

基于描述逻辑的概念图推理^{*)}

王 军¹ 王继军¹ 甘 丹¹ 蒋运承^{1,2}

(广西师范大学计算机科学与信息工程学院 桂林 541004)¹ (中山大学计算机科学系 广州 510275)²

摘 要 分析了概念图在知识表示领域的重要性及其存在的问题,提出了一种基于描述逻辑的具有自动推理功能的扩展概念图。针对概念图的特点和需求,给出了将概念图的一个子集转化为描述逻辑知识库的方法,并证明了该方法的正确性。同时给出了其知识库的一致性、包含关系的自动判断方法,也证明了这些判断方法的正确性。

关键词 知识表示,概念图,描述逻辑,自动推理

Description Logics Based Conceptual Graphs Reasoning

WANG Jun¹ WANG Ji-jun¹ GAN Dan¹ JIANG Yun-cheng^{1,2}

(College of Computer Science and Information Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)¹

(Department of Computer Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)²

Abstract The importance and the existing problems of conceptual graphs in knowledge representation are discussed. Then a conceptual graphs extension based on description logic which can be automatically reasoned is proposed. According to the conceptual graphs characteristics and requirement, a method to translate a subset of conceptual graphs into a knowledge base of description logic is given, and its correctness is proved. At last, the automated reasoning methods of consistency, and subsumption relation of conceptual graphs are presented, and the correctness of these reasoning methods is also proved.

Keywords Knowledge representation, Conceptual graphs, Description logic, Automated reasoning

1 引言

概念结构 (Conceptual Structure) 是由美国科学家 J F Sowa 首先提出的, 是一种以语言学、心理学、哲学、逻辑学和数学为基础的知识表示方法, 其思想源于存在图和语义网络, 其理论建立在谓词逻辑之上^[1]。概念图是概念结构的具体模型, 它继承了语义网络直观性强, 易懂的特点, 能够和自然语言完全相互翻译, 描述其语义, 并且它不但能表示逻辑形式所能表示的形式, 而且能表示逻辑形式所不能表示的形式, 比如模态逻辑等^[2,3]。它的出现扩展了人工智能的知识表示方法, 对于信息时代从以数据处理为主的低级阶段向以知识表示为主的高级阶段的转变和发展有决定性的意义, 为知识表示的研究带来了一种新的思路^[4]。但是在知识表示领域, 人们所关心的不仅仅是对知识进行表示, 更重要的是在知识表示的基础上对其进行有效的推理, 比如概念图的一致性和包含关系推理等。由于概念图是一种具有一阶谓词逻辑完整表达能力的图形化表示, 能表达一阶谓词逻辑所能表示的所有知识, 因此使得上述推理对于一般的概念图而言是不可判定的, 即我们能找到可靠、完备的推理算法, 但是在实现这些算法的时候会遇到与一阶谓词逻辑同样的问题: 算法的不可终止性和很低的推理效率^[5,6]。这种局限性大大限制了概念图在人工智能中的应用。

为此, 急需一种可判定的自动推理的算法来判断概念图的一致性、包含关系等推理问题。实际上这方面已有研究, J F Sowa 通过对概念图的表达能力进行限制, 提出了概念图的一个可判定子集——简单概念图, 并且研究了它和描述逻辑

εLI 的对应关系^[7]; F Baader 在 J F Sowa 的工作基础上提出了一种表达能力更强的概念图子集——根简单概念图 (Rooted Simple Conceptual Graphs), 并且研究了它与描述逻辑 εLIRO¹ 的关系^[8]。但是 J F Sowa, F Baader 等人的研究中还存在如下不足: (1) 没有给出如何把概念图表示的知识转化为描述逻辑知识库的方法; (2) 没有给出如何利用描述逻辑已有的推理算法对概念图的一致性和包含关系进行判断的方法; (3) 没有考虑概念图的构成规则。

基于上述原因, 本文在 J F Sowa 和 F Baader 等人的工作基础上, 给出了把概念图所表示的知识转化为描述逻辑知识库的方法, 并且给出了这种转化方法的正确性证明; 给出了利用描述逻辑已有的可判定自动推理算法判断概念图的一致性和包含关系的方法, 也证明了这些方法的正确性。这些工作弥补了 J F Sowa 和 F Baader 等人研究中的不足, 为概念图在知识表示领域中的实际应用提供了坚实的理论基础。

