

基于描述逻辑的目标推理研究

吴修国^{1,2} 曾广周¹ 许崇敬²

(山东大学计算机科学与技术学院 济南 250061)¹ (山东经济学院信息管理学院 济南 250014)²

摘要 描述逻辑(Description Logics, DLs)是近年来研究和发展最快的知识表示的形式化工具之一,具有强大的表达能力、可判定性等优点。本文将描述逻辑应用于主体研究领域中的目标表示和推理,充分利用其具有自动判断概念包含关系的有效推理功能,为主体提供目标推理工具。

关键词 描述逻辑,目标一致性,目标层次

Research on Goal Reasoning Based on Description Logics

WU Xiu-guo^{1,2} ZENG Guang-zhou¹ XU Chong-jing²

(School of Computer Science and Technology, Shandong University, Jinan 250061, China)¹

(School of Information Management, Shandong University of Economic Jinan 250014, China)²

Abstract Description logics is one of formal tools for knowledge representation which is studied and developed rapidly in recent years. It has many merits such as powerful expressive capability and determinant. This paper applies Description logics into the representation and reasoning of goals in the area of Agent and supplies valid determinant goal reasoning service based on the automatic judgment of the subsumption of concept in DLs.

Keywords Description logics(DLs), Goal consistency, Goal hierarchy

1 引言

描述逻辑(Description Logics, DLs)作为一簇知识表示语言,是近年来研究和发展最快的知识表示的形式化工具之一。它具有强大的表达能力、可判定性和能提供有效的推理服务等特征。目前国内外许多学者对描述逻辑进行了深入的研究,特别是在描述逻辑的应用方面。例如,董明凯等人使用动态描述逻辑建立了一种主体心智模型,包括主体的信念、能力、目标和规划等,该主体模型将理论和实践有机地结合起来,表达能力强,能够充分体现智能主体的本质特征运行机制;史忠植等人利用描述逻辑描述主体服务,提出了基于描述逻辑的主体服务匹配机制,该方法充分利用描述逻辑具有清晰模型-理论语义的特点,使得服务匹配具有有效性;V. Haarslev 等人对基本描述逻辑(ALC)进行了扩展,形成了ALCRP(D),并应用于具体的空间推理领域,取得了较好的效果。

在主体的目标描述方面,传统的解决办法是以线性逻辑作为理论基础。但是,直接使用线性逻辑存在语义不够自然、推理过程繁琐和没有完备的公理体系等问题。用任务逻辑来描述主体能力是一个研究方向,Giorgi 等人首次提出并系统地研究了基于谓词框架下的任务逻辑(the Logic of Tasks)。然而,在该框架下一个任务的可完成性是不可判定的。张会等在现有任务逻辑的基础上提出了描述任务逻辑(the Description Logic of Tasks),但它仍然是囿于谓词逻辑框架的,通过代换来判定任务的完成性。

基于以上原因,本文以描述逻辑为基础,对主体的目标知识进行描述,并在此基础上充分利用描述逻辑的优点对主体的目标进行可满足性以及分层等推理。第2节给出了基本描

述逻辑(ALC)的语法和语义;第3节以知识表示为基础分析了目标推理机制;最后总结全文并对下一步工作进行展望。

2 描述逻辑基础

2.1 描述逻辑

描述逻辑源于构造遗传网络和基于框架的表示。一个描述逻辑系统包含四个基本组成部分:①表示概念和关系的构造集;②Tbox 包含断言;③Abox 实例断言;④Tbox 和 Abox 上的推理机制。描述逻辑系统的表达能力和推理能力取决于对以上几个要素的选择以及不同的假设。一般来说,描述逻辑有两个基本元素,即概念(Concept)和关系(Role)。概念解释为一个领域的子集;关系则表示在领域中个体之间所具有的相互关系,是在领域集合上的一种二元关系。

