

基于属性 Petri 网的属性粒推理研究

周如旗¹ 冯嘉礼²

(广东第二师范学院计算机科学系 广州 510303)¹ (上海海事大学信息工程学院 上海 200135)²

摘要 不确定性知识处理是人工智能研究中经常遇到的问题,基于定性映射的属性 Petri 网模型在动态表示认知思维中不确定性知识与逻辑推理方面具有优势。在属性拓扑空间中,给出了属性粒的基本定义和基本推理,在属性 Petri 网中对不确定性知识进行表达,并基于属性 Petri 网给出归结推理的基本形式和基本算法。结果显示,这种方法可以使定性映射和 Petri 网更易于动态和显式地表达认知不确定性知识,可为进一步研究 Petri 网在认知模型中的作用提供参考。

关键词 定性映射, Petri 网, 粒计算, 知识表示, 归结推理

中图分类号 TP181 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.08.022

Attribute Granular Reasoning Based on Attribute Petri Net

ZHOU Ru-qi¹ FENG Jia-li²

(Department of Computer Science, Guangdong University of Education, Guangzhou 510310, China)¹

(Department of Computer Science, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China)²

Abstract To deal with the uncertain knowledge is often encountered in artificial intelligence research. Attribute Petri net model based on qualitative mapping has the advantages of a dynamic representation of uncertainty knowledge and logical reasoning in cognitive thinking. The basic definition and basic reasoning of attribute granular were given in the property topological space in this paper. Uncertainty knowledge can be expressed with the attribute granular in attribute Petri net. Finally, the basic form and basic algorithm of resolution reasoning were given in attribute Petri net. The results show that this method can make qualitative mapping and Petri net to more dynamically explicit expression of the cognitive uncertainty knowledge, and it can also provide a reference for further study of Petri net in the cognitive model.

Keywords Qualitative mapping, Petri net, Granular computing, Knowledge representation, Resolution reasoning

1 引言

人类认知过程中的不确定性主要体现在模糊性、随机性、不完全性、不稳定性和不一致性等基本形式,人工智能学家的任务,就是寻找并且能够形式化地表示不确定性中的规律性,至少是某种程度的规律性,从而使机器能够模拟人类认识客观世界、认识人类本身的认知过程^[1]。从粒计算的观点,在人类认知过程中由于存在主观局限性,粒计算理论模型中的知识粒具有不确定性,知识空间中知识粒的不确定性直接决定了用粒计算方法解决复杂问题的效率和精确程度^[2]。目前,用来分析认知过程中的不确定性问题的粒计算模型主要有模糊集模型^[3]、粗糙集模型^[4]和商空间理论模型^[5]等,它们或从宏观上、或从微观上分析了粒计算的变化规律,都考虑到人类智能中从不同粒度思考问题这一特点。

属性论方法引入定性映射概念,描述了不确定性中以属性为基础的认知问题,同时通过基于属性坐标系构造定性基准空间诱导出一个模糊集,经过细粒度拓扑划分构造商空间。研究表明,经过对定性基准的线性伸缩、平移、叠加以及拓朴

剖分(或粒度细分)变换,在定性基准变换的框架下,若干人工智能方法可在属性坐标框架下得到合理解释^[6,7]。但定性映射固有的操作模式,使得它不能直观、形象地动态体现认知过程中的异步性、并发性等行为特征。

Petri 网模拟的系统模型既有静态的结构特性(有界、死锁、陷阱等),又有动态特性(并发、同步、活性、可达等),这些特性可以准确地描述与分析各类分布式系统的并发、异步、不确定性等特性^[8]。然而,传统 Petri 网的形式化方法不能提供直接支持系统结构的动态变化和业务的多种操作模式,因此,具有动态建模能力扩展 Petri 网的研究得到不断发展^[9]。在普通 Petri 基础上拓展定性映射特性而得到的属性 Petri 网,在属性拓扑空间中动态表示不确定性知识与逻辑推理方面有一定的优势^[10,11]。本文在属性拓扑空间中,给出了属性粒的基本定义、语义描述和基本推理,这种属性粒表达了属性计算的另一种形式,可以在属性 Petri 网中对不确定性知识进行表示,最后给出了归结推理的基本算法。这种方法可以使定性映射和 Petri 网更加直观、形象地动态模拟认知过程中的异步性、并发性、不确定性等行为特征,可为进一步研究人类认知