2 描述逻辑 εLIRO¹

描述逻辑是一种基于对象的知识表示的形式化工具^[9]。本文所用的描述逻辑是 εLIRO¹, 首先介绍它的语法和语义, 领域知识是用概念描述来表示的, 概念描述是由常量集 N_I 、原子概念 (一元谓词) 集 N_C 和原子关系 (二元谓词) 集 N_R , 通过一组构造算子构造而成的。其中概念解释为对象的集合, 关系解释为对象之间的二元关系。描述逻辑 εLIRO¹ 是一阶逻辑的可判定子集, 所以其语义可以通过一阶逻辑给出, 它的语法和一阶语义如下 (A 表示原子概念, C 和 D 表示概念, R, R_1 和 R_2 表示关系):

^{*)} 基金项目: 国家自然科学基金项目 (60663001, 60673135, 60373081, 60573010); 中国博士后科学基金项目 (20060400226); 广西研究生教育创新项目 (2006106020812M37)。王 军 硕士研究生, 主要研究领域为语义 Web、描述逻辑等。

全概念(top-concept),语法表示为 $\top$,一阶语义为 $x=x$ 。

原子概念 $A \in N_C$,语法表示为 A ,一阶语义为 $A(x)$ 。

交(conjunction),语法表示为 $C \sqcap D$,一阶语义为 $\forall x. (C(x) \wedge D(x))$ 。

存在限制(existential restriction),语法表示为 $\exists R. C$,一阶语义为 $\exists y. R(x, y) \wedge C(y)$ 。

常量(constant) $a \in N_I$,语法表示为 $\{a\}$,一阶语义为 $x=a$ 。

原子关系 $R \in N_R$,语法表示为 R ,一阶语义为 $R(x, y)$ 。

反关系(inverse role),语法表示为 R^- ,一阶语义为若 $R(x, y)$ 则 $R^-(y, x)$ 。

关系的交(role conjunction),语法表示为 $R_1 \sqcap R_2$,一阶语义为 $R_1(x, y) \wedge R_2(x, y)$ 。

eLIRO¹ 的知识库 $KB = \langle TB, AB \rangle$ 由两部分组成: Tbox TB 和 Abox AB,其中 TBox 是一组概念包含公理、概念等价公理的集合。概念等价公理的形式为 $A \equiv D$,对于每一个概念必有一个概念等价公理与其对应,并且对于每一个概念等价公理的左边必须是没有被定义过的概念(即在 TBox 中每个概念只能被定义一次);概念包含公理的形式为 $C \sqsubseteq D$,它所表达的含义是,对于 C 的每一个实例必然也是 D 的实例。Abox 是实例断言的有限集合,包括概念断言和关系断言两种,形式分别为: $C(a)$ 和 $R(a_1, a_2)$ 。

一个解释 $I = (\Delta, \cdot^I)$ 是由一个领域集 Δ 和一个解释函数 $\cdot^I$ 组成的,解释函数 $\cdot^I$ 将每个常量 $a \in N_I$ 映射为 $a^I \in \Delta$,将概念 C 映射为 Δ^I 的一个子集 C^I ,把每个二元关系 R 映射为 $\Delta^I \times \Delta^I$ 的一个子集 R^I 。可以定义 eLIRO¹ 的语义解释为:

$$\begin{aligned} (\top)^I &= \Delta^I; \\ A^I &\subseteq \Delta^I; \\ (R^-)^I &= \{(b, a) \in \Delta^I \times \Delta^I \mid (a, b) \in R^I\}; \\ (\exists R. C)^I &= \{x \in \Delta^I \mid \exists y. (x, y) \in R^I \wedge y \in C^I\}; \\ (C_1 \sqcap C_2)^I &= (C_1)^I \cap (C_2)^I; \\ (R_1 \sqcap R_2)^I &= (R_1)^I \cap (R_2)^I. \end{aligned}$$

一个解释 $I = (\Delta, \cdot^I)$ 是包含断言 $C \sqsubseteq D$ 的模型,当且仅当 $C^I \subseteq D^I$;

一个解释 $I = (\Delta, \cdot^I)$ 是包含断言 $C \equiv D$ 的模型,当且仅当 $C^I = D^I$;

一个解释 $I = (\Delta, \cdot^I)$ 是 $C(a)$ 的模型,当且仅当 $a \in C^I$; I 是 $P(a, b)$ 的模型,当且仅当 $(a, b) \in P^I$;

