

直觉模糊推理的语义匹配度

雷英杰, 李续武, 王坚, 申晓勇

(空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800)

摘要:首先引用 Atanassov 直觉模糊集的基本概念及运算, 描述了直觉模糊逻辑运算及其知识表示形式, 重点给出了直觉模糊逻辑命题真值的对称合成方法, 定义了直觉模糊逻辑命题的基本运算。讨论了计算直觉模糊集语义匹配度的若干途径, 包括贴近度、语义距离、相似度、复合条件的匹配等。最后, 阐明了直觉模糊推理冲突消解的基本思想。

关键词:直觉模糊集合; 直觉模糊逻辑; 匹配度; 语义距离; 相似度

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2005)03-0042-05

Atanassov 对直觉模糊集给出如下定义。

定义 1(直觉模糊集^[1]) 设 X 是一个给定论域, 则 X 上的一个直觉模糊集 A 为

$$A = \{ \langle x, \mu_A(x), \gamma_A(x) \rangle \mid x \in X \}$$

其中 $\mu_A(x): X \rightarrow [0, 1]$ 和 $\gamma_A(x): X \rightarrow [0, 1]$ 分别代表 A 的隶属函数 $\mu_A(x)$ 和非隶属函数 $\gamma_A(x)$, 且对于 A 上的所有 $x \in X$, $0 \leq \mu_A(x) + \gamma_A(x) \leq 1$ 成立。

当 X 为连续空间时, $A = \int_X \langle \mu_A(x), \gamma_A(x) \rangle / x, x \in X$; 当 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为离散空间时, $A = \sum_{i=1}^n \langle \mu_A(x_i), \gamma_A(x_i) \rangle / x_i, x_i \in X, i = 1, 2, \dots, n$, 直觉模糊集 A 有时可以简记作 $A = \langle x, \mu_A, \gamma_A \rangle$ 或者 $A = \langle \mu_A, \gamma_A \rangle / x$ 。显然, 每一个一般模糊子集对应于下列直觉模糊子集 $A = \{ \langle x, \mu_A(x), 1 - \mu_A(x) \rangle / x_i \in \}$ 。

对于 X 中的每一个直觉模糊子集, 我们称 $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \gamma_A(x)$ 为 A 中 x 的直觉指数(Intuitionistic Index), 它是 x 对 A 的犹豫程度(Hesitancy degree)的一种测度。显然, 对于每一个 $x \in X$, $0 \leq \pi_A(x) \leq 1$ 。对于 X 中的每一个一般模糊子集 A , $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - [1 - \mu_A(x)] = 0, \forall x \in X$ 。

对于一个模糊集 $A \in F(U)$, 其单一隶属度 $\mu_A(x) \in [0, 1], \forall x \in X$ 既包含了支持 x 的证据 $\mu_A(x)$, 也包含了反对 x 的证据 $1 - \mu_A(x)$, 它不可能表示既不支持也不反对的“非此非彼”的中立状态的证据。而一个直觉模糊集 $A \in IFS(U)$, 其隶属度 $\mu_A(x) \in [0, 1], \forall x \in U$ 与非隶属度 $\gamma_A(x) \in [0, 1], \forall x \in U$ 及其直觉指数 $\pi_A(x) \in [0, 1], \forall x \in U$ 则可分别表示对象 x 属于直觉模糊集 A 的支持、反对、中立这三种证据的程度。例如, 假设直觉模糊集 $A = \langle x, 0.5, 0.3 \rangle$, 即其隶属度 $\mu_A(x) = 0.5$, 非隶属度 $\gamma_A(x) = 0.3$, 直觉指数 $\pi_A(x) = 1 - 0.5 - 0.3 = 0.2$, 则表示对象 x 属于直觉模糊集 A 的程度为 0.5, 不属于集 A 的程度为 0.3, 既不支持也不反对的中立程度为 0.2。我们也可以用投票模型来解释集 A , 即赞成票为 50%, 反对票为 30%, 弃权票为 20%。可见, 直觉模糊集有效地扩展了 Zadeh 模糊集的代表能力。

