

# 连续认知结构推理方法及其应用\*

刘洁, 刘贵全, 陈小平, 蔡庆生

(中国科学技术大学 计算机科学与技术系, 安徽 合肥 230027)

E-mail: gqliu@ustc.edu.cn

http://www.ustc.edu.cn

**摘要:** 实际问题中存在着大量连续量以及对它们的各种认知信息(知识).为了较好地描述和利用这些知识,将这些知识分解为连续认知结论以及关于这个结论的一个认知结构,并将它们统一成一个连续认知结构.在此基础上提出了一种基于连续认知结构的连续认知推理网络,并探讨了一套利用连续认知结构进行推理的方法.这种方法在不完整的知识推理网络中的推理是非单调的,其最简推理复杂度关于推理网络节点在最复杂情况下是线性的.同时,还用例子说明了这种方法在实际问题求解中的适用性.

**关键词:** 不确定推理;认知结构;连续认知结论;连续认知结构;连续认知结构推理网络

**中图法分类号:** TP18 **文献标识码:** A

证据理论是处理不确定信息和知识的一种常用方法.它采用似真函数和信任函数来表达不确定知识<sup>[1]</sup>.使用证据理论进行推理会出现置信区间发散现象,从而降低推理结果的意义<sup>[2]</sup>.模糊理论在不确定知识的表达和推理的处理中取得了很多成果<sup>[3]</sup>.但在多智能体环境下,智能体为了有效地利用社会性信息,它们彼此之间应组成一个复杂分层的处理系统.而模糊理论不能完整地表达它们所面临的不确定信息,因此也不能完成在这种情况下推理任务.基于 Bayes 网络(bayes networks,简称 BNS)的不确定推理方法是目前比较成熟的一种推理技术,在多种智能系统及知识获取中有大量应用.BNS 可精确地算出推理结果的不确定性,代价是必须获得关于推理过程以及推理中间信息的全部精确相关知识,其计算复杂度关于节点数是 NP 类的,在大规模推理网络中处理起来相当困难<sup>[4-6]</sup>.动态 BNS 提供了对复杂动态系统的一种简洁、自然的表达,但在很多情形下没有可以提供模型的专家<sup>[1]</sup>,这也限制了 BNS 的应用.其他不确定推理方法也都存在各自的缺陷<sup>[1]</sup>.本文采用一种连续认知结构来表示不确定信息.第 1 节将关于连续量的认识分解为一个关于连续量的认知结论和关于这个结论的一个连续认知结构;接下来讨论了利用连续认知结构进行推理的相关问题.第 2 节讨论了这种方法在实际问题中的应用.

## 1 形式描述

### 1.1 关于连续量的认知定义及连续认知结构的运算

**定义 1.** 连续认知结论是对一个连续取值变量的认知结论,是一个实数四元组  $\{\lambda, \varepsilon, \xi_1, \xi_2\}$ .其中  $\lambda$  是此变量可能的取值,称为连续认知结构的最值,简称结论最值;  $1-\varepsilon$  为连续认知结论的置信度,称为连续认知结论的置信度,简称结论置信度;  $\xi_1$  为这个量在结论置信度下的上界,称为连续认知结论的上界,简称结论上界;  $\xi_2$  为这个量

\* 收稿日期: 2000-03-17; 修改日期: 2000-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69875017)

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;刘贵全(1970 - ),男,四川彭山人,博士,讲师,主要研究领域为机器学习,多 Agent 理论与系统,自然语言理解;陈小平(1955 - ),男,安徽合肥人,博士,教授,主要研究领域为机器学习,Agent 理论,机器人足球;蔡庆生(1938 - ),男,江苏南京人,教授,博士生导师,主要研究领域为人工智能,机器学习,离散数学.

在结论置信度下的下界,称为连续认知结论的下界,简称结论下界.