如果解释 $I = (\Delta, \cdot^I)$ 满足知识库 KB 中的所有断言,则称 I 是 KB 的一个模型。如果知识库 KB 存在一个模型,则称 KB 是可满足的。对于知识库中的一个概念 C ,如果存在 KB 的一个模型 I ,使得 $C^I \neq \emptyset$,则称 C 在 KB 中是可满足的,如果知识库 KB 的任意一个模型 I 满足断言 α ,则称 KB 逻辑蕴含 α ,记为 $KB \models \alpha$ 。

3 简单概念图

简单概念图最早是由 J F Sowa 提出的概念图的一个可判定子集,它是由一个字母表和基于这个字母表的简单概念图集合组成的,并且支持一些构成规则^[10]。其中我们把未对变量进行赋值的简单概念图称为一般简单概念图。

3.1 字母表

字母表 S 是一个三元组 $S = (T_C, T_R, \zeta)$,其语义可通过映射 γ 由一阶逻辑给出,其中, T_C 和 T_R 分别表示有序的概念类型和关系类型集合,对任意 $C \in T_C$ 的一阶语义为 $C(x)$,对任意 n 元关系 $R \in T_R$ 的一阶语义为 $R(x_1, \dots, x_n)$, T_C 还

包含一个全类型(universal type),用 $\top$ 表示; ζ 是一组个体标识集,另外还有一个一般标识(generic marker),用 $*$ 表示,并且 $* \notin \zeta$, $*$ 包含其它所有个体标识,通过映射 γ ,个体标识转化为常量。类型之间的层次关系是由 $\leq$ 表示的一个包含关系序列,假设有两个类型 t_1 和 t_2 ,并且有 $t_1 \geq t_2$,则其一阶语义为 $\forall x_1 \dots x_k. (t_2(x_1 \dots x_k) \rightarrow t_1(x_1 \dots x_k))$,只有具有相同元的类型之间才能进行比较。

3.2 概念图集

一个基于字母表 S 的简单概念图是一个三元组 $G_S = (C_G, R_G, E_G)$,其中, C_G 和 R_G 分别表示概念节点和关系节点, E_G 表示连接两者的边。概念节点的一般形式为 $[type: ref]$,这里 $type$ 是 T_C 中的一个概念类型, ref 是个体标识集 $* \cup \zeta$ 中的一个标识。如果概念节点的 ref 为 $*$,则称这个节点为一般概念节点,其余的称为个体概念节点。类型与标识之间有一个函数 $referent: T_C \rightarrow (* \cup \zeta)$ 将 T_C 中的概念映射为 $(* \cup \zeta)$ 中的标识集合。

给定一个简单概念图 g ,其等价的一阶逻辑公式 $\gamma(g)$ 按如下方式构造:为每个概念节点指定一个标识(为不同的一般节点指定不同的变量,为不同个体节点指定不同的常量),那么一个概念节点就和一个原子公式 $t(e)$ 相对应,这里 t 是节点的类型所对应的谓词, e 是指定给这个节点的个体标识,同理可以由关系节点得到原子公式 $t(e_1 \dots e_k)$ 。令 $\Psi(g)$ 是这些原子公式的交,那么 $\gamma(g)$ 就是 $\Psi(g)$ 的存在封闭(existential closure)。两个简单概念图 g 和 h 的包含关系的一阶语义为 $\forall x. (\gamma(g) \rightarrow \gamma(h))$ 。

3.3 构成规则

概念图可以通过拷贝、限制、连接和化简等构成规则得到新的概念图。拷贝(copy):把一个概念图精确复制为另外一个概念图,其一阶语义可由 $\forall x. (\gamma(g) = \gamma(h))$ 给出;限制(restrict)是用一个概念的子类型去替换这个概念而得到的新的概念图,其一阶语义可由 $\forall x. (\gamma(h) = \gamma(g))$ 给出;连接(join)是合并两个图中的相同的概念从而得到一个新的复合概念图,其一阶语义可由 $\forall x. (\gamma(g) \Rightarrow (\gamma(g) \wedge \gamma(h)))$ 给出;化简是消除图中的冗余,其一阶语义可由 $\forall x. (\gamma(g) = \gamma(h))$ 给出。有了以上构成规则,就可以由一些最基本的概念图,得到更加复杂的概念图。

