# 基于模糊规则的插值推理算法综述

# 李方轶 李映 杨静

(西北工业大学计算机学院西安 710129) (空天地一体化大数据技术及应用国家工程实验室西安 710129) (陕西省语音与图像信息处理重点实验室西安 710129)

**摘 要** 基于模糊规则的近似推理系统是在模糊集和模糊逻辑理论上建立的,在数学、工程、计算机等科学领域得到了迅速的发展。它作为解决建模和推理中不精确和模糊问题的有效工具,利用模糊 *if-then* 规则完成推理任务。传统推理机制只能使用稠密的规则库进行推理,其能获得有效结论的前提是保证任何输入的观测值都能与现有的模糊规则相匹配。模糊规则插值(Fuzzy Rule Interpolation, FRI)技术能够有效地利用不完备(或稀疏)的规则库实现推理,为没有规则匹配的观测值通过规则插值估计出其结论。本文系统地综述了基于模糊规则的插值推理技术,着重介绍基于 α-截集和基于中间规则的两大类插值方法,通过代表性算法揭示了这两类方法的基本思想。同时,还简要介绍了模糊插值推理系统的其它方法和规则插值算法的实际应用。此外,本文汇总了 11 个常用的评价指标,并对典型算法进行了系统的比较和讨论。最后对未来的研究工作进

行了展望。

关键词 模糊规则插值;不完备规则库;模糊 α-截集;模糊中间规则;模糊插值推理 中图法分类号 TP301

# **Fuzzy Rule-based Interpolative Reasoning: A Survey**

LI Fang-Yi LI Ying YANG Jing

(School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710129) (National Engineering Laboratory for Integrated Aero-Space-Ground-Ocean Big Data Application Technology, Xi'an, 710129) (Shaanxi Provincial Key Laboratory of Speech & Image Information Processing, Xi'an, 710129)

Abstract Fuzzy rule-based approximate reasoning system, established with support of the fuzzy set theory and fuzzy logic, has gained rapid developments in a variety of scientific areas, including mathematics, engineering, and computer science. It works by the use of a set of fuzzy *if-then* rules, as an effective tool to address the issues of imprecision and vagueness in modelling and reasoning. The conventional reasoning mechanism can only perform inference with dense rule bases where any input observation is able to match the existing fuzzy rules. Fuzzy rule interpolation (FRI) facilitates fuzzy rule-based inference system to make reasoning when incomplete (or sparse) rule bases are available, where an estimation is able to be made by computing an interpolated consequent for the observation which matches no rules. This paper systematically reviews the fuzzy interpolative reasoning technique where FRI is involved. In particular, the existing methodologies of FRI are generically categorised into two groups, which are the  $\alpha$ -cut based interpolation and the intermediate rule based interpolation,

本课题得到国家自然科学基金(No.61871460)、陕西省重点研发计划(No.2020KW-003)、中央高校基本科研业务费专项资金(No.3102019ghxm016)资助. 李方轶,女,1991年生,博士,主要研究领域为模糊插值推理、机器学习、图像分类.E-mail:lifangyi@mail.nwpu.edu.cn. 李映(通信作者),女,1969年生,博士,教授,主要研究领域为图像处理、计算智能、信号处理.E-mail:lybyp@nwpu.edu.cn.杨静,女,1990年生,博士研究生,主要研究领域为模糊系统、深度学习.E-mail:yangjing199002@mail.nwpu.edu.cn.

respectively. The main body of this survey reviews each of the two groups of method, where individual representative approaches are described in detail to demonstrate the basic idea of their implementations of FRI. Also, other alternative FRI methods and practical applications of fuzzy interpolative reasoning systems are briefly outlined. In addition, the most commonly used evaluation criteria over FRI algorithms are collected and presented, supported by the comparison and discussion among the typical methods. This paper finally points out potential work of future study in this area.

Key words Fuzzy rule interpolation; Incomplete rule base; α-cut fuzzy set; Fuzzy intermediate rule;Fuzzy interpolative reasoning

# 1 引言

模糊集合理论<sup>[1]</sup>及模糊逻辑已成功地应用于许 多实际问题<sup>[2,3,4]</sup>。以它们为基础的模糊专家系统由 于能够出色地处理实际问题中存在的不精确性、部 分真值和近似值而广受重视。许多模糊专家系统是 基于近似推理(也称为语义推理(linguistic reasoning))发展起来的。

近似推理系统通常可以被形式化为一个基于 模糊 *if-then* 规则的推理机制,它由语义变量、模糊 规则和模糊推理方法组成。语义变量就是利用某些 具有潜在数学语义的模糊量来解释语言表达。模糊 推理规则是将给定的系统输入和输出变量关联起 来,从而确定它们之间关系的一组规则。模糊推理 规则可以从数据中学习得到,也可以直接从领域专 家那里获取,或者两者兼而有之。模糊近似推理方 法将这些模糊推理规则应用于新的输入数据,从而 推导出相应的结论。因此,模糊规则库是任何近似 推理模型的基本组成部分,它不仅存储了推理所需 的知识,其性质也决定了使用何种推理技术实现模 糊近似推理。

近似推理系统的另一个主要组成部分是模糊 推理机制。现有文献中存在多种多样的模糊推理机 制,其中多数是通过合成推理规则(Compositional Rule of Inference, CRI<sup>[5]</sup>)来实现一般化的假言推理 (modus ponens)。合成推理规则自提出后得到了广泛 而成功的应用。例如,著名的 Mamdani 模糊逻辑控 制器<sup>[6]</sup>就是基于 CRI 实现的。然而,CRI 只能在规 则库是稠密(dense)或者完备的情况下(即可用的规 则覆盖整个问题论域)得出合理和准确的结果。换 言之,任何未知的观测值都必须与规则库中的至少 一条模糊规则匹配才能使传统的基于CRI 的推理机 制生成有效的结论。

然而,在实际应用中可能无法获得稠密的规则

库,其原因有许多<sup>[7,8]</sup>,其中最常见的是:1)用于 构造规则库的知识不完备,包括来自人类的专业知 识以及机器学习技术学习得到的知识:2)为降低生 成的模糊系统的复杂度,减少规则库中的规则数, 从而导致规则库是稀疏(sparse)或不完备的。

当只有稀疏知识可用时,模糊规则插值(Fuzzy Rule Interpolation, FRI)技术<sup>[9, 10]</sup>应运而生,它解决 了模糊规则推理系统中的近似推理问题,从而解除 了CRI在应用过程中需要一个稠密模糊规则库的关 键限制,这为基于模糊规则的推理系统提供了一种 新的解决方案,即推断近似的插值结果,实现模糊 插值推理。

模糊规则插值在基于模糊规则的系统发展中 有两个重要贡献。一是它实现了基于稀疏规则库<sup>[11]</sup> 的模糊推理,二是它可以用来简化模糊规则库的复 杂性<sup>[12,13]</sup>,例如,用插值得到的一条规则迭代地替 换两条(或者多条)己知的用于插值的规则,从而从 相邻规则中消除那些可以近似的模糊规则<sup>[12]</sup>。文献 中大多数模糊规则插值方法都围绕第一点,本文因 此将详细综述规则插值推理算法。

作为一种推理机制,当输入的某一观测值未能 匹配到稀疏模糊规则库中的任何一条规则时,模糊 规则插值从选择与该观测值的最邻近的模糊规则 开始实现插值推理。这些选择出的规则构成了进行 模糊插值的基础,它们将作为实现规则插值推理算 法的待插值规则。在文献中,继 K άzy and Hirota (1993)的开创性模糊规则插值工作<sup>[9, 10]</sup>之后,各种 各样的模糊插值推理方法相继出现。现有的方法通 常可以分为两类:1)基于α-截集的插值方法,以及 2)基于中间规则的插值方法。这种分类取决于插值 结果的计算是否通过构造和变换中间规则的过程 来完成。因此它们也分别被称为基于非变换和基于 变换的模糊规则插值技术<sup>[14]</sup>。模糊插值推理的开创 性方法,如 KH 线性规则插值<sup>[9, 10]</sup>及其衍生算法是 最典型的基于非变换的方法。此类方法直接利用待 插值的规则获得插值推理结论,其中大部分遵循

"相似前件属性将导出相似结论"的基本思想,利 用模糊 α-截集推导结论。对于那些依赖于变换中间 规则的第二大类算法,其中典型的一类基于尺度和 位移变换的模糊规则插值方法族(称为 T-FRI 方法) 已经得到了广泛的研究和应用<sup>[15, 16, 17, 18, 19]</sup>。这些方 法没有直接对待插值的规则进行推导操作,而是通 常采取两步走的策略实现插值推理:首先利用待插 值的规则,将其聚合起来构造一条"中间规则", 然后基于相似类比的原理,对比如何将中间规则的 前件变换为输入观测值的过程,利用计算获得的变 换参数,将中间规则的后件变换成所求结论。

虽然绝大多数模糊规则插值方法可以依照上 述分类方法划分其类别,但还有一些算法难以精确 的划分到上述两大类中。这些算法可以细分为五 类: 1) 基于模糊环境(vague environment)逼近的插 值及其在自动导引车系统中的应用,包括文献 Kovács and Kóczy (1997)<sup>[20]</sup>; Kovacs and Koczy (1997)<sup>[21]</sup>; Kov ács and K úzy (1997)<sup>[22]</sup>; 2) 基于梯度 的插值方法(Bouchon-Meunier et al. (1999, 2001, 2000)<sup>[23, 24, 25]</sup>); 3) 模糊插值的公理化方法(Jenei (2001); Jenei et al. (2002)<sup>[26, 27]</sup>); 4) 将模糊集映射到 高维笛卡尔空间中的点从而进行插值,此类方法详 见文献 Yam et al. (2000b)<sup>[28]</sup>; Yam and K ćczy (2000, 1998, 2001)<sup>[29, 30, 31]</sup>; Yam et al. (2000a)<sup>[32]</sup>; 5) 规则簇 插值用于在稀疏规则库环境中生成自适应神经模 糊 推 理 系 统 (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS)<sup>[33]</sup>。这些多种多样的方法显示了模 糊规则插值方法研究领域的复杂性和多样性。

本文的其余部分组织如下。第2节首先叙述贯 穿本文的基于模糊规则推理的相关概念和符号。第 3节综述基于 α-截集的模糊插值方法。第4节详细 介绍基于中间规则的模糊插值方法。第5节介绍模 糊规则插值算法的评估准则并对代表性的方法进 行分析,概述列举算法的实际应用。最后第6节总 结本文并展望模糊插值推理技术的发展前景。

# 2 模糊规则推理的相关概念

模糊规则插值技术的关键组成部分是一组由 *if-then* 形式表示的规则,每一条规则都采用模糊或 精确的术语来表示输入变量,并将它们与作为某个 问题描述的输出变量相关联。一般来说,一条规则 可能包含多个输入属性和多个输出变量,但一条多 输出规则总是可以由多条单一输出规则等价地表 示。为了讨论的方便并不失一般性,本文只考虑具 有单一输出变量的规则。

一个典型的模糊规则模型本质上包含两个关 键要素: (R,Y). 其中 Y 表示非空的有限属性集  $Y = A \cup \{z\}$ , 它包含的 $A = \{a_j | j = 1, 2, ..., m\}$ 表示 输入的规则前件属性集, 以及 z 代表规则的结论(或 者后件)属性。另一个重要元素 R 表示一个非空的 有限模糊规则集 $R = \{r^1, r^2, ..., r^N\}$ . 在许多传统的 基于模糊规则的系统(包括使用模糊规则插值技术 实现的系统)中,给定的规则 $r^i \in R$ 和观测值 $o^*$ 通常 表示为:

- $r^i$ : if  $a_1$  is  $A_1^i$  and  $a_2$  is  $A_2^i$  and  $\cdots$  and  $a_m$  is  $A_m^i$ , then z is  $B^i$
- $o^*$ :  $a_1$  is  $A_1^*$  and  $a_2$  is  $A_2^*$  and  $\cdots$  and  $a_m$  is  $A_m^*$

(1)

其中,  $A_j^i n A_j^*$ 分别表示 $r^i n o^*$ 中的前件属性 $A_j$ 所取的模糊集值,  $B^i$ 表示 $r^i$ 的后件属性 z的模糊集值。

规则的前件和后件的模糊取值通常用模糊集表示。模糊集的概念是由 L. Zadeh<sup>[1]</sup>引入的。论域 X中的模糊集 A 由模糊隶属函数 A 表示,它将每个元素 $x \in X$ 与一个实数 $A(x) \in [0,1]$ 相关联。这一实数可以被理解为元素 x属于模糊集 A 的隶属度<sup>[34]</sup>。

实际应用中通常使用的模糊隶属函数主要有两 类:1)多边形(分段线性)模糊集,包括三角形、梯形、 六边形的隶属函数等;2)非线性模糊集,通常包括高 斯型、广义钟形和 Sigmoid 隶属函数。多边形模糊 集通常由其特征点在实数集上的分布从小到大按 升序表示,而非线性模糊集则由用于指定每个非线 性函数的参数表示。不同模糊隶属函数的选择取决 于给定应用问题的特定要求。但是三角形和梯形隶 属函数由于其简单的表示和计算效率高而被广泛 使用,尤其用于实时的应用场景。

在模糊规则插值方法的研究过程中,不同的模 糊隶属函数被用来实现不同的方法。由于模糊规则 插值过程依赖于具体的模糊隶属函数,因此很难有 一个通用的形式来统一所有的模糊规则插值模型。 尽管如此,为了叙述的一致性和理解的简单性,并 且由于其广泛应用在大多数文献中,下文中所有的 模糊规则插值方法都使用三角形隶属函数来描述 说明。如图1所示,一个正规的凸的三角形模糊集 A 由它的三个特征点按升序表示,即(*a*<sub>1</sub>,*a*<sub>2</sub>,*a*<sub>3</sub>), 其中第一个和第三个特征点代表该模糊集的支撑 集的两个极值点,其隶属度为0,中间的特征点代 表隶属度为1的点。对于由公式(1)表示的规则组成的模糊规则库,三角形模糊集表示的规则前件A<sup>i</sup><sub>j</sub>,观测目标值A<sup>\*</sup><sub>j</sub>,规则后件B<sup>i</sup>以及需要由模糊规则插

值方法计算得出的结论B\*的模糊值,分别由它们相 应的特征点表示为:

 $(a_{j_1}^i, a_{j_2}^i, a_{j_3}^i), (a_{j_1}^*, a_{j_2}^*, a_{j_3}^*), (b_1^i, b_2^i, b_3^i), (b_1^*, b_2^*, b_3^*),$ 

算法	特征
Huang et al. (2004) <sup>[35]</sup> ; K ćczy and Hirota (1993a,b) <sup>[9, 10]</sup> ;	仅含两条模糊规则的插值算法
Ughetto et al. (2000) <sup>[36]</sup>	
Chang et al. (2008) <sup>[37]</sup> ; Chen and Chen (2016) <sup>[38]</sup> ; Chen et al. (2013a,	多条模糊规则的插值算法
2015) <sup>[39, 40]</sup> ; Chen and Lee (2011) <sup>[41]</sup> ; Cheng et al. (2015, 2016) <sup>[42, 43]</sup> ;	
Kov ács (2006) <sup>[44]</sup> ; Yang and Shen (2013) <sup>[45]</sup>	
Chang et al. (2008) <sup>[37]</sup> ; 卢正鼎, 王天江, 符海东等 (2004) <sup>[46,47]</sup>	基于几何相似推理的模糊规则插值算法
Hsiao et al. (1998) <sup>[48]</sup> ;王天江和卢正鼎 (2004) <sup>[49]</sup> ;	基于多边形模糊集斜率的插值算法
赵洪文 (2010) <sup>[50]</sup>	
Chen and Chen (2016) <sup>[38]</sup> ; Chen et al. (2013a) <sup>[39]</sup> ;	加权的模糊规则插值算法
Cheng et al. (2015) <sup>[42]</sup>	
Chen and Lee (2011) <sup>[41]</sup> ; Chen and Barman (2019b) <sup>[51]</sup> ; Chen and	基于区间值 II -型模糊集(interval type-2 fuzzy sets <sup>[56]</sup> )的模糊规则插
Adam (2018) [52]; Bai and Wang (2017) [53]	值算法
Chen et al. (2015) <sup>[40]</sup> ; Chen et al. (2019a) <sup>[54]</sup>	基于粗糙-模糊集(rough-fuzzy sets)的模糊规则插值算法
Chen and Adam (2017) <sup>[55]</sup> ; Cheng et al. (2016) <sup>[43]</sup> ; Chen et al. (2019a)	具有自适应性的模糊规则插值算法
<sup>[54]</sup> ; Chen and Barman (2019b) <sup>[51]</sup> ; Chen and Adam (2018) <sup>[52]</sup>	

表1基于α-截集(非变换)的模糊规则插值方法





# 3 基于α-截集(非变换)的模糊插值

# 推理方法

在介绍了基于模糊规则的推理的相关概念之 后,本节首先概述基于α-截集的模糊插值方法的基 本原理,然后详细介绍此类方法中的一些典型代表 算法,包括经典的 KH 线性插值方法及其衍生算法。

### 3.1 概述

基于α-截集的模糊规则插值方法,也称为基于 非变换的方法。此类方法在计算与某一未匹配到任 何规则的观测值对应的插值推理结论时,直接利用 选定相邻的至少两条模糊规则,计算插值结果的每 个α-截集。在模糊插值推理研究的早期阶段,已有 大量的研究报道了这类方法。特别是第一个被提出 的模糊规则插值方法,以其发明者的名字命名为 KH 方法<sup>[9,10]</sup>,是最典型的基于α-截集的算法。表1 汇总了文献中属于该类的各种算法。此外,由于 KH 插值方法被广泛深入的研究,表 2 列出了 KH 方法家族的相关衍生算法。

基于α-截集的模糊规则插值本质上是经典线 性插值的模糊扩展,其中用于插值的"给定点"是 相关的模糊规则。插值的结果是通过在每个α-截集 上计算和聚合线性插值生成的。在理论方面,给定 任意形状的正规凸的模糊集,一个近似的插值结论 应该考虑无限个α-截集。然而在实践中,为了达到 可接受的计算要求,大多数基于α-截集的方法只考 虑有限个数的α-截集(通常是2、3或4个),最终的 结论由分段线性连接以得到近似值。下面将介绍一 些典型的基于α-截集的模糊规则插值方法。

### 3.2 KH线性规则插值

本节首先阐述了最著名的基于α-截集的模糊规则插值方法,即 KH 线性规则插值<sup>[9, 10]</sup>,然后介绍 该方法在多维情况下使用三角形隶属函数的具体 实现。

3.2.1 基本方法

KH 规则插值通过利用α-截集之间的距离为实

现模糊插值推理进行了初步的尝试。当给定的观测 值与稀疏规则库中任何规则都不匹配时,通过对距 离观测值最近的,事先选定的一些(通常是两个),

表 ZKH 线性规则插值算法族				
算法	特征			
Kứzy and Hirota (1997) <sup>[12]</sup> ; Kứzy et al. (2000) <sup>[57]</sup> ; Kứzy et al.	KH 线性规则插值算法的基本原理			
(2000) <sup>[58]</sup> ; K ćzy and Hirota (1993a,b,c,1991) <sup>[9, 10, 59, 60]</sup>				
Vass et al. (1992) <sup>[61]</sup>	扩展的 KH 算法用于减少无效结论			
Baranyi et al. (1999) <sup>[7]</sup> ; Tikk (1999) <sup>[62]</sup> ; Tikk and Baranyi (2000) <sup>[8]</sup> ;	基于坐标修正的α-截集方法			
Yam et al. (1999) <sup>[63]</sup>				
Tikk et al. (1997, 1999, 2002) <sup>[64, 65, 66]</sup>	稳健的 KH 规则插值算法			
Wong et al. (2000, 2005) <sup>[67, 68]</sup>	多维输入的 KH 改进算法			
钱皓等 (2009) <sup>[69]</sup>	基于高斯型隶属函数的 KH 扩展算法			

相邻规则的结果执行线性聚合来构造插值结果。聚 合操作符合基于相似性的类比推理的一般原则如 下:

规则的前件A<sup>i</sup>(是单个属性值A<sup>i</sup>的逻辑聚合)越接近观察值o<sup>\*</sup>,规则的后件B<sup>i</sup>越接近对应于o<sup>\*</sup>的结论B<sup>\*</sup>.

其中所采用的相似性度量是通过使用规则前件和 观测值之间定义的模糊距离来指定的。也就是说, A<sup>i</sup>和o\*之间的距离越小,它们就越相似,相应的B<sup>i</sup>被 视为潜在地对所寻求的结果作出更多贡献。

假设规则库 *R* 中有两条规则*r<sup>i</sup>*和*r<sup>j</sup>*,其形式由 公式(1)定义。给定一个观测值*o*\* (同样如公式(1)), 前文所述的线性规则插值的基本作法如下:通过类 比观测值前件*A*\*与待插值规则*r<sup>i</sup>*和*r<sup>j</sup>*前件(*A<sup>i</sup>*和*A<sup>j</sup>*) 之间的距离关系,来构造所求结论*B*\*与规则后件 (*B<sup>i</sup>*和*B<sup>j</sup>*)之间的距离比例:

$$\frac{\widetilde{d}(A^*,A^i)}{\widetilde{d}(A^*,A^j)} = \frac{\widetilde{d}(B^*,B^i)}{\widetilde{d}(B^*,B^j)}$$
(2)

其中

$$\widetilde{d}(A^*, A^i) = \sqrt{\widetilde{d}_{i1}^2 + \widetilde{d}_{i2}^2 + \dots + \widetilde{d}_{im}^2}$$

$$\widetilde{d}_{it} = \widetilde{d}(A_t^*, A_t^i), t = 1, 2, \dots, m$$
(3)

d表示两个隶属函数之间的模糊距离。

根据分解原理(Resolution Principle)<sup>[9]</sup>,两个模糊 集之间的模糊距离定义为它们的 $\alpha$ -截集之间的一 对下模糊及上模糊距离(lower and upper fuzzy distance)。对于[0,1]区间中的某一 $\alpha$ ,下模糊距离  $\tilde{d}_L(A,B)$ 和上模糊距离 $\tilde{d}_U(A,B)$ 定义为:

$$\widetilde{d}_{L}(A,B) = D(inf(A_{\alpha}), inf(B_{\alpha}))$$

$$\widetilde{d}_{U}(A,B) = D(sup(A_{\alpha}), sup(B_{\alpha}))$$
(4)

