

时空推理研究进展*

刘大有^{1,2}, 胡鹤^{1,2,3+}, 王生生^{1,2}, 谢琦^{1,2}

¹(吉林大学 计算机科学与技术学院,吉林 长春 130012)

²(吉林大学 符号计算与知识工程教育部重点实验室,吉林 长春 130012)

³(中国人民大学 信息学院,北京 100872)

Research Progress in Spatio-Temporal Reasoning

LIU Da-You^{1,2}, HU He^{1,2,3+}, WANG Sheng-Sheng^{1,2}, XIE Qi^{1,2}

¹(College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China)

²(Key Laboratory of Symbolic Computing and Knowledge Engineering of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130012, China)

³(School of Information, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

+ Corresponding author: E-mail: luckh2@163.com, http://www.jlu.edu.cn

Received 2003-09-01; Accepted 2004-03-29

Liu DY, Hu H, Wang SS, Xie Q. Research progress in spatio-temporal reasoning. *Journal of Software*, 2004,15(8):1141~1149.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1141.htm>

Abstract: Temporal and spatial reasonings are two important parts of Artificial Intelligence and they have important applications in the fields of GIS (geographic information system), Spatio-temporal Database, CAD/CAM etc. The development of temporal reasoning and spatial reasoning is discussed from three aspects: Ontology, representation model and reasoning methods, and the research progress of spatio-temporal reasoning is summarized. The problems of current research are discussed and the future directions are pointed out.

Key words: temporal reasoning; spatial reasoning; spatio-temporal reasoning

摘要: 与时态和空间有关的推理问题是人工智能研究中重要的组成部分,在地理信息系统、时空数据库、CAD/CAM 等领域有着重要应用.从本体、表示模型和推理方法 3 个方面分别介绍了时态推理和空间推理的发展,并在此基础上综述了时空结合推理的研究进展.讨论了目前时空推理领域存在的问题,并指出了今后的发展方向.

关键词: 时态推理;空间推理;时空推理

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60373098, 60173006 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2003AA118020 (国家高技术研究发展计划(863)); the Natural Science Foundation of Jilin Province of China under Grant No.20030523 (吉林省自然科学基金)

作者简介: 刘大有(1942—),男,河北乐亭人,教授,博士生导师,主要研究领域为知识工程与专家系统,分布式 AI,多 Agent 系统,不确定性推理,算法与数据结构,空间推理,地理信息系统;胡鹤(1976—),男,博士,主要研究领域为空间推理,本体技术,语义 Web;王生生(1974—),男,博士,讲师,主要研究领域为空间推理,地理信息系统;谢琦(1973—),女,博士生,讲师,主要研究领域为空间推理,时空推理.

中图法分类号: TP18

文献标识码: A

时间和空间是困扰各专业学者的两个基本概念.现实世界中,许多问题的解决都涉及时间或空间信息.在人工智能领域,有很多涉及时空信息的研究方向.时空推理研究在规划、地理信息系统、自治机器人导航、自然语言理解、时空数据库、计算机视觉、图像理解、CAD/CAM、物理位置常识推理等方面有着广泛的应用.

简单地讲,时空推理是指对占据空间并随时间变化的对象所进行的推理^[1].它由时态推理^[2]和空间推理^[3]发展而来.1993年以来,一些重要的国际 AI 学术会议(如 IJCAI,AAAI,ECAI 等)都把时态推理和空间推理作为重要的专题.最近几年,时空推理成为十分活跃的研究领域,在时间(空间)演算的易处理性、时空结合演算、时空知识管理等方面取得了许多研究成果.国际上成立了许多专门从事时空推理研究的学会.从 1999 年开始,国内也开展了有关时空推理的研究.1999 年~2002 年,国家基础地理信息中心、清华大学(计算机专业)和武汉测绘科技大学(测绘遥感专业)联合开展了多维动态 GIS(geographic information system)空间数据处理关键技术研究.2000 年~2001 年,浙江大学、中国科学院遥感研究所主要对时空数据模型和时空拓扑进行了研究,如基于 GIS 和 CA(细胞自动机)模型的时空建模方法^[4]、基于状态和变化的统一时空数据模型^[5]等.时空语义的表达和推理具有重要的研究意义.它有助于在真实世界和信息系统之间架起桥梁.同时,由于时空信息互相依赖、互为存在条件以及时空的连续性、无限性等特点,很难得到精确、全面、有深度的时空语义表达.

本体原是哲学概念,用以在哲学上解决语言中的二义性问题.在人工智能领域,本体是共享概念模型的明确的形式化规范说明^[6],时空推理研究中的本体涉及时空本质属性的理解.本文第 1 节从本体、表示模型和推理方法以及复杂性 3 个方面简要介绍了时态推理研究.第 2 节介绍空间推理的发展,从拓扑、方向、距离等不同方面分别介绍了有代表性的模型.第 3 节对近年来发展迅速的时空结合推理研究进展进行了总结.最后讨论了目前时空推理研究中存在的问题以及未来的发展方向.

