

不确定性空间关系

杜世宏

王 桥

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101) (南京师范大学地理信息科学江苏省重点实验室, 南京 210097)

摘 要 空间关系在空间查询语言、基于内容的数据检索及空间分析中有重要作用。不确定性是空间关系的固有特性,但至今没有受到研究人员的足够重视。为了使人们对该理论有个概略了解,首先给出了空间关系不确定性的定义、内涵及其对空间关系应用的影响;然后从数据的不确定性、认知的不确定性以及空间关系分析处理的不确定性等3个方面详细地分析了空间关系不确定性的来源,同时提出了空间关系不确定性的处理方式,并以空间关系不确定性的3个来源为标准,评价并指出了定性空间关系表达方法的不足之处;最后,给出了用模糊集方法研究模糊空间关系的框架和主要内容,以便为不确定性空间关系的研究奠定基础。

关键词 空间关系 不确定性 模糊表达

中图分类号: TP181 P208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2004)05-0539-08

Uncertain Spatial Relations

DU Shi-hong¹⁾, WANG Qiao²⁾

¹⁾(Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101)

²⁾(Key Lab. of Jiangsu Province, College of Geographic Information Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097)

Abstract Spatial relations are extensively used in spatial database query language, content-based spatial data retrieval and spatial data analysis. The uncertainty is an inherent characteristic of spatial relations, but little attention was paid to it. In this article, firstly, the definition, the implication of uncertainty of spatial relations and their influences on application of spatial relations are presented. Secondly, the sources of uncertainty spatial relations from the uncertainty of spatial data, spatial recognition and processing of spatial relation are analyzed, and the framework of processing uncertainty is proposed. Thirdly, the qualitative methods of describing spatial relations are evaluated and their shortcomings are pointed out. Finally, the fuzzy set theory is introduced to describing the fuzziness of spatial relations. The fuzzy methods can describe the partly membership between a geometry spatial relation and a concept. The fuzziness of spatial objects, people's cognition to spatial relations and similarity between two spatial relations can be described in a unified method, and spatial relations between two crisp objects, between two fuzzy objects and between crisp objects and fuzzy objects can also be expressed in a unified method. The fuzzy method lays a foundation for researching uncertain spatial relations.

Keywords Geographic information system, spatial relation, uncertainty, fuzzy expression

1 引言

地理信息系统 (geographic information system, GIS) 是对现实世界的一种数字化建模,它是建立在人们对现实世界认识和抽象基础上的,而且 GIS 是对客观世界数字化的近似反映,同时 GIS 中建模和分析的概念和方法又往往受人们认知的影响。尽管现实世界是客观的,但人的认知却是一种主

观意识活动,因此,GIS 是现实世界和人的认识相互交叉影响而产生的结果。众所周知,现实世界是无限复杂的巨系统,其中的现象和过程之间存在着各种复杂的关系,是一种连续而自然的现实模型;而 GIS 所提供的管理、分析和处理数据的能力却是有限的、离散的,并且是被人们经过认知、抽象和表达后的离散模型。这种有限与无限、连续与离散、原始与抽象、自然与认知之间的差异,必然会导致 GIS 中的数据、分析模型、处理方法和可视化等带有不确定性。

基金项目:国家自然科学基金项目(40271090)

收稿日期:2003-07-15;改回日期:2003-12-19

尽管不确定性已成为当前 GIS 所必须研究和解决的理论问题之一^[1],而空间关系作为 GIS 中基本理论问题之一,由于受数据、认知和分析处理中不确定性的影响,因而也具有不确定性,然而其却一直没有受到空间关系方面研究人员的足够重视。

2 空间关系的不确定性

2.1 不确定性

不确定性是指现象与其在 GIS 中的表现物的差异,当现象的真值能够被定义时,则术语误差和精度可被用来描述不确定性,但在很多情况下,真值是无法定义的^[1],特别是与人的认知行为相关的处理。现实世界中主要有以下两大类不确定性,一种是随机性,另一种是模糊性^[2]。随机性所描述的事件或现象本身含义是清楚而明确的,可以明确判定该事件是否发生;而模糊性所描述的现象或概念本身是模糊不清的一个具体的对象是否符合一个模糊概念是不能明确判定的^[2]。在 GIS 中,随机不确定性主要表现在空间位置的不确定性。由于 GIS 中空间数据的获取、表达、存储、管理和分析的每个过程都有可能引入新的不确定性,所以 GIS 实际存储、管理和分析的数据是以某种概率分布而随机存在的。大家知道,模糊不确定性主要表现在地理现象边界变化的模糊性,如城乡区域的结合部、土壤类型间的过渡等,而研究空间数据不确定性的主要目的是为了使用 GIS 中的数据、数据模型以及分析处理方法尽可能地与现实世界的现象保持一致,以减少信息损失。