4 基于描述逻辑的概念图

4.1 简单概念图与描述逻辑

首先分析描述逻辑和简单概念图的差异^[7,8],然后设法通过对简单概念图进行限制或扩充,以得到一个能用描述逻辑进行表示的简单概念图。

(1) 大多数描述逻辑中只允许二元关系出现,而简单概念图中可以出现多元关系。所以这里限制字母表 S 中的关系类型为二元的。

(2) 所有的描述逻辑都允许概念交出现,在概念图中,概念类型只允许单个的概念出现,这里我们把概念节点的类型扩充为 $(\{A_1, \dots, A_n\}, x)$,即允许概念节点的类型为 T_C 中的一组概念类型的交。称满足(1)(2)的概念图为延伸简单概念图,记作 G_e 。

(3) 一阶语义方面,概念图转化为封闭(closed)一阶公式,而描述逻辑概念描述转化为只含有一个自由变元的公式。因此这里我们在延伸简单概念图的基础上,给出一种称为根简单概念图的概念图,记为 $RSGs$ 。其定义如下:一个基于字母表 $S = (T_C, T_R, \zeta)$ 的根简单概念图是一个四元组 $G_r = (C, R, E, v_0)$,其中 (C, R, E) 是一个延伸简单概念图, v_0 类似于数

据结构中树的根节点,在这里也称为根节点。给定 $S=(T_C, T_R, \zeta)$ 的一个解释 $I=(\Delta, \cdot^I)$, 根简单概念图 $G_r=(C, R, E, v_0)$ 的语义为 $\{\delta \in \Delta \mid I \models \gamma(G_r, \delta)\}$ 。根简单概念图可以通过以下方法得到一个只含有一个自由变元的一阶公式 $\gamma(G_r)(x_0)$: 我们分 $ref(v_0) \in N_I$ 和 $ref(v_0) = *$ 两种情况进行讨论, 第一种情况, 用 $x_0 = ref(v_0)$ 对延伸简单概念图 G_r 的一阶公式 $\gamma(G_r)$ 进行扩充, 其中 x_0 是一个新变元; 第二种情况, 是通过消除 $\gamma(G_r)$ 存在限制中的变元 x_0 而得到的。下面引用文献[9] 中一个根简单概念图的例子, 并给出其一阶逻辑公式。如图 1 所示的根简单概念图, 它所对应的一阶公式为: $\gamma(G_r)(x) = \exists x_1. Female(x_0) \wedge has-child(Perter, x_0) \wedge Man(Perter) \wedge has-child(x_0, x_1) \wedge likes(x_0, x_1) \wedge male(x_1) \wedge Student(x_1) \wedge attends(x_1, KR101) \wedge CScourse(KR101)$ 。可以看出, 其对应的一阶公式中只含有一个自由变元 x_0 。

通过上述限制和扩充, 就可以把每个根简单概念图对应到一个唯一的描述逻辑 $\epsilon LIRO^1$ 概念描述。其具体对应关系为: 概念描述中的所有原子概念和常量对应于根简单概念图的根节点, 对于概念描述中的每个存在限制 $\exists R. C$, R 对应于根简单概念图中边上的关系, 而 C 则对应到该边所连接的概念节点。或者通过另外一种方法也可以得到两者的对应关系, 在上面的内容中我们已经介绍了如何把根简单概念图转化为一阶逻辑公式, 而由文献[11]可知, 描述逻辑的概念描述和一阶逻辑公式也是一一对应的, 这样我们就可以通过这种对应关系很容易地把根简单概念图转化为描述逻辑 $\epsilon LIRO^1$ 概念描述。下面给出图 1 所对应的概念描述:

$C \equiv Female \sqcap \exists has-child. \{Perter\} \sqcap \exists (likes \sqcap has-child). (Male \sqcap Student \sqcap \exists attends. (CScourse \sqcap \{KR101\}) \sqcap \exists likes. \{Perter\} \sqcap Man(Perter))$ 。