定义 2. 认知结构代表对一个事件或一个状态的认知情况.它是一个四元组 $\{\mu, \delta, \sigma_1, \sigma_2\}$ ,其中 $\mu$ 是这个事件发生或这个状态为真的最可能概率取值,称为认知最值; $1-\delta$ 是认知结构的置信度,称为认知置信度; $\sigma_1$ 是在这个置信度下,事件发生或状态为真的最小概率取值,称为认知信任值; $\sigma_2$ 是在这个置信度下,事件发生或状态为真的最大概率取值,称为认知似真值.

定义 3. 连续认知结构代表对一个连续变量的认知情况.它是一个八元组 $\{\{\lambda, \varepsilon, \xi_1, \xi_2\}, \{\mu, \delta, \sigma_1, \sigma_2\}\}$ ,由这个连续取值变量的连续认知结论和关于这个连续认知结论的认知结构组成.

定义 4. 给定对连续取值变量的认知结论  $C_1: \{\lambda_1, \varepsilon_1, \xi_{11}, \xi_{12}\}$  和  $C_2: \{\lambda_2, \varepsilon_2, \xi_{21}, \xi_{22}\}$ . 定义  $C_1$  和  $C_2$  的和  $C_3=C_1+C_2$  为  $\{\lambda_3, \varepsilon_3, \xi_{31}, \xi_{32}\}$ , 其中:

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_1}{(\xi_{12} - \xi_{11})\varepsilon_1} + \frac{\lambda_2}{(\xi_{22} - \xi_{21})\varepsilon_2},$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2},$$

$$\xi_{31} = \frac{\xi_{11}}{(\xi_{12} - \xi_{11})\varepsilon_1} + \frac{\xi_{21}}{(\xi_{22} - \xi_{21})\varepsilon_2},$$

$$\xi_{32} = \frac{\xi_{12}}{(\xi_{12} - \xi_{11})\varepsilon_1} + \frac{\xi_{22}}{(\xi_{22} - \xi_{21})\varepsilon_2}.$$

当出现结论上界等于结论下界时,用极限方法来处理.

定义 5. 给定:对事件  $E$  的连续认知结构  $Rec_1: \{\{\lambda_1, \varepsilon_1, \xi_{11}, \xi_{12}\}, \{\mu_1, \delta_1, \sigma_{11}, \sigma_{12}\}\}$  和连续认知结构  $Rec_2: \{\{\lambda_2, \varepsilon_2, \xi_{21}, \xi_{22}\}, \{\mu_2, \delta_2, \sigma_{21}, \sigma_{22}\}\}$ . 定义连续认知结构  $Rec_1, Rec_2$  和  $Rec_3=Rec_1+Rec_2$  为  $\{\{\lambda_3, \varepsilon_3, \xi_{31}, \xi_{32}\}, \{\mu_3, \delta_3, \sigma_{31}, \sigma_{32}\}\}$ . 其中:

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_1}{(\xi_{12} - \xi_{11})\varepsilon_1(\sigma_{12} - \sigma_{11})\delta_1} + \frac{\lambda_2}{(\xi_{22} - \xi_{21})\varepsilon_2(\sigma_{22} - \sigma_{21})\delta_2},$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2(\delta_1 + \delta_2)}{\varepsilon_1\delta_1 + \varepsilon_2\delta_2},$$

$$\xi_{31} = \frac{\xi_{11}}{(\xi_{12} - \xi_{11})\varepsilon_1(\sigma_{12} - \sigma_{11})\delta_1} + \frac{\xi_{21}}{(\xi_{22} - \xi_{21})\varepsilon_2(\sigma_{22} - \sigma_{21})\delta_2},$$

$$\xi_{32} = \frac{\xi_{12}}{(\xi_{12} - \xi_{11})\varepsilon_1(\sigma_{12} - \sigma_{11})\delta_1} + \frac{\xi_{22}}{(\xi_{22} - \xi_{21})\varepsilon_2(\sigma_{22} - \sigma_{21})\delta_2}.$$