其中, *D* 表示 Minkowski 距离, *inf*(·)和*sup*(·)分别 是相应的α截集的下确界和上确界。因此,线性规则插值公式(即公式(2))可以重新表示为:

$$\frac{\tilde{d}_{L}(A_{\alpha}^{*},A_{\alpha}^{i})}{\tilde{d}_{L}(A_{\alpha}^{*},A_{\alpha}^{j})} = \frac{\tilde{d}_{L}(B_{\alpha}^{*},B_{\alpha}^{i})}{\tilde{d}_{L}(B_{\alpha}^{*},B_{\alpha}^{j})}$$

$$\frac{\tilde{d}_{U}(A_{\alpha}^{*},A_{\alpha}^{i})}{\tilde{d}_{U}(A_{\alpha}^{*},A_{\alpha}^{j})} = \frac{\tilde{d}_{U}(B_{\alpha}^{*},B_{\alpha}^{i})}{\tilde{d}_{U}(B_{\alpha}^{*},B_{\alpha}^{j})}$$
(5)

这使得 $min\{B_{\alpha}^{*}\}$ 和 $max\{B_{\alpha}^{*}\}$ 可以通过对两条用 于插值的规则进行加权平均获得,加权的对象是相 应模糊集的 $\alpha$ -截集的临界值。因此可得:

$$min\{B_{\alpha}^{*}\} = \frac{w_{\alpha L}^{i} min\{B_{\alpha}^{i}\} + w_{\alpha L}^{j} min\{B_{\alpha}^{j}\}}{w_{\alpha L}^{i} + w_{\alpha L}^{j}}$$

$$max\{B_{\alpha}^{*}\} = \frac{w_{\alpha U}^{i} max\{B_{\alpha}^{i}\} + w_{\alpha U}^{j} max\{B_{\alpha}^{j}\}}{w_{\alpha U}^{i} + w_{\alpha U}^{j}}$$
(6)

其中权值由相应的下模糊和上模糊距离定义:

$$w_{\alpha L}^{i} = \frac{1}{\tilde{d}_{L}(A_{\alpha}^{*}, A_{\alpha}^{i})} \qquad w_{\alpha L}^{j} = \frac{1}{\tilde{d}_{L}(A_{\alpha}^{*}, A_{\alpha}^{j})}$$
$$w_{\alpha U}^{i} = \frac{1}{\tilde{d}_{U}(A_{\alpha}^{*}, A_{\alpha}^{i})} \qquad w_{\alpha U}^{j} = \frac{1}{\tilde{d}_{U}(A_{\alpha}^{*}, A_{\alpha}^{j})}$$
结论的*a*-截集由此可得:
$$(7)$$

 $B_{\alpha}^{*} = [min\{B_{\alpha}^{*}\}, max\{B_{\alpha}^{*}\}]$  (8) 因此,最终的插值结论可以通过分解原理获得:

$$B^* = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} B^*_{\alpha} \tag{9}$$

在实际应用中,为确定插值结果,选择具体α截 集的数值及个数与算法所采用的模糊隶属函数有 着密切的关系。根据前文中提到的,具有三角形或 梯形的多边形模糊集由于其分段线性的特性及较低的计算复杂度被广泛使用。因此在 KH 插值方法中,通常根据多边形的特征点选择对应的α值,比如对于三角形隶属函数的三个顶点,α取值为0和1。

3.2.2 多维输入的多规则 KH 方法

对于简单的线性问题,基本的 KH 线性规则插 值方法的一个显著优势在于它能够高效地为某一 无法匹配任何规则的输入计算获得一个推理结果。 随后,它被拓展用于处理更复杂情况下的稀疏规则 插值,例如涉及处理具有多条规则,且每条规则具 有多个前件变量的问题<sup>[66,68]</sup>。由于 KH 插值假定的 分段线性性质,给定三角隶属函数,插值结果  $B^* = (b_1^*, b_2^*, b_3^*)$ 可以用其两个 $\alpha$ -截集(当 $\alpha$ 为 0 或 1 时)来确定,从而使得结论的三个特征点计算如下:

$$b_t^* = \frac{\sum_{i=1}^n w_t^i \times b_t^i}{\sum_{i=1}^n w_t^i}$$
(10)

其中相应的权值为:

$$w_t^i = \frac{1}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (a_{jt}^i - a_{jt}^*)^2}}$$
(11)

n 是用于插值的相邻于观测的规则数, m 是规则中的前件属性数, t=1,2,3。对插值得到的模糊集B\*的这种计算正好反映了公式(6)所表示的一般情况,即:

当 $\alpha = 0$ 时,

$$min\{B_0^*\} = b_1^* = \frac{\sum_{i=1}^n w_1^i \times b_1^i}{\sum_{i=1}^n w_1^i}$$

$$max\{B_0^*\} = b_3^* = \frac{\sum_{i=1}^n w_3^i \times b_3^i}{\sum_{i=1}^n w_3^i}$$
(12)

当 $\alpha = 1$ 时,

$$min\{B_1^*\} = max\{B_1^*\} = b_2^* = \frac{\sum_{i=1}^n w_2^i \times b_2^i}{\sum_{i=1}^n w_2^i} \quad (13)$$

#### 3.3 KH方法的重要改进

KH 方法的显著缺点是,通过它获得的模糊集的 隶属函数并不总是一个正规的模糊集,有时甚至不 是有效的模糊集。对 KH 方法中存在的"非正规模 糊集问题"的研究促进了许多技术的发展。下面简 要列举几类具有代表性的 KH 改进算法。

### 3.3.1 基于修正α-截集距离的插值算法

以下两种方法对 KH 线性规则插值算法的改进

是通过修正α-截集距离实现的,具体而言是利用模 糊隶属函数的宽度来刻画α-截集之间的距离。

#### 1) VKK 方法

VKK 方法<sup>[61]</sup>的主要思想是修改了 KH 方法中对 模糊集之间距离度量的定义。它通过其中心点之间 的距离 $d_c(\cdot,\cdot)$ 和宽度 w 描述每个 $\alpha$ -截集。其定义如 图 2 所示,其中上方表示 KH 方法中的下模糊和上 模糊距离。模糊集之间的距离由一个向量表示,该 向量包含一组基于中心点的 Euclidean 距离。该方 法同样适用于具有多个前件属性的规则插值,通过 Minkowski 距离聚合不同前件属性上的距离,并通 过计算算术平均值得到相应的 $\alpha$ -截集的宽度。但 是,这种方法不考虑 $\alpha$ -截集宽度为 0 的情况,因此 不适用于观测值表示为单点模糊集(singleton fuzzy set)的情形。



2) 利用隶属函数宽度的方法

近些年李霞等人提出一种模糊插值推理方法 <sup>[70]</sup>,同样利用了隶属函数宽度的概念,用于解决 KH 方法不能保证推理结论正规性和凸性的问题。 与其它 KH 改进算法在最后验证结论的正规性和凸 性不同的是,该方法的基本思想是先假定推理结果 是符合正规性和凸性的,然后求推理结果的核和宽 度,这样就能保证其正规和凸的特性。该方法也被 推广到多维情况下,能很好地解决多维稀疏模糊规 则库的推理问题。

#### 3.3.2 MACI 方法

MACI (modified α-cut based interpolation) 方法 <sup>[8]</sup>有效地解决了"非正规模糊集问题",同时保持了 KH 方法的计算效率高的优点。该方法利用模糊集 的向量表示与坐标变换的概念,其主要思想是它将 输入输出空间的模糊集合进行坐标变换,将表示规 则属性的模糊集在特定的坐标系中进行表示,而这 种特定的坐标系不包含"非正规"的模糊集。然后 在变换的坐标空间中对所得结论进行线性插值计 算,最后将所得结论再转换回原坐标空间中。

MACI 方法利用特征点构成的向量定义每个模 糊集。其实现过程可以简化为以下三步:

- (1) 为输出变量空间选择适当的坐标系;
- (2) 执行 KH 规则插值方法对变换后的模糊集进行 推理;
- (3)将结论进行坐标逆变换为原始坐标空间中的模 糊集合表示。

该方法能够应用于任意形状的模糊集。对于分 段线性模糊隶属函数,MACI利用模糊集的特征点 向量描述该模糊集;对于非线性模糊隶属函数,其 平滑函数预定义的α-截集的端点被用来构造模糊 集的表示向量。同 KH方法一样,这种方法也不保 持线性特性,但通过分段线性特性获得的结论优于 原方法。由于其计算效率高且消除了"非正规模糊 集问题",MACI方法还被进一步拓展至多维输入变 量的规则插值过程中<sup>[68]</sup>。当规则前件和输入观测值 如公式(1)中所示,均有*a*<sub>1</sub>,*a*<sub>2</sub>,...,*a<sub>m</sub>*个属性时, MACI算法的多维扩展的基本原理与 3.2.2 节中 KH 算法在多维输入中的实现类似,即如公式(11),利 用欧式距离将原始算法中在输入空间的计算过程 进行聚合。然而该算法仅仅将输入变量扩展至多维 情况,用于插值的规则仍为 2 条。

除了上述几类典型的 KH 改进算法以外,在国内的模糊插值推理研究中,钱皓等人<sup>[69]</sup>把 KH 方法应用于高斯型隶属函数,利用模糊集顶点及拐点的距离比得到推理结果,并保证结论也是高斯型模糊 集,从而进一步加强了 KH 线性规则插值方法的研究与推广应用。

#### 3.4 基于多边形模糊集斜率的插值算法

基于多边形的模糊集是模糊规则插值方法最常 使用的模糊集合,尤其是以三角形、梯形为代表, 其显著的优点就是算法简单,易于实现且运算效率 高。这类模糊隶属函数的关键参数即多边形的顶 点,底点和两腰斜率,故这些算法被命名为基于多 边形模糊集斜率的插值算法,参看文献[48,49,50] 等。由于多边形的顶点大多由模糊隶属函数的α-截 集来确定,比如三角形的两个底点和顶点分别是 α=0 和α=1 的截集,因此这些算法均属于基于α-截 集的模糊插值推理方法。

在这类算法中,王天江等人<sup>[49]</sup>提出一种线性插 值推理方法,其基本思想是只要求规则后件及推理 结果的α=1 截集满足线性比例关系,而推理结果的 左右边斜率分别为两规则前件相应斜率的平均值。 该方法可适用于规则前件为多个变量的规则插值, 并且保证了推理结果的凸性和正规性,然而它只适 用于梯形隶属函数。相似的方法还有 HCL 插值法 <sup>[48]</sup>。赵洪文<sup>[50]</sup>提出的"点--斜"模糊插值推理方法 是 HCL 方法的推广,具有易理解、易操作的优点, 但也仅限于梯形模糊集的情况。下面以 HCL 方法 为例简述基于多边形模糊集斜率插值算法的原理。

HCL 插值法<sup>[48]</sup>是一种基于 KH 线性规则插值算 法的插值推理方法。二者的区别在于,HCL 方法对 模糊集隶属函数的最高点的插值方法与 KH 基于 $\alpha$ -截集的处理过程不同,从而改进 KH 方法可能产生 非正规的模糊集的问题。该算法可以保证如果模糊 规则(例如:  $A^1 \Rightarrow B^1 \pi A^2 \Rightarrow B^2$ )以及观测值( $A^*$ )是 由三角隶属函数定义的,则插值结论也是三角形 的。然而,这种方法是专门为三角形情况而设计的, 因此无法推广到更一般的模糊集(如梯形)。

HCL 插值法计算三角形隶属函数的底边的方法 与 KH 方法相同,但计算顶点的方法不同。下面将 详细说明。图 3 描述了模糊规则插值问题的一种简 单 的 典 型 代 表 , 其 中  $k_1, t_1, k, t, k_2, t_2, h_1, m_1, h, m, h_2, m_2$ 分别表示相应模 糊集的斜率。确定 $B^*$ 顶点的过程如下:

(1) 确定三角形隶属函数B\*的斜率h和m. 令

$$k = k_1 x + k_2 y$$
  $t = t_1 x + t_2 y$  (14)  
其中 x 和 y 是实数。

当 $k_1/t_1 \neq k_2/t_2$ 时,则通过同时求解(14)中的 两式来计算唯一的 x 和 y.令

$$h = kc \qquad m = tc \tag{16}$$

其中 c 为常数。

(2) 通过求解下式确定顶点b<sub>2</sub>的位置:

$$\frac{1}{b_2^* - \inf(B^*)} : \frac{-1}{\sup(B^*) - b_2^*} = h:m$$
(17)

即可得

$$b_2^* = \frac{m \cdot \sup(B^*) - h \cdot \inf(B^*)}{m - h}$$
(18)

其中*inf(·)和sup(·)*分别表示模糊集的上确界 和下确界。

图 3HCL 模糊规则插值



#### 3.5 基于几何相似推理的模糊规则插值方法

基于几何相似推理的模糊规则插值方法是基 于α-截集的方法中的具有代表性的一大子类。参 看文献[37,46,47]。这些方法利用模糊集面积之 间的相似比例进行推理。早期,卢正鼎,王天江, 符海东等人[46,47]通过考虑观测值与规则前件之 间的几何相似性在结论与规则后件之间也应该 存在,从而以输入观测所围成的面积与规则前件 所围成的面积的比例, 它们的重心的水平距离的 比例,以及角度相似特征为插值依据。但他们仅 讨论了梯形模糊集的情况。

同样利用模糊集面积进行推理的 CCL 规则插 值<sup>[37]</sup>为模糊插值推理提供了另一种有效的方法, 它利用了规则中属性以及未匹配到任何规则的 观测值的模糊集的面积的概念。其思想是保持模 糊度的比(ratio of fuzziness, RF)的逻辑一致性。 RF 由相关模糊集的面积决定。也就是说,它追 求对应于观测值的(待)插值结果与观测的 RF 和 用于插值的每条规则的结果与前件之间的 RF 的 一致性。更具体地说,两个模糊值 A 和 B 之间的 RF 定义为:

$$RF(A,B) = \frac{S(A)}{S(B)}$$
(20)

其中,S(A),S(B)分别表示A和B的模糊集的面积。

CCL 模糊规则插值方法提出了一种灵活的插 值推理框架, 它允许使用不同类型的隶属函数, 包括各种多边形和高斯形状的函数。它还可以处 理涉及多条模糊规则且含有多个前件变量的一 般情况。为了简化描述的复杂性和保持一致性, 下面仅介绍使用三角形模糊隶属函数的核心计 算过程。

首先,待插值的后件模糊集B\*的隶属度取 1 的点b;通过线性插值计算得:

$$b_2^* = \sum_{i=1}^n W_i b_2^i \tag{21}$$

其中 n 是用于插值的规则个数, W;是每条规则的 权重,其值为:

$$W_{i} = \frac{\sum_{j=1}^{m} w_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} w_{ij}}$$
$$_{ij} = 1 - \left| \frac{a_{j2}^{i} - a_{j2}^{*}}{\max_{a_{i2}} - \min_{a_{i2}}} \right|$$
(22)

其中 $max_{a_{i_2}}$ 和 $min_{a_{i_2}}$ 用于归一化,分别代表  $\{a_{i_2}^i|i=1,2,...,n\}$ 内的最大值和最小值。

给定由两个α-截集产生的三个特征点(当 α=0.1 时), 三角形模糊集可以被分成两个较小的 子三角形,如图4所示。对于具有许多特征点的 更复杂的多边形模糊集,可以生成更多三角形甚 至梯形的子多边形,但是计算的原理同下述对于 三角形隶属函数的情况。由此模糊集B\*的左三角 区域面积S<sub>L</sub>(B\*) (即b<sub>2</sub>\*点左侧的三角形模糊集的 几何区域面积)和右三角区域面积S<sub>R</sub>(B\*)可由公 式(19)计算得出,其中 $S_K$ 的下标中 $K \in \{L, R\}$ 。该 方程准确地揭示了 CCL 规则插值的基本思想,

即从观测角度出发,通过对所包含规则的 RF 的 加权聚集,从而导出插值模糊集的面积。



图 4 三角形模糊集的左侧和右侧面积

最后,插值结果*B*\*的支撑集的左、右端点可由 生成的三角形区域的面积导出,如下所示:

Chen et al. (2019) [96]

Li et al. (2005)<sup>[97]</sup>

 $b_1^* = b_2^* - 2S_L(B^*), \quad b_3^* = b_2^* + 2S_R(B^*)$  (23)

# 4 基于中间规则(变换)的模糊插值

# 推理方法

继上一节对模糊规则插值第一大类的分析之 后,本节详细综述第二类基于中间规则(变换)的 模糊插值方法。首先概述其基本思想并对此类方法 按特征进行细分,然后介绍了一些典型代表,包括

夜了茶!中间观则(文侠)的埃帕观则而有力	表 3	基于中间规则	(变换)	的模糊规则提	盾方法
----------------------	-----	--------	------	--------	-----

算法	特征
Wu et al. (1996) <sup>[73]</sup>	利用相似变换保证插值的有效性
Baranyi et al. (1995, 1996a) <sup>[74, 75]</sup> ; Baranyi and K ćczy (1996a) <sup>[76]</sup> ;	采用广义函数概念进行内插和外插(extrapolation)
Baranyi et al. (2004, 1996b, 1998) <sup>[77, 78, 79]</sup> ;	
Baranyi and K ćczy (1996b) <sup>[80]</sup>	
Kawaguchi and Miyakoshi (2000a,b, 2001) <sup>[81, 82, 83]</sup> ; Kawaguchi et al.	基于 B 样条的插值
(1997) <sup>[84]</sup>	
Chen et al. (2016) <sup>[85]</sup> ; Chen and Shen (2017) <sup>[86]</sup> ; Huang and Shen	基于尺度和位移变换的规则插值(T-FRI)
(2006, 2008) <sup>[15, 16]</sup> ; Jin et al. (2014, 2020) <sup>[17, 87]</sup> ; Li et al. (2019a,	
2018b) <sup>[88, 89]</sup> ; Naik et al. (2017b) <sup>[19]</sup> ; Shen and Yang (2011) <sup>[90]</sup> ; Yang et	
al. (2017) <sup>[18]</sup> ; Yang and Shen (2011) <sup>[91]</sup>	
Das et al. (2019) <sup>[92]</sup>	基于几何的线性模糊规则插值

算法	特征
Huang and Shen (2006) <sup>[15]</sup>	T-FRI 的基本方法,用于处理两条给定的相邻规则,可以采用多种模糊隶属度函数(如复杂多边形、高
	斯或钟形),并且处理包含多个前件变量的问题
Huang and Shen (2008) <sup>[16]</sup>	扩展的 T-FRI: 同时支持包含多条模糊规则的内插和外插,每条规则包含多个前件项
Jin et al. (2014, 2019) <sup>[17, 93]</sup>	反向 T-FRI: 允许从已知的前件和后件中插值与后件直接相关的缺失前件值,支持包含多个前件模糊
	规则的反向内插与外插
Yang et al. (2017); Yang and Shen	自适应 T-FRI: 能够在插值过程中出现矛盾结果时恢复系统一致性
(2011) <sup>[18, 91]</sup>	
Chen et al. (2016) <sup>[85]</sup>	粗糙模糊 T-FRI: 允许表示、处理和利用不同程度的知识不确定性
Chen and Shen (2017) <sup>[86]</sup>	基于区间值Ⅱ-型模糊集的 T-FRI
Naik et al. (2017b) <sup>[19]</sup>	动态 T-FRI: 有助于选择、组合和概括信息丰富的中间规则,以便在执行插值时完善当前的规则库
Li et al. (2017, 2018b,a, 2020) <sup>[94,</sup>	属性加权 T-FRI: 对规则的前件属性进行加权,并应用于分类和预测任务
89, 95, 88]	

基于 Takagi Sugeno Kang (TSK)模糊规则模型的 T-FRI

类 T-FRI 的加权算法

#### 表 4 基于尺度和位移变换的规则插值算法族

一类最具代表性的算法族,即基于尺度和位移变换 的规则插值方法及其衍生算法。

#### 4.1 概述

作为另一大类的模糊规则插值方法,基于变换 的方法近年来得到了更多的关注与研究。由于此类 方法在计算插值结论模糊集的过程中,通常首先需 要计算一条中间规则(intermediate rule),因此又被 称为基于中间规则的模糊规则插值方法。此类方法 一般分为两步执行(具体算法中可进行细分)。第一 步利用选择出的用于插值操作的规则构造一条中 间规则, 使得它的前件尽可能与观测值"接近"。 第二步基于类比推理机制<sup>[71,72]</sup>,即根据中间规则的 前件项与观测之间的相似性来转换中间规则的后 件,以类似将中间规则的前件转换为给定的观测的 方式,从而得出结论。表3汇总了该类各种算法, 并根据其不同的特征进行分类。其中的一大子类, 即基于尺度和位移变换的方法(scale and move transformation based FRI, T-FRI), 是近些年最流行 的方法之一,首先由 Z. Huang 和 Q. Shen 提出<sup>[15, 16]</sup>, 并且在过去的二十年里,又对这一开创性的方法提 出了许多后续发展和修改。代表的方法见表 4。本 节将综述表3中一些典型算法。

在详细介绍基于中间规则的模糊规则插值技术 之前,需要引入一个非常重要的概念。这就是模糊 集的代表值(Representative Value, Rep)。代表值在不 同的文献中有许多变体,它也被赋予不同的名称, 例如文献 Huang and Shen (2008)<sup>[16]</sup>中的代表值,文 献 Baranyi et al. (2004)<sup>[77]</sup>中的参考点(reference point),以及文献 Chen and Ko (2008); Chen et al. (2009)<sup>[98,99]</sup>中的特征值(characteristic value)。

模糊集的代表值是一个精确的实数值,用来表达模糊集所包含的重要信息,例如模糊集在其论域中最具代表的总体位置以及它的几何形状。在某些情况下,由于代表值没有统一的定义,则可以用该模糊集的去模糊化(defuzzified)后的值来定义代表值。然而需要注意的是,在某一特定的模糊规则插值方法中,所有的代表值都是以相同的方式计算的。

给定一个任意多边形模糊集 $A = (a_1, a_2, ..., a_n)$ , 其中 $a_i, i = 1, 2, ..., n$ 表示多边形的特征点,其代表 值Rep(A)定义如下:

 $Rep(A) = \sum_{i=1}^{n} w_i a_i$  (24) 其中 $w_i$ 是分配给特征点 $a_i$ 的权重。对于最简单的情 况,称为平均代表值,其中所有点都取相同的权重 值,即 $w_i = 1/n$ .对于第2节中图1描述的三角形 模糊隶属函数 $A = (a_1, a_2, a_3)$ , Rep(A)在文献中通 常简单地定义如下(尽管其重心也可作为备选方 案):

$$Rep(A) = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{3} \tag{25}$$

对更复杂的模糊隶属函数(如复杂多边形、高斯型)的代表值的定义可以查阅文献 Huang and Shen (2008)<sup>[16]</sup>。

除了其几何意义外,代表值另一重要作用就是 简化了模糊集之间距离的定义。两个模糊集 A 和 B 之间距离的定义可以简单的表示为:

d(A,B) = |Rep(A) - Rep(B)| (26) 与基于α-截集距离的方法<sup>[77]</sup>相比,该定义描述的距 离是一个精确的距离。对于在给定的不同模糊规则 插值方法中,本文将具体指出如何定义该距离。