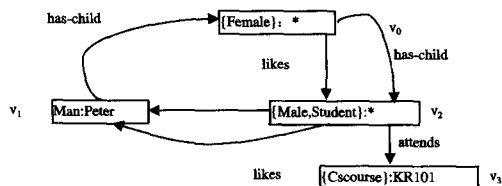


图 1 根简单概念图 G_r

为了利用描述逻辑 $\epsilon LIRO^1$ 的推理机制对根简单概念图的一致性、包含关系等问题进行自动推理, 需要解决以下两个问题: (1) 将根简单概念图知识转化为 $\epsilon LIRO^1$ 知识库, 并证明这种转化的正确性; (2) 将根简单概念图的推理问题转化为 $\epsilon LIRO^1$ 的推理问题, 并证明这种转化的正确性。下面分别介绍这两个问题。

4.2 概念图与描述逻辑 $\epsilon LIRO^1$

根简单概念图所表示的知识可以通过一个转化函数 ϕ 转化为描述逻辑 $\epsilon LIRO^1$ 的知识库, 记为 $\phi(RSGs)$, 下面给出具体转化关系。

(1) $\phi(RSGs)$ 的原子概念集合 N_C 由下列元素组成:

对字母表 S 中的每个概念类型 C , $\phi(C)$ 是一个原子概念。

(2) $\phi(RSGs)$ 的原子关系集合 N_R 由下列元素组成:

对字母表 S 中的每个关系类型 R , $\phi(R)$ 是一个二元原子关系。

(3) $\phi(RSGs)$ 常量集合 N_I 由下列元素组成:

对字母表中 ζ 的每个个体标识 a , $\phi(a)$ 是一个常量; $*$ 对应于 $\phi(RSGs)$ 中的个体标识全集。

(4) $\phi(RSGs)$ 的公理集合 TB 由下列元素组成:

对于每个一般简单概念图 g , $C \equiv \phi(g \in C)$ 表示由 g 转化而得的概念描述标识是公理;

对于概念类型层次结构, $\phi(C_i) \sqsubseteq \phi(C) \sqcap \phi(C_i)$ 是公理, 其中 $1 \leq i \leq n$;

对于关系类型层次结构, $\phi(R_i) \sqsubseteq \phi(R) \sqcap \phi(R_i)$ 是公理, 其中 $1 \leq i \leq n$;

对于复制规则, 假设 g 复制为 h , 则 $\phi(g) \equiv \phi(h)$ (其中 $\phi(g)$ 和 $\phi(h)$ 分别表示由 g 和 h 转化而得的概念描述) 是公理;

对于限定规则, 假设 g 限定为 h , 则 $\phi(h) \sqsubseteq \phi(g) \sqcap \phi(h)$ (其中 $\phi(g)$ 和 $\phi(h)$ 分别表示 g 和 h 转化而得的概念描述) 是公理;

对于联合规则, 假设 g 和 h 联合后得到 q , 则 $\phi(q) \sqsubseteq \phi(g) \sqcap \phi(h)$ (其中 $\phi(q)$, $\phi(g)$ 和 $\phi(h)$ 分别是由 q , g 和 h 转化而得的概念描述) 是公理;

对于简化规则, 假设 h 是由 g 简化而得的简单概念图, 则 $\phi(g) \equiv \phi(h)$ (其中 $\phi(g)$ 和 $\phi(h)$ 分别表示 g 和 h 转化而得的概念描述) 是公理。

说明: (1) 对于如何把一个根简单概念图转化为一个描述逻辑 $\epsilon LIRO^1$ 概念描述, 具体转化方法见 4.1 节;

(2) 由于下面所要介绍的描述逻辑推理不涉及个体实例, 因此这里我们没有给出 $\phi(RSGs)$ 的 Abox。

下面给出上述转化函数 ϕ 的正确性证明, 即证明上述转化函数 ϕ 能正确地将根简单概念图表示的知识转化为描述逻辑 $\epsilon LIRO^1$ 的知识库。这里是通过建立 $RSGs$ 的实例与 $\phi(RSGs)$ 的模型之间的对应来证明上述转化的正确性。

定理 1 给定一个简单概念图 $RSGs$, $\phi(RSGs)$ 是由 $RSGs$ 转化得到的 $\epsilon LIRO^1$ 知识库, 则: (1) $RSGs$ 的任意一个实例是 $\phi(RSGs)$ 的一个模型, (2) $\phi(RSGs)$ 的任意一个模型是 $RSGs$ 的一个实例。