2.2 空间关系的不确定性

空间关系的不确定性可以从现实世界、认知世界、GIS(数字)世界 3 个方面来认识(图 1)。在现实世界中,空间关系的变化是连续的、渐变的,而且既有量的变化,又有质的变化,其空间关系的种类繁多,约束复杂。现实世界中的空间关系给 GIS 提供了研究空间关系的原型。

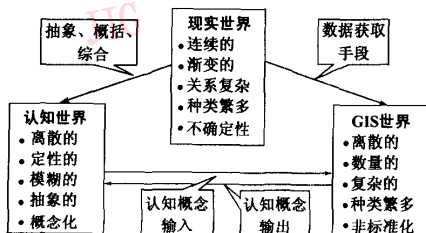


图 1 空间关系在 3 个世界中的特点

在认知世界中,空间关系是人们对现实世界中空间关系的抽象、概括、综合以及总结归纳后产生的结果。由于人们认知能力的有限性,无法也没必要对现实世界中的所有空间关系的各个方面进行建模和表达,因此,在认知过程中,需要利用概括、综合和抽象等手段来简化空间关系。这样,一方面,认知把现实世界中的复杂关系归纳和简化为有限的能被人们识别和处理的空间关系概念,从而给人类的交流、使用以及 GIS 的软件实现带来了方便;另一方面,由于概括和综合,认知世界中一个空间关系概念对应着现实世界中多个实例,现实世界中一个实例对应着认知世界的多个概念,也就是说,认知世界中的空间关系概念集合与现实世界中的实例集合之间是一个多对多的映射关系,而这种映射关系则带来了某种不确定性。

综上所述,由于空间关系在现实世界、认知世界和 GIS 世界表现出不同的特点和表现方式,并且总存在差异,因而也就产生了不确定性。

2.3 空间关系不确定性的来源

空间关系的不确定性主要是由数据的不确定性、认知的不确定性以及空间关系分析处理的不确定性等引起的。

2.3.1 数据不确定性引起的空间关系不确定性

(1) 位置不确定性

GIS 中,图形位置的不确定性主要指由数据获取、表示、分析等引起的空间实体位置坐标与现实世界中相应实体的位置不一致,即 GIS 中存储的坐标往往不是现象的真实坐标,而是以某种概率分布在误差带内。通常,点的不确定性用 ϵ -误差椭圆模型来描述,线的不确定性用 ϵ -误差带模型来描述^[3-5]。由于位置不确定性和属性不确定性的共同作用使得面对象的边界不再是几何意义上的线,而是具有一定宽度的区域^[6,7],从而使得空间关系在边界地区发生变化,但是现有的空间关系的表达方法却很少能处理这种由位置不确定性而引起的空间关系不确定性。

(2) 属性不确定性

属性不确定性可以由位置不确定性引起,如在面对象的边界线附近,由于边界线的随机性而导致了边界附近属性的模糊性^[7]。还有另一种属性不确定性是指对象的边界模糊性,如城乡接合部、土壤类型分布等^[8,9]。这些现象一般可采用场模型来表达,场中的每个像元可以以不同的隶属度隶属于多个对象(分类),

从而解决了精确方法中每个像元只能属于一个对象的缺点。由于每个对象实际上可用一个模糊集来表达,因而称为模糊对象,它是与精确对象相对应的另一种建模方法。设 $\mu(x,y)$ 为场中任意点的隶属度,对于精确对象来说, $\mu(x,y)$ 的值域是 $\{0,1\}$;对模糊对象来说,其值域为 $[0,1]$ 。模糊对象概念虽然解决了传统GIS不能解决的问题,但是却给空间关系表达带来挑战。

