

11-13

定性空间推理的研究与进展

Researches and Development of Qualitative Spatial Reasoning

TP18

廖士中

(辽宁师范大学计算机科学系 大连116029)

石纯一

(清华大学计算机科学与技术系)

摘要 Qualitative spatial reasoning (QSR) is an Artificial Intelligence (AI) approach to dealing with the representation and reasoning of common sense spatial knowledge. In this paper, based on the analysis of previous works and the summary of our works on QSR, first, the development, the relevant research fields, the main methods, and the key problems of QSR are presented. Then, the open problems and directions of further QSR research are put forward.

关键词 Qualitative spatial reasoning, Qualitative reasoning, Spatial reasoning

定性空间推理是人工智能学科处理常识性空间知识的一种方法^[1],其推理任务包括^[2],推导知识库中的隐含知识;针对给定的部分知识或特定的上下文回答询问;维护一致性;获取新知识特别是认知图;定性场景描述的可视化。

空间知识的表示和处理是认知科学和人工智能研究的中心问题。由于空间知识和空间推理本质上是定性的^[1,2],因而定性空间推理是表示并处理空间知识的一种有效方法,它的研究不仅具有重要的理论意义,同时也具有广泛的应用前景,近几年受到普遍的重视。

1 发展过程

有关定性空间推理的研究工作始于70年代末。1977年,de Kleer 在 NEWTON 系统中研究了滑车运动轨道的定性表示和推理方法。同年,Kuipers 在博士论文“大规模空间知识的表示”中提出了机器人导航的 TOUR 模型,将空间知识组织成感知运动、过程、拓扑和度量四个层次。1978年 Hayes 采用公理化的方法表示容器的形状。1980年,Forbus 在 FROB 系统中,提出了度量图式(metric diagram)和场所描述(place vocabulary)的概念,并在以后的工作中明确指出 MD/PV 模型是空间推理的基本框架。1983年,Allen 给出了基于区间的时态逻辑及基于约束传播的推理算法。

80年代后期,Forbus, Falting 和 Nielsen 等开展了定性运动学和定性空间推理的研究工作,从此定性空间推理作为一个独立的研究领域日益受到人们的重视^[3]。1992年,Freksa 提出了概念邻域的概念,指出了定性空间推理研究的重要性。1994年,Hernandez 总结了定性空间推理的早期工作^[2]。近几年,AAAI、IJCAI 和 COSIT 等会议上,定性空间推理研究工作都受到了重视,IJCAI'93、IJCAI'95和 IJCAI'97会议上还专门举办了有关定性空间推理的研

班。

现在,定性空间推理的研究涉及空间知识的拓扑、距离、朝向、形状、路途、时间、运动、语言学、认知科学、空间描述的可视化等方面,对空间知识与时间、因果性和动力学的集成也予以了足够的重视,探索出了公理化、代数、几何约束满足、基于模型的推理等基本方法,并在导航、地理信息系统、工程设计、定性物理、空间数据库和图形图象等领域进行了应用研究^[1,2]。

2 相关领域

与定性空间推理密切相关的领域是定性推理和空间推理。定性空间推理是定性推理的重要组成部分,空间推理本质上是定性的。

2.1 定性推理

定性推理的主要特点包括:①针对具体问题仅作必须的表示和推理;②是欠确定的(underdetermined)和上下文有关的;③允许以不同的粒度、在多个抽象层次上进行推理;④在知识不完全和不确定的情况下可以推导出结论。由此可见,定性推理不仅能够表示、处理深层次知识,提供问题求解的上下文,还能够在知识不完全和不确定的情况下给出问题合理的解,定性推理弥补了定量推理的不足。

定性推理研究始于70年代末80年代初,初期工作注重基本方法的研究,总结出了三个基本方法:ENVISION、QPT 和 QPC/QSIM。后来提倡把定性推理应用到实际任务中去^[3,4]。近几年,定性推理研究不仅有了实质性的应用,而且加强了基础研究,在理论体系的完备性和有效性、定性和定量的集成、时间、空间、因果性、以及概念邻域结构等方面开展了深入的工作,这些工作进一步揭示了定性和定量的关系问题,指出了粒度、抽象层次和观察者在定性推理中的核心地位^[1,4]。

国外,定性推理已在诊断、仿真、地理信息系统、

机器人导航以及图形图象分析与处理等领域得到了应用;国内,定性推理也针对气象预报和控制等领域进行了研究^[1,2]。

2.2 空间推理

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,空间推理的研究工作可分为四类^[2]: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。

80年代,由于计算机图形学、计算机视觉、图象处理、机器人学、计算复杂性、空间数据库、自然语言处理和专家系统等领域都需要研究空间知识的表示和处理,因而形成了空间推理这一新的专门的研究领域。它的研究范围涉及计算机视觉、空间任务规划、移动机器人导航、大型数据库的表示和索引技术、几何约束推理和符号推理的集成、不确定空间证据的积累、多传感器数据的融合、运动学等。