$$\begin{aligned} \sigma_{31} &= \frac{\frac{\delta_1 \sigma_{11}}{(\xi_{12} - \xi_{11}) \varepsilon_1 (\sigma_{12} - \sigma_{11}) \delta_1} + \frac{\delta_2 \sigma_{21}}{(\xi_{22} - \xi_{21}) \varepsilon_2 (\sigma_{22} - \sigma_{21}) \delta_2}}{\delta_3} \\ &= \frac{\delta_1 \delta_2 [\sigma_{11} \varepsilon_2 (\xi_{22} - \xi_{21}) (\sigma_{22} - \sigma_{21}) + \sigma_{21} \varepsilon_1 (\xi_{12} - \xi_{11}) (\sigma_{12} - \sigma_{11})]}{\delta_3 [\varepsilon_1 \delta_1 (\xi_{12} - \xi_{11}) (\sigma_{12} - \sigma_{11}) + \varepsilon_2 \delta_2 (\xi_{22} - \xi_{21}) (\sigma_{22} - \sigma_{21})]}, \\ \sigma_{32} &= \frac{\frac{\delta_1 \sigma_{12}}{(\xi_{12} - \xi_{11}) \varepsilon_1 (\sigma_{12} - \sigma_{11}) \delta_1} + \frac{\delta_2 \sigma_{22}}{(\xi_{22} - \xi_{21}) \varepsilon_2 (\sigma_{22} - \sigma_{21}) \delta_2}}{\delta_3} \\ &= \frac{\delta_1 \delta_2 [\sigma_{12} \varepsilon_2 (\xi_{22} - \xi_{21}) (\sigma_{22} - \sigma_{21}) + \sigma_{22} \varepsilon_1 (\xi_{12} - \xi_{11}) (\sigma_{12} - \sigma_{11})]}{\delta_3 [\varepsilon_1 \delta_1 (\xi_{12} - \xi_{11}) (\sigma_{12} - \sigma_{11}) + \varepsilon_2 \delta_2 (\xi_{22} - \xi_{21}) (\sigma_{22} - \sigma_{21})]}. \end{aligned}$$

**定义 6.** 给定对事件  $E$  的连续认知结论  $C_1: \{\lambda_1, \varepsilon_1, \xi_{11}, \xi_{12}\}$  和  $C_2: \{\lambda_2, \varepsilon_2, \xi_{21}, \xi_{22}\}$ . 定义这两个连续认知结论的差  $C_1 - C_2$  为两个连续认知结论  $C_3^-: \{\lambda_3^-, \varepsilon_3^-, \xi_{31}^-, \xi_{32}^-\}$  和  $C_3^+: \{\lambda_3^+, \varepsilon_3^+, \xi_{31}^+, \xi_{32}^+\}$ . 其中  $\lambda_3^- = \text{Min}(\lambda_1, \xi_{21})$ ,  $\varepsilon_3^- = \text{Max}(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ ,  $\xi_{31}^- = \xi_{11}$ ,  $\xi_{32}^- = \xi_{21}$ ;  $\lambda_3^+ = \text{Max}(\lambda_2, \xi_{21})$ ,  $\varepsilon_3^+ = \text{Max}(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ ,  $\xi_{31}^+ = \xi_{22}$ ,  $\xi_{32}^+ = \xi_{12}$ .

**定义 7.** 给定对事件  $E$  的连续认知结构  $Rec_1: \{C_1 = \{\lambda_1, \varepsilon_1, \xi_{11}, \xi_{12}\}, R_1 = \{\mu, \delta, \sigma_1, \sigma_2\}\}$  和连续认知结构  $Rec_2: \{C_2 = \{\lambda_2, \varepsilon_2, \xi_{21}, \xi_{22}\}, R_2 = \{\mu, \delta, \sigma_1, \sigma_2\}\}$ . 当这两个连续认知结构的认知结构部分相同 ( $R_1 = R_2 = R$ ) 时, 定义这两个连续认知结构的差  $Rec_1 - Rec_2$  为两个连续认知结构  $Rec_3^-: \{C_3^-, R\}$  和  $Rec_3^+: \{C_3^+, R\}$ . 其中  $C_3^-$  和  $C_3^+$  为  $C_1 - C_2$  的两个结果.