在一定领域中,一个知识库 $K = \langle T, A \rangle$ 由两个部分组成: TBox T 和 ABox A。其中, TBox 是一个关于包含断言的有限集合,也称为术语公理的集合。包含断言的一般形式为 $C \sqsubseteq D$, 其中 C 和 D 都是概念。ABox 是实例断言的有限集合,形为 $C(a)$, 其中 C 是一个概念, a 是一个个体的名字;或者形为 $P(a, b)$, 其中 P 为一个原始关系, a, b 为两个个体的名字。

一般地,描述逻辑依据提供的构造算子,在简单的概念和关系上可以构造出复杂的概念和关系。通常,描述逻辑至少包含以下算子:交(\sqcap)、并(\sqcup)、非(\neg)、存在量词(\exists)和全称量词(\forall)。这种最基本的描述逻辑称之为 ALC。在 ALC 的基础上再添加不同的构造算子,则构成不同表达能力的描述逻辑。例如在 ALC 上添加数量约束算子“ \leq ”和“ \geq ”,则构成描述逻辑 ALCN。

ALC 语义将概念解释为一定领域的子集,关系是该领域上的二元关系。形式上,一个解释 $I = (\Delta^I, \cdot^I)$ 由解释的领

域 Δ^I 和解释函数 \cdot^I 所构成,其中解释函数把每个原子概念 A 映射到 Δ^I 的子集,而把每个原子关系 P 映射到 $\Delta^I \times \Delta^I$ 的子集。

2.2 描述逻辑的推理机制

描述逻辑中的基本推理问题主要包括概念的可满足性、概念间的包含关系、实例检测、一致性检测等。其中,概念的可满足性问题是最基本的问题,其它的推理基本上都可以转化为概念的可满足性问题。

检验一个概念的可满足性,实际上就是看是否有解释使得这个概念成立。例如,对概念 $\text{Male} \sqcap \text{Female}$,即需要检测是否有性别既是男的又是女的这样的人。若确实没有这种两性人,则可以断言这个概念是不可满足的。而对于概念 $\text{Student} \sqcap \text{Worker}$,它是可满足的,它代表那些在职学生的集合。在描述逻辑中,可以利用下述性质对推理问题进行约简,转化为概念的可满足性问题,进而将推理问题进行简化。对于概念 C 和 D ,有如下命题成立:

(1) $C \sqsubseteq D \Leftrightarrow C \sqcap \neg D$ 是不可满足的;

(2) $C \doteq D$ 是等价的 $\Leftrightarrow (C \sqcap \neg D)$ 与 $(D \sqcap \neg C)$ 都是不可满足的;

(3) C 与 D 是不相交的 $\Leftrightarrow C \sqcap D$ 是不可满足的。

为了充分支持目标的可判定性推理,首先给出 Badder 和 Hanschke 提出的将描述逻辑和具体域相结合而定义的描述逻辑 $\text{ALC}(D)$ 。

定义 1 具体域 D 是一个二元组 $\langle \Delta_D, \Phi_D \rangle$,其中 Δ_D 是一个被称为域的集合, Φ_D 是谓词名的集合。 Φ_D 中的谓词都是 n 维的,并且任意一个 n 元谓词 $p^D \subseteq (\Delta_D)^n$ 。具体域 D 被称为可纳的当且仅当具体域 D 的谓词名的集合在非运算下是闭合的,并且包含一个 Δ_D 名,并且有限个谓词的合取运算的可满足性是可判定的。

3 基于描述逻辑的目标推理

3.1 语义描述

在关于主体的研究中,主体被看作是来设计完成某类任务的、能在一定环境中具有生命周期的、可以自主控制行为的、可以移动的计算实体。它具有自治性、反应性、能动性、学习性、通信性和移动性等特性。其中的能动性主要表现为面向目标的行为。一般地,目标被看作是希望系统达到的状态或者通过采取某项行动后收到的效果,是对意向的一种说明性的描述。

通常地,主体能力描述和推理首先要描述主体自身的能力。而在描述主体能力时,往往将其表示为主体能完成的目标的集合。也就是说,主体的能力描述是一个由有限个简单目标组成的集合(记为 Σ)。主体在完成既定的目标之前,需要在自身的能力基础上对目标进行推理,包括建立目标层次结构,判定它的一致性、可满足性等。本文利用描述逻辑具有自动判断概念包含关系的有效推理功能,利用 DL 推理机为主体目标推理,提供自动的目标分层机制以及自动建立目标分层,然后在目标分层的基础上判定目标的可满足性。

