

定性空间表示与定性空间的研究与发展^{*}

刘亚彬^{1,2} 刘大有² 王 飞³

(上海财经大学信息管理系 上海200433)¹ (国家教育部符号计算与知识开放实验室 长春130023)²

(复旦大学计算机科学与工程系 上海200433)³

Research and Development of Qualitative Spatial Reasoning and Representation

LIU Ya-Bin LIU Da-You WANG Fei

(Department of Information Managing, Shanghai University of Finance & Economics, Shanghai 200433)¹

(Lab of Symbol Computing & Knowledge Opening, Ministry of Education, Changchun 130023)²

(Department of Computer Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433)³

Abstract This paper first discusses some possible applications of qualitative spatial reasoning, then surveys the main aspects of the representation of qualitative spatial knowledge including ontology, topology distance, orientation and shape.

Keywords Qualitative spatial reasoning, Qualitative spatial representation

1 引言

空间推理是指利用空间理论和人工智能技术对空间对象建模、描述和表示,并据此对空间对象间的空间关系进行的定性或定量的分析和处理过程^[1]。

在描述和推断空间对象间的空间关系时,要获得精确、定量的数据通常是不可能的或不必要的,在这种情况下,可能要用到关于空间关系的定性空间推理^[2]。定性空间推理是一个领域,定义了近年来领域研究人员的共识,其中最重要的是空间对象间空间关系的推理,在很多情况下,这些关系的定量信息是不精确的。由于空间提供了非常丰富的结构,空间的许多不同方面,例如距离、方向、形状或拓扑结构可以被视为定性方法^[2,3]。

2 本体论

在发展空间理论的过程中,研究者可从根据预期的应用领域来建立纯粹的空间理论或应用理论。我们将主要集中讨论纯粹的空间理论,因为这种纯粹的空间理论的发展必然优先于基于纯粹空间理论的应用理论的发展。

传统上,在数学空间理论中,点(或点和线)被视为空间实体的基元,诸如区域之类的扩展空间实体可以被视为点集。可是,在空间推理领域中,则倾向于将空间区域视为空间实体的基元,这样做的理由是:首先,如果有人利用空间理论对物理对象进行推理,那么他可能会坚持认为任何实际物理对象的空间延伸必定类似于区域,而不会类似于更低维的实体;其次,大多数自然语言(非精确的)提及的“点”也不是精确的点,第三,如果需要,研究者可以通过区域来定义点^[4]。

本体论的另一个问题是什么是嵌入空间的本质?按照惯例,研究者可以将嵌入空间的本质视为 R^n 。但研究者可以想象应用是在离散、有限或非凸的领域内,这样做可能对我们的

实际应用更有帮助。

一旦研究者对这些本体论问题做出决定,便产生了进一步的问题:允许哪些“计算”基元?在逻辑理论中,相当于判定没有定义而仅通过某些公理集约束的情况下得到承认的非逻辑的基元符号。有的研究者主张这些基元集应该是小规模,这不仅是为了数学上简洁和理论一致性评估上简单,也是为了把符号系统界面简化为一个能减少这些基元的感性部件。相反的主张认为由此产生的符号推理可能更加复杂,因为基元集不是只包含几个元素中的集合,而是个庞大且丰富的概念集合,这些概念的含义是通过众多的以不同的途径相联系的公理给出的。

我们将提到的最后一个本体论问题是如何为多维空间建模?一个方法是分别地考虑每一维,每个区域分别向每一个维上做投影,然后在每一维上进行推理。此方法的不足是二个实际上不重叠的个体,它们的投影却可能重叠在一起。

3 拓扑结构

拓扑结构是空间的最为基础的方面,拓扑结构通常被非正式地描述为“橡胶板几何结构(rubber sheet geometry)”,尽管这样描述并不十分准确。拓扑结构已经成为定性空间推理的一个基础方面,因为拓扑结构就可以产生定性特性。由此引出的一个问题是:是否可以简单地把传统的数学拓扑理论完全照搬到定性空间表示中?尽管各种各样的定性空间理论都受到数学拓扑结构的影响,但仍有许多理由可以说明为什么完全照搬通常是不合乎需要的^[5]。首先,传统的拓扑学研究的是如何对物理空间或应用空间进行抽象,以得到更加抽象的空间;其次,在定性空间推理过程中,我们感兴趣的是不精确的表示,这种不精确的表示在数学领域上和实际应用中很少受到关注,因为典型的公式表示方法涉及高阶逻辑,没有合适、直观的计算机制。