1 时态推理

本节从本体、表示模型和推理方法以及复杂性 3 个方面对时态推理研究进行简要介绍,更详细的时态推理研究综述可参见文献[3].

1.1 时间本体

在研究时态信息的表示与推理的过程中,出现了多种对时间的不同观点(即不同的时间本体).这些观点的差异主要体现在时态原语和时态属性两方面.

时态原语.基本的时态原语有两种:时间点(instants)和时间段(intervals).在人工智能研究的早期,多数工作使用时间点作为时间表示原语,如状态演算(situational calculus)^[7]和 Chronos 系统^[8].1983 年 Allen^[9]提出的区间代数系统和 1987 年 Ladkin 等人^[10]研究的约束网络传播算法中的时间段为基本原语.

时态属性.时态属性涉及如下问题的考察,包括:时间是离散的还是连续的;时间是有限的还是无限的;时间的拓扑结构是线性的、分支的还是循环的.离散时间与 Z(整数集)同构,连续时间与 R(实数集)同构.用公历日期表示时间反映时间的离散性.分支时间结构则用来表示未来的不确定性.

1.2 时态表示模型

有代表性的时态表示模型有 1969 年 McCarthy 等人^[7]提出的状态演算、1972 年 Bruce^[8]提出的 Chronos 系统、1983 年 Allen^[9]提出的时态区间代数等.其中影响较大的是 Allen 提出的区间代数理论^[9].

Allen^[9]提出的区间代数理论是关于时间段的代数系统.每个时间段包含两个端点,通过比较两个时间段的端点之间的关系,区分了 13 种互不相交且联合完备(jointly exhaustive and pairwise disjoint,简称 JEPD)的基本关系,分别是 Before(\prec),Meets(m),Overlaps(o),Starts(s),During(d),Ends(e),它们的逆关系 After(\succ),Met-by($m\bar{\sim}$),Overlapped-by($o\bar{\sim}$),Started-by($s\bar{\sim}$),Includes($i\bar{\sim}$),Ended-by($e\bar{\sim}$)及相等关系 Equals(\equiv).图 1 给出了 13 种关系及对应的端点关系表达式.区间代数能够表示出这 13 种关系的幂集(总共 2^{13} 种不同关系).

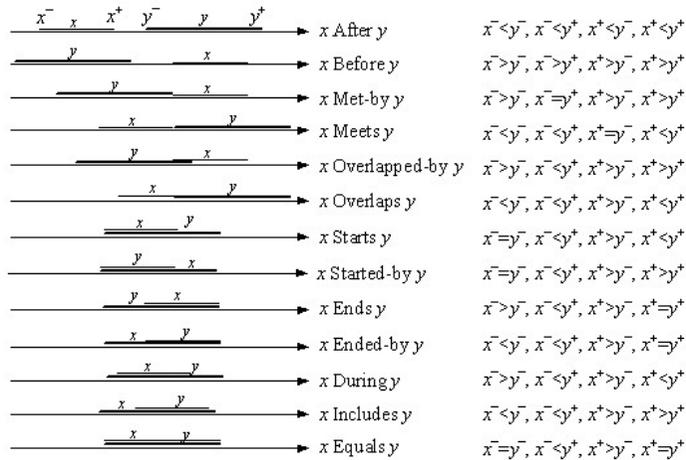


Fig.1 Thirteen JEPD relations of interval algebra and their corresponding end-point relation formulas

图 1 区间代数的 13 种 JEPD 关系及其对应的端点关系表达式

1.3 时态推理方法及复杂性

时态推理问题可以看作是约束满足问题(CSP)的一个特例,其中变量表示时态对象,变量之间的约束对应于对象间的时态关系.Allen^[9]的区间代数就可以采用这种推理方法.1988 年,Ladkin 等人^[11]发现了可用于判定点代数约束满足问题的路径一致算法,并证明了该算法的完备性.1995 年,Nebel 和 Burckert^[12]通过用 Horn 形式的点约束表达区间约束,发现了区间代数的一个极大(maximal)易处理子集.2001 年,Krokhin 等人^[13]给出了区间代数中易处理子集和 NP 子集的完整划分.基于该划分,Renz^[14]给出了考虑方向的区间代数扩展.

时态问题还可以使用时态逻辑表达,时态推理对应着时态逻辑的归结证明过程.现有的时态逻辑系统主要有两类:线性时态逻辑和分支时态逻辑,分别对应于线性和分支的时态结构.1985 年,Sistla 和 Clarke^[15]证明了对任意给定的线性命题时态逻辑 PTL 公式,判定其可满足性的复杂性为 PSPACE.2002 年,Wolter 等人^[16]将一阶语言 FO 与命题时态逻辑 PTL 结合,得到了一阶时态逻辑 FOTL,并指出 FOTL 在线性时间流下的可满足问题是非递归可枚举的,因而也是不可判定的.

2 空间推理

2.1 空间本体

与时态推理类似,空间推理研究过程中也产生了多种对空间对象及对象嵌入空间属性的理解.这些理解的差异主要体现在空间原语和空间属性两方面.