2.3.2 认知不确定性引起的空间关系不确定性

由认知引起的空间关系不确定性主要体现为空间关系概念的模糊性。由于GIS不但是对现实世界的建模,同时又是为人类认识和改造现实世界服务的,因而它必须能够正确理解人们的查询和处理意图,又要能够将结果以人们能够理解的形式反映给用户,也就是,GIS必须能够以人们所希望的方式来处理所管理的数据。如果给空间关系的每个概念定义一个函数 $\varphi(o_1, o_2)$,则可建立概念与空间对象 o_1 和 o_2 之间的映射关系。由于在已有的空间定性关系表达中, $\varphi(o_1, o_2)$ 的值域为0(不能用该术语描述)或1(能用该术语描述),因而一对对象间空间关系只能用一个术语描述。由此可见,定性表达是一种等价划分,且各个概念等价类之间不允许重叠,其函数值域是 $\{0,1\}$,但是,人们的认知是有模糊性的,这种模糊性是在认识客观世界的思维反映中形成的^[10]。由于同一对对象间的空间关系可以被多个概念来表示,且有不同的隶属度,因此其函数 $\varphi(o_1, o_2)$ 的值是连续的,可在区间 $[0,1]$ 内取值。这是一种模糊划分,且模糊等价类别(术语)之间有一定的重叠度,如图2中的3个对象,虽都可以用线在面内来描述,但是隶属度却递减。

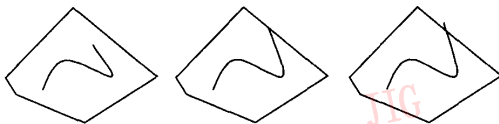


图2 拓扑关系的认知模糊性

人们认知的另一个显著特征就是在谓语前增加修饰语,如“大概”、“基本上”、“差不多”、“完全”等,又如像“对象A完全在对象B的内部”、“对象A与对象B基本相交”等语句。这些都可以归结为空间关系认知的不确定性,它们是通过概念的模糊性来体现的。

2.3.3 空间关系分析处理中的不确定性

空间关系分析处理中的不确定性主要表现为分析处理的模糊性,如在GIS中处理数据时,有些操作往往不是精确的,而是模糊的,因为精确的操作可能得不到所需的结果或者运算本身就是模糊的(如模糊叠加分析),而且有时也没必要进行精确的操作。模糊操作在GIS中有着广泛应用^[9],本文仅讨论涉及到空间关系的模糊操作。通常空间关系在GIS中的应用包括数据检索、数据匹配、关系推理、相似性及完整性判断等,这些运算都可能涉及到模糊性。基于空间关系的数据处理一般可以归结为空间关系相似性问题,并有精确相似与模糊相似之分,其中,空间关系精确相似只有相似与不相似两种状态,而没有相似的程度,这是不合逻辑的,而模糊相似性却可以给出两个空间关系的相似性程度。

若用函数 $S(r_1, r_2)$ 表示空间关系 r_1 和 r_2 之间的一致性程度,则对于精确相似来讲, $S(r_1, r_2)$ 的值域是 $\{0,1\}$,而对于模糊相似来讲, $S(r_1, r_2)$ 的值域是 $[0,1]$ 。另外还可以在模糊相似性定义的基础上,做出进一步的模糊定义,如“空间关系 r_1 与空间关系 r_2 基本相似”、“空间关系 r_1 与空间关系 r_2 完全相似”等。

3 空间关系的研究现状及不足

空间关系一直是GIS中基础理论和方法研究的热点和重点。由于受人们认知的影响,致使人们往往用空间关系术语来描述空间关系,如“东”、“南”等,这种用术语(词语)来描述空间关系的方式称为定性表达。定性表达的关键在于找到空间对象关系特征和空间关系术语之间的映射关系。由于映射的方式不同,从而产生了不同的描述方法。在拓扑关系定性表达方面,以Egenhofer的九交和四交模型^[11~14]为代表;在方向关系的表达方面,则以基于投影和锥形的方法为代表。

3.1 空间拓扑关系

拓扑关系是指在拓扑变换下空间关系保持不变的性质,如平移、旋转和比例变换等。拓扑关系的表达就是用一种形式化的方法来描述拓扑关系,以方便拓扑关系建模、表达和检索。

3.1.1 拓扑关系的定性表达

在定性表达方面,Egenhofer提出了四交和九交模型来描述拓扑关系^[11]。四交模型用两个点集A、B的内部(A°)和边界(∂A)子集是否相交来刻画

两个点集之间的关系,而九交模型则用点集的内部(A°)、边界(∂A)和外部(A^{-})子集是否相交来刻画两个点集间的关系。

Mark 和 Egenhofer 对九交模型所能区别和表达的线/面拓扑关系类型进行了问卷测试^[15,16],实验结果表明,把线/面拓扑关系分为 19 种类型是合理的,在表达线/面拓扑概念时,既不会冗余,也不会不足,但在拓扑概念的表达和区分上却具有缺陷。由于定性表达方法是用点集的内部、外部和边界的相交情况的组合来判断对象间的拓扑关系,且相交情况只有相交(用 1 表示)与不相交(用 0 表示)两种,因此是一种基于二值逻辑的精确表达方法。它的缺点表现在内部、外部和边界的截然分开,由于它是一种精确的等价划分,且 3 者之间没有平滑的过渡区,因而无法表达拓扑关系的认知模糊性。