到稿日期:2013-05-27 返修日期:2013-07-12 本文受国家自然科学基金项目(60075016),广东省科技计划项目(2012B010100049)资助。

周如旗(1971-),男,硕士,副教授,主要研究方向为机器学习、模式识别, E-mail: ruqzhou@163.com;冯嘉礼(1948-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为模式识别与智能系统。

中不确定性知识处理方法以及研究 Petri 网在认知模型中所起的作用提供参考。

2 属性 Petri 网的基本定义

定义 1^[10,11] 属性 Petri 网(简称 APN)形式定义为一个九元组:

$$\text{Attribute_PetriNet} = \{P, T, F; M_0, S, O, N, W, \Gamma\}$$

其中, P 是一个属性量特征(或质特征)位置结点的有限集合; T 是一个属性转移结点的有限集合, 相当于一个基本定性映射(或 m 维加权定性映射); F 是 $P \times T$ 上的一个带标识的关系, 表示位置结点到转移结点的连接情况和连接线上的额定输入量、输入强度计算函数 S 以及相应的连接强度。 M_0 是定义在 P 上的一个取值于 $[0, K]$ (K 为某个有界实数) 的函数, 表示位置结点在运行开始时的初始标记状态; N 是定性程度函数的输出强度函数; O 是 m 维加权定性算子操作; Γ 是定性基准, W 为属性贡献权值, 是关于 Γ 的函数。

这是一个可以运行的网, 库所节点之间的逻辑关系可以用图 1—图 6 分别表示, 当库所中有标识时表示该库所有属性量或属性特征为真。定性映射模型所描述的判断问题都可以用属性 Petri 网形象而直观地表示。

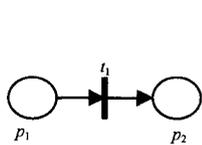


图 1 一因一果

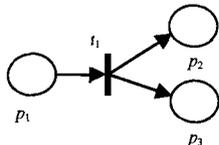


图 2 一因多果(与关系)

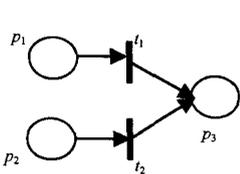


图 3 多因一果(或关系)

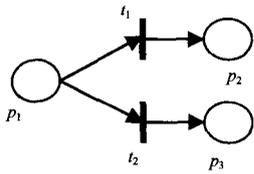


图 4 一因多果(或关系)

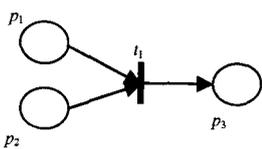


图 5 多因一果(与关系)

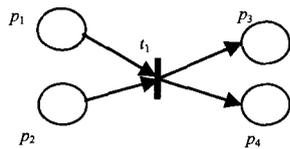


图 6 多因多果

例 1 已知 H_2O 随温度 $t(H_2O)$ 变化有 $ice(H_2O)$ 、 $water(H_2O)$ 和 $gas(H_2O)$ 等 3 种不同质的态, 若用 α_* 和 β^* 分别表示未确知的上下界, 并用 $t \in (\alpha, \beta^*)$ 和 $t \in (\alpha^*, \beta)$ 分别表示 $\alpha < t < \beta^*$ 和 $\alpha_* \leq t \leq \beta$, 则 H_2O 的三态定性映射可表示为:

$$\begin{aligned} & \tau[t(H_2O), [(\theta_*, 0), (0, 100), (100, \theta^*)]] \\ &= t \perp (\theta_*, 0) \vee t \perp (0, 100) \vee t \perp (100, \theta^*) \\ &= \tau_{ice}(t) \bar{\vee} \tau_{water}(t) \bar{\vee} \tau_{gas}(t) \\ &= \max_{i \in \{ice, water, gas\}} \{\tau_i(t)\} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\bar{\vee}$ 为不可兼析取。且有以下关于餐具消毒知识: 达到 100 度的水 (H_2O) 可以对餐具干净消毒, 当然, 合格的专用消毒液也可以对餐具干净消毒; 已进行合格消毒的餐具是可以放心使用的。已知事实: 水的温度是 100 度, 还有一瓶合格的消毒水。结论: 餐具是可以放心使用的。

