

不确定信息的认知结构表示、推理和学习*

刘洁, 陈小平, 蔡庆生, 范焱

(中国科学技术大学 计算机科学与技术系, 安徽 合肥 230027)

E-mail: liliu-in-263@263.net

http://www.wrighteagle.org

摘要: 提出了一个对不确定信息进行表示、推理和学习的统一框架. 通过引入 4-值认知结构刻画不确定性, 提供了更强的度量能力和更高的推理效率, 同时支持相关不确定信息的有效获取, 从而更加接近实际应用的需要.

关键词: 不确定推理; 认知结构; 经验结构

中图法分类号: TP18 **文献标识码:** A

不确定推理是人工智能的一个重要研究课题, 已提出多种理论和方法, 例如 Bayes 网络、可能性理论和模糊逻辑等等. 然而, 这些理论均存在各自的缺陷, 限制了它们的实际应用^[1-3]. 另外, 迄今还很少有研究者讨论相应的不确定信息的自动获取, 这是导致应用困难的另一个重要原因.

本文提出一个关于不确定信息的表示、推理和学习的一般框架. 此框架具有下列特点: (1) 融合了证据理论的成功之处, 在推理中考虑一些可能性区域; (2) 使用 4-值认知结构刻画不确定性, 提供了更强的度量能力; (3) 利用实际问题中常见的、容易获得的定量信息作为不确定推理的“基本材料”; (4) 支持相关不确定信息的有效获取; (5) 具有较低的计算耗费, 最简推理的计算复杂度是线性的. 这些特点使本框架支持的不确定信息处理机制更接近实际应用的需要.

本文第 1 节定义基本表示机构——认知结构. 第 2 节定义认知结构的运算. 第 3 节研究学习问题. 最后给出结论. 限于篇幅, 略去定理及性质的证明.

1 基本定义

定义 1. 一个认知结构 Rec 是一个概率密度函数 ρ , 满足:

B0 $\rho(x) \geq 0$;

B1 $\int \rho(x) dx = 1$;

B2 实数 $\mu = \text{Max}(\rho(x)), x \in R$, 称为 Rec 的最值;

B3 实数 σ_1 和 σ_2 满足:

$$\int_{-\infty}^{\sigma_1} \rho(x) dx = \delta, \quad 1 - \int_{-\infty}^{\sigma_2} \rho(x) dx = \delta.$$

其中 $\delta < 1$; $\sigma_1 \leq \mu \leq \sigma_2$; $1 - \delta$ 称为认知结构 Rec 的置信度, σ_1 称为 Rec 的信任值, σ_2 称为 Rec 的似真值, $\sigma_2 - \sigma_1$ 称为 Rec 的离散度.

公设 1. 认知结构的离散度(不确定信息的不确定程度)与其可信度成正比.

定义 2. 已知事件 E_1 的认知结构 $Rec: \langle \mu_1, \delta_1, \sigma_{11}, \sigma_{12} \rangle$ 和事件 E_2 的认知结构 $Rec: \langle \mu_2, \delta_2, \sigma_{21}, \sigma_{22} \rangle$. E_1 和 E_2 是相

* 收稿日期: 2000-03-13; 修改日期: 2001-08-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69875017); 国家 863 高科技发展计划资助项目(2001AA422200)

作者简介: 刘洁(1972 -), 男, 重庆人, 博士, 工程师, 主要研究领域为不确定推理, Agent 技术, 对话理解; 陈小平(1955 -), 男, 重庆人, 博士, 教授, 主要研究领域为 Agent 理论, AI 基础, 多机器人系统; 蔡庆生(1938 -), 男, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为专家系统, KDD, DM; 范焱(1968 -), 男, 安徽合肥人, 博士, 主要研究领域为知识发现.

互独立的.定义事件 $E_3=E_1 \cap E_2$ 的认知结构 $Rec(E_3)=Rec(E_1) \times Rec(E_2)$; $\mu_3=\mu_1 \times \mu_2$; $\sigma_{31}=\text{Max}(0, \mu_3 - (\mu_1 - \sigma_{11}) - (\mu_2 - \sigma_{21}))$; $\sigma_{32}=\text{Min}(1, \mu_3 - (\mu_1 - \sigma_{12}) - (\mu_2 - \sigma_{22}))$; $\delta_3=\text{Max}(\delta_1, \delta_2)$.