^{*} 本文研究得到国家自然科学基金(空间推理和空间知识表示研究及应用69883003)、国家863高科技项目基金(农业专家系统开发平台863-306-ZB05-01-2)和吉林大学符号计算与知识工程国家教育部开放实验室基金的资助。刘亚彬 副教授,博士,主要研究方向为知识工程和空间推理。刘大有 教授,博士生导师,主要研究领域为知识表示和知识工程、agent 系统、空间推理、专家系统和 GIS。

定性空间推理遵循早期拓扑理论的一个例外是在哲学逻辑文献中发现的工作,在这些工作中,建立了以区域(而不是点)为空间实体基元的拓扑空间的公理理论,这个惯例被描述为“无点几何学”^[6]。特别是 Clarke 的工作使所谓的 RCC 系统得以发展。

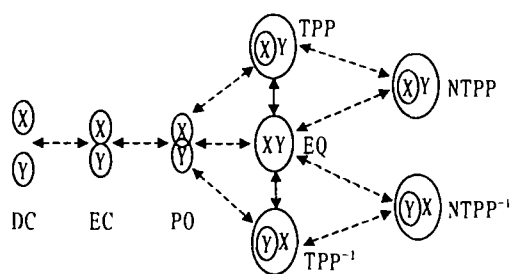


图1 RCC-8演算

Clarke 用 $C(x,y)$ 表示两个区域 x 和 y 是相互连接的,所谓连接是指两个由点集构成区域共享一点。在 RCC 系统中,这种解释被稍做改动为:共享一点的区域的闭包,改动后的解释有助于区分区域、区域的闭包和区域的内部之间的区别。图1中说明了著名的 RCC-8 演算^[7],在 RCC-8 演算中,使用8个穷举、成对并且不相交(JEPD)的关系来描述两个空间区域之间的拓扑关系。

3.1 拓扑结构的谓词表示

可以利用谓词 $C(x,y)$ 来定义比 RCC-8 演算中的谓词 $WC(x,y)$ 更多的谓词。例如,可定义计算两区域接触次数的谓词。Gotts 从事区分“油炸圈饼”(只有一个洞整块区域)的工作^[8,9]并发表了一系列文章。在此过程中,它依据基本 $C(x,y)$ 定义了许多谓词,例如,严格相切和非严格相切的区别(FTPP)。

3.2 拓扑结构的“n-交集”表示

拓扑关系表示和推理的另一种方法是“n-交集”表示^[10,11],在这种表示方法中,每一个区域都与三个点集联系在一起,这三个点集分别是区域的内部、区域的边界和区域的补。两区域间的关系可以通过用一个被称9-交集的 3×3 的矩阵来刻画,矩阵的每个元素表示来自每个区域的相应的集合的交集是否为空。实际上,利用一个更为简单的 2×2 的4-交集矩阵就可以充分地描述 RCC-8 关系了,可是, 3×3 的矩阵允许表示更多的顾及到区域和嵌入空间之间关系的集合。

“维扩展方法”^[12](DEM)允许枚举所有的区域之间,线之间和点之间的关系。“基于演算的方法”^[13](CBM)定义了很多种可能的关系,所有这些关系都产生于实体对 x 和 y 之间的5种有多种组合形式的二元关系集合,这5种二元关系分别是“不相交”、“接触($a/a, l/l, l/a, p/a, p/l$)”、“在...内”、“重叠($a/a, l/l$)”和“交叉”; α/β 表示参数约束用符号,例如, a/a 表示两个参数是区域型的, p/p 表示两个参数是点型的, l/l 表示两个参数是线型的;此外,引入了表示区域边界的操作符和表示非闭线的两个端点的操作符;将上述5种关系之一形成的原子命题组合起来可一形成 x 和 y 之间的复合关系,通过最具表达力的演算,得到了共计81种关系,其中,有9种区域/区域关系,31种线/区域关系,3种点/区域关系,33种线/线关系,3种点/线关系,2种点/点关系。

3.3 拓扑结构和充分度量空间表示

虽然拓扑结构是最抽象和最定性的表示,但在很多定性空间推理领域中,仅有拓扑结构的定性信息是不够的,还需要

其它的定性信息。下面我们讨论其它的定性信息。

·方向 方向既可以作为一个定量属性,也可以作为一个定性属性,例如,2维空间中常提到的顺时针方向或逆时针方向。方向与空间实体上拓扑关系的不同之处在于方向不是一个二元关系,为了给出两个元素之间的方向,至少要指定3个元素(在2维以上的空间中可能要指定更多的元素)。

如果我们要说明主体 PO(primary object)相对于参照物 RO(Reference Object)的方向,那么就需要某个基准框架 FofR(Frame of Reference)。一个外在的基准框架强加了一个外部的、不可改变的方向,例如万有引力或一个固定的坐标系。一个直接指出的基准框架是基于“说话者”或内部观察者的。一个内在的基准框架利用了 RO 的某些固有属性,例如人、建筑物和船。