九交和四交模型另一个缺点在于,无法对边界有一定宽度的情形进行建模,也不能够描述模糊对象间的拓扑关系。针对这个缺陷,Gohn 等人用“蛋黄”方法来描述模糊对象,并进而研究了 46 种模糊面间的拓扑关系^[17]。在该方法中,对象边界是具有一定宽度的带状区域,用它们是否相交来区别不同的拓扑关系,实际上仍然是一种精确性的表达方法。该方法带来的另一个问题是,46 种拓扑关系远远超过了人类所能认知的关系数量,如何把这 46 种拓扑关系聚簇到人们所能认知的关系中去? 这个问题至今未能解决。

3.1.2 拓扑关系的定性相似

空间关系的相似性与空间关系的表达是紧密联系在一起的,而在精确空间关系表达中,由于没有区分量上的差别,故关系相似性只能用概念邻居来表示(图 3 和图 4)。虽然相邻概念之间具有某种相似性,但还是有很大的差异,即使对于同一种概念来说,它们的相似性也不一定是 1,如面/面相交,由于相交面积不同,相似性就会不同,因而相似性是有一

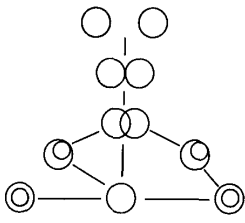


图 3 面/面拓扑关系
概念邻居^[12]

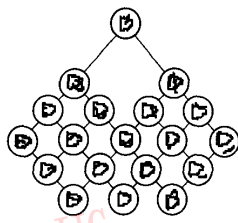


图 4 线/面拓扑关系
概念邻居^[15]

致性程度的,不仅仅是相似与不相似两种状态的问题。概念邻居图不能完全解决拓扑关系的相似性问题,其主要原因是定性拓扑关系没有提供量上的表达,由于概念上相邻的拓扑关系之间没有重叠区域,因而对于重叠区域内和外的关系无法表达和识别,更准确地说,这是由于精确表达引起的,而没有对不确定性进行描述所致。

3.1.3 现有的空间拓扑关系表达方法不足

从空间拓扑关系的研究现状可以看出,现有的空间拓扑关系表达方法有以下几个方面的不足:

(1) 现有的拓扑关系表达方法不能够全面统一地描述影响拓扑关系不确定性的 3 个因素。尽管已经有一些方法用来研究模糊对象间的拓扑关系或精确对象间拓扑关系的模糊表达,但是影响拓扑关系不确定性的 3 个因素是相互作用的,相辅相成的,应该全面描述,而不应分开处理。

(2) 自然语言是交流中经常使用的方法,但现有的拓扑关系表达无法或不能很好地使用自然语言来检索和处理拓扑关系。

(3) 基于概念邻居的拓扑关系相似性是一种精确度量方法,若用概念距离来代替相似性,这是不够的,因为这种方法只能描述概念间粗略的相似性,不能描述细节上的相似性。拓扑关系概念邻居的另一个缺陷是无法描述不确定对象间拓扑关系的相似性。

(4) 由于受精确表达和精确相似的影响,拓扑关系的推理结果也是精确的,不可能是不确定的,因而推理的结果也存在问题。

3.2 空间方向关系

GIS 中空间方向关系研究的是对象在空间中的次序关系。与拓扑关系相比,方向关系还没有一个被广泛接受的定义方法^[19]。精确方向关系表达方法主要有基于投影、基于锥形和基于比例等 3 种,而不确定方向关系则是基于锥形的模糊表达方法。

3.2.1 空间方向关系的精确表达

空间方向关系表达的难点就在于采用何种方法来对参照对象的空间范围进行划分,以使得基于这种划分得到的方向与人们的认知概念较为一致。

(1) 基于锥形的方法

如图 5 所示,基于锥形的方法是将参照对象当作一个点来处理,并按照方向关系的语义分辨率把参照对象所在的空间范围以等角度的方式化为锥形方向区域。一般目标对象与参照对象之间的方向关系是由所有与目标对象相交的方向概念组成的集