空间原语.与时态推理类似,空间原语的选择有两种:基于点和基于区域.在空间拓扑推理领域中,多数研究者倾向于用区域作为空间原语.如在拓扑表示模型方面广泛采用的 RCC 模型^[17]就是用区域作为空间原语.在方向模型研究中,主要使用点和区域两种空间原语.在距离模型的研究中,以点为原语的占了大多数.

空间属性.空间的结构涉及的问题包括离散结构或连续结构(即空间与 Z^n 同构或与 R^n 同构)、有限的或无限的、同维的或混合维的^[18]等等.

2.2 空间表示模型

空间推理包含多种空间关系的推理,如拓扑、方向、距离等.下面分别加以讨论.

拓扑模型.拓扑关系是空间关系中最重要、最基本关系.空间拓扑模型可分为点集拓扑和区域拓扑两类.它们都有比较完整的理论体系.在空间推理领域影响较大的模型是 1992 年 Randell 等人^[17]提出的区域连接演算 RCC(region connection calculus)理论.

RCC 理论基于空间区域连接关系 $C(x,y)$,表示“区域 x 和 y 至少共用一点”.由 $C(x,y)$ 可以推导出 RCC-5, RCC-8,RCC-15 等多种拓扑关系模型,分别对应着不考虑边界、考虑边界以及考虑时态的各种不同的情况.这些 RCC 模型中最重要的是 RCC-8 模型.它区分了 8 种 JEPD(互不相交且联合完备)的 RCC 关系:{DC,EC,PO,TPP, TPPi,EQ,NTPP,NTPPi},它们可以组合成 28 种不同关系.RCC-8 关系及其概念邻域如图 2 所示.1991 年,Egenhofer 等人^[19]提出了基于点集拓扑的 n -交集模型.该模型通过考察两个区域的内部、边界和外部,观察它们的交集是否为空,以此作为判定其拓扑关系的依据.对于实际空间对象,该模型可以得到 8 种拓扑关系,与 RCC-8 关系相对应. n -交集模型在 GIS 领域应用较广.1997 年,廖士中等人^[20]针对 n -交集模型难以推导出拓扑关系的完备集、概念邻域和复合表等不足,提出了 n 维实体间拓扑关系完备集的概念,建立了比 n -交集模型更为简单、有效的闭球模型.

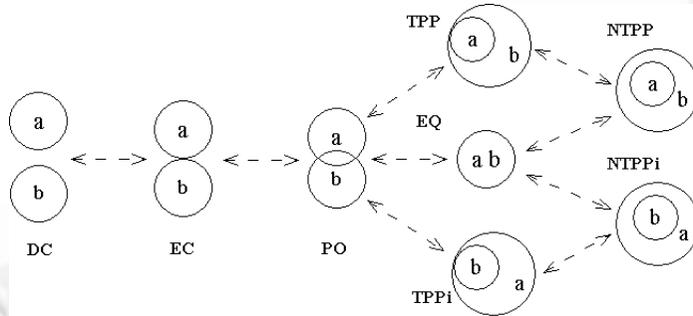


Fig.2 RCC-8 relations and their conceptual neighborhood
图 2 RCC-8 关系及其概念邻域

方向模型.下面给出的是一些重要的方向关系模型.1991 年,Andrew Frank^[21]提出了“基于圆锥”和“基于投影”两种方向划分方法(如图 3(a)、图 3(b)所示).1992 年,Freksa^[22]在“基于投影”方法的基础上,通过引入“视点”,进一步提出了“双十字”方向模型(如图 3(c)所示).该模型在机器人导航中有广泛应用.如果对坐标轴应用点代数关系($>$, $=$, $<$),“基于投影”方法所确定的 9 种关系(N,NE,E,SE,S,SW,W,NW,EQ)可以用点代数表示,这使得“基于投影”方法又被称为“主代数(cardinal algebra)”.1998 年,Ligozat^[23]研究了“主代数”的计算性质,发现其推理复杂性是 NP 完全的.

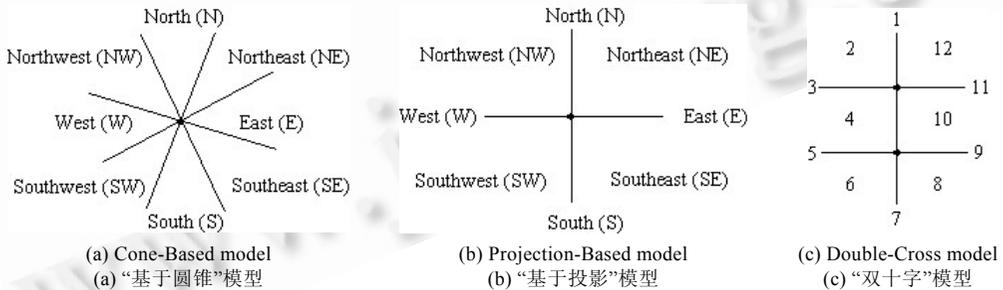


Fig.3 Orientation relations between points
图 3 点间的方向关系

上面的模型针对点对象,区域对象之间的方向关系比点对象之间的方向关系更复杂.区域对象往往有自己内在的方向性,并有复杂的形状.为了简化处理过程,常常用区域的最小边界矩形来近似代表区域.这些矩形的边界要求与参照框架的坐标轴相平行.这种方法将区域对象之间的关系转换为两组投影于坐标轴上的区间之间的关系,可以利用区间代数^[9]方法进行处理.2001 年,Goyal 和 Egenhofer^[24]提出了一种 3×3 的“方向关系矩阵”表示方法.该矩阵对应参照对象最小边界矩形将平面划分为 9 个部分,通过考察每个部分与主对象的关系来确定参照对象和主对象之间的方向关系.