则以上知识的表示与推理, 在属性 Petri 网中的表示如图 7 所示, 其中, 已知事实就是初始标识 M_0 , d_1 表示水 (H_2O) 具有的温度属性量特征, d_2, d_3, d_4 分别表示水 (H_2O) 相对属性量特征经过式 (1) 定性映射 (τ_i) 操作所具有的质特征, $\tau_{46}, \tau_5, \tau_{67}$ 均表示对餐具检测的定性映射, 它们具有不同的定性基准, d_5 表示作用于餐具的消毒液具有的质特征(合格产品), d_6 表示餐具具有的属性量质特征(达到 100 度温度的消毒或经过合格消毒液消毒), d_7 表示餐具具有的属性特征(符合使用)。

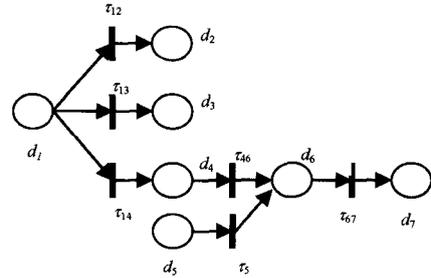


图 7 餐具消毒属性 Petri 网表示

3 属性粒的基本概念

一个粒不仅仅是实体的聚类或者集合, 同时也是这些聚类或者集合的抽象^[12,13]。如果把一个事物的所有属性看作是一个整体, 则其中的某个属性自然也可认为是一个粒。定性映射把一个属性映射为一种性质, 这是一种直观意义上的属性计算, 也是直观意义上的粒计算。属性与定性基准是密切相连的, 或者说, 属性与定性映射密切相连, 我们说事物 x 具有 $P_{a(x)}$ (属性 $a(x)$ 所具有的量特征) 所指称的性质 $p(x)$, 其实是指在某种定性基准下具有性质 $p(x)$, 因此把包含了定性基准或定性映射的属性直观上构成一个结构更大的属性, 我们称之为属性粒。

定义 2 属性拓扑空间中的一个属性粒可表示成以下二元对的形式:

$(P, \Gamma) = (p_i(x), [\alpha_i, \beta_i])$, 或者 $(P, \Gamma) = (d_{a(x)}, [\alpha_i, \beta_i])$
 $a(x)$ 为事物 x 的某一感觉属性, $p_i(x)$ 为 $a(x)$ 的性质, $[\alpha_i, \beta_i]$ 为 $p_i(x)$ 的某一定性基准域, $d_{a(x)}$ 是属性 $a(x)$ 的定量属性值。一个粒 $(p_i(x), [\alpha_i, \beta_i])$ 简记为 $\Gamma_i(p_i)$ 。因此, 有时一个属性粒形式上也等价于一个一阶谓词公式。

定义 3 设 $\Gamma(p_i)$ 和 $\Gamma(p_j)$ 是两个属性粒, 它们关于逻辑联结词的计算公式被定义如下:

- ① $\sim \Gamma(p_i) = (\sim p_i, \Gamma')$, Γ' 表示 Γ 的定性基准的补运算;
- ② $\Gamma_i(p_i) \xrightarrow{*} \Gamma_j(p_j) = (p_i(x) \wedge p_j(x), T(\Gamma_i) = \Gamma_j)$ 。

其中, $\xrightarrow{*}$ 为 \wedge (合取), 或 \vee (析取), 或 \rightarrow (蕴含) 关系, Δ 为属性整合或推理关系, T 为定性基准变换操作。

定义 4 属性粒逻辑公式的构成定义如下:

(1) 符号

包括下列 7 类:

- ① 个体变元集: $V = \{x_i | i \in N\}$, 为属性集上的元素;
- ② 个体常元集: $E = \{e_k | k \in K\}$, 它被解释为属性集上的基本属性;
- ③ 函数符集: $C = \{f_j, \eta_j, \dots | j \in J\}$, 其中 J 为指标集, j 称为函数 η_j, f_j 的元数, $j \in N^+$;

④关系符集: $\{P_i, T_i, \dots | i \in I\}$, 其中 I 为指标集, $i \in N^+$; P_i 和 T_i 分别表示谓词关系和定性基准映射关系;

⑤基准符集: $\{i | i \in I\}$, 其中 I 为指标集, i 称为基准 Γ_i 的元数, $i \in N^+$;

⑥逻辑连接词: $\wedge, \vee, \sim, \rightarrow$;

⑦量词: \forall, \exists ;

⑧括号: $(,)$ 。

(2)项的构成

项集是满足下列条件的最小集 T^* :