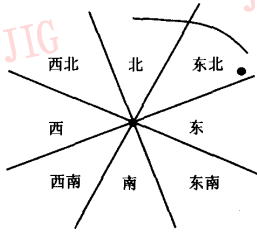


图 5 基于锥形的方向关系

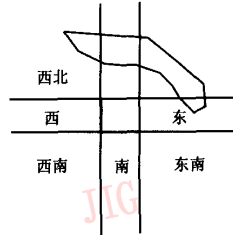


图 7 基于比例的方向关系

合,而基于锥形的方法的缺点则在于无法顾及参照对象的形状和大小。

(2)基于投影的方法

如图 6 所示,基于投影的方法是按照参照对象的外接矩形来对参照对象所在的空间范围进行划分,其所得到的方向区域是规则的。这种带中心区的方向关系表达方法由于增加了“同一”的概念,即表示参照对象与目标对象的外接矩形处于同一位置,因而无法表达其方向关系。与基于锥形的方法相比,基于投影的方法更容易实现,因为它是一种矩形划分方法,所以比锥形方法更自然;此外,它还能估计参照对象的大小。

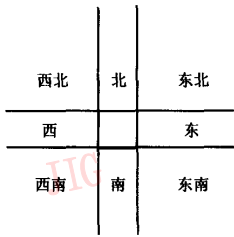


图 6 基于投影的方向关系

(3)基于比例的方法

在不是基于比例的表示方法(包括基于锥形和投影等)中,只要目标对象与方向所在的空间范围相交,就可判定目标对象位于参照对象的某个方位,但实际情况有时与此不一样,尽管相交,但由于目标对象位于参照对象某个方向区域的部分与整个对象相比,可能只是很少一部分,因此它应该不属于该方向或者以较小的可能性属于它。Goyal 提出用一种基于比例的方法来表达方向关系^[18]来解决这个缺陷(图 7),即用目标对象与各个方向区域相交的面积与目标对象面积的比值来表示方向关系。

(4)空间方向关系定性推理

空间方向关系必须是可推理的,即能够根据已知的方向关系推出未知的方向关系。通常空间关系

推理可以用于空间数据的检索,以减少搜索的次数。方向关系可以分为单项方向关系和多项方向关系^[18,20],其中,单项方向关系是指方向关系矩阵中只有一个非空元素,即目标对象只落在某一个方向区域中,而与其他方向区域没有关系;多项方向关系是指关系矩阵中有多个非空元素,即目标对象可以与多个方向区域相交。单项方向关系推理可以用方向组合运算来处理,而多项方向关系的推理则可以用单项方向关系的并集来实现^[18,21]。

3.2.2 空间方向关系不确定表达

Papadias 等基于锥形的方法,利用梯形隶属函数,即用四元组 (a, b, c, d) 来计算两个点间的模糊方向关系,并且让 $b=c$,再以两点间的角度为变量,且相邻方向概念的重叠区域为 45° ,建立了空间方向关系模糊表达方法^[22]。然而由于该方法无法表达点、线、面间的方向关系,也不能在不确定对象和精确对象框架内表达方向关系,因此,还不算完全意义上的方向关系不确定表达方法。

3.2.3 空间方向关系的相似性

Goyal 等人基于关系比例表达方法研究了方向关系的相似性问题,即用方向关系概念邻居图(图 8)来表达方向概念之间的相似性^[18]。该文认为,方向概念间的相似性可以通过从一个概念到另一个概念所经过的最短路径的长度来表示,而概念间的移动是沿着方向关系的概念邻居图连接关系来移动

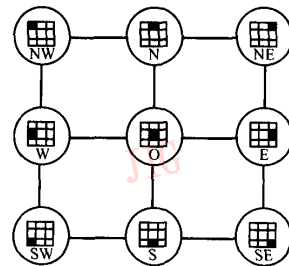


图 8 方向关系概念邻居^[18]

的。如 NW 方向与 N 方向之间的距离为 1, NW 方向与 NE 方向之间距离为 2, 可通过这种概念间的距离来表达方向的相似性。对于一个目标对象跨越了多个方向区域的方向关系来说, 可用目标对象在各个方向区域中所占的面积比例与方向概念间距离乘积之和来表达其相似性。该方法仍然是一种精确方法, 因为它是建立在精确方向关系的表达方法之上的。

3.2.4 现有空间方向关系表达方法的不足

从空间方向关系的研究现状可以看出, 现有的空间方向关系表达方法有以下几个方面的不足:

(1) 方向关系的不确定性受空间数据、关系认知和分析处理等 3 方面的不确定性影响。但现有的方法基本上只是从定性的角度来研究方向关系, 而对于不确定性的 3 个来源则未作全面处理, 也没有把 3 者统一表达。