距离(尺寸)模型.距离不同于拓扑与方向的方面在于它是标量.距离的表示分为绝对距离和相对距离,绝对

距离关系直接表示两个空间对象之间的距离,相对距离关系通过与第 3 个对象的比较,间接表示两个对象间的距离.例如,“A 到 B 的距离为 100 米”、“A 到 B 的距离很近”属于绝对距离关系,而“A 距离 B 比距离 C 近”是相对距离关系.绝对距离可以是定性关系,也可以是定量关系,而相对距离一般是定性的.

有时单纯的距离关系不足以用于推理,如“点 A 距离点 B 很远”且“点 B 距离点 C 很远”,要得到 A, C 两点之间的距离关系还要知道这 3 个点间的方向关系.方向与距离的结合称为位置(positional)信息.1993 年,Zimmermann 等人^[25]提出了一种根据两点间的连线确定第 3 点位置的方法,并用 Delta 算子把定性方向和距离概念结合起来.1997 年,Clementini 等人^[26]将“基于圆锥”方向模型^[21]与绝对距离关系相结合,提出了位置演算方法(如图 4(a)所示).1999 年,Isli 等人提出了将相对距离关系分别与“基于投影”方向模型(如图 4(b)所示)和“双十字”方向模型相结合的方法.但迄今为止还没有对这两种方法计算性质的相关研究.

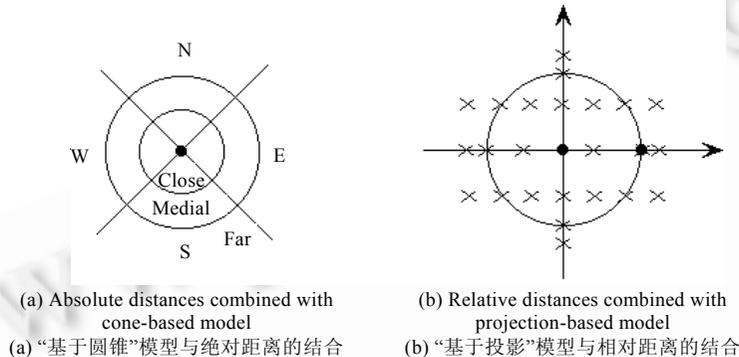


Fig.4

图 4

2.3 空间推理方法及复杂性

当空间关系可以表达为一组 JEPD 基本关系时,可以应用约束满足技术加以解决,这一点与时态推理中的情况类似.1999 年,Renz 和 Nebel^[27]证明了 RCC-8 公式的可满足问题是 NP 完全的.Renz^[28]采用与时态推理研究类似的方法对 RCC-8 的推理复杂性进行研究,得到了 3 个最大易处理子集($\hat{\mathcal{H}}_8$, C_8 , Q_8).这一发现对解决处于“相变”区域的较难的 RCC-8 空间拓扑约束问题有很大帮助.但最近清华大学的李三江基于 RCC 复合表的可扩展性^[29],指出 Renz 证明过程中使用的一个定理是错误的,因此,有关最大易处理子集的结果需要重新证明.

在空间推理的逻辑方法方面,1994 年,Bennett^[30]讨论了空间拓扑模型 RCC-8(RCC 模型中不带量词的逻辑子集)与命题逻辑的关系,用命题逻辑对空间实体的拓扑关系进行编码,以提高推理能力,并证明了 RCC-8 是可判定的.1996 年,Bennett^[31]给出了模态逻辑 S4 在拓扑空间的解释,指出 S4 中的模态操作符与空间拓扑中的取内部操作是等价的,从而在 S4 中定义了模态取内部操作符并给出了 RCC-8 的模态逻辑表示.Bennett 通过对模态操作符‘□’加入约束条件得到强 S5 操作符,用它来表示空间区域的凸包概念.1998 年,Renz^[32]指出对区域项执行布尔操作能提高 RCC-8 的表达力.2000 年,Wolter 等人^[33]通过把布尔区域项作为 RCC-8 谓词的参数,扩展了 RCC-8 的表示能力,得到了 BRCC-8 逻辑,同时证明了在欧几里德拓扑空间中,BRCC-8 的可满足问题是 PSPACE 完全的.2000 年,Sturm 等人^[34]提出了对距离信息进行形式化表示的度量逻辑.2001 年,Kurz 等人^[35]提出了组合描述逻辑和度量逻辑的方法,证明了所得到的逻辑为可判定的.

