

关于知识的推理

黄智生 (荷兰阿姆斯特丹大学计算机系留学生)

近年来,关于知识的推理(Reasoning about Knowledge)正在成为计算机科学,特别是人工智能研究中的最重要的分支之一。自从八六年在美国加州召开首届关于知识的推理理论问题国际会议(简称TARK, Theoretical Aspects of Reasoning about Knowledge)以来,每两年将召开一次TARK会议。今年三月份召开的TARK90已是第三次盛会了。

关于知识的推理的有关技术已在诸多的领域中得到应用,主要有,经济学,语言学,人工智能及计算机科学。这里,将简要地介绍关于知识的推理的有关基本知识、基本技术及其发展动向。

一、关于知识的经典模型

关于知识的逻辑推理(通常被称为认识逻辑(Epistemic Logics))的研究,最早由语言哲学家J. Hintikka在题为《知识和信念》书中提出了可能世界模型^[1],其基本思路是存在着许多可能的世界状态。一个主体(Agent)被认为是知道一个事实 φ 只要 φ 在它认为所有可能的世界状态中都是真的。这里主体指的是能够独立进行信息处理的这样一些实体:人,计算机,机器人,知识库或进程。可能的世界状态指的是主体在信息处理过程中所能感受到的状态。认识逻辑的可能世界模型实际上等同于模态逻辑中的Kripke语义模型。

在计算机科学的应用中,我们通常考虑多主体的情形。为了形式化地描述可能世界模型,首先我们得使用一个形式语言。假设有几个主体,用 $L_i\varphi$ 来表示“主体 i 知道事实 φ ”。其中 L_i 是模态词。

一个Kripke模型 M 是一个元组 $(S, \pi, L_1, \dots, L_n)$,其中 S 是可能世界(或称状

态)的集合, π 是一个从状态和基本命题到 $\{\text{true}, \text{false}\}$ 的一个赋值函数。 L_i 是状态集 S 上的一个等价关系, $i=1, \dots, n$, L_i 又称为主体 i 的可达关系。

类似于通常逻辑系统中的可满足关系“ \models ”,这里也定义关系 $M, s \models \varphi$ 如下:

- $M, s \models p$ 如果 p 是一个基本命题,且 $\pi(p, s) = \text{true}$
- $M, s \models \neg\varphi$ 如果 $M, s \not\models \varphi$
- $M, s \models \varphi \wedge \psi$ 如果 $M, s \models \varphi$ 而且 $M, s \models \psi$
- $M, s \models L_i\varphi$ 如果 $M, t \models \varphi$ 对所有的 t 使得 $(s, t) \in L_i$

上述定义的认识逻辑的Kripke模型,被证明对于下列公理系统是正确和完备的:

- (L₁) 所有的命题逻辑的有效推理规则。
- (L₂) $L_i\varphi \wedge L_i(\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow L_i\psi$
- (L₃) $L_i\varphi \rightarrow \varphi$
- (L₄) $L_i\varphi \rightarrow L_iL_i\varphi$
- (L₅) $\neg L_i\varphi \rightarrow L_i\neg L_i\varphi$
- (R₁) $\vdash\varphi, \vdash\varphi \rightarrow \psi \Rightarrow \vdash\psi$
- (R₂) $\vdash\varphi \Rightarrow \vdash L_i\varphi$

(L₁)和(R₁)对所有的命题逻辑推理系统都是成立的。(L₂)表明一个主体的知识在逻辑蕴含下是封闭的。(L₃)表明一个主体所知道的事实都是真的。(L₃)通常是区别知识和信念的重要标志。若(L₃)换成另一个公理(L'₃) $\neg L_i\text{false}$ (即,主体 i 不会相信完全假的事实,换言之,主体 i 知道的 φ 是可能假的),则其公理系统被称为信念系统,否则为知识系统。对于信念系统,

$L_i\varphi$ 通常被解释为：“主体*i*相信事实 φ ”。 (L_4) 和 (L_5) 被称为内省公理 (axioms of introspection)。 (L_4) 指的是若主体*i*知道 φ ，则主体*i*知道它所知道的。 (L_5) 表明主体*i*知道什么是它所不知道的。 (R_2) 指的是若 φ 是有效的，则任何一个主体*i*都是知道的。