### 1.2 连续认知结构的推理

**定义 8.** 连续认知结构正向推理规则 (简称连续正向推理规则)  $F$  为一个函数  $F: U_1 \rightarrow U_2$ ; 连续认知结构逆向推理规则 (简称连续逆向推理规则)  $C$  为一个函数  $C: U_2 \rightarrow U_1$ . 其中  $U_1$  属于推理前件连续认知结论的值域,  $U_2$  属于推理后件连续认知结论的值域.

**定义 9.** 若已知从事件  $E_1$  到事件  $E_2$  的正向推理规则为  $F$ , 对事件  $E_1$  的连续认知结论为  $C_1: \{\lambda_1, \varepsilon_1, \xi_{11}, \xi_{12}\}$ , 则记对事件  $E_2$  的连续认知结论为  $C_2: \{\lambda_2, \varepsilon_2, \xi_{21}, \xi_{22}\} = F \times C_1$ . 其中  $\lambda_2 = F(\lambda_1)$ ,  $\xi_{21} = F(\xi_{11})$ ,  $\xi_{22} = F(\xi_{12})$ ,  $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$ .

**定义 10.** 已知对认知结论  $C_1$  的认知结构  $R_1: \{\mu_1, \sigma_{11}, \sigma_{12}, \delta_1\}$  和对认知结论  $C_2$  的认知结构  $R_2: \{\mu_2, \sigma_{21}, \sigma_{22}, \delta_2\}$ ; 认知结论  $C_1$  和  $C_2$  之间是相互独立的. 定义对认知结论  $C_3 = \{C_1 \cap C_2\}$  的认知结构  $R_3 = R_1 \times R_2: \mu_3 = \mu_1 \times \mu_2; \sigma_{31} = \mu_3 - (\mu_1 - \sigma_{11}) - (\mu_2 - \sigma_{21}); \sigma_{32} = \mu_3 - (\mu_1 - \sigma_{12}) - (\mu_2 - \sigma_{22}), \delta_3 = \text{Max}(\delta_1, \delta_2)$ .

**定义 11.**  $R(1)$  为一个认知结构, 满足: 对任意一个认知结构  $R_1$  有  $R_1 \times R(1) = R_1$ ;  $R(0)$  为一个认知结构, 满足: 对任意一个认知结构  $R_1$  有  $R_1 \times R(0) = R(0)$ .

**定义 12.** 连续认知结构正向推理认知 (简称连续正向推理认知)  $For$  为一个函数  $For: R_1 \rightarrow R_2$ ; 连续认知结构逆向推理认知 (简称连续逆向推理认知)  $Cout$  为一个函数  $Cout: R_2 \rightarrow R_1$ . 其中  $R_1$  为对推理前件连续认知结论的认知结构,  $R_2$  为对推理后件连续认知结论的认知结构.

**定义 13.** 连续认知结构正向推理函数 (简称连续正向推理函数)  $CF$  由一个连续正向推理规则加上对这个规则的连续正向推理认知构成. 连续认知结构逆向推理函数 (简称连续逆向推理函数)  $CC$  由一个连续逆向推理规则加上对这个规则的连续逆向推理认知构成.

**定义 14.** 设事件  $E_1$  到事件  $E_2$  的正向推理函数  $CF = \{F, For\}$ ; 对事件  $E_1$  的连续认知结构  $Rec_1: \{C_1 = \{\lambda_1, \varepsilon_1, \xi_{11}, \xi_{12}\}, R_1 = \{\mu_1, \sigma_{11}, \sigma_{12}, \delta_1\}\}$ . 定义对事件  $E_2$  的连续认知结构  $Rec_2: \{C_2 = \{\lambda_2, \varepsilon_2, \xi_{21}, \xi_{22}\}, R_2 = \{\mu_2, \sigma_{21}, \sigma_{22}, \delta_2\}\} = CF \times Rec_1$ . 其中  $C_2 = F \times C_1; R_2 = For \times R_1$ .