3 时空结合推理

3.1 时空本体

在物理学中,从牛顿的绝对时空观到爱因斯坦的时空相对论,人们对时空关系的认识不断深入.在人工智能领域有两种与之对应的做法:一种是将时间模型和空间模型作正交组合,另一种则试图建立时空统一的模型.现有的时空结合工作可分为以下 4 种类型:在已有的时态模型的基础上,添加对空间的支持能力;在已有的空间模

型基础上,添加对时态的支持能力;将已存在的时态和空间模型作正交组合;将时空看作原子实体,在此基础上提出时空统一的模型.时空统一模型在理论上可能更加完美,但在研究上可能更加困难.

3.2 时空模型

时空结合推理是知识表示中一个相当新的领域.有关时空统一的形式化方法较少,大部分工作都是试图结合时间和空间各自的理论.目前研制的时空模型可以分为通用的理论化模型和面向特定应用的专用模型.理论化模型可以分为基于逻辑的方法和基于代数方法两类.

基于逻辑方法的模型.目前存在一种直观的时空形式化表示方法,即选定某种时态逻辑 T 和某种空间逻辑 S ,把它们融合成一个时空混合体,允许空间和时间两者之间有一定的相互作用.这种构造方法可以从语义和语法两种途径来考虑.2000年,Wolter等人^[36]采用语义的方法,将时态模型 T 和空间模型 S 结合成一个多维时空结构.他们把区域作为基本的空间表示实体,以基于点的线性时间、基于点的分支时间和基于区间的线性时间 3种基本模型作为时间表示,将时空解释成时间和空间结构的迪卡尔乘积,并基于 BRCC-8 进行时空表示,构造了 ST_0, ST_1, ST_2 这3个时空逻辑.对 ST_i 应用模态算子 \square, \diamond 得到 $STBi$,在 $STBi$ 上添加时间区域项得到 $STBi+$.2002年,Wolter^[16]等人构造了一阶时空逻辑(FOST),并指出在基于无限时间流的拓扑时态模型中,由于时态操作符和作用于区域变量上的量词导致FOST的可满足问题是不可判定的,他们将BRCC-8嵌入到双模态逻辑 $S4u$ 中(可判定的),然后再把 $S4u$ 嵌入到一阶逻辑单变量子集中(NP-完全的),构造出命题时空语言(PST),有关任意拓扑模型中的 PST 公式可满足性问题的计算性质还有待研究.通过在 BRCC-8 中加入区间时态逻辑(ALL-13)得到 ARCC-8 逻辑.ARCC-8 公式在时态拓扑模型中是 NP 完全的.2002年,Bennett等人^[37]将命题时态逻辑 PTL 和空间模态逻辑 $S4u$ 结合起来,形成了“二维”时空逻辑 PSTL.PSTL 是否可判定,仍然是未解决的问题,但通过嵌入 PSTL 到 RCC8 空间逻辑,能得到一些可判定的子系统.1995年,Asher^[38]基于部分学(mereology)的连接、部分、内部、补等概念提出了关于这些概念的语义及完备性公理,把关于空间表示的语言学语义看成是常识空间推理和几何推理的基础.2002年,Muller^[39]指出 Asher 的理论与 RCC-8 理论具有同样的表达能力,并可用于时空区域.此外,Asher 的理论对开区域和闭区域进行了区分,而 RCC-8 没有区分.Muller 把时间和空间看成同质(homogeneity)的,以时空区域(时空历史)为基本实体,从语法角度扩展了 Asher^[38]的空间逻辑公理集,并定义了时序关系和时空约束,建立了一阶时空逻辑模型,并基于该逻辑提出了有关运动的推理理论.该理论的表达能力较强,能定义诸如自然语言中由运动动词表达的复杂运动类.

基于代数方法的模型.1999年,Medak^[40]提出了一种能表达空间实体时空演化关系的代数方法,定义了 identity(标识)的建立、消失、挂起、恢复等基本操作.这些操作既可以用于表示单一实体的演变,也可以用于表示一组实体的聚合、分离等变化.Medak 将这种代数方法称为 lifestyles 方法,用范畴论和数学方法对其进行形式化表达,并用函数程序语言 Haskell 加以实现.2000年,Viqueira^[41]扩展了他的量子(quantum)空间关系模型,构造了时空代数系统.空间关系表示方法是把二维空间表示为迂回连续编码的点阵,空间点用数字表示,线和区域由其边界点表达.时空关系的表达采用快照方式,即给出各时间点处的空间状态,Viqueira 还定义了一些满足封闭性的基本时空操作.该时空模型能对常规、时间、空间和时空数据进行处理,可应用于关系数据库和 SQL,但它所能表达的时空对象局限于离散点阵的表示.2000年,Claramunt^[42]扩展了 Ladkin 代数^[43],通过空间副词来表达由简单区域构成的非凸区域,结合时态副词来表达区域的演变,用于常识推理中对复杂空间轮廓的分析.2001年,Claramunt 等人^[44]把不考虑方向的区间代数与 RCC 拓扑关系综合形成了包含 56 种基本时空关系的二维平面空间和凸时态区间下的时空关系代数.