(2) 不管是基于投影的方法, 还是基于锥形的方法, 方向区域划分都是一种精确的划分方式。由于精确划分方式在相邻的方向区域之间没有平滑过渡区, 在相邻的方向概念之间人为设置了一个跳跃, 从而使得方向概念的表达不符合人的认知。如图 9 所示, 对象 \hat{A} 与 A 位置上很接近, 但却被强行划到两个方向中去, B 与 \hat{B} 也存在同样的情形。

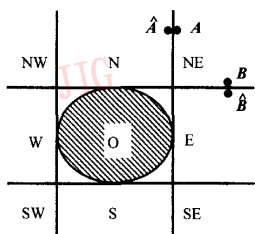


图9 精确方向关系的缺点

(3) 在把目标对象映射到参照对象所划分的方向区域时, 使用的都是基于二值逻辑的精确映射, 即以目标对象是否与参照对象的方向区域相交作为划分函数, 这与人们的认知不符合; 比例方法尽管考虑了量的信息, 但本质仍然是二值逻辑的。

(4) 由于方向概念邻居是定义在精确表达上的, 因而概念邻居在表达方向关系相似性上也存在一些缺陷, 在图 9 中, 从实际情况看, 尽管 A 与 \hat{A} 及 B 与 \hat{B} 比 A 与 B 在方向关系上更相似, 但在概念邻居中, A 与 \hat{A} 及 B 与 \hat{B} 的概念距离都是 1, 而 A 与 B 的概念距离却是 0, 这是不合理的。

(5) Papadias 等人虽然提出了点对象的模糊表达和相似性^[22], 但仅对点对象有效, 而不能表达不确定对象、线、面对象间的方向关系, 并且是基于锥形方法的; 由于投影方法比锥形方法应用更广, 因此有必要进一步研究基于投影的模糊表达方法。

4 空间关系不确定性处理——空间关系模糊表达

空间关系不确定性的处理包括以下两点: 一是能够把空间数据、空间关系认知和空间关系处理等 3 个不确定性在一个统一的框架和基础上表达; 二是能够把精确对象和不确定对象之间的空间关系用一个统一的方式处理。由于现有的空间关系表达方法却把上述两点要么分开处理, 要么当作确定性处理, 因此, 使得表达的结果和实际有较大的差距。

针对现有 GIS 对不确定性空间关系处理的不足, 需要把模糊集原理引入空间关系的表达中, 用来解决空间关系中的模糊性问题。模糊集是对经典集合的扩充, 由于它允许集合元素与非集合元素之间有平滑的过渡, 因而是一种柔性集合。现有的空间对象模型和空间关系表达可以看作是经典集合的, 由于其像元与对象的隶属关系、空间关系实例与空间关系概念的隶属关系、空间关系的相似性等问题, 基本上都是基于二值逻辑的, 其值域是 $\{0, 1\}$, 因此经典集合论无法描述空间关系模糊性; 由于模糊集是一种多值逻辑, 其值域范围是 $[0, 1]$, 因此它能够表达像元与空间对象、空间关系实例与空间关系概念的部分隶属关系。

空间数据的不确定性、空间关系认知的不确定性、空间关系分析处理中不确定性的隶属函数可分别用 $\mu(x, y)$ 、 $\varphi(o_1, o_2)$ 和 $S(r_1, r_2)$ 表示, 而且这 3 者是互相影响、互相作用的, 也就是说, 空间关系不确定性的处理必须全面考虑对象的隶属函数 $\mu(x, y)$ 是如何影响空间关系的隶属度 $\varphi(o_1, o_2)$ 的, 以及空间关系隶属度 $\varphi(o_1, o_2)$ 是如何影响空间关系相似隶属度 $S(r_1, r_2)$ 的。

空间对象 O 、空间关系 R 和关系分析处理 P 可以称为空间关系的 3 个要素。就空间对象而言, 有不确定对象 O_i (包括由位置不确定性引起的边界为具有宽度的对象以及模糊对象) 和精确对象 O_c 之分; 就空间关系而言, 有不确定空间关系 R_i 和精确空间关系 R_c 之分; 就处理方法而言, 有不确定空间处理

P_i 和精确空间处理 P_c 之分。GIS 中空间关系处理可以用迪卡尔积 $O \times R \times P$ 表示,共有 8 个组合,如下式所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} (O_c, R_c, P_c), (O_c, R_i, P_i), (O_c, R_c, P_i), (O_c, R_i, P_c) \\ (O_i, R_i, P_i), (O_i, R_c, P_i), (O_i, R_i, P_c), (O_i, R_c, P_c) \end{array} \right\}$$

