西侧	跨越不同分片
朝阳区在博雅塔以东	跨越多个层次和分片

表1中的3个陈述,尽管采用普通的GIS空间关系检测算子都可得到肯定的结果,但由于其违背了尺度相应的原则,在日常生活尤其是空间定位表述中,并不直接采用类似的表达方式,更合乎常识的表达是“朝阳区在海淀区以东”、“荷塘在清华大学内”。换言之,表1所描述的空间关系可以认为是二阶的、可导出的命题,而合乎常识的空间认知表达可以认为是一阶的、直接通过语言系统在长期记忆中表达的命题。在层次空间推理方面,Timpf等<sup>[30]</sup>探讨了模拟层次化空间认知的推理,Winter<sup>[31]</sup>则研究了基于层次模型的拓扑关系推理。在空间关系表达和推理的尺度相应原则方面,Liu等<sup>[32]</sup>指出内方位关系推理中的层次尺度问题,Wang等<sup>[33]</sup>则讨论了顾及空间分片的空间定性定位框架。

1.2.8 不确定性 正如Goodchild<sup>[34]</sup>所指出的,不确定性是地理信息的固有特性。空间关系的表达和推理同样存在着不确定性,主要体现在3方面:1)参与一个关系的地物可能是不确定的,这种不确定性既可能是由概念的模糊性引起,也可能由测量的精度导致,前者适合用模糊集及模糊逻辑表达<sup>[35]</sup>,后者则适合用概率建模<sup>[36]</sup>。地物(尤其是面状地物)的不确定性通常体现为不具有明确的边界,即边界是渐变(Gradual)的,而不是“干脆”(Crisp)的。许多学者对不确定边界地物之间的拓扑关系进行了研究,并

建立了相应模型,如 Cohn 等<sup>[37]</sup>提出的“egg-yolk(鸡蛋-蛋黄)”模型。2)一些定性空间关系具有模糊性,如主方位关系和定性度量关系,其中“东、西、南、北”、“远、近”等基本关系都不具有确定的边界。文献[38—40]分别对度量关系和主方位关系的模糊性进行了研究。空间关系的模糊性使得人们需要更为精细地描述在同一类空间关系中对应于不同认知的关系实例,其途径是顾及地物的具体形状,采用定量方法区分不同实例,如文献[41]及[42]分别对主方位关系和拓扑关系的定量表达进行了研究。3)在空间关系组合中,同样存在不确定性。组合两个基本空间关系可得到一个或多个新的空间关系,但具体为哪种关系,其中存在概率的差异,目前的研究尚未涉及该问题。

1.2.9 三维与时态特性 在 UCGIS 定义地理信息科学与技术知识体系中,从时态、三维和不确定性角度探讨了对普通静态的、二维的和确定的数据模型的扩展<sup>[43,44]</sup>。对于地理空间中的关系,除不确定性外,还需考虑三维和时态数据模型。在三维方面,除考虑三维地物的拓扑、方位和度量关系外,还有一些关系的定义仅限于三维空间中,如道路与河流的立交关系、建筑物之间的对面关系等。而在时态方面,由于时间推理<sup>[28]</sup>的研究早于空间推理,所以时间推理中的一些形式化方法也被引入空间推理中<sup>[45]</sup>。地理空间中很多地物具有动态变化的特征,这使得可以探讨空间关系的动态演化,相关的研究有文献[46]等。如图8所示,考虑地物的动态特征,会产生更为丰富的地理语义,图8a表示两个地物的分离,图8b表示两个地物的接续,图8c则表示两个地物的相遇,文献[47]对此进行了形式化表达。

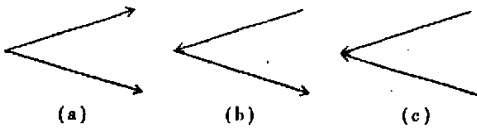


图8 考虑动态语义的线/线关系  
Fig.8 Line/line relations considering temporal semantics

上述地理空间关系表达的九方面特征,可分为表2所示的4个范畴,它们反映了地理空间和地理现象的特殊性。由于上述原因,在地理信息科学研究中,不能像在AI中可抽象空间和对象;而在大多数GIS应用中,也不能直接照搬AI中的研究成果。

2 地理空间推理的两个应用领域

文献[48]认为空间推理是基于场所的GIS<sup>[49]</sup>的关键技术。基于场所的GIS是基于常识性地理认知,

表2 地理空间关系特性的4个范畴  
Table 2 Four categories of the characteristics of geospatial relations

范畴	特性
地理空间的特殊性	空间的有限性;地球的球面特征
地物的复杂性	地物的地理语义;地物形状的复杂性;面状地物
符合地理空间认知的空间关系	特殊的空间关系;空间关系的层次性与尺度相应原则
地理现象和关系的本质特征	不确定性;三维与时态特性