面向应用的时空模型.最近几年,由实际应用需求的驱动产生了很多有代表性的时空模型.1998年,Muller^[45]提出了一个用于表示运动的描述定性时空关系的时空模型.该模型定义了 6 种运动关系:离开、到达、碰撞、内部、外部和相交关系.类似于 Allen^[9]和在 RCC 模型^[17]中采用的推理方法,该模型也构造了运动与时态(空间)的复合表.2001年,Pissinou 等人^[46]提出的 GTDM 模型是一种用于多媒体地理信息系统的时空关系模型,它将 Allen^[14]提出的 13 种时段关系扩展到高维,用以描述对象间的拓扑和方向关系.该模型使用视频帧表达时间,是一种离散化的定量模型,难以应用于多媒体之外的领域.2002年,Erwig^[47]用时空谓词来形式化地表达

对象间的时空关系.时空谓词是定义在时空抽象数据类型(ADT)基础上的函数.该模型用 9-交集模型^[19](或等价的 RCC 模型)来表达对象的空间拓扑关系,并使用连续线性的时间模型.更复杂的时空谓词可以通过组合基本时空谓词来构造.该模型的主要目的在于扩展传统的关系型数据库,使其成为时空数据库.在空间关系中,该模型只考虑了拓扑关系.2002年,Andrea等人^[48]提出了基于对象移动时段(OMI)和空间关系时段(SRI)的模型,用于分析机器人足球比赛中各个机器人之间的时空关系.在该模型中,时段关系采用了 Allen^[9]提出的 13 种时段关系,空间关系只考虑了定量的方向和距离关系,需要通过系统内部函数映射为定性的远、中、近、接触等关系.

4 存在的问题与发展方向

本文在简要介绍时态推理的基础上,对近年来有代表性的空间推理和时空结合推理研究工作进行了重点介绍.限于篇幅,没有介绍时空信息模糊性与不确定性处理方面的工作以及时空推理研究的应用.在时空推理研究领域中,单独的时间方面和单独的空间关系(拓扑、方向、距离等)方面的研究已经比较充分,提出了一些很有价值的模型.但现实应用常常要求将多种信息结合起来加以利用,这种结合既包括多种空间关系的结合,也包括时空的结合,如何处理好这两种结合是时空推理的研究难点和重点.目前时空结合的形式化表示和推理研究尚处于“萌芽”阶段.该研究领域存在很多有待解决的问题,以逻辑方法为例:(1) 目前关于时空逻辑的研究缺乏对时空关系及相互作用的深入分析;(2) 缺乏对被组合的空间逻辑、时间逻辑以及它们之间的结合性质的深入分析(Wolter^[36]和 Bennett等人^[37]的时空逻辑方法是将时间逻辑和空间逻辑正交结合,并不是构造对时空对象进行表示和推理的逻辑方法);(3) 已有的时空逻辑绝大部分仅支持拓扑空间关系,将距离和方向等其他空间关系与时间结合的时空逻辑研究很少.

通过对时空推理研究工作进行总结和比较可以发现,时空推理是人工智能以及地理信息系统、时空数据库等相关领域的热点研究方向.在基础理论方面,对时间、空间信息表示和推理的理论研究工作比较充分,对时空结合信息的研究刚刚起步;在应用研究方面,时空推理中很多理论研究成果(如 RCC 理论)已应用于 GIS、知识发现和机器人等领域.通过总结近年来时空推理的研究进展,我们认为以下几方面是未来时空推理研究发展的方向:

① 时空结合的知识表示和推理.时间和空间相结合的研究工作还存在很多问题.为了构造适应性更强的时空结合理论,很可能需要摒弃原来针对单纯时间和空间的建模方法,从根本上提出一套面向时空统一的新理论.现在的时空结合工作多数限于拓扑关系和时间区间关系的结合,还需要进一步深入研究多种空间和时间关系的结合,最终建立包括所有空间和时间关系的统一模型.

② 时空本体的研究.本体技术不仅有助于解决不同时空表示系统之间的交互、集成、共享、重用等方面的问题,而且还是常识知识表示等研究的重要工具.由于时空本体在生物信息化、GIS、常识库建造以及语义 Web 等方面都有重要的应用,其研究已经引起了各个领域学者的广泛关注.未来有关时空本体的研究将作为时空推理领域中的重要分支,成为研究的热点.

③ 时空推理研究与应用结合.时空推理的应用领域已经由地理信息领域向军事、交通、医疗、生物信息等领域扩展.近几年来,随着移动对象数据库等一批已经(或接近)商业化的时空信息处理系统的出现,时空推理的应用前景越来越明显.将现有理论成果向应用领域推广以及基于时空推理理论研究应用问题将是今后时空推理研究的重点之一.

References:

- [1] Oliviero S. Spatial and Temporal Reasoning. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997. 3~71.
- [2] Pani AK, Bhattacharjee GP. Temporal representation and reasoning in artificial intelligence: A review. Mathematical and Computer Modelling, 2001,34(1-2):55~80.
- [3] Cohn AG, Hazarika SM. Qualitative spatial representation and reasoning: An overview. Fundamental Informatics, 2001,46(1-2): 1~29.