(O_c, R_c, P_c) 含义是精确对象间精确空间关系的精确处理,即 $\mu(x, y) \in \{0, 1\}$ 、 $\varphi(o_1, o_2) \in \{0, 1\}$ 、 $S(r_1, r_2) \in \{0, 1\}$; (O_i, R_i, P_i) 含义是不确定对象间不确定性空间关系的不确定性处理,即 $\mu(x, y) \in [0, 1]$ 、 $\varphi(o_1, o_2) \in [0, 1]$ 、 $S(r_1, r_2) \in [0, 1]$ 。其他 6 种情况是 (O_c, R_c, P_c) 和 (O_i, R_i, P_i) 之间的过渡状态。由于精确空间关系精确处理的方式会造成信息损失,不能更真实反映处理的对象和关系;而不确定性空间关系不确定性处理从建模和处理的手段上更符合实际情况,处理过程和结果也比较精确,因而 (O_i, R_i, P_i) 是 GIS 中空间关系处理的最理想方式,它既能够尊重事实,又能提高空间关系表达和分析的精度。

把模糊集思想用于空间关系处理,关键在于空间关系的模糊表达。把对象看作一个集合,而像元与对象的组成关系也就变成了元素与集合的隶属关系,这样像元与对象的部分隶属关系很自然就可以用元素与集合的隶属度来表达,对象也就成了模糊对象(模糊集合),而精确对象是模糊集合的一个特例(集合中所有元素的隶属度为 1)。同样,由于任意一对空间对象间的空间关系可以看作是一个空间关系实例,而一个空间关系概念则可以当作具有相同特征的所有空间关系实例的集合,因此空间关系实例与空间关系概念的关系也就变成了元素与集合的隶属关系。空间关系模糊表达就是根据空间关系实例的特征与空间关系概念的特征来确定空间关系实例与空间关系概念的隶属关系,且允许部分隶属关系存在。另由于一个空间关系实例可以以不同隶属度隶属于多个空间关系概念,因而现有的精确空间关系表达是空间关系模糊表达的一个特例(隶属度为 1)。由此可见,空间关系模糊表达实质上就是确定空间关系实例与每个空间关系概念的隶属函数。在确定空间关系的模糊隶属函数时,应注意以下两个问题:一是隶属函数必须考虑对象的隶属度,这是精确对象与模糊对象统一表达以及对象、关系认知和处理中模糊性统一处理的基础;二是模糊表达的结果要尽量保持与现有精确表达方法的结果一致。

空间关系模糊表达要着重研究空间拓扑关系、

空间方向关系的模糊表达、推理、相似性计算和检索的问题,其主要的研究内容包括:

(1) 研究空间拓扑关系和方向关系的模糊划分方法,解决模糊对象和精确对象空间无法统一表达的问题,以解决数据不确定性引起的空间关系的模糊性;

(2) 研究空间关系模糊表达的隶属函数,充分研究它们的性质以及与现有方法的效果进行对比,进而把空间关系表达函数 $\varphi(o_1, o_2)$ 的值域由 $\{0, 1\}$ 推广到 $[0, 1]$,以解决由认知引起的空间关系模糊性问题;

(3) 根据空间关系隶属函数的性质和隶属度,研究空间关系的模糊相似性问题,并把空间关系相似性函数 $S(r_1, r_2)$ 的值域由 $\{0, 1\}$ 推广到 $[0, 1]$,以解决分析处理中不确定性引起的空间关系模糊性问题;

(4) 虽然模糊表达可以克服定性方法的不足,然而可能增加运算量和复杂性,特别是由于现有的 GIS 软件基本上不具备对模糊数据的处理功能,因而,应加强模糊集理论和方法在 GIS 中应用的基本问题研究,包括 GIS 中模糊隶属函数库管理系统、模糊数据的查询、运算和处理,特别是基于自然语言的空间查询语言,因为它可以直接对模糊数据进行查询和处理。从应用的角度来看,应给现有 GIS 软件扩充模糊建模、分析和处理功能,以提供一个方便的工具。

空间关系模糊表达的优点在于,其不仅能够综合表达定性和定量信息(通过隶属度值的大小来体现),而且能够对模糊对象和精确对象提供统一的处理方式,还能够把空间关系不确定性的 3 个来源统一处理,因而模糊表达将成为空间关系理论研究的重点。