基于描述逻辑的目标的语义由以下各部分组成:

(1) 非空集合 Δ ,是领域中所讨论的所有目标的集合,包括原子目标和中间目标等,称为论域;

(2) 解释映射 I ,它对形式系统中的个体常元、概念和关系加以解释:

① 个体常元是论域中的一个具体目标;

② 概念是论域 Δ 的一个子集;

③ 关系是该论域上的二元关系。

在接下来的讨论中,将公式称为目标公式或者目标。

3.2 目标一致性判定

赋予主体的目标并不一定都是一致的。对于不一致的目标,主体当然不能实现。因此,检验目标的一致性目标是进行目标推理的基础。比如,目标 $\alpha = \text{Arrive}(\text{Beijing}) \sqcap \text{Leave}(\text{Beijing})$,对于这样的目标就是不一致的,或者冲突的。

定义 2 目标公式 α 是冲突的,当且仅当具有如下情形之一,其中 C 为任意概念, R 为关系, a, b 为任意个体常元:

(1) $\{ \perp(a) \}$

(2) $\{ C(a), \neg C(a) \}$

(3) $\{ R(a, b), \neg R(a, b) \}$

定义 3 一个目标公式集 α 是一致的,当且仅当 α 中不含冲突;否则称 α 是不一致的。

下面给出目标公式集的一致性检测算法。该算法主要利用 DL 中基本的公理对原有的公式集进行扩充,然后检测是否有冲突出现。假设 α 为目标公式, α 中的公式都是否标准式,即所有的一操作符都出现在原子目标之前。如果一个目标公式不是否标准式,可以按照以下规则进行转换:

$\neg(\alpha \sqcap \beta) \Leftrightarrow \neg\alpha \sqcup \neg\beta$

$\neg(\alpha \sqcup \beta) \Leftrightarrow \neg\alpha \sqcap \neg\beta$

算法通过以下步骤对 α 进行扩充并检测:

步骤 1 若有 $C(x) \in \alpha$,且有 $\forall x(C(x) \rightarrow D(x))$,则把 $D(x)$ 添加到 α 中;

步骤 2 使用下述规则对 α 中的公式进行扩充,直到没有可用的规则:

(1) \sqcap 规则:若 $C_1 \sqcap C_2(x) \in \alpha$,并且 $C_1(x) \notin \alpha, C_2(x) \notin \alpha$,则将 $\{C_1(x), C_2(x)\}$ 并入 α 中;

(2) \sqcup 规则:若 $C_1 \sqcup C_2(x) \in \alpha$,并且 $C_1(x) \notin \alpha, C_2(x) \notin \alpha$,则将 $\{D(x)\}$ 并入 α 中,其中 $D=C_1$ 或者 $D=C_2$;

(3) \exists 规则:若 $\exists R. C(x) \in \alpha$,且没有 y 使得 $R(x, y)$ 且 $C(y) \in \alpha$,则将 $\{C(y), R(x, y)\}$ 并入 α 中;

(4) \forall 规则:若 $\forall R. C(x) \in \alpha, R(x, y) \in \alpha$,且 $C(y) \notin \alpha$,则将 $\{C(y)\}$ 并入 α 中;

步骤 3 最后检测 α 中是否含有冲突,若没有冲突,则 α 是一致的,否则 α 是不一致的。算法终止。

在上述几个步骤中,步骤 2 中的“(2) \sqcup 规则”是不确定,可能得到两个分支 α_1 和 α_2 。若多次使用该规则,则将得到一个有穷的集合 $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ 。此时,只要 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 中有一个公式集是一致的,即目标公式 α 不包含冲突, α 就是一致的;若 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 中都包含冲突,则公式 α 就是不一致的。在算法的实际运行中,只要有一个分支出现了冲突,则就可以将该分支丢掉。