近几年,人们逐渐认识到:空间推理本质上是定性的,空间推理的关键是形状的定性表示^[1,2]。

3 基本方法

定性空间推理的基本方法包括公理化方法、代数方法、几何约束满足方法和基于模型的推理等^[1],下面予以介绍。

3.1 公理化方法

空间知识的公理化描述是 Hayes 提倡的。这类工作大都以逻辑或部分学(mereology)为基础,选择一组基本的关系和谓词,建立一类空间概念或空间关系的公理和推理规则,以此表示并处理定性的空间知识,其中有代表性的工作是空间的 RCC 理论。

RCC 理论是英国 Leeds 大学的 Randell, Cohn 和 Cui 从 1989 年起逐渐创立的空间逻辑理论,该理论基于“连结”关系定义了空间区域间的 8 种关系,并把区域间的和、交、补、以及凸包运算定义为公理系统中的函数。其他研究者进一步发展了这一工作。1993 年, Galton 改进了 Allen 提出的时态逻辑,使之可以处理连续性,并将它同 RCC 结合起来,提出了一种能够表示并处理时间、空间和运动的集成逻辑。1995 年 Asher 和 Vieu 利用部分学和拓扑学概念,建立了一个关于空间推理的具有完整语义描述的完备公理系统。RCC 理论已在定性仿真领域得到了应用,并在拓扑关系和形状的定性表示方面受到研究者的重视。

3.2 代数方法

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。

代数方法是 Allen 在基于区间的时态逻辑理论中提出来的,后人将这一方法应用到定性空间推理

领域,并从空间关系集、代数运算及应用等方面发展了这一方法。如,将一维区间推广到多维情形,容许空间关系是点、线和区域之间任意关系,引入新的代数等。这些研究工作涉及到空间知识的各个方面,其中既有理论分析探索性的工作,也有面向实际应用性的工作。

后来有二项重要工作。1992 年, Freska 在基于半区间的时态逻辑中,提出了概念邻域、粗细知识的表示和推理的问题。1994 年, Rohrig 提出了空间推理的序理论,他认为可以在空间关系集上建立序结构,利用序关系的传递性实现推理步骤。这些工作发展了代数方法,并对定性空间推理乃至定性推理的研究产生了影响。

3.3 几何约束满足方法

在代数方法中,所应用的约束满足方法过于一般,不能有效地解决运动学问题。几何约束满足方法从空间的几何性质、空间的层次结构以及空间的功能划分来定义约束和相容性,从而能较有效地解决运动学中的问题。

1990 年和 1992 年, Kramer 提出了基于自由度分析的几何约束满足方法。这是一种关于几何的符号推理技术,使用一组规划段来说明、改变几何体(geom)的配置,规划段使用固定的一组操作和自由度,能够在满足新的约束的同时保留以前的约束。1994 年, Bhansali 和 Kramer 进一步研究了规划段的自动生成问题。

表示并利用领域结构是几何约束满足方法的重要工作。1993 年 du Verdier 在利用几何约束满足方法研究空间规划问题时,表示并利用了位置关系和朝向关系的序结构;1994 年 Hernandez 在利用几何约束满足方法研究位置关系时,考虑了位置关系的概念邻域结构,提出了抽象图的表示方法。这些工作丰富发展了几何约束满足方法。

3.4 基于模型的推理方法

模型既指思想模型也指物理模型。基于模型的空间推理方法首先要给出相关空间概念和空间关系的模型。下面介绍位形空间和符号投影串二种模型。

位形空间首先用于路径规划,以后广泛用于机械机构的推理。在位形空间中,运动物体可表示成一个点,并用该物体的点集和其他物体点集的闵可夫斯基和来表示其它物体。这样,路径规划问题就归约为位形空间中点的可视性问题和位形空间的连通性问题。定性空间推理进一步研究了位形空间的拓扑结构、定性表示方法以及增量式的建构过程,并以位形空间为基础提出了定性运动学和定性空间推理的 MD/PV 框架。

符号投影串是物体空间布置和位置关系的一种定性表示方法。平面中的物体可沿水平、垂直二个方向投射到坐标轴上,投影点及其位置关系构成了称

为符号投影串的二个串。符号投影串是张系国作为空间数据库的图标索引提出来的。用于定性空间推理领域后,又提出了斜率投影串,可用于形状的定性描述和定性匹配。

一旦有了模型,实现推理就方便了,甚至可以吧定性空间推理问题转化为基本的定性推理问题,利用定性推理的三个基本方法推导结论。

4 重要问题

拓扑推理是定性空间推理的基本问题,形状的定性表示是空间推理的关键^[1],因而关于拓扑推理和形状的定性表示的研究是定性空间推理的重要问题。

4.1 拓扑推理

拓扑关系是基本的空间关系,拓扑推理即是关于空间物体间拓扑关系的推理,推理时一般采用代数方法,如 Allen、Smith、Hernandez 等人的工作。拓扑推理代数方法的基础是拓扑关系的完备集和复合表。虽然拓扑关系的4-交集模型和 RCC 理论定义了8种拓扑关系,但没有指明其适用范围,复合表也是人工构造的。