① $\forall U \subseteq T^*$;

②对于任意 $j \in J$, 且 $t_1, t_2, \dots, t_m \in T^*$, 则 $f_m(t_1, t_2, \dots, t_m) \in T^*$, 其中 J 为指标集。

(3)公式的构成

①形如 $\Gamma_i(p_i)$ 是属性粒逻辑原子公式, 原子公式是属性粒逻辑公式;

②若 $\Gamma_i(p_i), \Gamma_j(p_j)$ 是公式, 则 $(\sim \Gamma_i(p_i)), (\Gamma_i(p_i) \wedge \Gamma_j(p_j)), (\Gamma_i(p_i) \vee \Gamma_j(p_j)), (\Gamma_i(p_i) \rightarrow \Gamma_j(p_j))$ 都是公式。

③凡有限次引用上述步骤得到的公式都是属性粒逻辑上的公式。

定义 5 一个公式 $(\Gamma_i(p_i))$ 为真, 当且仅当它的转化程度函数 $\eta(\Gamma_i(p_i))$ 的真值为 1 或大于 0.5。

定义 6 属性粒逻辑公式的语义解释:

一个解释是如下形式的四元组 D :

$D = \{U, T, \eta, \{\Gamma_i, i \in I\}\}$

① U 是一个非空集合, 称为解释域;

② T 为映射, $P_i: U \rightarrow U$;

③对于任意的 $i \in I, \eta: U \times \Gamma_i \rightarrow [0, 1]$ 是一个程度函数;

④ Γ_i 定性基准域。

在解释 D 之下, 每一个定性基准变换公式 P 对应 $[0, 1]$ 中一元素 $v(P)$, 称为定性基准变换公式 P 在解释 D 之下的真值。其中:

①若 P 为属性粒逻辑公式 $\Gamma_i(p_i) = (p_i(x), [\alpha_i, \beta_i])$, 则:

$$v(p_i(x), [\alpha_i, \beta_i]) = \begin{cases} 1, & \text{iff } x \in [\alpha_i, \beta_i] \\ \neg, & \text{iff } x \notin [\alpha_i, \beta_i] \end{cases}$$

②若 P 为属性粒逻辑公式 $\sim G$, 则 $v(\sim G) = (v(G))' = v(\sim p_i(x), \Gamma - [\alpha_i, \beta_i])$;

③若 P 为属性粒逻辑公式 $G \vee H$, 则 $v(G \vee H) = v(p_i(x) \nabla p_j(x), [\alpha_i, \beta_i] \cup [\alpha_j, \beta_j])$;

④若 P 为属性粒逻辑公式 $G \wedge H$, 则 $v(G \wedge H) = v(p_i(x) \Delta p_j(x), [\alpha_i, \beta_i] \cap [\alpha_j, \beta_j])$;

⑤若 P 为属性粒逻辑公式 $G \rightarrow H$, 则 $v(G \rightarrow H) = v(p_i(x) \Rightarrow p_j(x), [\alpha_i, \beta_i] = T([\alpha_i, \beta_i]))$

$$v(G \rightarrow H) = v(\sim G \vee H);$$

其中, ∇ 为属性析取操作, Δ 为属性合取操作, \Rightarrow 为属性推理操作。

⑥若 P 为属性粒逻辑公式 $\forall x G(x)$, 则 $v(G(x)) = \inf_{x \in U} \{v(G(x))\}$;

⑦若 P 为属性粒逻辑公式 $\exists x G(x)$, 则 $v(G(x)) = \sup_{x \in U} \{v(G(x))\}$ 。

定义 7 属性粒逻辑公式 G 与 H 称为等价, 如果对任意解释 D 的赋值, 都有 $v(G) = v(H)$, 记为 $G = H$ 。

定义 8 $\Gamma_i(p_i) \rightarrow \Gamma_j(p_j)$ 是属性粒逻辑的一个推理, 是指如果有 $(p_i(x) \Rightarrow p_j(x))$ 成立, 且存在一个映射 $T_{ij}: \Gamma \rightarrow \Gamma$ 使得: $T_{ij}([\alpha_i, \beta_i]) = [\alpha_j, \beta_j]$ 。