5 结 论

现有的精确空间关系表达基本上不能处理空间关系所固有的不确定性。由于空间对象、人类对空间关系的认知、空间关系的处理等过程中充满了各种特征的不确定性,因而探讨空间关系表达和处理过程中的不确定性问题,对于空间关系在 GIS 中的应用有着重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Goodchild M F. Future directions in geographic information

- science [J]. *Geographic Information Sciences*, 1999, **5**(1): 1~8.
- 2 何新贵. 模糊知识处理的理论与技术[M]. 长沙: 国防工业出版社, 1998.
 - 3 Chrisman N R, Yandell B S. Effects of point error on area calculations: a statistical model [J]. *Surveying and Mapping*, 1982, **48**(4): 241~246.
 - 4 Dunn R, Harrison A R, White J C. Positional accuracy and measurement error in digital databases of land use: an empirical study [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1990, **4**(4): 385~398.
 - 5 戴洪磊. 矢量GIS中位置不确定性度量与传播的理论和方法[D]. 武汉: 武汉测绘科技大学博士论文, 2000.
 - 6 张景雄, 杜道生. 位置不确定性与属性不确定性的场模型[J]. *测绘学报*, 1999, **28**(3): 244~249.
 - 7 刘文宝, 邓敏, 夏宗国. 矢量GIS中属性数据的不确定性分析[J]. *测绘学报*, 2000, **29**(1): 76~81.
 - 8 Stefanakis E, Vazirgiannis M, Sellis T. Incorporating fuzzy set methodologies in a DBMS repository for the application domain of GIS [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1999, **13**(7): 657~675.
 - 9 Altman D. Fuzzy set theoretic approaches for handling imprecision in spatial analysis [J]. *International journal of Geographical Information Science*, 1994, **8**(3): 271~289.
 - 10 陈致宇, 陈世权. 认知思维的模糊性问题[J]. *模糊系统与数学*, 2002, **16**(1): 1~6.
 - 11 Egenhofer M J, Franzosa R. Point-Set topological spatial relations [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1991, **5**(2): 161~176.
 - 12 Egenhofer M J, Al-Taha K. Reasoning about gradual changes of topological relationships [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 1992, **639**: 196~219.
 - 13 Egenhofer M J. A model for detailed binary topological relationships [J]. *Geomatica*, 1993, **47**(3&4): 261~273.
 - 14 Egenhofer M J, Franzosa R D. On the equivalence of topological relations [J]. *International Journal of Geographical Information System*, 1994, **8**(6): 133~152.
 - 15 Mark D, Egenhofer M J. Calibrating the meanings of spatial predicates from natural language: line-region relations [A]. In: *Six International Symposium on Spatial Data Handling [C]*, Edinburgh, Scotland, UK, 1994: 538~553.
 - 16 Mark D, Egenhofer M J. Modeling spatial relations between lines and regions: combining formal mathematical models and human subjects testing [J]. *Cartography and Geographic Information Systems*, 1994, **21**(4): 195~212.
 - 17 Gohn A G, Gotts N M. The 'Egg-Yolk' representation of regions with indeterminate boundaries [A]. In: *Proceedings of GISDATA-Specialist Meeting on Spatial Objects with Undetermined Boundaries [C]*, London: Taylor & Francis, 1996.
 - 18 Goyal R K, Egenhofer M J. Similarity of direction relations [A]. In: *Seventh International Symposium on Spatial and Temporal Databases [C]*, Los Angeles, California, USA, 2001: 36~58.
 - 19 Papadias D, Theodoridis Y. Spatial relations, minimum bounding rectangles, and spatial data structures [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1997, **11**(2): 111~138.
 - 20 曹茵, 陈军, 杜道生. 空间目标方向关系的定性扩展描述[J]. *测绘学报*, 2001, **30**(2): 162~167.
 - 21 Skiadopoulos S, Koubarakis M. Composing cardinal direction relations [A]. In: *Seventh International Symposium on Spatial and Temporal Databases [C]*, Los Angeles, California, USA, 2001: 299~317.
 - 22 Papadias D, Karacapilidis N, Arkoumanis D. Processing fuzzy spatial queries: a congruence similarity approach [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1999, **13**(2): 93~118.



杜世宏 1975年生, 2001年获武汉大学硕士学位, 现为中国科学院遥感应用研究所地图学与地理信息系统专业博士生。研究方向为空间关系、空间推理、空间数据模型及相关应用开发。



王桥 1957年生, 南京师范大学特聘教授, 博士生导师。主要研究方向为环境地理信息系统和环境遥感。已发表论文40余篇, 出版专著4部。