由此可见，上述公理系统确实形式化地描述了知识的逻辑特征。用模态逻辑的术语来讲，上述公理系统是一个S5系统。即知识系统是一个S5模态逻辑系统。对于信念系统，即 (L_5) 换成 $(L'_5) \neg L_i \text{false}$ ，则通常被称为弱S5系统，又叫KD45系统。弱S5系统所对应的Kripke结构中的可达关系就不是等价关系，而是一个后继的 (serial)，传递的 (transitive) 和欧几里得关系。一个后继的二元关系，是指对于所有的 $s \in S$ ，都存在一个 t ，使得 $\langle s, t \rangle \in L_i$ 。欧几里得关系，是指对于所有的 $\langle s, t \rangle \in L_i, Q$ 有 $\langle s, u \rangle \in L_i$ ，都有 $\langle t, u \rangle \in L_i$ 。其有关证明可参见有关的模态逻辑书籍^[2]。

二、计算机科学中的知识和信念模型

关于知识的经典模型，即可能世界模型，近年来，被引入到计算机科学中作为分析知识和信念结构的有效工具。最早的应用可能是Moore所提出的Autoepistemic Logic (自知逻辑)^[3]，它是一个非单调推理逻辑。限于篇幅，这里不详细阐述其与关于知识的推理的关系。现在只介绍一个分布式系统上应用知识推理模型例子。

一个分布式系统由一组进程 (又称主体) 及其一个通讯网络组成。这些进程执行一些网络协议。一个分布式网络协议可形式化地定义为： $P = \langle n, Q, I, \tau \rangle$ 。其中 n 是指 n 个进程。 Q 是进程的局部状态集合， n 个进程的局部状态组成一个全局状态 $q \in Q^n$ 。 I 是所有的初始全局状态的集合，即 $I \subseteq Q^n$ 。 $\tau \subseteq Q^n \times Q^n$ 指的是从全局状态到全局状态的变化函数。

对于任何协议 P ，我们定义一个 τ -可达全局状态 RP 是从初始状态 $q \in I$ 开始通过变化

函数 τ 所能达到的所有的全局状态。通常我们仅考虑 τ -可达全局状态。协议 P 的一次执行 (run) 是一个全局状态序列。这样，根据全局状态 $q \in Q^n$ ，我们就可以类似于知识的Kripke模型那样定义一个等价的可达关系。对于任何进程 i ，全局状态 p, q ，我们定义 $p \sim_i q$ 当且仅当 $[p]_i = [q]_i$ ，即进程 i 在全局状态 p, q 中具有相同的局部状态，这里 $[p]_i$ 表示在全局状态 p 中进程 i 所具有的局部状态。

这样，对于分布性协议 P 的分布式系统的Kripke模型是

$$M = \langle RP, \pi, \sim_1, \dots, \sim_n \rangle$$

其可满足关系 \models ，可以类似地如经典模型那样地定义。根据这个分布式系统的Kripke模型，我们就可以形式化地描述进程的知识状态，即何为进程 i 知道事实 φ 。并由此可以推导出许多进程的行为特征。关于许多技术细节，读者可参见有关的参考文献^[4,5,6]。

在多主体的情形下，一个很重要的概念是共同知识 (common knowledge)。通常用 $E\varphi$ 来表示“所有的主体知道 φ ”，而用 $C\varphi$ 表示“ φ 是共同知识”。 $C\varphi$ 与 $E\varphi$ 的主要区别在于： $C\varphi$ 表明“任何主体 i 都知道主体 j 知道... φ ”等这样的重叠过程，而 $E\varphi$ 仅仅是表明“主体 i 知道 φ 而且主体 j 知道 j 而且...” 这样单层次的过程。 $E\varphi$ 和 $C\varphi$ 可形式化地定义为：

$$M, s \models E\varphi \text{ 如果 } M, s \models L_1\varphi \wedge \dots \wedge L_n\varphi$$

$$M, s \models C\varphi \text{ 如果 } M, s \models E^k\varphi \text{ 对于 } k=1, 2, \dots \text{ 其中 } E^1\varphi = E\varphi, \text{ 而 } E^{k+1}\varphi = EE^k\varphi$$