以场所的名称及场所之间的关系为核心组织地理空间知识,通过定性或半定性空间推理,为人们提供空间行为决策支持。由于基于场所的GIS对空间信息的组织和加工更符合人的空间认知过程,可紧集成空间和非空间知识,因此它更有助于实现决策支持。基于场所的GIS对空间及非空间知识的集成加工能力可应用在很多领域,本文简介其中的两个应用,即地理信息检索(Geographic Information Retrieval, GIR)和基于对象的图像分析(Object-Based Image Analysis, OBIA)。

目前,以 Google 为代表的全文检索式搜索引擎技术得到迅速发展。但传统的全文检索技术是基于关键词匹配进行检索,往往存在对空间信息查不全、查不准以及检索质量不高等现象,如何向用户提供具有更加丰富语义的空间信息检索结果,已引起学术界和工业界的共同关注。其中,包含地理语义的Web信息检索(即地理信息检索)便是该领域的研究热点之一。为实现GIR,需要对基于场所的空间知识进行组织和推理,换言之,基于场所的GIS是实现GIR的核心,它可以作为空间信息加工引擎,与文本搜索相结合实现地理信息的检索。

近年来高空间分辨率遥感影像技术飞速发展,其代表性产品有 Quick Bird、IKONOS 等。尽管高分辨率影像提供了丰富的信息,但较之普通中低分辨率影像其信息提取更困难,主要由于高分辨率影像上地物的结构特征成为分类的主要依据。因此,基于对象的图像分析在研究中得到重视<sup>[50]</sup>。其基本原则是根据影像的光谱特征进行分割(Segmentation),得到对象;而在分类中,则利用这些对象建立相应的规则。通常这些规则可分为3个层次:1)单对象规则,即考虑对象的光谱特征、形状等建立的规则;2)对象间规则,即根据两两对象之间的空间关系建立的规则;3)多对象规则,即包含多个对象的模式<sup>[51]</sup>。定性或定量表达的空间关系有助于定义上述第二、三层次的规则<sup>[40]</sup>,而关系的推理则可用于分类。此外,从空间认知的角度分析,由于个体对高分辨率影像的认知类似于其基于视觉得到的现实世界

图像的知觉过程,因此如何模拟人的认知过程用于高分辨率影像的判读,将是一个有意义的研究方向。

### 3 结论

本文对空间关系的表达和推理进行综述,并探讨地理空间中空间关系的表达和推理与普通 AI 中研究的差异。通常 AI 中空间关系所嵌入空间为一个数学空间(欧氏空间、拓扑空间或度量空间),其形式化定义注重建立一个可推理的系统。因而在建模中对地物进行了抽象,主要包括形状的简化和地理语义的去除,这使其不便于实现空间知识和非空间知识集成处理。此外,由于 AI 中研究的空间认知和推理较少涉及人在亲身体验中获取的空间知识,因而也较少表达空间推理中的层次性和尺度相应原则。最后,在推理过程中多采用形式逻辑,从而忽略了地物及空间关系的不确定性。考虑上述因素,本文归纳了地理空间知识中空间关系表达和推理的九方面特点,进而讨论了地理空间推理的两个应用领域,即地理信息检索和基于对象的图像分析。它们是 GIS 实现以及地理信息科学研究的重点。