# 4.2 基于尺度和位移变换的模糊规则插值方法 (T-FRI)

基于尺度和位移变换的模糊规则插值(scale and move transformation-based FRI, T-FRI)是一种最通 用、最先进的基于中间规则的模糊插值推理机制。 提出这一方法的关键目标之一是消除模糊规则插 值早期工作中存在的一个重要的实际问题,即插值 结果不能保证是凸的模糊集,甚至在某些情况下不 能保证是有效的模糊集。文献 Huang and Shen (2006, 2008)<sup>[15, 16]</sup>介绍了 T-FRI 的基本思想,简而言 之,该算法通过四步完成规则插值,即首先选择出 用于插值的规则,然后用它们构造一条中间规则, 第三步通过比较观测值与中间规则前件的相似性 获得尺度和位移变换的参数,最后对中间规则的后 件进行尺度位移变换得出结论。

给定稀疏规则库 R 和观测值o\*,它们分别采用 公式(1)中的形式,T-FRI 由以下四个步骤实现,并 且分别总结在图 5 所示的四个阶段中。

#### • 第一阶段:选择最近邻规则

作为 T-FRI 的预备阶段,当输入的观测值 $o^*$ 与 规则库中的任何规则都不匹配时,需要在第一阶段 选择一定数量的规则,使得这些规则最接近观测 值,并且用于后续阶段的插值推理。在度量"接近 度"时,需要用到基于距离的准则。在 T-FRI 中, 观测值 $o^*$ 与规则 $r^q$ 之间的距离,或任意两条规则  $r^p, r^q \in R$ 之间的距离,是通过计算它们之间对应属 性的所有相应模糊值的聚合距离来确定的:

$$d(v, r^{q}) = \frac{1}{\sqrt{m}} \sqrt{\sum_{j=1}^{m} d(A_{j}^{v}, A_{j}^{q})^{2}}$$
(27)

其中 v 代表o\*或者r<sup>p</sup> (因此A<sup>v</sup>表示A<sup>\*</sup>j或者A<sup>p</sup>),取决 于上述定义的距离是观测值和规则之间的距离还 是两条规则之间的距离。因此,与o\*最接近的 n 条 规则就是此距离测量的最小的 n 条规则。在计算关 于上述定义元素之间的聚集时,一对前件模糊集之 间的距离计算如下:

$$d(A_{j}^{v}, A_{j}^{q}) = \frac{|Rep(A_{j}^{v}) - Rep(A_{j}^{q})|}{max_{A_{j}} - min_{A_{j}}}$$
(28)

这是通过使用相应模糊集的代表值来实现的 (见第4.1节中代表值的定义),该距离值是对绝对距 离标准化的结果,其中max<sub>Aj</sub>和min<sub>Aj</sub>分别表示属性 a<sub>j</sub>的最大值和最小值。这种标准化是为了确保所有 距离度量在不同的属性域上彼此兼容。这一阶段如 图 5 阶段一所示。

#### • 第二阶段:构造模糊中间规则

在第一阶段中可以选择出与给定观测值最接近的,具有最小距离的 n 条规则,下面将构造一条模糊中间规则r<sup>'</sup>,作为 T-FRI 稍后执行基于尺度和 位移变换过程的基础。在 T-FRI 的大多数应用中,为了计算效率, n 取值通常为 2,但通常是以牺牲 插值精度为代价的<sup>[100]</sup>。

构造模糊中间规则r'的过程是分别计算r'的前 件模糊集 $A'_{j}, j = 1, ..., m$ ,以及相对应的后件模糊集 B',以得到如下形式的模糊中间规则r':

r': if  $a_1$  is  $A'_1$  and  $a_2$  is  $A'_2$  and  $\cdots$  and  $a_m$  is  $A'_m$ , then z is B'

它是对第一阶段选择的 n 条最近邻规则的加权整合获得的。令 $w_j^i$ ,  $i \in \{1, ..., n\}$ 表示第 i 条模糊规则的第 j个前件属性对构造模糊中间规则的第j个前件 $A'_j$ 所附加的权重,计算如下:

$$w_j^i = \frac{1}{1 + d(A_j^i, A_j^*)}$$
(29)

其中 $d(A_j^i, A_j^*)$ 由公式(28)计算得到。对该权重在 n

条规则间进行归一化得到 $w_j^i = \frac{w_j^i}{\sum_{t=1,\dots,n} w_j^t}$ ,以便做

加权平均使用。

因此,模糊中间规则r'的第j个前件 $A'_j$ 计算如下:

$$A_{j}' = \sum_{i=1,\dots,n} \hat{w}_{j}^{i} A_{j}^{i} + \delta_{A_{j}} (max_{A_{j}} - min_{A_{j}}) \quad (30)$$

其中 $\delta_{A_j}$ 是一个常量,称为 $A_j$ 的偏移因子,目的是使 得构造出的中间规则前件 $A'_j$ 和对应的观测值 $A^*_j$ 有 相同的代表值。其定义如下:

$$\delta_{A_j} = \frac{|Rep(A_j^*) - Rep(\sum_{i=1,\dots,n} w_j^i A_j^i)|}{\max_{A_j} - \min_{A_j}}$$
(31)

类比于上述构造中间规则的前件属性,其后件 值可由此得出:

$$B' = \sum_{i=1,\dots,n} \hat{w}_z^i B^i + \delta_z (max_z - min_z) \quad (32)$$

其中max<sub>z</sub>和min<sub>z</sub>为结果属性的最大值和最小值。

 $w_{z}^{i}$ 作为与每条规则的前件项相关的归一化权重(即  $^{y_{j}}$ )的平均值,并且后件属性的偏移因子 $\delta_{z}$ 也是前件 属性偏移因子 $\delta_{A_{j}}$ , j = 1, ..., m的代数平均,分别计算 如下:

$$\hat{w}_{z}^{i} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} \hat{w}_{j}^{i} \delta_{z} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} \delta_{A_{j}}$$
 (33)

如图 5 阶段二中总结的这一步骤的工作,模糊 中间规则则由分别计算出的规则前件和后件构成。

# • 第三阶段:计算尺度和位移因子

在第二阶段构造出模糊中间规则r<sup>'</sup>后,便可对 其进行相应的变换得出与观测值对应的结论。其理 论依据是类比相似推理机制:中间规则的前件与观 测越相似,其后件便与结论越相似。在 T-FRI 方法 中,这种相似性是通过尺度和位移因子衡量的。作 为一种基于变换的模糊规则插值方法,T-FRI 中的 变换过程 T 的目标是对中间规则的后件模糊集B<sup>'</sup>进 行尺度和位移变换,从而获得最终的插值结论。该 变换是通过类比将中间规则的前件属性A<sup>'</sup><sub>j</sub>变换为 对应的观测值属性A<sup>\*</sup><sub>j</sub>,并保证变换后的形状和代表 值与观测相一致。因此,在第三阶段,首先计算出 进行尺度和位移变换的参数因子,该过程分为以下 两步实现:

(1) 构造尺度因子,对中间规则前件进行尺度变

换:  $A_j^{'} \rightarrow A_j^{'}$ 为了实现这一点,首先确定所需的尺度因子

 $s_{A_j}$ 。由于尺度(和随后的位移)因子的计算取决于所 使用的模糊隶属函数,因此给定一个三角模糊集  $A'_j = (a'_{j1}, a'_{j2}, a'_{j3})$ ,尺度因子 $s_{A_j}$ 由下式得出:

$$s_{A_j} = \frac{a_{j3}^* - a_{j1}^*}{a_{j3}^* - a_{j1}^*} \tag{34}$$

它扩展或缩短了支撑集的长度: $A'_{j}:a'_{j3} - a'_{j1}$ ,使其与  $A'_{j}$ 支撑集的长度相同。为保证尺度变换后的模糊集  $\hat{A'_{j}} 与 A'_{j}$ 的代表值相等, $\hat{A'_{j}} = (a'_{j1}, a'_{j2}, a'_{j3})$ 通过尺度 因子的构造方式如下:

$$\hat{a'_{j1}} = \frac{(1+2s_{A_j})a'_{j1}+(1-s_{A_j})a'_{j2}+(1-s_{A_j})a'_{j3}}{3}$$

$$\hat{a'_{j2}} = \frac{(1-s_{A_j})a'_{j1}+(1+2s_{A_j})a'_{j2}+(1-s_{A_j})a'_{j3}}{3}$$

$$\hat{a'_{j3}} = \frac{(1-s_{A_j})a'_{j1}+(1-s_{A_j})a'_{j2}+(1+2s_{A_j})a'_{j3}}{3}$$
(35)

(2) 对尺度变换后的模糊集进行位移变换:

 $A_i^{'} \rightarrow A_i^*$ , 从而构造位移因子

位移因子 $m_{A_j}$ 可由第一步中获得的尺度变换后 的模糊集 $\hat{A'_j}$ 得出。如前所述,位移变换是通过移动  $\hat{A'_j}$ 的位置,使其与 $A'_j$ 相同,同时还需保证代表值不 变。因此,位移因子可构造如下:

$$m_{A_{j}} = \{ \begin{array}{c} \hat{a_{j1}^{*} - a_{j1}^{'}} \\ \hat{a_{j2}^{*} - a_{j1}^{'}} \\ \hat{a_{j2}^{*} - a_{j1}^{'}} \\ \frac{\hat{a_{j3}^{*} - a_{j2}^{'}}}{\hat{a_{j3}^{*} - a_{j2}^{'}}}, \text{ otherwise} \end{array}$$
(36)

如图 5 阶段三中阴影部分着重描述的,这一阶 段计算并保留所有规则前件的尺度和位移变换因 子,以便在后续和最终过程中使用以获得结论值。

#### • 第四阶段:尺度和位移变换

在计算了需要的尺度和位移因子(即 $s_{A_j}$ 和 $m_{A_j}$ ,j = 1,...,m)之后,第四阶段将完成T-FRI 过程, 得到所需的结果值 $B^*$ 。这一阶段遵循了类比近似推 理的机制,即相似观测导致相似结果。为此,后件 属性的变换因子将聚合前件属性上的变换因子,这 是通过计算代数平均来实现的:

$$s_z = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m s_{A_j} m_z = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m m_{A_j}$$
 (37)

这使得所求的插值结论模糊集*B*<sup>\*</sup> = (*b*<sup>\*</sup><sub>1</sub>, *b*<sup>\*</sup><sub>2</sub>, *b*<sup>\*</sup><sub>3</sub>)可通 过类比第三阶段对中间规则的前件进行的尺度和 位移变换获得,即有如下两步变换:

- (1) 尺度变换:  $B' \to \hat{B'}$ 。类比公式(35)获得尺度化 的后件模糊集 $\hat{B'} = (\hat{b'_1}, \hat{b'_2}, \hat{b'_3})$ 。
- (2) 位移变换:  $\hat{B'} \rightarrow B^*$ 。

在位移变换中,利用位移因子获得最终所需的插值结果 $B^* = (b_1^*, b_2^*, b_3^*)$ :

$$b_{1}^{*} = b_{1}^{'} + m_{z}\gamma$$

$$b_{2}^{*} = \dot{b_{2}^{'}} - 2m_{z}\gamma\gamma = \{\frac{\dot{b_{2}^{'}} - \dot{b_{1}^{'}}}{3}, \text{ if } m_{z} \ge 0$$

$$\frac{\dot{b_{3}^{'}} - \dot{b_{2}^{'}}}{3}, \text{ otherwise}$$

 $b_3^* = \dot{b_3'} + m_z \gamma$  (38)