证明: 从转化函数 ϕ 可知, 从 $RSGs$ 转化为 $\epsilon LIRO^1$ 的知识库 $\phi(RSGs)$ 时, 是分别将 $RSGs$ 的构成规则、概念类型层次、关系类型层次、概念图描述等转化为 $\epsilon LIRO^1$ 的公理。而 $RSGs$ 的形式语义可用一阶逻辑给出的, 即 $RSGs$ 的构成规则、概念类型层次、关系类型层次和概念描述可以转化为一阶逻辑公式集合。因而下面只需证明对任意一个解释 I , I 满足由 $RSGs$ 转化得到的一阶逻辑公式集合 $FOL(RSGs)$, 当且仅当 I 满足转化得到的 $\epsilon LIRO^1$ 的知识库 $\phi(RSGs)$ 。下面对转化函数 ϕ 中的概念类型层次和限定规则进行讨论, 其它的情况可以类似进行。

概念类型层次对应的一阶逻辑公式为 $FOL(RSGs) = \forall x. (C_i(x) \rightarrow C(x))$, 而对应的 $\epsilon LIRO^1$ 知识库 $\phi(RSGs) = \phi(C_i) \sqsubseteq \phi(C) \sqcap \phi(C_i)$, 其中 $1 \leq i \leq n$ 。给定 $RSGs$ 的一个实例 I , 即 I 是 $FOL(RSGs)$ 的一个模型, 对任意的 $x \in C_i$, 有 $\forall x. (C_i(x) \rightarrow C(x))$, 其中 $1 \leq i \leq n$, 也就是对 $x \in \phi(C_i)^I$, 有 $x \in \phi(C) \sqcap \phi(C_i)$, 从而 I 是 $\phi(RSGs) = \phi(C_i) \sqsubseteq \phi(C) \sqcap \phi(C_i)$ 的一个模型。反过来给定 $\phi(RSGs) = \phi(C_i) \sqsubseteq \phi(C) \sqcap \phi(C_i)$ 的一个模型 I , 对任意的 $x \in \phi(C_i)^I$, 有 $x \in \phi(C) \sqcap \phi(C_i)$, 也就是对 $C_i(x)$, 有 $\forall x. (C_i(x) \rightarrow C(x))$, 从而 I 是 $FOL(RSGs) = \forall x. (C_i(x) \rightarrow C(x))$ 的一个模型。

概念图限定规则的一阶逻辑公式为 $FOL(RSGs) = \forall x. (\gamma(h) \rightarrow \gamma(g))$, 而对应的 $\epsilon LIRO^1$ 知识库 $\phi(RSGs) = \phi(h) \sqsubseteq \phi(g) \sqcap \phi(h)$ 。给定 $RSGs$ 的一个实例 I , 即 I 是 $FOL(RSGs)$ 的一个模型, 对任意的 $x \in \gamma(h)$, 有 $\forall x. (\gamma(h) \rightarrow \gamma(g))$ 。也就是对 $x \in \phi(h)^I$, 有 $x \in \phi(g) \sqcap \phi(h)$, 从而 I 是 $\phi(RSGs) = \phi(h) \sqsubseteq \phi(g) \sqcap \phi(h)$ 的一个模型。反过来给定 $\phi(RSGs) = \phi(h) \sqsubseteq \phi(g) \sqcap \phi(h)$ 的一个模型 I , 对任意的 $x \in \phi(h)^I$, 有 $x \in \phi(g) \sqcap \phi(h)$ 。

$\phi(h)$,也就是对 $\gamma(h)$,有 $\forall x. (\gamma(h) \rightarrow \gamma(g))$,从而 I 是 $FOL(RSG_s) = \forall x. (\gamma(h) \rightarrow \gamma(g))$ 的一个模型。证毕。

定理 1 说明了 RSG_s 的实例与 RSG_s 通过转化得到的 $\epsilon LIRO^1$ 的知识库 $\phi(RSG_s)$ 的模型之间可以建立一一对应关系,从而保证了转化函数 ϕ 的正确性,即转化函数 ϕ 能正确地将 RSG_s 所表示的知识转化描述逻辑 $\epsilon LIRO^1$ 知识库。

下面介绍 RSG_s 的推理问题,即如何把 RSG_s 的一致性和包含关系推理转化为描述逻辑 $\epsilon LIRO^1$ 的推理问题,从而可以利用描述逻辑已有的可判定自动推理算法对 RSG_s 的推理问题进行推理。