定理 1 $(\Gamma_i(p_i)) \rightarrow (\Gamma_j(p_j))$ 是属性粒逻辑的一个定理。

证明: 假设 $\Gamma_i(p_i) \rightarrow \Gamma_j(p_j)$ 为真且 $\Gamma_i(p_i)$ 为真, 则 $v(\Gamma_i(p_i)) \rightarrow (\Gamma_j(p_j)) > 0.5$ 且 $v(\Gamma_i(p_i)) > 0.5$, 即 $\eta((\Gamma_i(p_i)) \rightarrow (\Gamma_j(p_j))) > 0.5$ 且 $\eta(\Gamma_i(p_i)) > 0.5$, 所以 $1 - \eta(\Gamma_i(p_i)) < 0.5$, 即 $1 - v(\Gamma_i(p_i)) < 0.5$, $v(\Gamma_i(p_i)) \rightarrow (\Gamma_j(p_j)) = (1 - v(\Gamma_i(p_i))) \vee v(\Gamma_j(p_j)) > 0.5$, 所以, $v(\Gamma_j(p_j)) > 0.5$, 即 $\eta(\Gamma_j(p_j)) > 0.5$, 所以 $(\Gamma_j(p_j))$ 也为真。

即定理成立。

4 属性粒 Horn 归结

将逻辑推论问题转换成 Petri 网模型, 在一组 Horn 子句的 Petri 网模型中, 潜在着一个可能发生的目标变迁当且仅当存在一个非负的 T-不变量^[14]。求 T-不变量的过程其实就是对子句的归结过程, 但由于实际应用中, 有很大一类不确定知识和规则, 传统求 T-不变量的方法显得不太适合, 因此刘叙华提出 λ -Horn 子句集描述, 并用 λ 归结方法处理 λ -Horn 子句集上的推理问题^[15]。事实上, 属性 Petri 网 (APN) 的网络结构及运行特性与模糊 Petri 是一致的, 因此, 在属性 Petri 网上, 也是可以实施 λ 归结的。归结的过程就是属性粒归结过程, 在这里的 λ 我们由定性映射的程序函数给出。以下给出推理过程与求 T-不变量的矩阵算法。

算法 1^[16] (一般归结算法)

C 是 APN 模型的 $n \times m$ 关联矩阵 (目标变迁对应着 C 中的第 n 行), E_n 是单位矩阵。

(1) $A_i = C_{n \times m}; D_i = E_n$

(2) LOOP $i = 1$ to $i = m$:

1) 对矩阵 A 中第 i 列元素符号相反且变量可以合一的任意两行, 在矩阵 $[D/A]$ 中经合一运算后进行相加运算, 将相应的合一替换符代入到相应行中的每一变量, 在 $[D/A]$ 添加新增加的行。

2) 从 $[D/A]$ 中删除 A 中第 i 列元素在 1) 中参加运算的行。

END LOOP

A 中小于或等于 λ 所对应的 D 中的行即为关联矩阵 C 的 T-不变量。

事实上, 可以在算法 1 基础上添加部分带删除策略的归结算法, 可以删除含有纯文字的子句或被子句集中别的子句类含的子句。因为, 用一个包含纯文字的子句进行归结不可能得到空子句, 被类含的子句被类含它的子句所逻辑蕴含, 它是多余的。以下算法 2 是本文改进后的算法。

算法 2 (删除归结算法)

C 是 APN 模型的 $n \times m$ 关联矩阵 (目标变迁对应着 C 中的第 n 行), E_n 是单位矩阵。

(1) $A_i = C_{n \times m}; D_i = E_n$

(2) LOOP $i = 1$ to $i = m$:

1) 对矩阵 A 中第 i 列元素符号相反且变量可以合一的任意两行, 在矩阵 $[D/A]$ 中经合一运算后进行相加运算, 将相应的合一替换符代入到相应行中的每一变量, 在 $[D/A]$ 添加新增加的行。

2) 从 $[D/A]$ 中删除 A 中第 i 列元素在 1) 中参加运算的行。

3) 在 A 中仅有一个大于 λ 的元素 a , a 所对应的列如果含有相同元素, 则删除这个对应元素所在的行。

END LOOP

A 中小于或等于 λ 所对应的 D 中的行即为关联矩阵 C 的 T -不变量。

一般子句集对删除策略归结是完备的,因此算法 2 也是完备的。

为了提高归结效率,除了利用删除策略外,还可以利用另一种完备的改进型归结策略,即支持集策略归结算法。其主要思想是:正在被归结的子句中至少有一个在支持集中。这样一种策略就使得被归结的两个子句中至少有一个或是待证定理的否定,或是一个在待证明定理的否定上产生的后裔子句,因此支持集策略效率是比较高的。具体算法如下。