为突出尺度变换和位移变换的重要性,基于插值的结论模糊集可以用以下方式表示: *B*\* = *T*(*B*<sup>'</sup>,*s<sub>z</sub>*,*m<sub>z</sub>*)。最后阶段四的工作如图 5 最下面一行所总结的。尽管上述对 T-FRI 算法基本原理的概述 仅采用了三角形模糊集,该算法还可以处理具有复杂多边形、高斯和钟形模糊隶属函数的多个前件规则的内插和外插。

### 4.3 T-FRI方法的衍生算法代表

由于 **T-FRI** 方法在实现模糊规则插值推理时表现出优良的特性,近些年已经涌现大量文献,从许 多不同的角度来进一步改进它,如表 4 中汇总的 **T-FRI** 算法族。本节概述其中具有代表性的方法。 4.3.1 自适应的 **T-FRI** (2011<sup>[91]</sup>, 2017<sup>[18]</sup>)

自适应的 T-FRI 算法的提出是由于观察到在一 系列 T-FRI 插值运算之后,插值结果可能存在不一 致性。造成不一致的原因可能包括插值的规则和不 精确的插值变换。自适应模糊插值增强了原始 T-FRI 算法的插值变换对缺陷规则的识别和修正能 力,有利于消除某些不一致性。该算法是通过两个 子系统来实现的: 1) 诊断子系统。它是由通用诊断 引擎(General Diagnostic Engine, GDE)构造的,其中 不一致的插值结果记录在基于假设的信值修正系 统 (Assumption-based Truth Maintenance System, ATMS)<sup>[101]</sup>中; 2) 修正子系统。它是对传统数值插值 理论进行模糊扩展,及其在近似计算中的应用。

自适应 **T-FRI** 的工作流程如图 6 所示。尽管从 理论上讲,系统的不一致可能来自观测值、不正确

13

的规则等多方面因素,在自适应 T-FRI 算法中,仅 考虑插值过程中的中间规则导致的不一致结论。因 此在该算法中,ATMS 收集记录下某一插值结论与 后面模糊规则插值之间的依赖性,并将其输入到 GDE 中。GDE 是用于分离多个同步错误的系统, 它通常与 ATMS 一起工作。在这里,GDE 将所有 可能的不一致结论从这些冲突依赖关系中分离出 来。最终由一个基于依赖指导的修正子系统通过将 模糊推理中的错误从线性插值细化到分段线性插 值,从而对不一致的模糊推理结论进行修正并返回 输入到插值器中,完成自适应 T-FRI 的闭环工作。 然而,这项工作主要集中在自适应 T-FRI 的实现上, 它只涉及两条多前件属性的规则。此外,还需要进 一步研究它是否能够处理外插的情况(因为原始 T-FRI能够以与内插相同的方式处理外插)。





图 5 基于变换的 T-FRI 规则插值

### 4.3.2 反向的 T-FRI(2019<sup>[93]</sup>, 2020<sup>[87]</sup>)

传统的模糊规则插值(包括 T-FRI)通常以"前向" 的方式执行,即在给定规则库和观测的所有前件属 性的情况下,需要对结果进行插值推理。然而,可 能会出现某种情况,当给定的观测值中缺少某些关键的前件属性时,同时该属性也可能参与到随后的插值过程中,因此该前件属性的缺失将会导致最终插值结论的推导失败。这一重要问题是通过对

T-FRI的一个改进来解决的,称为反向的 T-FRI,它 提供了一系列的解决方案来处理单个前件值的缺 失和多个前件属性缺失的问题。

对于单个前件值缺失的问题,反向 T-FRI 通过 仿照实现原始 T-FRI 的四步计算过程(见第 4.2 节), 从而反向计算对应于未知前件属性值的相关参数。 不失一般性,将 T-FRI 对某一观测值相关的结论的 插值推理用下式表示:

$$B^* = f_{T-FRI}((R = \{r^1, r^2, \dots, r^N\}), (o^* = \{A_1^*, \dots, A_l^*, \dots, A_m^*\}))$$
(39)

即插值结论B\*通过 T-FRI 的规则插值过程,利用规则库R和具有全部前件属性的观测值o\*获得。具有单个前件值缺失(比如A<sub>l</sub>\*缺失)的反向 T-FRI 因此类比上式可以有如下的形式:

 $A_l^* = f_{B-TFRI}(R, B^*,$ 

 $(o_{missing}^{*} = \{A_{1}^{*}, ..., A_{l-1}^{*}, A_{l+1}^{*}, ..., A_{m}^{*}\}))$  (40) 其中在求未知前件属性 $A_{l}^{*}$ 时,除了需要规则库R和 具有剩余前件属性的观测值 $o_{missing}^{*}$ 以外,该观测值 对应的已知结论也需要加入到计算过程中。此时 $B^{*}$ 作为已知变量,而 $A_{l}^{*}$ 为未知变量。但由于缺失属性 只有一个,因此可以通过第 4.2 节 T-FRI 的四步插 值过程的逆向计算,获得规则前件属性的模糊集 值。

对于更一般的具有多个前件属性缺失的问题, 反向 T-FRI 提出了两种方案来求缺失值。第一种方 案是参数化方法,它是上述方法的直接推广。假设 有 $A_1^*, A_2^*, ..., A_L^* + L$  个前件属性未知,该方法首先将  $A_i^*, i \in [1, 2, ..., L]$ 对应的用于插值过程的参数(比如 公式(29)中的 $w_j^i$ ,以及公式(31)中的 $\delta_{A_j}$ )离散化,然 后便能获得某一组参数值,将这组参数代入 T-FRI 算法中得到一个插值结论 与已知的**P**\*进行比较

算法中得到一个插值结论,与已知的B\*进行比较, 误差最小的组合即为最佳参数组合,最后利用最优 参数构造缺失的规则前件属性。第二种方案被命名 为反馈方法。该方法与参数化方法不同的是,首先 离散化的不是缺失属性对应的参数,而是属性的模 糊集值本身,从而获得缺失属性的一组估计,然后 将其代入 T-FRI 算法中,计算获得插值结论并与已 知的B\*进行比较,最终寻求误差最小的一组离散估 计值即为所求的A<sub>1</sub>,A<sub>2</sub>,...,A<sub>L</sub>。这两种方法均采用了 参数估计与结果验证的思想。由于参数化方法中需 要估计的参数组合比反馈方法更多,因此算法的计 算复杂度更高。

反向的 T-FRI 算法保留了原始 T-FRI 所具有的

许多重要性质,如处理多条具有多前件属性的规则 插值的能力,以及保证了插值结果的凸性和正规 性,从而有助于解决前件项缺失的问题,但它并不 能完全消除这个问题,特别是当缺少的值的比例很 大时。

### 4.3.3 动态 T-FRI (2017<sup>[19]</sup>)

现有的大多数基于变换的模糊规则插值机制都 是针对静态稀疏规则库的。然而,由于模糊系统的 需求可能会随着时间的变化而变化,缺乏并存或动 态生成的规则,使得静态规则库的使用可能会影响 模糊插值推理的有效性。在执行规则插值时,基于 变换的模糊规则插值方法通常生成大量模糊中间 规则。总体而言,它们可以逐渐覆盖无法由原始稀 疏规则库覆盖的区域,从而为更新静态稀疏规则库 提供有价值的信息。受此启发,Naik et al. (2017b)<sup>[19]</sup> 提出了一个动态的 T-FRI 机制。它通过改进和提取 中间规则来丰富规则库,进而通过进行更直接的规 则匹配来获得结论,从而提高模糊推理过程的效 率。

动态 T-FRI 算法的具体工作流程如下:

- (1) 正常利用 T-FRI 规则插值算法对输入观测值进行插值推理,同时保留插值过程中构造生成的大量中间规则,集中保存在中间规则库R<sup>'</sup>中;
- (2) 将R'中的所有前件属性在多维(由于前件属性 不止一个)立方空间中进行划分,得到超立方体
   H,其中包含许多子立方体,每一个对应由多 维前件属性的某一取值构成的组合;
- (3) 将处于非空子立方体H\*(H\* ⊆ H)中的规则输入 到基于遗传算法的聚类算法中,找出"最佳" 聚类结果,其中包括强子立方体(H<sup>1</sup>)和弱子立 方体(H<sup>0</sup>). 这里的强弱子立方体根据包含的中 间规则数目的多少确定;
- (4) 将弱子立方体(H<sup>0</sup>)合并转化为强子立方体
   (H<sup>1</sup>);
- (5) 最后选择仅包含足够中间规则的聚类结果,将 其合并至原始的稀疏规则库 R 中,完成规则库 的更新。

通过上述过程,动态 T-FRI 能够在后续的推理 过程中,直接利用简单高效的 CRI 为之前出现过的 相似观测值进行推理,从而减少进行没有必要规则 插值。该方法还是一种灵活和通用的算法,在动态 扩充原始稀疏规则库的过程中,并不限制使用任何 特定的规则插值算法、适应度函数和规则合并方 案,只是在提出的方法中采用了 T-FRI 和遗传算法。 动态 T-FRI 算法对更新规则库和提高推理效率的现 实意义是显而易见的。然而,通过使用更有效和高 效的聚类和优化方法来替换当前实现中的相关过 程,仍然有可能进一步提高算法的效能。

4.3.4 高阶 T-FRI (2016<sup>[85]</sup>, 2017<sup>[86]</sup>)

大多数模糊规则插值方法的一个共同点是,通 常利用常规的 I-型模糊集定义规则和观测值中的模 糊隶属函数,用于解释和处理模糊系统中存在的不 确定性。现有的方法中很少能够联合处理规则或观 测中的一种以上形式的不确定性,尤其在某些情况 下,对更复杂的模糊集进行合理的表示对模糊系统 十分必要<sup>[102]</sup>。针对这一问题,高阶的模糊规则插 值方法应运而生,它允许在 T-FRI 框架内表示和处 理不同类型的不确定性。这类算法首先用高阶形式 对不确定性知识进行描述,然后对这种模型进行高 阶插值得到最终结论。

高阶的模糊规则插值利用了两种常见的不确定 性表示方法来实现:1)基于粗糙模糊集的规则插值 方法<sup>[85]</sup>。该方法用粗糙模糊近似表示不确定模糊隶 属函数: 2) 基于区间值 II-型模糊集的方法<sup>[86]</sup>。其工 作方式与基于粗糙模糊集的 T-FRI 相同。在这两种 方法中,模糊集的代表值的概念起着与原始的基于 I-型模糊集的 T-FRI 一样不可或缺的作用。从本质 上讲,这两种方法均为 T-FRI 规则插值算法<sup>[15, 16]</sup>的 拓展,它们分别用粗糙模糊集和区间值 II-型模糊集 代替传统的 I-型模糊集,即公式(1)中规则的前件  $(A = \{a_i | i = 1, 2, ..., m\})$ 和结论(B)属性以及观测值 的属性( $o = \{a_i^* | j = 1, 2, ..., m\}$ )由这两类高阶模糊 集来描述。然后基于这种改进的模糊规则进行第4.2 节中 T-FRI 的规则插值过程。由于插值过程中元素 所采用的取值不同,插值算法也需要进行相应的改 进。比如,区间值 II-型模糊隶属函数中存在额外的 不确定性分别用上模糊隶属函数和下模糊隶属函 数表述,因此在第3,4步的变换过程中,除了对模 糊集进行尺度和平移变换,还需要对下模糊隶属函 数的高度进行进一步的变换。另一种基于区间值 II-型模糊集的模糊规则插值方法可以参考文献 Chen and Lee (2011)<sup>[41]</sup>。这种方法需要对每个特定的不确 定性表示进行相应的修改,这不可避免地增加了计 算复杂度。对基于 T-FRI 改进的高阶算法,如果所 涉及的所有不确定性都能被 I-型模糊集充分捕获, 则高阶 T-FRI 机制将会退化成为原始的方法。