定理 1 目标公式集的一致性问题是可判定的。

证明:要检测目标公式集 α 是否一致,主要就是查找公式集中是否含有冲突。一个目标公式可以在各种规则的作用下进行扩充,正如上述算法所描述的。现在只需证明该算法确定终止就可以了。下面分别对算法的各个步骤进行证明:

(1) 算法的第一步使用公理对公式集进行扩充,主要是进行概念的替换操作,因此在多项式时间内就可以完成,是确定的;

(2) 第二步是用与概念运算对应的四个规则,其中只有 \sqcup 是不确定的规则,至多可能出现完全二叉树的情形,即至多可

以在指数时间内完成;而其它规则都是确定可执行的,因此,第二步至多可以在指数时间内完成。

当公式通过上述步骤进行扩充后,它是确定可以终止的,而在得到公式集中查找冲突的过程是确定的。要么有冲突,是不一致的;要么没有冲突,是一致的。因此,目标公式的一致性判断过程是确定可终止的,是可判定的。证毕。

3.3 目标的概念分层

一般来说,解决一个具体目标的方法,是将目标分解为“And/Or”结构的树,即将目标分层。目标分层可以使得主体知识库中的概念层次清晰,结构完整,更易于目标的推理。

假设主体知识库中的所有目标的集合 $\alpha = \{ \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n \}$, 规定 α 中不包含相等(或等价)的目标,可以利用描述逻辑推理机建立目标层次结构。算法如下:

输入: 目标集合 $\alpha = \{ \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n \}$

输出: 目标分层结构图 G_α

(1) 初始化 $G_\alpha = \text{null}$;

(2) 如果 α 为空, 则算法结束, 返回 G_α ;

(3) 从 α 中取出 $\alpha_i, 1 \leq i \leq n$, 修改 $\alpha = \alpha - \{ \alpha_i \}$;

(4) 若 G_α 为空, 生成根节点 $\text{root} = \text{new node}(\text{"root"})$, 生成节点 $\text{node}(G_i)$, 并令 $\text{parent}(\text{node}(G_i)) = \text{root}$;

(5) 调用 $\text{insert}(\text{root}, G_i)$ 函数;

(6) Goto(2)。

函数 $\text{Insert}(\text{root}, G_i)$ 步骤如下:

(1) 令 $\text{Children} = \text{children}(\text{root})$;

(2) 若 Children 为空, 生成新节点 $\text{node}(G_i)$, 令 $\text{parent}(\text{node}(G_i)) = \text{root}$, 函数返回;

(3) 从 Children 中取出 Child , 令 $\text{Children} = \text{Children} - \{ \text{Child} \}$;

(4) 根据描述逻辑推理, 如果 Child , Concept 与 G_i 无关, 则 Goto (2);

(5) 根据描述逻辑推理, 如果 G_i 包含 Child , Concept , 生成新节点 $\text{node}(G_i)$, 令 $\text{parent}(\text{node}(G_i)) = \text{root}$, 并令 $\text{parent}(\text{Child}) = \text{node}(G_i)$, 同时删除关系 $\text{parent}(\text{Child}) = \text{root}$, 函数返回;

(6) 递归调用 $\text{insert}(\text{Child}, G_i)$ 。

几点说明如下:

(1) 两个概念 C 和 D 无关是指 $C \sqsubseteq D$ 和 $D \sqsubseteq C$ 都不成立;

(2) 函数 $\text{children}(\text{node } G)$ 表示求出节点 G 的所有直接子节点的集合;

(3) 函数 $\text{parent}(\text{node } G)$ 表示求出节点 G 的直接父节点;

(4) $\text{new node}(G)$ 表示生成新节点 G ;