某些方向演算要么需要显式的三元组形式的关系,要么必须预先假定一个外在的基准框架,例如,以指南针指示的方向为外在的基准框架。在显式的三元组形式的关系中,特别值得一提的是 Schlieder 的工作^[14],他开发了一种演算方法,可以将三元组映射为三个定性的值+、0、-中的一个,+、0和-分别表示逆时针方向、共线方向和顺时针方向。

另一个重要的三元组形式的方向演算是 Roehrig 演算^[15],这种演算方法是基于一个关系 CYCORD(x,y,z)的,当 x,y 和 z 顺时针转动时,CYCORD(x,y,z)为真(在2维空间中)。Roehrig 还说明了大量定性演算(不仅仅是方向演算)是如何被转化为 CYCORD 系统的,CYCORD 系统可以作为一个推理系统来使用。

·距离和大小 传统上,距离通常被视为一维的概念,而大小通常则与面积或体积之类的更高维的度量联系在一起。我们首先讨论纯粹的空间表示方法,这些空间表示方法可以划分为二类:一类是用某种“绝对”标度来度量的表示方法,另一类是提供某种相对度量的表示方法。

“相对”表示是在空间推理领域中发展起来的,它首先出现在 de Laguna 提出的演算中^[16],引入一个三元组形式的基元 CanConnect(x,y,z),当物体 x 通过简单的平移就可以与 y 和 z 相连时,这个基元为真。通过这个基元可以非常容易地定义诸如“距离比...更进”、“距离比...更远”之类概念。这个基元还可以定义关于区域的简单的大小度量,如果一个区域可以连接到另一个区域不能连接的区域,那么这个区域就比另一个大。另一个确定两对象相对大小的方法是由 MuKerjee 和 Joe 提出来的^[17],首先平移区域,再开发拓扑关系,即如果存在一个能够使一个区域成为另一个区域的一部分的平移,那么这个区域一定更小。有趣的是,似乎只有 MuKerjee 和 Joe 提出来的表示方法是以区域作为空间实体基元的,而这部分提到的其它表示方法都是以点作为空间实体基元的。另外一个有趣的问题发生在度量两个区域之间的距离的时候,在上述形式方法中是选择最短距离作为两个区域之间的距离,但是也可以选择质心间的距离作为两个区域之间的距离,或选择其他特殊子区域或点之间的距离作为两个区域之间的距离。

不同标度的空间可能需要不同的定性距离演算或基准框架 FofR。有四种主要的与人体有关的标度空间,它们分别是有形空间(figural space)、远景空间(vista space)、环境空间(enviromental space)和地理空间(geographic space)。有形空间(figural space)小于人体并且无须移动就可察觉的空间,例如,桌面空间和画面。远景空间(vista space)与有形空间类

似,但是比人体大的空间并且更易变形。环境空间(environmental space)是一种如果不从一个位置移动到另一位置就不能被感知的空间。地理空间(geographic space)不能通过移动完全理解的空间,需要通过一张(有形空间)图来间接感知。从一种标度或环境转移到另一种标度或环境的一个明显效果是诸如“近”之类的定性距离项将会发生很大变化,甚至某些环境或空间中的距离会有很多“非数学的”表现形式,例如距离可能是非均匀的,有时距离是用旅行所用的时间来度量的,而上坡旅行用的时间要比下坡旅行用的时间长。当利用旅行的时间来度量距离时,距离很容易变成非各向同性的,即与实际距离相比,沿某一方向的旅行与实际的距离可能花费更多或更少的时间,例如一条东-西向的高速公路将会缩短东西向的旅行时间。另一个“数学失常”是一定的范围内两点间的最短距离可能不是直线段,例如可能有湖或建筑物的阻挡。

•形状 空间理论构成了一个分层次的表示结构,其顶层是拓扑结构,底层是度量/几何理论。在纯粹拓扑理论中,只能构成有限的关于区域形状的命题,例如,区域是否有洞或者区域是否整块的。

但是,如果一个应用要求更详细的纹理区别(grained distinction),仅有拓扑结构是不够的。有很多方法可以扩展带有某些形状基元的同时仍保持定性表示的拓扑结构。虽然数学领域还有许多不同于欧几里得几何结构的几何结构,例如投影几何结构,但是还没有用于这些几何结构的有效的计算推理技术。定性空间推理领域刚刚开始研究各种可能性,下面我们对一些方法做简要描述。