#### 参考文献:

- [1] COHN A G, HAZARIKA S M. Qualitative spatial representation and reasoning: An overview[J]. *Fundamenta Informaticae*, 2001, 46: 1-29.
- [2] FREKSA C, HABEL C, WENDER K F. Spatial Cognition, an Interdisciplinary Approach to Representing and Processing Spatial Knowledge[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1998.
- [3] DUCKHAM M, WORBOYS M F. Computational structure in three-valued nearness relations[A]. MONTELLO D R. Proceedings of COSIT 2001[C]. Berlin: Springer-Verlag, 2001. 76-91.
- [4] RANDELL D A, COHN A G, CUI Z. Computing transitivity tables: A challenge for automated theorem provers[A]. Proceedings of the 11th CADE [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1992. 786-790.
- [5] EGENHOFER M J, HERRING J. Categorizing Binary Topological Relations between Regions, Lines and Points in Geographic Databases[R]. Department of Surveying Engineering, University of Maine, Orono, ME, 1991.
- [6] LIU Y, WANG X, JIN X, et al. On internal cardinal direction relations[A]. COHN A G, MARK D M. Proceedings of COSIT'05[C]. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 283-299.
- [7] CLEMENTINI E, FELICE P, HERNÁNDEZ D. Qualitative representation of positional information[J]. *Artificial Intelligence*, 1997, 95: 317-356.
- [8] PIAGET J, INHELDER B. The Child's Conception of Space [M]. New York: W. W. Norton and Co., 1967.
- [9] MARK D M. Spatial representation: A cognitive view[A]. MAGUIRE D J, GOODCHILD M F, RHIND D W, et al. *Geographical Information Systems, Principles and Applications*[C]. New York: John Wiley & Sons, 1999. 81-89.
- [10] DEHAK S M R, BLOCH I, MAÎTRE H. Spatial reasoning with incomplete information on relative positioning[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27 (9): 1473-1484.
- [11] BENNETT B, ISLI A, COHN A G. When does a composition table provide a complete and tractable proof procedure for a relational constraint language? [A]. Proceedings of the IJCAI-97 Workshop on Spatial and Temporal Reasoning[C]. 1997.
- [12] RANDELL D A, CUI Z, COHN A G. A spatial logic based on regions and connection[A]. *Principles of Knowledge Representation and Reasoning, Proceedings of the Third International Conference (KR'92)*[C]. 1992. 165-176.
- [13] ISLI A, CABEDO L, BARKOWSKY T, et al. A topological calculus for cartographic entities [A]. *Spatial Cognition II* [C]. Berlin: Springer-Verlag, 2000. 225-238.
- [14] FRANK A U. Qualitative spatial reasoning: Cardinal directions as an example[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1996, 10(3): 269-290.
- [15] SKIADOPOULOS S, KOUBARAKIS M. Composing cardinal direction relations[A]. SSTD 2001[C]. Berlin: Springer-Verlag, 2001. 299-317.
- [16] GIRITLI M. Who can connect in RCC? [A]. GUNTER A, KRUSE R, NEUMANN B, KI 2003[C]. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 565-579.
- [17] ISLI A, MORATZ R. Qualitative Spatial Representation and Reasoning: Algebraic Models for Relative Position[R]. University at Hamburg, FB Informatik, Hamburg, 1999.
- [18] MORATZ R, NEBEL B, FREKSA C. Qualitative spatial reasoning about relative position: The tradeoff between strong formal properties and successful reasoning about route graphs [A]. FREKSA C, BRAUER W, HABEL C, et al. *Spatial Cognition III* [C]. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 385-400.
- [19] SHARMA J. Integrated topological and directional reasoning in geographic information systems[A]. GRAGLIA M. *Geographical Information Research, Transatlantic Perspective* [C]. 1999. 435-448.
- [20] EGENHOFER M J, MARK D M. Naive geography[A]. FRANK A U, KUHN W. Proceedings of COSIT'95[C]. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 1-15.
- [21] MONTELLO D R. Spatial cognition[A]. SMELSER N J, BALTES P B. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*[C]. Oxford: Pergamon Press, 2001. 14771-14775.
- [22] WIECZOREK J, GUO Q, HIJMANS R. The point-radius method for georeferencing locality and calculating associated uncertainty[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2004, 18: 745-767.
- [23] CHEN J, ZHAO X, LI Z. An algorithm for the generation of Voronoi diagram on the sphere based on QTM[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2003, 69(1): 79-89.
- [24] EGENHOFER M J. Spherical topological relations[A]. SPACAPIETRA S, ZIMÁNYI E. *Journal on Data Semantics III* [C]. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 25-49.
- [25] XU J. Natural-Language Representation and Query of Linear Geographic Objects in GIS[D]. State University of New York at Buffalo, 2005.
- [26] BLOCH I, COLLISOT O, CESAR R M. On the ternary spatial relation "between" [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, 2006, 36(2): 312-327.
- [27] TAKEMURA C M, CESAR JR R, BLOCH I. Fuzzy modeling and evaluation of the spatial relation "along" [A]. LAZO M, SANFELIU A. CIARP 2005[C]. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 837-848.