- [4] Zhang XF, Cui WH. Spatio-Temporal analysis and modeling based on the integration of GIS and CA model. *Journal of Image and Graphics*, 2000,5A(12):1012~1018 (in Chinese with English abstract).
- [5] Zheng KG, Tan SY, Pan YH. A unified spatio-temporal data model based on state and change. *Journal of Software*, 2001,12(9):1360~1365 (in Chinese with English abstract).
- [6] Studer R, Benjamins V, Fensel D. Knowledge engineering: Principles and methods. *Data Knowledge Engineering*, 1998,25(1-2):161~197.
- [7] McCarthy J, Hayes P. Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. In: Meltzer B, Michie D, ed. *Machine Intelligence*. Edinburgh: Edinburgh University Press, 1969. 463~502.
- [8] Bruce B. A model for temporal references and its application in a question answering program. *Artificial Intelligence*, 1972,3(1-3):1~25.
- [9] Allen JF. Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communications of the ACM*, 1983,26(11):832~834.
- [10] Ladkin PB, Maddux RD. The algebra of convex intervals. Technical Report, KES-U-87-2, Palo Alto: Kestrel Institute, 1987. 1~5.
- [11] Ladkin PB, Maddux RD. On binary constraint problems. Technical Report, KES-U-88-8, Palo Alto: Kestrel Institute, 1988. 1~7.
- [12] Nebel B, Burckert H. Reasoning about temporal relations: A maximal tractable subclass of Allen's interval algebra. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 1995,42(1):42~66.
- [13] Krokhin A, Jeavons P, Jonsson P. A complete classification of complexity in Allen's algebra in the presence of a non-trivial basic relation. In: Nebel B, ed. *Proc. of the 17th Int'l Joint Conf. on AI*. Seattle: Morgan Kaufmann, 2001. 83~88.
- [14] Renz J. A spatial odyssey of the interval algebra: Directed intervals. In: Nebel B, ed. *Proc. of the 17th Int'l Joint Conf. on AI*. Seattle: Morgan Kaufmann, 2001. 51~56.
- [15] Sistla A, Clarke E. The complexity of propositional linear temporal logics. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 1985,32(3):733~749.
- [16] Wolter F, Zakharyashev M. Qualitative spatio-temporal representation and reasoning: A computational perspective. In: Lakemeyer G, Nebel B, eds. *Exploring Artificial Intelligence in the New Millennium*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2002. 175~216.
- [17] Randell D, Cui Z, Cohn A. A spatial logic based on regions and connection. In: Nebel B, Rich C, Swartout W, eds. *Proc. of the Knowledge Representation and Reasoning*. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1992. 165~176.
- [18] Wang SS, Liu DY, Yang B. Multi-Dimensional qualitative spatial query language MQS-SQL. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(12A):1995~1999 (in Chinese with English abstract).
- [19] Egenhofer MJ, Herring JR. Categorizing binary topological relationships between regions, lines and points in geographic database. Technical Report, 91-7, Orono: University of Maine, 1991. 1~4.
- [20] Liao SZ, Shi CY. Closed ball model and composition table derivation for topological relations. *Journal of Software*, 1997,8(12):894~900 (in Chinese with English abstract).
- [21] Andrew UF. Qualitative spatial reasoning about cardinal directions. In: Mark D, White D, eds. *Proc. of the 7th Austrian Conf. on Artificial Intelligence*. Baltimore: Morgan Kaufmann, 1991. 157~167.
- [22] Christian F. Using orientation information for qualitative spatial reasoning. In: Frank AU, Campari I, Formentini U, eds. *Proc. of the Int'l Conf. on GIS*. Berlin: Springer-Verlag, 1992. 162~178.
- [23] Ligozat G. Reasoning about cardinal directions. *Journal of Visual Languages and Computing*, 1998,9(1):23~44.
- [24] Roop G, Egenhofer MJ. Similarity of Cardinal Directions. In: Jensen CS, Schneider M, Seeger B, Tsotras VJ, eds. *Advances in Spatial and Temporal Databases*. Redondo Beach: Springer-Verlag, 2001. 36~55.
- [25] Zimmermann K, Freksa C. Enhancing spatial reasoning by the concept of motion. In: Sloman A, ed. *Prospects for Artificial Intelligence*. Hamburg: IOS Press, 1993. 140~147.
- [26] Eliseo C, Paolino F, Daniel H. Qualitative representation of positional information. *Artificial Intelligence*, 1997,95(2):317~356.
- [27] Renz J, Nebel B. On the complexity of qualitative spatial reasoning. *Artificial Intelligence*, 1999,108(1-2):69~123.
- [28] Renz J. Maximal tractable fragments of the region connection calculus: A complete analysis. In: Dean T, ed. *Proc. of the 16th Int'l Conf. on Artificial Intelligence*. Stockholm: Morgan Kaufmann, 1999. 448~455.
- [29] Li SJ, Ying MS. Region connection calculus: Its models and composition table. *Artificial Intelligence*, 2003,145(1-2):121~146.
- [30] Bennett B. Spatial reasoning with propositional logic. In: Doyle J, Sandewall E, Torasso P, eds. *Proc. of the 4th Int'l Conf. on Knowledge Representation and Reasoning*. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1994.51~62