算法 3(支持集策略归结算法)

C 是 APN 模型的 $n \times m$ 关联矩阵(目标变迁对应着 C 中的第 n 行), E_n 是单位矩阵。

(1) $A := C_n \times m; D := E_n$

(2) LOOP $i=1$ to $i=m$:

1) 对矩阵 A 中第 i 列元素符号相反且变量可以合一的两行,其中一行必须是第 n 行或其后裔(当 $i=1$ 时必须是第 n 行),在矩阵 $[D/A]$ 中经合一运算后进行相加运算,将相应的合一替换符代入到相应行中的每一变量,在 $[D/A]$ 添加新增加的行。如果 A 中出现零向量,则子句集不可满足,算法结束;否则转 2);

2) 从 $[D/A]$ 中删除 A 中第 i 列元素在 1) 中参加运算的行(除目标行外)。

3) 在 A 中仅有一个大于 λ 的元素 a , a 所对应的列如果含有相同元素,则删除这个对应元素所在的行。

END LOOP

A 中小于或等于 λ 所对应的 D 中的行即为关联矩阵 C 的 T -不变量。

一般子句集对支持集策略归结是完备的,因此算法 3 也是完备的。

例 2 任何经过 100 度左右开水或合格专用消毒液消毒过的餐具都是合格的,已进行合格消毒的任何餐具都是可以放心使用的。已知某餐具要么已经经过了很烫的水的消毒,要么经过了一瓶著名品牌(可信用度高)的餐具专用消毒液消毒,证明经上述两种方法消毒的餐具几乎是可以放心使用的。

先用属性粒的形式给出以上命题。

令: $\Gamma_1(x)$: x 经过 100 度左右开水消毒; $\Gamma_2(x)$: x 经过合格专用消毒液消毒; $\Gamma_3(x)$: x 是合格的; $\Gamma_4(x)$: x 是可以放心使用的。

前提: $\forall x((\Gamma_1(x) \vee \Gamma_2(x)) \rightarrow \Gamma_3(x)); \forall x(\Gamma_3(x) \rightarrow \Gamma_4(x)); \eta_1 \Gamma_1(c); \eta_2 \Gamma_2(c)$

结论: $\eta_4 \Gamma_4(c)$

这里, $(\eta_1, \eta_2, \eta_4) = (0.95, 0.96, 0.90)$ 是由定性程度函数给出的程度值向量。

写成 Horn 子句集:

$S = \{\Gamma_3(x) : -\Gamma_1(x), \Gamma_3(x) : -\Gamma_2(x), \Gamma_4(c) : -\Gamma_3(x), \eta_1 \Gamma_1(c) : -, \eta_2 \Gamma_2(c) : -, : -\eta_4 \Gamma_4(c)\}$, 取 $\lambda = 0.8$ 。

其 APN 表示如图 8 所示。

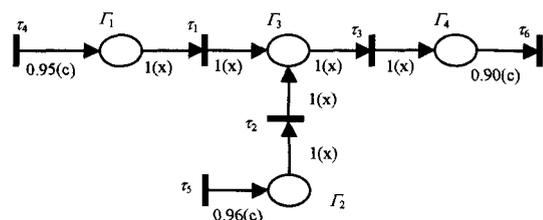


图 8 餐具消毒的属性 Petri 网推理

关联矩阵

$$C = \begin{pmatrix} -1(x) & 0 & 1(x) & 0 \\ 0 & -1(x) & 1(x) & 0 \\ 0 & 0 & -1(x) & 1(x) \\ 0.95(c) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.96(c) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.90(c) \end{pmatrix}$$

其中,列向量对应 $(\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4)$,行向量对应 $(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6)$ 。用算法 2 求 T -不变量如下:

① 令 $A := C; D := I_6$

② 利用删除策略归结:

$$[D/A] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1(x) & 0 & 1(x) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1(x) & 1(x) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1(x) & 1(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0.95(c) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0.96(c) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -0.90(c) \end{pmatrix}$$

$$\begin{matrix} \tau_4 + \tau_1 \{c/x\} \\ \tau_5 + \tau_2 \{c/x\} \\ \tau_6 + \tau_3 \{c/x\} \end{matrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -0.05(c) & 0 & 1(c) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -0.04(c) & 1(c) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1(c) & 0.1(c) \end{pmatrix}$$

$$\xrightarrow{\tau_3 + \tau_1} \text{删除化简含纯文字的 } \tau_2 (1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ -0.05(c) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.1(c))$$