4.3 根简单概念图的推理

根简单概念图的推理问题主要包括判断一致性和包含关系。

上面已经介绍了将 RSG_s 所表示的知识转化为 $\epsilon LIRO^1$ 知识库。在此基础上,下面介绍将 RSG_s 的推理问题转化为 $\epsilon LIRO^1$ 推理问题的有关方法。首先给出 RSG_s 的一致性和包含关系的定义。

定义 1 给定 RSG_s , C 是字母表中的一个概念类型, g 和 h 分别表示两个一般简单概念图。如果对 RSG_s 的任意实例,满足 $C' \neq \emptyset$,则称 C 是一致的;如果对任意一个实例 I ,满足 $g' \sqsubseteq h'$,则称 h 包含 g 。

下面给出 RSG_s 模型的一致性的有关转化定理。

定理 2 给定一个 RSG_s , C 是一个概念类型, $\phi(RSG_s)$ 是通过转化得到的 $\epsilon LIRO^1$ 知识库,则 C 是一致的,当且仅当 $\phi(C)$ 在 $\phi(RSG_s)$ 中是可满足的。

证明:先证明 $\Rightarrow$,因为 C 是一致的,所以存在一个实例 I ,使得 $C' \neq \emptyset$ 。由定理 1 可知, I 是 $\phi(RSG_s)$ 的一个模型,根据 RSG_s 到 $\phi(RSG_s)$ 的转化方法可知, RSG_s 中的概念类型 C 对应于 $\phi(RSG_s)$ 中的概念 $\phi(C)$ 。由于 $C' \neq \emptyset$,并且 I 是 $C' \neq \emptyset$ 的一个模型,因此有 $(\phi(C))' \neq \emptyset$,从而可知 $\phi(C)$ 在 $\phi(RSG_s)$ 中是可满足的。

再证明 $\Leftarrow$,因为 $\phi(C)$ 在 $\phi(RSG_s)$ 中是可满足的,所以 $\phi(RSG_s)$ 存在一个模型 I ,使得 $(\phi(C))' \neq \emptyset$ 。由定理 1 可知, I 是 RSG_s 的一个实例。根据 RSG_s 到 $\phi(RSG_s)$ 的转化方法可知, $\phi(RSG_s)$ 中的概念 $\phi(C)$ 对应于 RSG_s 中的类 C 。由于 $(\phi(C))' \neq \emptyset$,并且 I 是 RSG_s 的一个实例,因此 $C' \neq \emptyset$,即 C 是一致的。证毕。

下面给出 RSG_s 的包含关系的有关转化定理。

定理 3 给定一个 RSG_s , g 和 h 是两个一般简单概念图, $\phi(RSG_s)$ 是 RSG_s 通过转化得到的 $\epsilon LIRO^1$ 知识库,则 h 包含 g ,即 $g \sqsubseteq h$,当且仅当 $\phi(g) \sqsubseteq \phi(h)$ 。

证明:先证明 $\Rightarrow$, $\phi(RSG_s) \models \phi(g) \sqsubseteq \phi(h)$ 成立,则 $\phi(g) \sqcap \neg \phi(h)$ 是一致的,从而由定理 2 可得, $\phi(RSG_s) \models \phi(g) \sqcap \neg \phi(h) \sqsubseteq \perp$ 。因此 $\phi(RSG_s)$ 存在一个模型 I ,使得 $d \in (\phi(g))'$ 和 $d \notin (\phi(h))'$ 成立,其中 $d \in \Delta^I$ 。因为 I 是 $\phi(RSG_s)$ 的一个模型,由定理 1 可知, I 是 RSG_s 的一个实例。根据 RSG_s 到 $\phi(RSG_s)$ 的转化方法可知, $\phi(RSG_s)$ 中的概念 $\phi(g)$ 和 $\phi(h)$ 分别对应与 RSG_s 中的一般简单概念图 g 和 h ,并且 RSG_s 和 $\phi(RSG_s)$ 有相同的解释论域。从而由 $d \in (\phi(g))'$ 和 $d \notin (\phi(h))'$,可知 $d \in g'$ 和 $d \notin h'$ 成立,因此有 $g \not\sqsubseteq h$ 与 $g \sqsubseteq h$ 矛盾。所以有 $\phi(RSG_s) \models \phi(g) \sqsubseteq \phi(h)$ 。