**定义 15.** 连续推理结构  $Inf\{For(E_1, E_2), Cout(E_1, E_2)\}$  由一个连续正向推理函数和一个连续逆向推理函数构成. 在一个推理结构中, 连续正向推理函数和连续逆向推理函数可以有缺失. 连续正向推理函数或连续逆向推理函数的缺省取值等同于其连续逆向推理函数或连续正向推理函数的取值.  $Rec_2(E_2) = Rec_1(E_1) \times For(E_1, E_2)$  为连续认知框架的连续正向推理结果;  $Rec_1(E_1) = Rec(E_2) \times Cout(E_1, E_2)$  为连续认知框架的连续逆向推理结果.

当推理函数出现缺省时, 用正向推理函数类推逆向推理函数, 反之亦然.

定义 16. 以连续认知结构为节点、以连续推理结构为连接这些节点之间的边所构成的连通单图叫连续认知推理网络.

性质 17. 连续认知结构推理是非单调的,而且可以根据需要调整推理的计算复杂度.

定理 18. 连续认知结构精确推理的计算复杂度关于推理节点个数为指数量级.

定义 19(连续认知结构推理最简计算复杂度). 在连续认知结构推理网络这个连通单图中,从推理出发节点到目标节点的最短行迹的长度叫做连续认知结构推理的最简计算复杂度.

定理 20. 上述最简计算复杂度在最坏情况下关于推理节点个数是线性的.

## 2 在现实世界中的应用

### 2.1 对现实世界的描述能力

例 1:若智能体说:“我认为他身高 1 米 80 以上,不会超过 2 米,估计身高约 1 米 95,超过 1 米 95 或低于 180 的可能性小于 0.2%”,则这个智能体的认知结构为  $R_1\{\mu, \delta, \sigma_1, \sigma_2\}; \mu=0.999, \delta=0.0001, \sigma_1=0.97, \sigma_2=1.0$ . 县体育部门有这么一个规定:高于 1 米 90 的人可以考虑去打篮球.对县体育部门规定的认知结构为  $R_2\{\mu, \delta, \sigma_1, \sigma_2\}; \mu=0.9, \delta=0.04, \sigma_1=0.7, \sigma_2=1$ . 我们可以从这一描述中得到关于他身高的连续认知结构为  $Rec_1\{C_1, R_1\}$ . 连续正向推理函数为  $CF(F_1, For_1)$ .

### 2.2 在现实世界中的推理

例 2:对例 1 可以得到以下结果:对此人的连续认知结论为  $C_1\{\lambda, \varepsilon, \xi_1, \xi_2\}; \lambda=1 \text{ 米 } 95, \xi_1=1 \text{ 米 } 80, \xi_2=2 \text{ 米 }, \varepsilon=0.002$ ; 关于这个结论的认知结构为  $R_1\{\mu, \delta, \sigma_1, \sigma_2\}; \mu=0.999, \delta=0.0001, \sigma_1=0.97, \sigma_2=1.0$ ; 关于规定的连续正向推理规则:

$$F_1(x) = \begin{cases} \text{打篮球} & x \geq 1 \text{ 米 } 90 \\ \text{不打篮球} & x < 1 \text{ 米 } 90 \end{cases};$$