由于 $-0.05, 0.1, 0$ 都小于 $\lambda = 0.80$,且可验证 $X = \{1, 0, 1, 1, 0, 1\}$ 为关系矩阵 C 的 T -不变量,且由于 $X > 0$,因此有结论: $\eta_4 \Gamma_4(c)$ 。

比较一下,如果由一般归结算法 1,则得到以下结果:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & -0.05(c) & 0 & 0 & 0.1(c) \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -0.04(c) & 1(c) & 0 \end{pmatrix}$$

这时求得关系矩阵 C 的 T -不变量也是 $\{1, 0, 1, 1, 0, 1\}$,尽管删除了一些子句,但还是产生了冗余。

如果由支持集策略归结算法 3,则只需要 3 次归结计算即可得到算法 1 同样的结果,效率更高,而且没有冗余。

属性粒在属性 Petri 网中可以进行 Horn 归结推理,认知思维操作的异步性、并发性、不确定性等行为特征可以得到初步体现,这为定性映射进一步动态地描述自身所蕴含的感觉属性抽取与整合操作提供了基础。

结束语 定性映射是属性论的基本方法,反映了人脑信息处理中感觉属性特征及其变化的规律。把定性映射和 Petri 结合起来扩展得到的属性 Petri 网在动态表示不确定性知识与逻辑推理方面有一定的优势。文章在属性 Petri 网基础上给出的属性粒的基本推理方法,从另一角度表明了可以更加深入地研究 Petri 网在认知模型中的作用,例如 Petri 网的学习方法和学习能力、Petri 网的记忆模式等。文中所给出的方法还可更进一步地细化。更加完善的知识表示和推理方法是以后进一步研究的内容。

参考文献

- [1] 李德毅,刘常昱,杜鹤,等. 不确定性人工智能[J]. 软件学报, 2004, 15(11): 1583-159
- [2] 王国胤,张清华,马希骛,等. 知识不确定性问题的粒计算模型[J]. 软件学报, 2011, 22(4): 676-694
- [3] Zadeh L. A. Fuzzy Logic = Computing With Words[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1996, 4(2): 103-111

- [4] Pawlak Z. Rough sets[J]. Int'l Journal of Computer and Information Sciences, 1982, 11(5): 341-356
- [5] 张钹, 张铃. 问题求解理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990
- [6] 冯嘉礼. 从判断到识别的定性映射模型与模糊人工神经元[J]. 模式识别与人工智能, 2006, 19(1): 35-66
- [7] Feng J L. Attribute network computing based on qualitative mapping and its applications in pattern recognition[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2008, 19(2): 1-16
- [8] 韩江洪, 方华, 刘小平. Petri 网的公平性及分析[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(3): 521-535
- [9] 庞善臣, 林闯. 可重写 Petri 网: 位置可重写及性质分析[J]. 计算机学报, 2012, 35(10): 2182-2193
- [10] 周如旗, 李广原, 冯嘉礼. 一种基于属性抽取与整合的 Petri 网模型[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2003, 39(2): 189-193
- [11] 张锦, 冯嘉礼, 史小宏. 属性 Petri 网建模及其应用[J]. 计算机工程, 2006, 32(17): 105-107
- [12] 苗季谦, 王国胤, 刘清, 等. 粒计算: 过去、现在与展望[M]. 北京: 科学出版社, 2007
- [13] Pedrycz W, Bargiela, Andrzej. An Optimization of Allocation of Information Granularity in the Interpretation of Data Structures: Toward Granular Fuzzy Clustering[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2012, 42(3): 582-590
- [14] 葛季栋, 胡昊, 吕建. 一种基于不变量的从 workflow 网到 PERT 图的转换方法[J]. 电子学报, 2008, 36(5): 893-898
- [15] 刘叙华. 算子 Fuzzy 逻辑和 λ -归结方法[J]. 计算机学报, 1989(2): 81-91
- [16] 夏世芬, 毛大会, 徐扬. 一种算子模糊逻辑系统及其 Petri 网推理算法[J]. 模糊系统与数学, 2008, 22(1): 7-14

(上接第 84 页)