定义 2(直觉模糊集基本运算^[2~5]) 设 A 和 B 是给定论域 X 上的直觉模糊子集, 则有

- 1) $A \cap B = \{ \langle x, \mu_A(x) \wedge \mu_B(x), \gamma_A(x) \vee \gamma_B(x) \rangle \mid \forall x \in X \}$
- 2) $A \cup B = \{ \langle x, \mu_A(x) \vee \mu_B(x), \gamma_A(x) \wedge \gamma_B(x) \rangle \mid \forall x \in X \}$
- 3) $\bar{A} = A^c = \{ \langle x, \gamma_A(x), \mu_A(x) \rangle \mid x \in X \}$
- 4) $A \subseteq B \Leftrightarrow \forall x \in X, [\mu_A(x) \leq \mu_B(x) \wedge \gamma_A(x) \geq \gamma_B(x)]$

收稿日期: 2004-11-05

基金项目: 国防科技预研基金资助项目(51406030104DZ0120)

作者简介: 雷英杰(1956-), 男, 陕西渭南人, 教授, 博士生导师, 主要从事智能信息处理与智能系统、智能决策等研究。

$$5) A \subset B \Leftrightarrow \forall x \in X, [\mu_A(x) < \mu_B(x) \wedge \gamma_A(x) > \gamma_B(x)]$$

$$6) A = B \Leftrightarrow \forall x \in X, [\mu_A(x) = \mu_B(x) \wedge \gamma_A(x) = \gamma_B(x)]$$

1 直觉模糊逻辑

直觉模糊逻辑是一种建立在直觉模糊集理论基础之上的扩展模糊逻辑,是模糊推理的重要工具。在直觉模糊逻辑中,命题是由直觉模糊集表述的直觉模糊命题,也可以是作为特例的一般模糊命题。它以直觉模糊集为理论基础^[6-8],进行不精确命题的近似推理。在基于直觉模糊集理论的模糊知识处理中,直觉模糊逻辑是一个重要的基础。

1.1 直觉模糊命题

直觉模糊集合是对 Zadeh 模糊集合的一种扩充和发展,所以直觉模糊命题、直觉模糊逻辑也是对一般模糊命题和模糊逻辑的扩充和发展,而这种扩充和发展主要体现在对命题内涵的表述方面。

直觉模糊逻辑命题 P 是关于某个没有明确界限的概念的语言陈述,它能表达人们的主观想法,而且对每个人而言其主观含义又略有差异。赋给直觉模糊命题 P 的真值可以是区间 $[0, 1]$ 上的任何值,赋值过程实际上是从区间 $[0, 1]$ 到命题论域 U 的一个真值映射 T ,即 $T: u \in U \rightarrow \{0, 1\}$ 。设命题 P 对应于直觉模糊集 A ,则命题 P 的真值 $T(P)$ 由下式给出:

$$T(P) = \alpha \mu_A(x) + \beta \cdot \pi_A(x)$$

式中 α, β 分别为隶属度函数与直觉指数的合成权系数。为简明起见,取对称权系数,即 $\alpha = 1$ 且 $\beta = 0.5$,于是有

$$T(P) = \mu_A(x) + \frac{1}{2} \pi_A(x)$$

即命题的真实程度等于 x 对直觉模糊集 A 的隶属度与犹豫度的对称合成。这里 $\beta = 0.5$ 的含义是指直觉指数 $\pi_A(x)$ 所表征的中立证据中,支持与反对的程度呈均衡状态。

直觉模糊逻辑中的命题分为原子命题和复合命题。所谓直觉模糊原子命题是一个单独的陈述句。其形式为“ x 为 A ”,这里 x 是语言变量, A 是语言变量 x 的值,即 A 是一个定义在 x 的论域 U 上的直觉模糊集合。

定义 3(直觉模糊逻辑运算) 设 $A, B \in IFS(U)$, 定义在 A, B 上的命题 P, Q 有如下运算

1) 否定(逻辑“非”): $T(\neg P) = 1 - T(P)$

2) 析取(逻辑“或”): $P \vee Q, x$ 属于 A 或 $B, T(P \vee Q) = \max(T(P), T(Q))$

3) 合取(逻辑“与”): $P \wedge Q, x$ 属于 A 与 $B, T(P \wedge Q) = \min(T(P), T(Q))$

4) 蕴涵: $P \rightarrow Q$, 如果 x 属于 A , 则 y 属于 $B, T(P \rightarrow Q) = T(\neg P \vee Q) = \max(T(\neg P), T(Q))$