关于连续正向推理规则的连续正向推理认知  $For_1=R(1)$ . 结合前面的推理方法进行推理,得到关于这个人是否可以打篮球的连续认知结构为  $Rec_2\{C_2=\{\lambda, \varepsilon, \xi_1, \xi_2\}, R_2=\{\mu, \delta, \sigma_1, \sigma_2\}\}=Rec_1 \times CF_1=(C_2=F_1 \times C_1, R_2=For_1 \times R_1=R(1) \times R_1=R_1); \lambda=F(1 \text{ 米 } 95)=\text{“打篮球”}, \xi_1=F(1 \text{ 米 } 80)=\text{“不打篮球”}, \xi_2=F(2 \text{ 米 } 00)=\text{“打篮球”}, \varepsilon=0.002; \mu=0.999, \delta=0.0001, \sigma_1=0.97, \sigma_2=1.0$ . 推理结果翻译为自然语言是这样的:“这个人可能去打篮球,也可能不去,但是打篮球的可能大一些.这个结论成立的最大可能性为 0.999,至少也有 0.97,小于 0.97 的可能性为 0.0001”.

## 3 结 论

本文深入分析了在连续量情形下,认知信息的表达和推理问题,给出了一套关于连续取值量认知结构的不确定推理方法.这种方法的计算复杂度问题关于推理节点个数为线性的.它对现实问题有很强的表达能力和实用性.此外,这种方法的推理过程是非单调的.

进一步的工作是改进连续推理结构的推理方法,以使其能够表达和处理复杂的关系.另外,如何评估连续认知结构不确定的推理质量也是一个需要研究的问题.

### References:

- [1] Zhang, Yao-ting, Du, Jin-song. The Probability Approach in Artificial Intelligence. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese).
- [2] Liu, Jie, Chen, Xiao-ping, Wang, Ren-hua, et al. A Chinese spoken dialogue system based on the uncertain reasoning. In: Huang, Chang-ning, ed. Proceedings of the 5th Natural Language Processing Pacific Rim Symposium (NLPRS-99). Beijing: TsingHua University Press, 1999. 221~226.
- [3] Li, Ying-chun, Shi, Chun-yi. Fuzzy model of knowledge concept and fuzzy targets identification. Journal of Computers, 1999,22(6): 615~619 (in Chinese).

- [4] Koller, D. Probabilistic frame-based system. In: Proceedings of the 15th National Conference on Artificial Intelligence(AAAI-98). Madison: AAAI Press, 1998. 580~588.
- [5] Boyen, X., Koller, D. Approximate learning of dynamic models. In: Michael, S.K., Sara, A.S., David, A.C, eds. Proceedings of the 11th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS-98). Denver: MIT Press, 1999. 396~402.
- [6] Boyen, X., Friedman, N., Koller, D. Discover the hidden structure of complex dynamic system. In: AAAI, ed. Proceedings of the 15th Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-99). Stockholm: AAAI Press, 1999. 91~100.

附中文参考文献:

- [1] 张尧庭,杜劲松.人工智能中的概率统计方法.北京:科学出版社,1998.
- [3] 李膺春,石纯一.知识概念的模糊模型及模糊目标的识别.计算机学报,1999,22(6):615~619.

## Inference Method and Applications of Continuous Cognitive Structures\*

LIU Jie, LIU Gui-quan, CHEN Xiao-ping, CAI Qing-sheng

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

E-mail: gqliu@ustc.edu.cn

<http://www.ustc.edu.cn>

**Abstract:** There are a lot of continuous values and various kinds of cognitive information (knowledge). Firstly, for describing and handling the knowledge, in this paper, they are divided into two parts: a continuous cognitive result and its cognitive structure. Secondly, a cognitive structure and a cognitive inference network are put forward, and they are integrated into a continuous cognitive structure. Thirdly, a continuous cognitive inferential network based on continuous cognitive structure is proposed. Fourthly, a set of inference approaches are discussed utilizing the continuous cognitive structure. The inference is non-monotonous upon an incomplete inference network. The most simplified computational complexity of inference is linear to the inferential nodes under the most complex condition. Finally, the suitability of the approach in practical problem is shown by an example.

**Key words:** uncertain inference; cognitive structure; continuous cognitive result; continuous cognitive structure; continuous cognitive inference network

---

\* Received March 17, 2000; accepted July 31, 2000

Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.69875017