4.3.5 其它 T-FRI 相似算法

除了上述算法是对T-FRI的直接研究和改进外,

还有一些类似于 T-FRI 的方法,如文献 Li et al. (2005)<sup>[97]</sup>。又如,在文献 Chen and Adam (2018)<sup>[14]</sup>中,任意多边形模糊集的排序值(ranking values)被用来表示隶属函数的特征点,而这些特征点又被用来在基于变换的模糊规则插值过程中扮演与 T-FRI 中代表值相似的角色。此外,该算法将 T-FRI 中涉及的尺度因子和位移因子分别替换为距离比 (distance ratio)和偏移率(move rate),对所构造的中间规则进行变换,以获得最终的插值结果。

Chen and Ko (2008)<sup>[98]</sup>提出 T-FRI 的另一个变 形,称之为CK方法。该算法用特征值(characteristic values)代替代表值,不仅简化了对模糊集的表示, 而且用于定义模糊集之间的距离。对于任意多边形 模糊集,CK 方法通过计算从一系列α-截集中获得 的每个特征点来导出所寻求的插值模糊集。算法首 先确定隶属度为1的点,用以帮助随后计算剩余点。 然后执行两个变换,即增量变换和比率变换 (increment and ratio transformations),将中间规则的 结果转化为最终插值结果。转换这二者之间的相似 度与中间规则的前件和观测值的相似度类似。最 近,作者改进了他们的工作,引入了两个增强的转 换,即加权的增量变换和加权的比率变换(weighted increment transformation and weighted ratio transformation),来实现相应的加权模糊规则插值 [99]。在这个加权算法中,每个规则前件变量的权重 是通过机器学习算法自动获得的。该方法是一个迭 代过程,它被嵌套在加权插值过程中,同时需要利 用插值的结果来构造适应度函数以更新当前权重, 进而对 CK 方法中的增量变换和比率变换进行加 权。该方法的优点在于它可以处理多种类型的模糊 隶属函数表示的模糊集,比如多边形、高斯和钟形 隶属函数。然而,在该方法中,虽然权重可以通过 算法自动获得最优值,但它是针对特定问题定制 的,每个规则前件属性的适应性函数都是预先确定 的,从而限制了该技术的通用性。

### 4.4 基于广义函数的模糊规则插值方法

与上述 **T-FRI** 方法类似的是另一种方法,称为 基于广义函数的算法。作为基于变换的模糊规则插 值方法之一,它自成一个子类,其中的典型代表参 看文献 Baranyi et al. (1995, 1996a)<sup>[74,75]</sup>; Baranyi and Kózy (1996a)<sup>[76]</sup>; Baranyi et al. (2004, 1996b, 1998)<sup>[77,78,79]</sup>; Baranyi and Kózy (1996b)<sup>[80]</sup>。与基于  $\alpha$ -截集的插值算法不同,在给定未匹配的观测值的 情况下,该方法是基于模糊关系的插值而不是使用 α-截集距离来推断结论。此类算法通常需要两个主要步骤来实现。下面简要概述这两步的原理,更多 细节可参考上述文献。

给定由公式(1)表示的两条模糊规则(例如, r<sup>1</sup>,r<sup>2</sup>)和一个观测值(o<sup>\*</sup>),基于广义函数的方法的核 心思想可以通过以下两个阶段来描述。

4.4.1 基于插值的推理规则的生成

第一个阶段的目的是创建一条中间规则r<sup>'</sup>,使r<sup>'</sup> 的前件尽可能"接近"观测的前件(A\*)。这里的"接 近"一词表示在观测值和中间规则之间确保至少存 在部分重叠。本阶段的实现过程可用下面的函数形 式表示:

$$r' = f^{Interpolation} (r^1, r^2)$$
(41)

其中, *f<sup>Interpolation</sup>* 表示从一对规则到一组所有可能的规则集的映射。有两类算法可用于实现该阶段的过程:

- 模糊关系插值(fuzzy relation interpolation),包括 任何类 solid cutting的方法:Baranyi et al. (1995, 1996a)<sup>[74, 75]</sup>; Baranyi and Kćzy (1996a)<sup>[76]</sup>; Baranyi et al. (1996b)<sup>[78]</sup>; Baranyi and Kćzy (1996b)<sup>[80]</sup>; 以及一些基于固定点(fixed point law)或者固定值(fixed value law)的方法: Ding et al. (1989, 1992)<sup>[103, 104]</sup>; Mukaidono et al. (1990)<sup>[105]</sup>; Shen et al. (1993, 1988)<sup>[106, 107]</sup>。
- 语义关系插值(semantic relation interpolation), 其中包括任何的语义修正(semantic revision)的 方法: Ding et al. (1989, 1992)<sup>[103, 104]</sup>; Mukaidono et al. (1990)<sup>[105]</sup>; Shen et al. (1993, 1988)<sup>[106, 107]</sup>。这些算法利用语义修正原理,描述基于插值的中间规则的前件与后件模糊集 之间的关系。
- 4.4.2 基于单条规则的推理

第二个阶段即是利用在第一阶段生成的中间规则进行推理。此阶段的过程通常可以表示为:

$$B^* = f^{Inference} \left( r', A^* \right) \tag{42}$$

对于这一类方法中的不同模糊规则插值算法, 实现单条规则推理的具体机制可能有所不同。文献 Ding et al. (1989, 1992)<sup>[103, 104]</sup>; Mukaidono et al. (1990)<sup>[105]</sup>; Shen et al. (1993, 1988)<sup>[106, 107]</sup>中的任何 方法都可以直接变换中间规则来计算所需的最终 结果值。

此类方法的更多优势在于它可采用任意形状的 模糊隶属函数,并且避免生成非正规的模糊结论。 以上主要分析总结了具有单个规则前件属性情况 下的插值。与基于α-截集和 T-FRI 方法一样,基于 广义函数的机制也被扩展到使用多个规则前件属 性和模糊外插的规则插值应用中。更多细节可以在 文献 Baranyi et al. (2004)<sup>[77]</sup>和其他衍生算法中查 看。这种方法的工作流程见图 7。从概念上讲,这 与 T-FRI 采取的基本方法非常相似,因此它们共同 的缺点是,在某些使用复杂模糊集的应用中,其计 算复杂度比基于α-截集的方法更高。



图7基于广义函数规则插值方法的流程图

#### 4.5 基于几何的线性模糊规则插值

由前文综述的模糊规则插值算法可以看出,尽 管国内外诸多学者提出各种各样不同的方法实现 模糊插值推理,但目前并没有一种形式对规则插值 过程的进行统一数学形式表示。Das et al. (2019)提 出了一种初步的尝试方案:基于几何的线性模糊规 则插值<sup>[92]</sup>。下面简要介绍其基本原理。

基于几何的线性模糊规则插值方法(Geometry Based Linear Fuzzy Rule Base Interpolation, GLFRI) 属于第二大类的基于中间规则的算法。该方法希望 利用几何可视化从而对规则插值算法进行数学形 式上的统一表示。GLFRI 首先构造一条中间规则,

即相邻规则的线性聚合,然后通过对中间规则进行 几何变换得到最终的结论。在第一步中,通过对规 则前件和结论部分进行特定的数学运算,将所有的 模糊规则转化为高维空间中的的模糊集或模糊点。 然后将规则前件和结论所表示的模糊集或模糊点 用模糊线段相连接,从而将模糊规则之间的关系用 模糊线段几何表示。中间规则则通过线性聚合待插 值的模糊线段(即模糊规则)构造得到。第二步通过 对比观测值与中间规则的前件的差异计算相应的 膨胀和收缩参数,最终利用这些参数变换中间规则 的后件从而获得观测值对应的结论。

GLFRI 通过对模糊集的几何空间表示,不仅将 模糊插值方法与传统经典插值技术相结合,而且能 够提供插值过程的几何可视化表示。然而该方法目 前只考虑核集为单点的正规模糊集(比如三角形隶 属函数),对于非正规或者非凸模糊集有待进一步研 究。

#### 4.6 模糊规则插值的其它思路

从前文第 3,4 节中综述的模糊规则插值方法可 以看出,尽管实现模糊稀疏规则库下的插值推理算 法层出不穷,它们基本上都是从α-截集(非变换) 或中间规则(变换)的角度出发,寻求更先进的理 论方法。然而随着模糊规则插值技术的发展,在实 际问题应用中遇到的一些问题可能同时出现在这 两大类插值方法中。比如表1和表4中列出的分别 基于α-截集的和基于中间规则的自适应规则插值 算法,尽管如此,这些方法的出发点和解决思路仍 存在很大差异。

在模糊规则插值最新的研究中,Li et al.(本文 作者们)提出了一系列的属性加权插值推理算法, 用于解决规则前件属性具有不同权重的规则插值 问题,这些方法分别是属性加权 T-FRI 规则插值 (2018, 2020)<sup>[89, 88]</sup>,属性加权 KH和 CCL 规则插值 (2020)<sup>[100]</sup>。这三种方法分别属于上述两类规则插值 方法,但它们实现的属性加权机制的核心思想相 似。下面总结其中的基本理论。

属性加权 **T-FRI** 规则插值算法是 **T-FRI** 算法<sup>[15,</sup> <sup>16]</sup>(见第 4.2 节)的拓展延伸。在原始算法中,规 则的前件属性被视为具有相同的重要性,因此未给 属性赋予权值。然而从现实决策中可以发现,不同 的条件变量在决策的制定中贡献是不同的。因此该 属性加权算法需要实现权重评估计算和加权规则 插值这两个步骤。

在属性加权 T-FRI 方法中,单一规则前件属性

的权重仅由给定的稀疏规则库自动学习生成,不需 要任何输入的观测值或其他相关信息。该属性权值 学习方法利用文献[89]所提出的被称为逆工程的算 法,从给定的稀疏规则库中生成一个人工训练决策 表。其基本思想是将规则库中所有的规则表示为一 种通用形式, 使得规则中可能出现的属性缺失值被 该属性能够采取的任意一个模糊值代替。这些由统 一形式表示的"规则",无论是人工构造的还是原 始规则库中的,都被用来评估单个属性的相对重要 程度。接着对各规则前件属性权重的评估计算是利 用特征评估算法实现的,这些算法是从特征选择技 术中提取和修改的。在文献[89]中,一共采用五种 特征评估算法,分别是基于单一特征评估的方法 (基于特征选择的信息增益、Relief-F、Laplacian Score 和基于局部学习聚类的特征选择方法)和基 于特征子集评估的方法(基于粗糙集的特征选择)。 它们都可以实现对规则前件属性的权重学习,但在 加权 T-FRI 方法的具体实践中, 仅需要五种加权方 案中的任意一种即可。每一个最终学习到的权值与 唯一的规则前件属性关联,无论它被包含在哪条规 则中。

在获得了规则前件属性的权值后,需要将其用 于指导规则插值算法。对于属性加权 T-FRI 方法, 属性权值被用于原始非加权算法的每一个步骤。具 体而言,这些权重与第 4.2 节 T-FRI 算法的四个阶 段相融合:最近邻规则的选择、中间规则的构造、 尺度和位移变换因子的计算以及结论的变换。原始 T-FRI 方法中涉及到不同属性聚合的所有计算算术 平均的步骤,都在属性加权 T-FRI 算法中通过对相 应成分的加权聚合得以改进。