- (1) 源点 s 不是高性能排序起点;
- (2) 网络中心为排序起点的边排序性能最差;
- (3) $N * N$ 型网络高性能排序起点分布在网络边缘且不在超对角线上。

以上结论为揭示边排序影响 BDD 尺度的本质进而设计更优的启发性边排序策略提供重要参考依据。下一步研究工作: (1) 研究随机网络中高性能排序起点的分布规律; (2) 比较优先级排序策略性能并优化策略。

参 考 文 献

- [1] Akers B. Binary decision diagrams[J]. IEEE Trans. Computers, 1978, C-27: 509-516
- [2] Bryant R E. Symbolic Boolean manipulation with ordered binary-decision diagrams[J]. ACM Computing Surveys, 1992, 24(3): 293-318
- [3] Bryant R E. Graph-Based Algorithms for Boolean Function Manipulation[J]. IEEE trans. on computers, 1986, c-35: 677-691
- [4] Sieling D, Wegener I. Reduction of OBDDs in Linear Time[J]. Information Processing Letters, 1993, 48(3): 139-144
- [5] Bollig B, Wegener I. Improving the variable ordering of OBDDs is NP-complete[J]. IEEE trans. on Computers, 1996, 45(9): 993-1002
- [6] Friedman S J, Supowit K J. Finding the optimal variable ordering for Binary Decision Diagrams[J]. IEEE trans. on Computer, 1990, C-39(5): 710-713
- [7] Hardy G, Lucet C, Limnios N. Computing all-terminal reliability of stochastic networks with binary decision diagrams[C]//11th International Symposium on Applied Stochastic Models and Data Analysis. 2005: 1468-1474
- [8] Hardy G, Lucet C, Limnios N. K-Terminal Network Reliability Measures With Binary Decision Diagrams[J]. IEEE Trans. Reliability, 2007, 56(3): 506-515
- [9] Yeh F-M, Kuo S-Y. OBDD-based network reliability calculation [J]. Electronics Letters, 1997, 33(9): 759-760
- [10] Kuo S Y, Lu S K, Yeh F M. Determining terminal-pair network reliability based on edge expansion diagrams using OBDD[J]. IEEE Trans. Reliability, 1999, 48(3): 234-246
- [11] Yeh F-M, Lu S-K, Kuo S-Y. OBDD-based evaluation of k-terminal network reliability[J]. IEEE Trans. Reliability, 2002, 51(4): 443-451
- [12] Butler K M, Ross D E, Kapur R, et al. Heuristics to Compute Variable Orderings for Efficient Manipulation of Ordered Binary Decision Diagrams[C]// Proc. 28th ACM/IEEE Design Automation Conf. . 1991: 417-420
- [13] Fujita M, Fujisawa H, Kawato N. Evaluation and Improvements of Boolean Comparison Method Based on Binary Decision Diagrams[C]// Proc. IEEE Int'l Conf. Computer Aided Design. 1988: 2-5
- [14] Fujita M, Matsunaga Y, Kakuda T. On variable Ordering of Binary Decision Diagrams for the Application of Multi-Level Logic Synthesis[C]// Proc. European Design Automation Conf. . 1991: 50-54
- [15] Mercer M R, Kapur R, Ross D E. Functional Approaches to Generating Orderings for Efficient Symbolic Representation[C]// Proc. 29th ACM/IEEE Design Automation Conf. . 1992: 614-619
- [16] Bouissou M. An ordering heuristic for building binary decision diagrams from fault-trees[C]// Proc. Annu. Reliab. Maintainability Symp. . 1996: 208-214
- [17] Herrmann J U, Soh S. A Space Efficient Algorithm for Network Reliability[C]// IEEE, the 15th Asia-Pacific Conf. Communications (APCC2009). 2009: 703-707
- [18] Herrmann J U. Improving Reliability Calculation with Augmented Binary Decision Diagrams[C]// IEEE, Advanced Information Networking and Applications (AINA2012). 2012: 329-333
- [19] Herrmann J U, Soh S. Comparison of binary and multi-variate hybrid decision diagram algorithms for k-terminal reliability[C]// Proceedings of the Thirty-Fourth Australasian Computer Science Conference-Volume113. Australian Computer Society, Inc. , 2011: 153-162
- [20] Pan Z S, Mo Y C, Zhong F R, et al. Performance Improvement of BDD-based Network Reliability [J]. Computer engineering & science, 2012, 34(9): 50-56