Cohn 指出,空间关系的概念邻域和复合表的自动计算是定性空间推理面临的挑战问题^[5]。针对拓扑推理中的这一问题,文[1]中提出了拓扑关系 (n, n) 完备集的概念,指出了4-交集模型和 RCC 理论所定义的8种拓扑关系对同维的实体是有效的、完备的,建立了拓扑关系的闭球模型,基于闭球模型可推导出拓扑关系的概念邻域和复合表。文[1]中进一步给出了一种基于概念邻域的层次拓扑推理方法。

4.2 形状

定性空间推理中有关形状的早期研究工作大都是面向具体问题的,并用一些简单理想的形状,如内外接多边形、圆等来表示物体的形状。后来也发展了一些较系统的一般方法,如斜率投影串、基于 RCC 理论的形状公理体系和骨架等方法。

Jungert 提出的斜率投影串是符号投影串的改进,它是沿二条倾斜的直线将物体区域投影到坐标轴上所生成的二个串,串中包含了区域在坐标轴上投影的边界点及其间的位置关系。符号投影串给出了物体形状的一种定性表示,可用于物体形状的定性匹配。这种方法比较简单且在空间数据库中得到了应用,但缺乏认知合理性。

RCC 理论是描述空间关系的一个公理体系,其基础是区域的连通性,起初用于拓扑关系的描述,加人凸包算子后可给出形状的定性描述,并能够根据凸包集合的并和差运算实现形状不同粒度的层次化表示。基于 RCC 理论的形状公理体系的目标是简单性和完备性,它表明了形状定性表示的可能性和存在性。

骨架是表示形状的一种重要方法。由于骨架结

合了形状轮廓和轮廓所包含的区域二方面的信息,保留了形状原始的连通性,给出了形状1-1对应的简洁描述,因而在形状分析和计算机视觉的高层处理中得到了广泛的应用,并发展了若干骨架化算法。已有的骨架化算法大致可以分成五类:直接模拟“燎原大火”法、解析算法、拓扑细化法、距离图法、Voronoi 图式法。

Voronoi 图式是计算几何研究的基本对象和工具,有着广泛的应用背景。由于 Voronoi 骨架保留了形状原始连通性,具有精确的欧氏度量和高效的计算算法,同时较有认知合理性,因而近几年受到了重视。如 Tagare 关于空间布置的定性表示方法,Mayya、Ogniewicz 等人关于形状的层次骨架表示方法等。文[1]中提出了定性 Voronoi 骨架的概念,给出了混合边界多连通形状和布置一种统一的定性表示方法,发展了 Tagare、Mayya、Ogniewicz 等人的工作。

结语 本文介绍了定性空间推理的发展过程、相关领域、基本方法和重要研究问题。进一步研究工作包括:(1)定性空间推理一般框架的研究。Forbus 提出的 MD/PV 框架不能以不同的粒度/抽象层次来表示并求解问题。Rohrig 提出的空间推理序理论只适用于一维区间、二维方位和包含关系的表示和推理。[1]中提出了一种分层逼近的一般框架,并基于这一框架研究了拓扑关系和形状的定性表示和推理,该框架对其他空间关系是否适用尚需进一步研究。(2)单个空间关系或概念的定性表示和推理的深入研究,如不同维对象拓扑关系的表示和推理方法,定性形状的分类和匹配等。(3)不同空间关系或概念的集成方法研究,如集成拓扑关系和方位关系可以给出位置关系,集成拓扑关系和邻近关系可以表示形状等。一般地,空间关系可以分成拓扑关系、射影关系和度量关系三类,它们之间的集成研究是有意义的,这方面的工作还不多。(4)空间知识与其他知识的集成方法研究,如与时间、因果性、动力学等知识的集成。这种集成是定性推理系统乃至一般的基于知识的系统所需要的。

参考文献

- [1]廖士中,定性空间推理分层逼近方法研究,[博士学位论文],北京,清华大学计算机科学与技术系,1997
- [2] Hernandez D., Qualitative representation of spatial knowledge, LNAI 804. Berlin, Springer-Verlag, 1994
- [3] Weld D. C., de Kleer J., eds., Reading in qualitative reasoning about physical systems, San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, 1990
- [4]石纯一、陈见、赵永等,定性推理进展,模式识别与人工智能,6(2)1993
- [5]Cohn A. G., The challenge of qualitative spatial reasoning, ACM Computing Surveys, 27(3)1995