定义 3. $Rec(0)$ 为满足下列条件的认知结构:对任一认知结构 Rec 有 $Rec \times Rec(0)=Rec(0)$. $Rec(1)$ 为满足下列条件的认知结构:对任一认知结构 Rec 有 $Rec \times Rec(1)=Rec$.

认知结构的乘法对应于概率的乘法.若干独立事件之积的认知结构等于各独立事件的认知结构积.

定义 4. 已知同一事件 E 的不同信息来源的认知结构为 $Rec_i=\langle \mu_i, \delta_i, \sigma_{i1}, \sigma_{i2} \rangle$, 则它们的和为

$$\mu = \frac{\sum_i \mu_i}{\sum_i (\sigma_{i2} - \sigma_{i1}) \delta_i} \bigg/ \frac{1}{\sum_i (\sigma_{i2} - \sigma_{i1}) \delta_i}, \quad \delta = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{\delta_i}}, \quad \sigma_1 = \frac{\sum_i \sigma_{i1}}{\sum_i (\sigma_{i2} - \sigma_{i1}) \delta_i} \bigg/ \frac{1}{\sum_i (\sigma_{i2} - \sigma_{i1}) \delta_i}, \quad \sigma_2 = \frac{\sum_i \sigma_{i2}}{\sum_i (\sigma_{i2} - \sigma_{i1}) \delta_i} \bigg/ \frac{1}{\sum_i (\sigma_{i2} - \sigma_{i1}) \delta_i}.$$

当 $(\sigma_{i2} - \sigma_{i1})$ 为 0 时,用极限来处理.

2 推理

定义 5. 正向推理函数 For 为一个映射 $For(E_1, E_2): Rec(E_1), Rec(E_2) \rightarrow Rec$, 其中 E_1, E_2 为两个相关事件, 满足 $For(E_1, E_2) \times Rec(E_1) = Rec(E_1 \cap E_2)$. 逆向推理函数 $Cout$ 为一个映射 $Cout(E_1, E_2): E_1, E_2 \rightarrow Rec$, 其中 E_1, E_2 为两个相关事件, 满足 $Cout(E_1, E_2) \times Rec(E_2) = Rec(E_1 \cap E_2)$.

定义 6. 推理结构 $Inf\{For(E_1, E_2), Cout(E_1, E_2)\}$ 由一个正向推理函数和一个逆向推理函数构成. 在一个推理结构中, 正向推理函数和逆向推理函数中可以有缺失. 正向推理函数或逆向推理函数的缺省取值等同于其逆向推理函数或正向推理函数取值; 若两者皆缺失, 则它们均等于 $Rec(0)$. $Rec_2(E_1 \cap E_2) = Rec_1(E_1) \times For(E_1, E_2)$ 为认知框架的正向推理结果; $Rec(E_1 \cap E_2) = Rec(E_2) \times Cout(E_1, E_2)$ 为认知框架的逆向推理结果.

缺省时, 采用类推估计, 用正向推理信息类推逆向推理信息, 得到逆向推理与正向推理的认知结构一致, 反之亦然.

性质 1. 关于推理前件和后件的多种相关信息都可以从推理结构中获得.

性质 2. 认知结构推理不要求考虑不确定推理规则之间的关联.

性质 3. 认知结构推理不是单调的, 而且可以根据需要调整推理的计算复杂度.

定理 1. 认知结构精确推理的计算复杂度具有指数量级.

定义 7. 在认知结构推理网络这个无向连通图中, 从推理出发节点到目标节点的最短行迹的长度称为认知结构推理的最简计算复杂度.

定理 2. 认知结构推理最简计算复杂度是线性的.

至此得到一个不确定推理框架. 使用这个框架可以对现实世界的各种不确定信息进行有效的处理. 这种方法与精确的概率计算兼容, 可以处理使用概率方法能处理的各种问题, 而且在一定条件下计算复杂度相对于问题的规模是线性的. 在这种推理中有用的数值主要是认知结构的最值, 由信任值和似真值决定.