- [31] Bennett B. Modal logics for qualitative spatial reasoning. *Bulletin of the Interest Group in Pure and Applied Logic*, 1996,4(1): 23~45.
- [32] Renz J. A canonical model of the region connection calculus. In: Anthony C, Schubert LK, Shapiro SC, eds. *Proc. of the 6th Int'l Conf. on Knowledge Representation and Reasoning*. Trento: Morgan Kaufmann, 1998. 330~341.
- [33] Wolter F, Zakharyashev M. Spatial reasoning in RCC-8 with boolean region terms. In: Werner H, ed. *Proc. of the 14th European Conf. on Artificial Intelligence*. Berlin: IOS Press, 2000. 244~248.
- [34] Sturm H, Suzuki NY, Wolter F, Zakharyashev M. Semi-Qualitative reasoning about distances: A preliminary report. In: Ojeda-Aciego M, Guzman I, Brewka G, Pereira LM, eds. *Proc. of the European Workshop on Logics in Artificial Intelligence*. Malaga: Springer-Verlag, 2000. 37~56.
- [35] Kutz O, Wolter F, Zakharyashev M. A note on concepts and distances. In: Carole G, McGuinness DL, Ralf M, Patel-Schneider PF, eds. *Proc. of the Int'l Workshop on Description Logic (DL 2001)*. 113~121.
- [36] Wolter F, Zakharyashev F. Spatio-Temporal representation and reasoning based on RCC-8. In: Cohn AG, Giunchiglia F, Selman B, eds. *Proc. of the 7th Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*. Breckenridge: Morgan Kaufmann, 2000. 3~14.
- [37] Bennett B, Cohn G, Wolter F, Zakharyashev M. Multi-Dimensional modal logic as a framework for spatio-temporal reasoning. *Applied Intelligence*, 2002,3(4):239~251.
- [38] Asher N, Vieu L. Towards a geometry of common sense: A semantics and a complete axiomatisation of mereotopology. In: Kitano H, Bates J, Hayes-Roth B, eds. *Proc. of the 14th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence*. Montréal: Morgan Kaufmann, 1995. 846~852.
- [39] Muller. Topological spatio-temporal reasoning and representation. *Computational Intelligence*, 2002,18(3):420~450.
- [40] Medak D. Lifestyles—A paradigm for the description of spatiotemporal databases [Ph.D. Thesis]. Vienna: Technical University Vienna, 1999.
- [41] Viqueira JRR. Relational algebra for spatio-temporal data management. In: Zaniolo C, Lockemann P, Scholl M, Grust T, eds. *Proc. of the EDBT 2000 Ph.D. Workshop*. Konstanz: EDBT Workshop. 2000. 235~243.
- [42] Claramunt C. Extending Ladkin's algebra on non-convex intervals towards an algebra on union-of regions. In: Li KJ, Makki K, Pissinou N, Ravada S, eds. *Proc. of the 8th ACM Symp. on GIS*. Washington: ACM, 2000. 9~14.
- [43] Ladkin PB. The logic of time representation [Ph.D. Thesis]. Berkeley: University of California at Berkeley, 1987.
- [44] Claramunt C, Bin J. An integrated representation of spatial and temporal relationships between evolving regions. *Journal of Geographic System*, 2001,3(1-3):411~428.
- [45] Muller. A qualitative theory of motion based on spatio-temporal primitives. In: Anthony C, Schubert LK, Shapiro SC, eds. *Proc. of the 6th Int'l Conf. on Knowledge Representation and Reasoning*. Trento: Morgan Kaufmann, 1998. 131~143.
- [46] Niki P, Ivan R, Kia M. Spatio-Temporal modeling in video and multimedia geographic information systems. *GeoInformatica*, 2001, 5(4):375~409.
- [47] Erwig M, Schneider M. Spatio-Temporal predicates. *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering*, 2002,14(4):881~901.
- [48] Andrea Miene, Ubbo V. Interpretation of spatio-temporal relations in real-time and dynamic environments. In: Birk A, Coradeschi S, Tadokoro S, eds. *Proc. of the Robot Soccer World Cup V*. Seattle: Springer-Verlag, 2002. 441~446.

附中文参考文献:

- [4] 张显峰,崔伟宏.基于 GIS 和 CA 模型的时空建模方法研究. *中国图像图形学报*,2000,5A(12):1012~1018.
- [5] 郑扣根,谭石禹,潘云鹤.基于状态和变化的统一时空数据模型. *软件学报*,2001,12(9):1360~1365.
- [18] 王生生,刘大有.混合维定性空间查询语言 MQS-SQL. *电子学报*,2002,30(12A):1995~1999.
- [20] 廖士中,石纯一.拓扑关系的闭球模型及复合表的推导. *软件学报*,1997,8(12):894~900.