蕴涵可以用基于规则的形式给出,并且与直觉模糊关系 $R = (A \times B) \cup (\bar{A} \times Y)$ 等价。 R 的隶属函数 $\mu_R(x, y)$ 和非隶属函数 $\gamma_R(x, y)$ 分别为

$$\mu_R(x, y) = \max[(\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)), \gamma_A(x)]$$

$$\gamma_R(x, y) = \min[(\gamma_A(x) \vee \gamma_B(y)), \mu_A(x)]$$

1.2 直觉模糊知识表示

因果关系是现实世界中事物间最常见且用得最多的一种关系,因此本文仅在产生式的基础上讨论直觉模糊知识的表示问题,并且把表示直觉模糊知识的产生式规则简称为模糊产生式规则。

模糊产生式规则的一般形式是:

$$IF E THEN H(CF, \lambda)$$

或

$$E \rightarrow H, CF, \lambda$$

这里 E 是用模糊命题表示的模糊条件,它既可以是由单个模糊命题表示的简单条件,也可以是用多个模糊命题表示的模糊条件; H 是用模糊命题表示的模糊结论; CF 是该产生式规则所表示的知识的可信度因子,它既可以是一个确定的实数,也可以是一个模糊数或模糊语言值, CF 的值由领域专家在给出知识时同时给出; λ 是阈值,用于指出相应知识在什么情况下可被应用。

U 上的直觉模糊子集, CF 是可信度因子。

2 直觉模糊匹配

在直觉模糊推理中, 由于知识的前提条件中的 A 与证据中的 A' 不一定完全相同, 因此在决定选用哪条知识进行推理时必须首先考虑哪条知识的前提条件 A 与证据中的前提条件 A' 近似匹配的问题, 即它们的相似程度是否大于某个预先设定的阈值 λ 。由于 A 与 A' 都是用相应的直觉模糊集及其属性函数刻画的, 因此对其相似程度的计算就转化为对其相应直觉模糊集的计算。

两个直觉模糊集所表示的模糊概念 A 与 B 的相似程度称为匹配度 $\delta_{\text{match}}(A, B)$ 。目前常用的计算匹配度的方法主要有贴近度、语义距离及相似度等。

2.1 贴近度

贴近度 $S(A, B)$ 是指两个模糊概念 A 与 B 相互贴近的程度。在直觉模糊集的贴近度计算时, 需要考虑其隶属度函数与非隶属度函数两个因素的合成, 因而必须对一般模糊集的贴近度计算进行相应扩展^[9]。当用贴近度表达匹配时, 贴近度越大表示越匹配。根据贴近度的含义, 设匹配度为

$$\delta_{\text{match}}(A, B) = S(A, B)$$

这里的贴近度 $S(A, B)$ 应是扩展的直觉模糊集贴近度。当贴近度或匹配度大于某个预先指定的阈值 λ 时, 就认为相应的模糊条件可与证据匹配。

2.2 语义距离

为了明确一个模糊条件是否可与相应的证据匹配, 可以通过计算语义距离的方法来得到匹配度。语义距离的含义是语义距离越小说明两者越匹配。语义距离通常有海明 (Hamming) 距离、欧氏 (Euclidean) 距离、明可夫斯基 (Minkovski) 距离、切比雪夫 (Chebyshev) 距离等。在直觉模糊集的语义距离计算时, 需要考虑其隶属度函数与非隶属度函数两个因素的合成, 因而必须对一般模糊集的语义距离计算进行相应扩展^[9]。无论用那种方法计算出的语义距离, 都可以通过下式将其转换为相应的匹配度:

$$\delta_{\text{match}}(A, B) = 1 - d(A, B)$$

这里的语义距离 $d(A, B)$ 应是扩展的直觉模糊集语义距离。如果模糊条件与相应的匹配度 $\delta_{\text{match}}(A, B)$ 大于某个预先指定的阈值 λ , 就认为它们是可以匹配的。