再证明 $\Leftarrow$,假设 $g \sqsubseteq h$ 不成立,则存在一个 RSG_s 的实例 I 和实例的值 $v \in \Delta^I$,使得 $v \in g'$ 和 $v \notin h'$ 成立。因为 I 是 RSG_s 的实例,由定理 1 可知, I 是 $\phi(RSG_s)$ 的一个模型。根据 RSG_s 到 $\phi(RSG_s)$ 的转化方法可知, RSG_s 中的一般简单概念图分别 g 和 h 分别对应于 $\phi(RSG_s)$ 中的概念 $\phi(g)$ 和 $\phi(h)$,

并且 RSG_s 和 $\phi(RSG_s)$ 有相同的论域。从而由 $v \in g'$ 和 $v \notin h'$ 可知 $v \in (\phi(g))'$ 和 $v \notin (\phi(h))'$ 成立,因此有 $\phi(RSG_s) \models \phi(g) \not\sqsubseteq \phi(h)$,与 $\phi(RSG_s) \models \phi(g) \sqsubseteq \phi(h)$ 矛盾。所以有 $g \sqsubseteq h$ 。证毕。

由定理 2 和定理 3 可知,我们把 RSG_s 的推理问题转化为了描述逻辑 $\epsilon LIRO^1$ 的推理问题。由于 $\epsilon LIRO^1$ 具有自动推理机制,从而可以利用 $\epsilon LIRO^1$ 的推理机制对 RSG_s 的推理问题进行自动推理。

结束语 本文分析了概念图在知识表示领域中的重要性及存在的问题,研究了基于描述逻辑 $\epsilon LIRO^1$ 的根简单概念图。通过对概念图进行限制和扩充,建立根简单概念图与描述逻辑 $\epsilon LIRO^1$ 之间的对应关系,更进一步,把根简单概念图所表示的知识转化为 $\epsilon LIRO^1$ 知识库,并证明了这种转化的正确性,然后利用 $\epsilon LIRO^1$ 的自动推理算法对概念图的推理问题进行了研究,为概念图在知识表示领域中的应用提供了坚实的理论基础。进一步的工作主要有:找到一个表达能力更强的可判定概念图子集;把概念图的最小公共超类型和最大公共子类型的推理问题也转化描述逻辑推理;对上述推理问题的复杂性进行研究。

参考文献

- [1] Sowa J F. Conceptual Structure, Information Processing in Mind and Machine. Boston: Addison-Wesley Publishing Co Inc, 1984
- [2] Leow M P. Fuzzy Conceptual Graphs for Matching Images of Natural Scenes // Proceedings of 17th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2001). 2001; 1397-1404
- [3] Castelfranchi C, Parisi D. Knowledge representation and Natural Language // Bara B G, Guida G, eds. Computational Models of Natural Language Processing, Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland), 1984; 59-89
- [4] Fargue J, Landau M C, et al. Conceptual Graphs for Semantics an Knowledge Processing. IBM J. Res. Develop, JULY 1976; 336-357
- [5] Wermelinger M. Conceptual Graphs and First-Order Logic // Ellis G, Rich W, Sowa J F, eds. Proceedings of 3th International Conference on Conceptual Structures (ICCS' 95). LNAI 954. Springer, 1995; 323-337
- [6] Kerdiles G, Salvat E. A Sound and Complete CG Proof Procedure Combining Projections with Analytic Tableaux // Lukose D, Delugach H, Keeler M, et al. eds. Proceedings of the 5th International Conference on Conceptual Structures (ICCS' 97), LNCS 1257. Springer, 1997; 371-385
- [7] Baader F, Guinness M, Nardi D, et al. The Description Logic Handbook: Theory Implementation and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2003; 142-182
- [8] Baader F, Mitor R, Tobies S. On the Relatiopn between Conceptual Graphs and Description Logics. Technology Research group for Theoretical Computer Science Aachen University, 1998, 11 (6); 1-28
- [9] 蒋运承, 汤庸, 王驹. 基于描述逻辑的模糊 ER 模型. 软件学报, 2006, 17(1); 20-30
- [10] Baget F. Simple Conceptual Graphs Revisited; Hypergraphs and Conjunctive Types for Efficient Projection Algorithms // Proceedings of the 11th International Conference on Conceptual Structures (ICCS' 03). LNAI 2746, Springer, 2003; 229-242
- [11] Borgida A. On the Relative Expressiveness of Description Logics and Predicate Logics. Artificial Intelligence, 1996, 82 (5); 353-367