若 G 是 $\{1, \dots, n\}$ 的一个子集， $E_G\varphi$ 表明“在 G 组中的所有主体 i 都知道 φ ”，而 $C_G\varphi$ 表明“在 G 组中 φ 是共同知识”。关于共同知识具有下列公理：

$$(C_1) \quad E_G\varphi \equiv \bigwedge_{i \in G} L_i\varphi$$

$$(C_2) \quad (C_G\varphi \wedge C_G(\varphi \rightarrow \psi)) \rightarrow C_G\psi$$

$$(C_3) \quad C_G\varphi \equiv E_G(\varphi \wedge C_G\varphi)$$

$$(RC_1) \quad \text{从 } \varphi \rightarrow E_G\varphi \text{ 可推得 } \varphi \rightarrow C_G\varphi$$

(C_1) 直接来自于定义， (C_2) 指的是共同知识在逻辑蕴含下是封闭的， (C_3) 又

称为共同知识的不动点定理。 (RC_1) 又称为共同知识的归纳规则, 即从 $\varphi \rightarrow E_G \varphi$, 我们可以对 k 进行归纳推得 $\varphi \rightarrow C_G \varphi$ 。

共同知识对于分析分布式系统的行为特征是很重要的。但是, Halpern 和 Moses 曾指出, 在许多实际的分布式系统中共同知识是不可获得的。近年来, 曾提出过许多共同知识的变种方案以使得在分布式系统中更实用一些。关于共同知识的研究仍然是关于知识的推理这个分支的热点之一。

三、逻辑万能问题

应用 kripke 模型作为知识的分析模型, 其最大不足是引起了逻辑万能问题 (The Problem of Logical Omniscience)。所谓逻辑万能问题是指在这个语义模型下所有的主体在逻辑上是万能的, 也就是说, 主体知道所有逻辑上有效的结论, 主体的知识在逻辑蕴含下是封闭的, (即若主体 i 知道 φ , φ 推出 ψ 在逻辑上是必然的, 则主体 i 知道 ψ)。这个性质显然不太合理, 因为任何一个人或计算机都不可能知道所有的逻辑结论。可见 Kripke 模型下的认识逻辑所描述的实际上是人的理想模型。

近年来, 为了解决认识逻辑中的逻辑万能问题, 计算机科学家和逻辑学家提出了许多方案和模型, 其中最引人注目的是 Fagin 和 Halpern 在 [7] 中提出的一般意识逻辑 (General Awareness Logic), 这篇论文获得了第九届人工智能国际联合会议 (IJCAI) 最佳论文奖。Fagin 和 Halpern 认为, 为了正确地描述知识状态, 必须引入意识的概念。如果一个主体 i 不能意识 φ , 则就不可能知道 φ 。因而, 在一般意识逻辑的模型中他们引入了一个意识函数。

形式化地说, 一个一般意识的 kripke 结构是一个元组 $M = (S, \pi, L_1, \dots, L_n, A_1, \dots, A_n)$, 这里 S, π, L_1, \dots, L_n 如经典模型中所述, 而 $A_i(s)$ 是一个命题公式的集合。 $\varphi \in A_i(s)$ 表明主体 i 在状态 s 中能够意识到 φ 。用 $A_i \varphi$ 表示“主体 i 意识到 φ ”, 而用 $L_i \varphi$ 表示“主

体 i 间接知道 φ ”, 用 $B_i \varphi$ 表示“主体 i 直接知道 φ ”, 从而又区分了间接知道和直接知道。对于信念系统, 则区分了间接相信和直接相信。而且定义 $B_i \varphi \equiv L_i \varphi \wedge A_i \varphi$, 即如果主体 i 间接知道 φ 而且主体 i 意识到 φ , 则主体 i 才直接知道 φ 。这里“间接”是指蕴含的意思。

然而, 一般意识逻辑也受到一些人的批评^[8], 其主要不足是在引入意识公式集时与传统的可能世界模型相混淆。意识公式集缺乏足够的分析特征。因而, 如何解决逻辑万能问题也是关于知识的推理的热点之一。

四、目前的研究方向

关于知识的推理已经在诸多的领域中得到应用, 受到多领域的注目。但从计算机科学的角度来看, 大多数集中于下列几个方面的研究:

1. 知识, 行动和通讯的综合模型

提出一个关于知识, 行动和通讯的综合形式化模型是十分重要的。这主要是在多主体环境下的规划和决策系统中具有十分重要的理论和应用价值。与此相关的是“分布式人工智能”, 它正在成为重要的研究领域^[9, 10, 11, 12]。