2.3 相似度

除了贴近度和语义距离可用来确定模糊条件与相应证据是否可匹配外, 还可以通过计算相似度的方法来得到匹配度。相似度的含义是相似度越大说明两者越匹配。计算相似度通常有最大最小法、算术平均最小法、几何平均最小法、相关系数法、指数法等方法, 它们分别适用于不同的场合。同样, 在计算直觉模糊集的相似度时, 需要考虑其隶属度函数与非隶属度函数两个因素的合成, 因而也必须对一般模糊集的相似度的计算进行相应扩展^[9]。根据相似度的含义, 设匹配度为

$$\delta_{\text{match}}(A, B) = r(A, B)$$

这里的相似度 $r(A, B)$ 应是扩展的直觉模糊集相似度。当相似度或匹配度大于某个预先指定的阈值 λ 时, 就认为相应的模糊条件可与证据匹配。

除了上面给出的方法之外, 还有一些处理模糊匹配的其他方法。

2.4 复合条件的匹配

上面讨论的方法都只考虑了简单条件与单一证据的模糊匹配问题, 对于复合条件如何进行模糊匹配, 一般来说, 可按下列步骤进行。

1) 选择或设计一种计算简单条件与单一证据匹配度的方法, 分别对复合条件中的每一个子条件算出与其证据的匹配度。例如对于复合条件: $E = x_1 \text{ is } A_1 \text{ AND } x_2 \text{ is } A_2 \text{ AND } x_3 \text{ is } A_3$ 及相应证据 $E': x_1 \text{ is } A'_1, x_2 \text{ is } A'_2, x_3 \text{ is } A'_3$, 分别算出 A_i 与 A'_i 的匹配度 $\delta_{\text{match}}(A_i, A'_i), i = 1, 2, 3$ 。

2) 选择或设计一种能综合各匹配度 $\delta_{\text{match}}(A_i, A'_i)$ 的方法, 求出整个前提条件与证据的总匹配度。综合方法可用“取极小”、“相乘”等, 即

$$\delta_{\text{match}}(E, E') = \min\{\delta_{\text{match}}(A_1, A'_1), \delta_{\text{match}}(A_2, A'_2), \delta_{\text{match}}(A_3, A'_3)\}$$

或

$$\delta_{\text{match}}(E, E') = \delta_{\text{match}}(A_1, A'_1) \times \delta_{\text{match}}(A_2, A'_2) \times \delta_{\text{match}}(A_3, A'_3)$$

3) 检查总匹配度是否满足阈值条件,如果满足就可匹配,否则为不匹配。

需要指出的是,由于选用不同匹配方法算出的匹配度一般不相同,这就要求设定阈值时要充分考虑所选用的匹配方法,使两者能够协调一致。

3 冲突消解策略

在推理过程中,系统要不断地用当前已知的事实与知识库中的知识进行匹配。此时,如果已知事实可与知识库中的多个知识匹配成功,或者有多个、多组已知事实与知识库中的多个知识匹配成功,称这种情况为冲突。

冲突消解的任务是解决冲突。对于正向推理而言,它将决定选择哪一组已知事实来激活那一条规则,使它用于当前推理,产生其后件指出的结论或执行相应的操作。对于逆向推理来说,它将决定用哪一个假设与哪一个产生式规则的后件进行匹配,从而推出相应的前件,作为新的假设。

对于精确推理,已有多种冲突消解策略,其基本思想是对知识进行排序,如按针对性排序、按已知事实的新鲜性排序、按匹配度排序、根据领域问题的特点排序、按上下文限制排序、按冗余限制排序、按条件个数排序等。具体应用时,可对上述策略进行组合,目的是尽量减少冲突的发生,使推理有较快的速度和较高的效率。对于不精确推理、近似推理或模糊推理,也有若干冲突消解策略,如按匹配度大小排序、按加权平均值排序,以及按广义顺序关系排序等,其基本思想可以推广到直觉模糊推理。