- [28] ALLEN J F. Maintaining knowledge about temporal intervals [J]. *Communications of the ACM*, 1983, 26(11): 832—843.
- [29] 邹伦, 王晓明, 高勇, 等. 基于地理认知的 GIS 数据元模型研究 [J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 583—588.
- [30] TIMPF S, FRANK A U. Using hierarchical spatial data structures for hierarchical spatial reasoning [A]. HIRTLE S C, FRANK A U. *COSIT'97* [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1997. 69—83.
- [31] WINTER S. Topological relations in hierarchical partitions [A]. FREKSA L C, MARK D M. *COSIT'99* [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 141—155.
- [32] LIU Y, LIU X, WANG X, et al. Qualitative spatial reasoning about internal cardinal direction relations [A]. *Proceedings of ISPRS International Symposium on Spatio-temporal Modeling, Spatial Reasoning, Spatial Analysis, Data Mining and Data Fusion (STM)'05* [C]. 2005. 131—138.
- [33] WANG X, LIU Y, GAO Z, et al. Landmark-based qualitative reference system [A]. *Proceedings of IGARSS 2005* [C]. Korea: Seoul, 2005. 932—935.
- [34] GOODCHILD M F. A geographer looks at spatial information theory [A]. MONTELLO D R. *Proceedings of COSIT'01* [C]. Berlin: Springer-Verlag, 2001. 1—13.
- [35] BURROUGH P A. Natural objects with indeterminate boundaries [A]. BURROUGH P A, FRANK A U. *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries* [C]. London: Taylor & Francis Ltd., 1996. 3—28.
- [36] SHI W. A generic statistical approach for modelling error of geometric features in GIS [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1998, 12(2): 131—143.
- [37] COHN A G, GOTTS N M. The “egg-yolk” representation of regions with indeterminate boundaries [A]. BURROUGH P A, FRANK A U. *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries* [C]. London: Taylor & Francis Ltd., 1996. 171—188.
- [38] DUTTA S. Qualitative spatial reasoning: A semi-quantitative approach using fuzzy logic [A]. *Proceedings of the First Symposium on Design and Implementation of Large Spatial Databases* [C]. 1990. 345—364.
- [39] DU S, WANG Q, YANG Y. Fuzzy description of fuzzy direction relations and their similarities [A]. *Proceedings of 12th Int. Conf. on Geoinformatics Geospatial Information Research: Bridging the Pacific and Atlantic* [C]. 2004. 496—502.
- [40] BLOCH I. Fuzzy spatial relationships for image processing and interpretation: A review [J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23: 89—110.
- [41] GOYAL R K, EGENHOFER M J. Similarity of direction relations [A]. JENSEN C, SCHNEIDER M, SEEGER B, et al. *Seventh International Symposium on Spatial and Temporal Databases* [C]. Berlin: Springer-Verlag, 2001. 36—55.
- [42] NEDAS K, EGENHOFER M J. Splitting ratios: Metric details of topological line-line relations [A]. BARR V, MARKOV Z. *The 17th International Florida Artificial Intelligence Research Symposium Conference* [C]. AAAI Press, 2004. 795—800.
- [43] University Consortium for Geographic Information Science. *Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge* [M]. AAG Publications, 2006.
- [44] 杜培军, 陈云浩, 张海荣. UCGIS 地理信息科学与技术知识体系及对我国 GIS 研究的启示 [J]. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(3): 6—10.
- [45] RENZ J. *Qualitative Spatial Reasoning with Topological Information* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- [46] EGENHOFER M J, WILMSEN D. Changes in topological relations when splitting and merging regions [A]. RIEDL A, KAINZ W, ELMES G. *Progress in Spatial Data Handling—12th International Symposium on Spatial Data Handling* [C]. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 339—352.
- [47] KURATA Y, EGENHOFER M J. The head-body-tail intersection for spatial relations between directed line segments [A]. RAUBAL L M, MILLER H, FRANK A U, et al. *GI-Science 2006* [C]. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 269—286.
- [48] 刘瑜, 方裕, 邹伦, 等. 基于场所的 GIS 研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 2005, 21(5): 6—10.
- [49] MARK D M, FREKSA C, HIRTLE S, et al. Cognitive models of geographical space [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1999, 13(8): 747—774.
- [50] BLASCHKE T, HAY G. Object-oriented image analysis and scale-space: Theory and methods for modeling and evaluating multi-scale landscape structure [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 34(4): 22—29.
- [51] AKSOY S, TUSK C, KOPERSKI K, et al. Scene modeling and image mining with a visual grammar [A]. CHEN C H. *Frontiers of Remote Sensing Information Processing* [C]. World Scientific, 2003. 35—62.

## Representation and Reasoning of Spatial Relations in Geographical Space

LIU Yu<sup>1</sup>, GONG Yong-xi<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>2</sup>, GAO Yong<sup>1</sup>

(1. Institute of RS and GIS, Peking University, Beijing 100871;

2. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

**Abstract:** QSR (Qualitative Spatial Reasoning) has become an important research topic in both artificial intelligence (AI) and geographical information sciences. In AI, spatial relations are formally defined such that an inferable algebra can be established. However, modeling geospatial relations should consider some special properties of geographical space and geographical phenomena. They make representation and reasoning of spatial relations more accordant with the way that human beings manage and process spatial knowledge. This paper summarizes nine aspects of characteristics of geospatial relations. They include finitude and sphericity of geographical space; semantics, complex actual shape, and areal distribution of features; cardinalities and hierarchies of spatial relations; and uncertain, 3-dimensional, and temporal phenomena. The discussions on those nine aspects and two associated applications, geographical information retrieval and object based image analysis, provide directions for future research.

**Key words:** representation and reasoning of spatial relations; geographical space; geographical semantics; geographical information retrieval; object based image analysis