2. 知识与非单调推理

基于模态逻辑的知识推理, 在非单调推理中显得越来越重要。自知模态逻辑 (Autoepistemic Modal Logics)^[13] 和非单调蕴含模态逻辑 (Nonmonotonic default modal logics)^[14] 成为今年 TARK90 的重要课题之一。

3. 信念修改和信念依赖模型

信念修改 (Belief Revision) 系统是指专门处理矛盾冲突的人工智能系统。至目前为止, 尚无理想的形式化工具。人们期待认识逻辑可能作为信念修改的一个较好的形式化工具。信念依赖 (Belief Dependence) 是指在多主体的情形中主体间信念和知识间的依赖性。信念依赖模型与一般信念和知识通讯模型之间的差异在于, 信念依赖模型中

(转第72页)

Shiel[1983]提出了以时间概念作为基本抽象概念的时态层次数据模型 (THM), 其工作详细地描述了时态对概括和特化语义方面的影响。Castilho等 [1982]开发了一种在数据模式规格说明中处理时态语义的语言。时态数据研究中的一个关键概念是时态约束, 它允许用户在约束条件中将时间因素和数据值都包含在内 [Ariav 1986; Kung 1984]。

新的信息处理领域的概念建模的需求主要推动了语义数据模型的发展, 本文讨论了几种数据模型, 能满足大部分企业模式的建模要求。提高数据建模能力所需的另一种方法是自动产生数据模型以适合特殊应用环境的要求。数据模型编译器 [Maryanski等1986, 1987]和EXODUS [Carey等1986; Richardson and Carey 1987]研究了这种方法。在可变数据模型生成器方面, 关键的问题是概念数据模型语义的形式说明及表示, 第一步应确定表示模型的实体、联系、操作和约束等抽象概念。在数据模型编译器中用于表示数据模型语义的语言出现在Hung和 Maryanski [1988]的著作中, EXODUS项目开发了E程序设计语言 [Richardson and Carey 1987]作为基本的说明机制。如果数据模型产生器的想法是可行的, 那么就有可能修改语义数据模型来满足企业模式的要求。这样, 设计者头脑中的模型与数据库系统中的表示之间的差距就缩小了。

(接第48页)

的主体并非全部相信其它主体所传递来的信念和知识, 笔者在一般意识逻辑模型基础上曾提出一个信念依赖模型^[16], 用于研究和描述多主体环境下的信念和知识的传播特性。

4. 共同知识与逻辑万能问题

如前所述, 共同知识与逻辑万能问题是关于知识的推理这个领域中最重要两个基

作为此处所提出的模型说明, 语义数据建模仍处于研究阶段, 商业市场中将不会超出关系模型, 直到性能合理的语义数据模型出现为止。按年代计, 语义数据模型比关系模型晚七年才出现, 而年轻的产品已开始涌现, 成熟的系统可望在几年内产生。这些新产品的市场目标不是商业数据处理而是科学与工程产生的大量数据的管理。商业市场上语义数据模型的影响可能受下述条件限制:

- (1) 商业市场的惰性——除非利益远大于开销, 否则把大量数据转换到新模型的过程就不会出现。
- (2) 在科学/工程/生产市场的机会——对高级数据模型的需求已经存在。

对概念建模未来的一个合理预测将影响程序设计语言的发展。一些语言 (如FORTRAN和COBOL) 自出现以来就一直被使用者青睐, 同时新的语言不断出现, 许多语言实际上影响了研究者和应用程序员。设计者总是为一个任务寻求最佳模型, 随着应用复杂性的持续上升, 设计者对概念建模的要求亦相应增强, 且新的模型将不断产生。本文中讨论的这些模型是有代表性的下一代模型, 但不是最后一代。

(全文完)

参考文献 [略]

[纪岳、何未艾、王红、赖维生、陆强、钟颖译自、姚卿达校自ACM Computing Surveys, 1988, vol.20, №3]

本问题。至今为止, 已提出了许多不同的解决方案。但仍未取得理想的结果。许多计算机科学工作者和逻辑工作者都在为之而努力。相信在不久的将来, 认识逻辑及其与知识的推理的有关技术将会得到更为广泛的应用。这也可以视为思维科学在计算机科学中的应用的一个起点。

(参考文献略)