3 学习

定义 8. 设 A, B 为两个相关事件, $A \rightarrow C$ (C 为任意事件) 的事例个数记为 N , $A \rightarrow B$ 的事例个数与 N 的比值记为 p ; $B \rightarrow C$ (C 为任意事件) 的事例个数记为 M , $B \rightarrow A$ 的事例个数与 M 的比值记为 q . ($p, N; q, M$) 称为关联事件 A 和 B 的经验结构 $J(A, B)$.

性质 4. 经验结构可以方便地转化为认知推理结构.

经验结构 $J(A, B): (p, N; q, M)$ 中的 p 和 q 就是对 $A \rightarrow B$ 和 $B \rightarrow A$ 的认识情况, 由此可得 $For(A, B): \sigma_1 = \sigma_2 = \mu = p$; $Cout(A, B): \sigma_1 = \sigma_2 = \mu = q$.

当观察到新的事例时, 可以根据需要将新的信息加到原有经验知识中, 完成学习功能. 下面给出相应的计算公式.

(1) 当观察到一个 $A \rightarrow B$ 的正例时, 修正经验结构 $J(A, B)$ 为经验结构:

$$J': p' = (p \times N + 1) / (N + 1), N' = N + 1; q' = q, M' = M.$$

(2) 当观察到 $B \rightarrow A$ 的一个正例时,修正经验结构 $J(A,B)$ 为经验结构:

$$J': p' = p, N' = N; q' = (q \times M + 1) / (M + 1), M' = M + 1.$$

(3) 当观察到 $A \rightarrow B$ 的一个反例时,修正经验结构 $J(A,B)$ 为经验结构:

$$J': p' = (p \times N) / (N + 1), N' = N + 1; q' = q, M' = M.$$

(4) 当观察到 $B \rightarrow A$ 的一个反例时,修正经验结构 $J(A,B)$ 为经验结构:

$$J': p' = p, N' = N; q' = (q \times M) / (M + 1), M' = M + 1.$$

4 结 论

本文给出了一个新的不确定信息处理框架,用以统一地处理不确定信息的表示、推理和学习.这个框架采用独特的 4-值认知结构表达不确定量,通过定义在认知结构上的推理结构来处理推理规则的不确定性,利用经验结构及其与认知推理结构之间的转化实现学习功能.从根本上说,这是一种信息合成方法,对于信息的缺失和信息的不确定性提供了统一的处理机制,因而具有比传统方法更强的表达能力和推理效率.另一个显著特点是,同时提供了对经验数据的学习功能.这些特点使本框架的实用性得到提高.借鉴概率分布函数与概率密度函数的处理方法,本框架的适用范围可以推广到连续不确定信息的处理.

References:

- [1] Copper, G.F. The computational complexity of probabilistic inference on uncertainty. *Artificial Intelligence*, 1990,42:393~405.
- [2] Koller, D. Probabilistic frame-based system. In: *Proceedings of the 15th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-98)*. 1998. 580~578.
- [3] Boyen, X., Friedman, N., Koller, D. Discover the hidden structure of complex dynamic system. In: *Proceedings of the 15th Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*. 1999. 91~100.

Recognition Structure of Uncertainty: a Unified Framework for Representation, Reasoning and Learning*

LIU Jie, CHEN Xiao-ping, CAI Qing-sheng, FAN Yan

(Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

E-mail: liliu-in-263@263.net

<http://www.wrighteagle.org>

Abstract: In this paper a unified framework for representing, reasoning and learning of uncertain information is put forward. The 4-valued recognition structure is used to measure the uncertain degree of uncertain information and thus more powerful expressive capacity is attained. Moreover, the framework supports the efficient acquisition of the uncertain information. These features make the framework more practical than existing theories of reasoning about uncertainty.

Key words: uncertain inference; recognition structure; experience structure

* Received March 13, 2000; accepted August 24, 2001

Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.69875017; the National High Technology Development 863 Program of China under Grant No.2001AA422200