(5) $\text{parent}(\text{node}(C)) = \text{node}(D)$ 表示将节点 D 赋为节点 C 的父节点。

定理 2 目标分层算法是有效的, 即它的结果是满足目标概念分层定义的一个有向无环图。

证明: 首先证明上述算法的结果是有向无环图, 不是有环图。假设结果是有向有环图, 则在返回结果的目标概念分类图中必须至少存在一个有向循环子图, 不妨假设该循环子图有如下结构: $G_1 \rightarrow G_2 \rightarrow \dots \rightarrow G_n$, 则说明存在 $G_1 \sqsubseteq G_2 \sqsubseteq \dots \sqsubseteq G_n$, 因此有 $G_1 \equiv G_2 \equiv \dots \equiv G_n$, 这和条件假设中矛盾。

然后, 证明返回结果仅有一个有向无环图。根据算法 1 (4) 和函数 $\text{insert}(\text{root}, G_i)$ 可知, 返回结果是一个以 root 为根

节点的有向无环图。证毕。

3.4 一个简单的例子

图 1 所示是一目标层次结构例子。目标 g : Assemble (PC) 是组装一台 PC 机, 其中的目标 g_1 : Buy (HD) 购买硬盘; g_2 : Buy (FD) 购买软驱; g_3 : Buy (MainBoard): 购买主板和目标 g_4 : Con (OS): 安装操作系统, 构成了目标 g 的实现途径。假设 HD1 型硬盘的容量是 4G, 而安装 Win XP 操作系统所需的

空间至少是 2G, 则有如下描述:

$$\text{HD1} \sqsubseteq \text{Hard_Disk} \sqcap \vee \text{storage_space. storage_space}_{\text{HD1}}$$

$$\text{Win_X P} \sqsubseteq \text{Operation_System} \sqcap \text{storage_space_req. Storage_space_req}_{\text{operation_System}}$$

在上面的表达式中, 约束“Storage space”用属性名“Storage space”来表示, 同时需要给出约束条件:

$$\text{Storage_Space} \geq 4 * 2^{30}$$

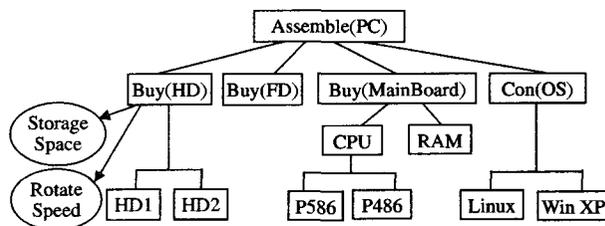
$$\text{Storage_Space_req}_{\text{operation_System}} \geq 2 * 2^{30}$$


图 1 目标层次结构例子

结束语 本文针对主体在迁移过程中对自身知识库的组织问题, 提出了一种基于描述逻辑的方法。该方法结合了描述逻辑的概念包含问题判定, 给出了构建目标层次结构的算法。由于描述逻辑具有强大的描述能力以及可判定性等特点, 因此本文的方法为智能主体的实现提供了使能技术。下一步将研究如何把时序结构引入到目标推理中, 以便更好地满足动态环境下目标推理的需要。

参考文献

- [1] Japaridze G. The logic of tasks. Annals of Pure and Applied Logic, 2002, 117(1-3): 263-295
- [2] Baader F, et al. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Application. Cambridge: Cambridge University Press, 2002
- [3] Japaridze G. Introduction to computability logic. Annals of Pure and Applied Logic, 2003, 123(1-3): 1-99
- [4] 刘弘, 刘希玉. 支持设计环境中学习的多 Agent 系统. 小型微型计算机系统, 2002, 23(3): 330-334
- [5] 董明楷. 面向智能主体的动态描述逻辑研究. 中国科学院博士学位论文. 2003. 5
- [6] 张会, 李思昆. 描述任务逻辑及其应用. 计算机学报, 2006(23): 488-494
- [7] Girard J Y. Linear logic. Theoret. Comput. Sci, 1987, 50 (1): 1-102
- [8] Haarslev V, Lutz C, Moller R. A description logic with concrete domains and a role-forming predicate operator [J]. Journal of Logic and Computation, 1999, 9(3): 351-284
- [9] Giuseppe D, Maurizio L. What's in an Aggregate: foundations for description logics with tuples and sets [C]. In: UCAI95, 1995: 801-807