4 结束语

Zadeh 模糊集理论及应用,特别是在知识处理中的应用虽然也在进一步发展但已趋成熟^[8],而 Atanassov 直觉模糊集理论用作知识处理领域,尚正在发展之中,且其数学描述较之 Zadeh 模糊集理论更加符合客观世界模糊对象的本质,因而形成新的研究热点。从已经发表的文献来看,国内仅少数学者对直觉模糊开展研究,且多局限于纯数学范畴,在知识处理领域的研究尚处于起步阶段。

本文探讨了直觉模糊逻辑命题及其知识表示,直觉模糊语义匹配度的计算方法及冲突消解策略的基本思想,是直觉模糊集理论在知识处理领域中应用的有益探索。

参考文献:

- [1] Atanassov K. Intuitionistic Fuzzy Sets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20 (1) : 87 - 96.
- [2] Atanassov K. More on Intuitionistic Fuzzy Sets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1989, 33 (1) : 37 - 46.
- [3] Atanassov K. New Operations Defined Over the Intuitionistic Fuzzy Sets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 61 (1) : 137 - 142.
- [4] Atanassov Krassimir T, Kacprzyk Janusz, Szmidt Eulalia, et al. On Separability of Intuitionistic Fuzzy Sets [J]. Lecture Notes in Artificial Intelligence, 2003, 2715 : 285 - 292.
- [5] 雷英杰,王宝树. 直觉模糊逻辑的语义算子研究[J]. 计算机科学, 2004, 31 (11) : 4 - 6.
- [6] 雷英杰,王宝树. 拓展模糊集之间的若干等价变换 [J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26 (10) : 1414 - 1417.
- [7] 雷英杰,孙金萍,王宝树. 模糊知识处理与模糊集理论的若干拓展[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2004, 5(3) : 40 - 44.
- [8] 雷英杰,王涛,赵晔. 直觉模糊匹配的语义距离与贴近度 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2005, 6 (1) : 69 - 72.
- [9] 雷英杰,赵晔,王涛. 直觉模糊语义匹配的相似性度量 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2005, 6 (2) : 83 - 86.

(编辑:田新华)

LEI Ying - jie, LI Xu - wu, WANG Jian, SHEN Xiao - yong

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

Abstract: The fundamental notions and operations on Atanassov's Intuitionistic Fuzzy Sets are first introduced. Both the operations on Intuitionistic Fuzzy Logic and the knowledge representation by it are described with the emphasis on proposing a symmetric synthesized technique for the truth of IFL propositions and defining the fundamental operations on IFL propositions. All kinds of approaches to computing the semantic matching degree on IFS, including those of near compactness, semantic distance, similarity and compound conditions match, are discussed. Finally, the essence of morality for conflict resolving over Intuitionistic fuzzy reasoning is expounded.

Key words: intuitionistic fuzzy sets ; fuzzy logic ; matching degree ; semantic distance ; similarity

(上接第 21 页)

[6] 汪树玉, 刘国华. 系统分析[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.

(编辑: 姚树峰)

New Synthetic Prediction Method Based on SVR and Its Application

ZHANG Yun - long^{1,2}, PAN Quan¹, ZHANG Hong - cai¹

(1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China; 2. The First Aeronautical Institute of Air Force, PLA, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract: For the problem that the dependent variable has many independent variables and their sampling periods are also different, a predicting method is proposed by using synthetically the data analysis methods of support vector regression (SVR), multivariate regression and principal component analysis, etc. The method can be briefly described as follows: 1. Predicting with the independent variables which have dense sampling periods based on SVR, and then the results are synchronized to have the same sampling period with the dependent variable. 2. Amending the results by using another linear or non - linear method which includes SVR itself, with the rest independent variables which have the same sampling periods with the dependent variable. 3. In order to increase the predictive accuracy, three data processing methods (principal component analysis, standardization and normalization) are integrated. 4. Two approaches, error mean square line and small error probability, are also introduced to evaluating this synthetic method. By using the method, the mathematical relation between the aircraft's failure ratio and its anfractuous factors is first established. The results show that the method is efficient in predicting the aircraft's failure ratio. In the process of quantifying some influencing factors of the aircraft's failure ratio, the Pearson's correlation coefficient method is also adopted.

Key words: support vector regression (SVR) ; multivariate regression ; principal component analysis; aircraft's failure ratio; synthetic prediction