对这些应用进行分类的方法有很多,约束区域可能形状的技术和根据形状简单的区域构造形状复杂的区域的技术之间是有区别的。例如,对象边界的描述包括顺序不同的边界段的分类,边界段的分类包括向内弯曲还是向外弯曲和向内倾斜还是向外倾斜等。前者的一个相关方法是在对象边界上取特征点,并且把这个特征点与它的三元组联系起来,值得注意的是这里提到的三元组与定性方向演算中描述的三元组类似,即形状描述是由一个- / 0 / + 符号序列组成的,每特征点对应一个三元组。前者的另一个方法是利用斜率投影的方法来描述多边形的形状,即描述每个角的凸/凹、钝角/直角/锐角和方向的定性描述。

后者的方法之一是构造一个形状抽象基元,例如,构造一个边界框形状抽象基元或者凸壳形状抽象基元。这两种技术在n-交集模型中都是容易实现的,后一种技术在RCC演算也有广泛的应用。凸凹区域之间的区别是形状描述中的基本方面。RCC理论已经证明,如果有了区域凸壳的概念或检验凸形状的谓词,并且把它与拓扑表示相结合,就可定义很多重要的谓词。通过计算形状本身和凸壳与形状间的差别的不同部分之间的拓扑关系,就可以区分很多种不同的凹形。这种技术的精髓是利用递归的形状描述的思想来描述非凸的不同于凸壳和形状之间的区别。还可以开发许多JEPD谓词集合来把直接利用凸壳功能得到区域对联系起来,这种谓词给出了另一种形状描述的方法,即通过指定本区域与其他区域的关

系来约束一个区域的形状。

参考文献

- 1 刘亚彬,刘大有.空间推理与地理信息系统综述.软件学报,2000,11(12):1598~1606
- 2 Renz J, Nebel B. On the Complexity of Qualitative Spatial Reasoning: A Maximal Tractable Fragment of the Region Connection Calculus. Artificial Intelligence, 1999, 108(1-2): 69~123
- 3 <http://agora.leeds.ac.uk/spacenet/spacenet.html>
- 4 Biacino L, Gerla G. Connection structure. Notre Dame Journal of Formal logic, 1991, 32(2)
- 5 Gotts N M, Gooday J M, Cohn A G. A connection based approach to common-sense topological description and reasoning. The Monist, 1996, 79(1): 51~75
- 6 Gerla G. Pointless Geometries. In: F Buekenhout, ed. Handbook of Incidence Geometry, chapter 18. Elsevier Science B V, 1995. 1015~1031
- 7 Renz J, Nebel B. On the Complexity of Qualitative Spatial Reasoning: A Maximal Tractable Fragment of the Region Connection Calculus. Artificial Intelligence, 1999, 108(1-2): 69~123
- 8 Gotts N M. Topology from a single primitive relation: define topological properties and relation in terms of connection; [Technical report, Report 96. 23]. School of Computer Studies. University of Leeds, 1996
- 9 Gotts N M, Googay J M, Cohn A G. A connection based approach to common-sense topological description and reasoning. The Monist, 1996, 79(1): 51~75
- 10 Clementini E, Sharma J, Egenhofer M J. Modeling topological spatial relations: strategies for query processing. Computer and Graphics, 1994, 18(6): 815~822
- 11 Egenhofer M. A formal definition of binary topological relationships. In: W Litwin, H Schek, eds. Third Intl. Conf. on Foundations of Data Organization and Algorithms (FODO), volume 367 of LNCS, Springer Verlag, 1989. 457~472
- 12 Clementini E, Felice P D. A comparison of methods for representing topological relationships. Information Sciences, 1995, 3: 149~178
- 13 Clementini E, Felice P D, Oosterom P. A small set of formal topological relationships suitable for end user interaction. In: D Abel, B C Ooi, eds. Proc. 3rd Int. Symp. On Large Spatial Databases, SSD, number 692 in LNCS, Springer, 1994. 277~295
- 14 Schieder C. Representing visible location for qualitative navigation. In: N Piera Carrete, M G Singh, eds. Qualitative Reasoning and Decision Technologies, Barcelona CIMNE, 1993. 523~532
- 15 Rohrig R. A theory for qualitative spatial reasoning based on order relations. In: AAAI-94: proc. of the 12th National Conf. on AI, volume 2, Seattle, 1994. 1418~1423
- 16 De Laguna T. Point, Laguna D, Point. T. line and surface as sets of solids. The Journal of Philosophy, 1992, 19: 449~461
- 17 Mukerjee A, Joe G. A qualitative model for space. In: Proc. AAAI-90. Los Altos, Morgan Kaufmann, 1990. 721~727