上述的属性权重学习方法是独立于任何模糊规则插值技术的。因此,另外两种属性加权规则插值 方法(属性加权 KH 和 CCL 规则插值)是分别对原 始非加权的 KH线性规则插值和 CCL 算法的加权扩 展。它们利用相同的方式学习生成规则前件属性的 权值,然后类似于加权 T-FRI,在插值过程的所有 计算步骤中与两种传统的方法结合构造属性加权 方法。这三类加权插值方法被用于经典的分类和回 归问题中,获得了精度上的提高。此外还得出一个 重要的结论是,对于属性加权的算法,仅使用最少 数目的规则(即两条)便能得到最优的效果,大大 提升了算法的使用效率。

属性加权 T-FRI, KH, CCL 规则插值算法均实现 了仅利用有限的稀疏规则库学习获得相应的规则 前件属性权值,并采用相似的理论方法进行规则插 值算法的加权拓展.这使得在改进模糊规则插值技 术的过程中冲破了受算法类型限制的阻碍,简化了 操作,为其发展提供了新的思路。

# 5 模糊规则插值方法的评估与应用

第 3,4 节分别综述了模糊插值推理的两大类算法,为了系统的比较各种方法的优势与不足,本节 首先总结模糊规则插值算法常用的评价指标,并对 前文综述的代表性算法进行评估与比较。作为基于 模糊规则系统的推理机制,本节最后介绍规则插值 方法在现实问题中的应用价值。

#### 5.1 评估准则

无论是基于α-截集还是基于中间规则的插值推 理方法,都是通过在给定规则库中插值模糊规则来 实现插值推理的目的,从而对未匹配的观测值生成 推理结果。从理论上讲,模糊规则插值本质上是一 个映射<sup>[108, 26]</sup>,它将输入的属性空间*A*和输出的属性 空间Z联系起来,其中输入属性域A和输出属性域Z中的模糊子集(由F(A)和F(Z)表示)分别表示规则 前件属性的值域和规则后件的值域。也就是说,给 定一个规则库 R,  $\forall r^i \in R$ 由公式(1)表示, 其所有 m个前件属性的值满足 $\{A_{1}^{i}, A_{2}^{i}, ..., A_{m}^{i}\} \in \mathcal{F}(\mathcal{A}),$ 且后 件属性的值同样满足 $B^i \in \mathcal{F}(Z)$ 。模糊规则插值算 法追寻某一相关性 $I: F(\mathcal{A}) \rightarrow F(Z)$ ,使得赋予输入 空间某一观测值 $A^*$ (= { $A_1^*, A_2^*, \dots, A_m^*$ })  $\in \mathcal{F}(\mathcal{A})$ 一个 基于插值得出的结论 $I(A^*) = B^*$ ,其中 $B^* \in \mathcal{F}(\mathcal{Z})$ 。 因此模糊规则插值方法需要满足映射函数的某些 共同性质,这也形成了比较它们的一般准则。

下面汇总了文献中11个最常用的模糊规则插值 方法的评价指标<sup>[108, 26, 109]</sup>。

- I1 结论的有效性:插值结论总是得到一个有 效的模糊集。
- I2 维持结论的凸性与正规性:如果观测值是 正规凸的模糊集,则插值结论也应该是正规凸 的模糊集。
- I3 与规则库的兼容性:对于规则库中所有的 规则r<sup>i</sup> ∈ R,以及输入空间中的所有观测值
   A<sup>\*</sup> ∈ F(A):如果A<sup>\*</sup> = A<sup>i</sup>,则J(A<sup>\*</sup>) = B<sup>\*</sup> = B<sup>i</sup>。
- I4 连续性条件:对于ε>0,存在δ>0 s.t. 如果A,A\* ∈ F(A),以及d(A,A\*) ≤ δ 那 么 d(J(A),J(A\*)) ≤ ε,其中d(·,·)表示某个距离度 量标准。

- I5 维持分段线性(piece-wise linearity):如果 用于插值的模糊集是分段线性的,则插值结论 应该是分段线性的。
- I6 维持介值性("in between"):如果A\*介于 A<sup>i</sup>和A<sup>j</sup>中间,那么插值结论J(A\*)应该介于 J(A<sup>i</sup>)和J(A<sup>j</sup>)之间。
- I7 任意隶属函数的使用:映射3适用于任何 凸的和正规的隶属函数。
- I8 形状不变性:如果规则前件属性中的所有 模糊集都是同一类型的隶属函数,则插值的结 论3(A\*)也应该是该隶属函数表示的模糊集。
- **I9** 多规则的适用性:映射**3**可以处理任意数 量规则的模糊插值推理。
- I10 多维输入的适用性:映射**3**适用于任何有 限数量的输入变量。
- I11 外插扩展能力:内插映射3能够扩展处理 外插问题。

### 5.2 算法比较

在模糊规则插值算法的发展历史上,一些在早 期阶段提出的方法,尤其是对基于α-截集的方法, 包括具有开创性意义的 KH 线性插值机制<sup>[9, 10]</sup>及其 相关的改进衍生算法,已经在基于上述的基本准则 上被详细地分析,并与之前的工作进行了比较,详 见文献 Johany & and Kov ás (2006); Tikk et al. (2011)<sup>[108, 109]</sup>。因此,为避免重复,本文将着重分析 比较近年来持续发展并流行的基于变换的方法。表 5 给出了一些代表性算法的评估结果。

尽管通常在研究模糊规则插值方法时,不必满 足所有 I1-I11 的评估准则,但是其中大部分关键性 的指标必须达到以获得合理正确的结论。在评价模 糊规则插值方法的性能的同时,这些指标也指出了 模糊插值推理技术的发展趋势,即修正现有方法的 缺陷并且追求满足更多的性能标准。由 5.1 节中 I1-I11 的定义可以发现,模糊规则插值算法可以从 数学理论和适用性拓展的角度分别进行比较。

映射函数*I*: *F*(*A*) → *F*(*Z*)满足的数学性质: I1 - I6, I8。

从前文可以看到,模糊规则插值算法从数学的 角度上讲是实现了从规则前件的属性空间到结论 属性空间的映射。这些准则便从理论的角度评估规 则插值方法的有效性与正确性。由表5可以看出, 最早提出的 KH 线性插值<sup>[9]</sup>不能总是保证导出的模 糊集是凸集(即准则 I2),尽管它们可能是正规的模 糊集。这使得后期出现了大量 KH 方法的衍生算法

		10		WCV11H1	山心松井						
算法	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11
КН	$\times$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$
							(当	I1 满足	时)		
CCL	$\checkmark$	$\checkmark$	-	-	-	-	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	-
T-FRI	$\checkmark$										
自适应 T-FRI	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$	$\times$							
				(—	阶分段线	性)					
反向 T-FRI	$\checkmark$										
СК	$\checkmark$	-									
动态 T-FRI	$\checkmark$										
基于广义函数的方法	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	√ (*)	$\checkmark$	√ (**)	-	-	$\checkmark$	$\checkmark$
				(*使月	目三角形模	糊集)					
					(*	*对该算	法族内某些	组合适用	])		

表 5 模糊规则插值代表算法的评估

√ 表示满足指定准则

× 表示不满足指定准则

- 表示无法判断是否满足指定准则

(参见第 3.3 节)对其进行改进。这些准则也是模糊规则插值算法能够得出合理准确结论所需要满足的最基本的条件。近些年提出的包括基于变换的方法在内的大多数方法都成功地实现这些关键标准(见表 5)。

• 方法的适用性和拓展性: I7, I9 - I11。

随着现实中的问题与数据越来越复杂,需要构 建更为复杂和精确的模糊系统,使其具有更强的插 值推理能力。因此模糊规则插值算法也需要有更好 的适用性和拓展性以满足不同应用领域的要求。比 如规则插值方法不能仅仅满足利用三角形或梯形 等简单多边形的模糊隶属函数实现插值推理,许多 实际应用常常也采用高斯型的平滑函数(I7)。大多 数基于变换的方法都能满足此标准。此外,系统的 复杂性也体现在高维的输入(I10)和对多于2条规则 的插值处理(I9)等方面。从表 5 可以看出, T-FRI 算 法不仅能够很好地实现这些要求,同时能完成当输 入的观测落在待插值规则的外侧,即外插(I11)情况 时的插值推理,因此获得了广泛深入地研究。然而 从图 5 可以看出,由于 T-FRI 为实现更精确的插值 推理,具有更细致的工作步骤,其计算复杂性也较 KH 线性插值等基于 $\alpha$ -截集的方法更高。

基于本文第 3,4 节对模糊规则插值相关方法的 理论介绍以及上述的评估讨论,表6汇总了当前算 法的优缺点及适用范围。

#### 5.3 实际应用

模糊规则插值方法能够有效地增强基于模糊规则系统的近似推理能力,特别是针对不完备模糊规则库的情况。自规则插值算法提出以来,尽管大多数的方法都着重于理论研究,近些年文献中也出现了将其应用到实际问题中的报道。重要的是,基于 模糊规则插值技术的模糊推理机制的有效性除了 利用 5.1 节中的基于数学模型的评价指标进行评估 以外,这些方法的实际应用价值也可以通过规则插 值算法在现实问题中的应用来揭示。

模糊规则插值算法广泛应用在系统控制、模式 识别、网络安全等多个领域,下面对文献中出现的 成功的案例进行汇总。

• 系统控制

与经典模糊推理工具的许多实际应用一样,模 糊插值推理增强了系统控制的能力,成功的例子包 括用于:模拟自动引导车辆<sup>[110]</sup>;移动机器人的监视 导航控制<sup>[111]</sup>;以及基于一般行为的控制<sup>[112,113]</sup>。

• 网络安全分析

动态 **T-FRI**<sup>[19]</sup>为方便选择、组合和推广信息丰富的、常用的插值得出的规则提供了可能,以便在执行插值推理操作的同时丰富现有的规则库。该算法为网络安全问题提供了有效的解决方案,其中包括网络安全分析、智能入侵检测<sup>[19]</sup>和防火墙的增强(特别是针对 Microsoft Windows 防火墙)<sup>[114]</sup>。

	表 6 模糊规	则插值算法的优缺点及适用范围	
算法	优点	缺点	适用范围
KH <sup>[9, 10]</sup>	计算简单, 效率高	可能导致结论是非正规或非凸模糊集	处理多前件变量, 多规则的内插和外插
VKK <sup>[61]</sup>	计算简单,保证结论模糊集的	无法解决规则属性为单点模糊集的插值	处理多前件变量的内插
	正规凸性		
MACI <sup>[8]</sup>	计算高效,保证结论模糊集的	不保持线性特性	处理2条多前件变量规则的内插
	正规凸性		
基于多边形模糊集斜率	算法简单, 易于实现	推广性较差(不同算法仅针对特定形状	处理多前件变量的规则内插
的算法 <sup>[48.49,50]</sup>		的模糊集)	
CCL <sup>[37]</sup>	灵活性高,保证结论模糊集的	复杂多边形模糊集规则插值的计算复杂	适用于不同类型的隶属函数,处理多前
	正规凸性	度较高	件变量, 多规则的内插
T-FRI <sup>[15, 16]</sup>	保证结论模糊集的正规凸性,	计算复杂度较高	适用于不同类型的隶属函数,处理多前
	灵活性高, 推广性强, 应用广泛		件变量, 多规则的内插和外插
自适应 T-FRI <sup>[18,91]</sup>	同 T-FRI, 且消除插值过程中产	同 T-FRI	处理2条多前件变量规则的内插
	生是不一致性结论		
反向 <b>T-FRI<sup>[93, 87]</sup></b>	同 T-FRI, 且处理前件属性缺失	同 T-FRI	同 T-FRI
	的问题		
动态 T-FRI <sup>[19]</sup>	同 T-FRI, 且通过动态更新规则	同 T-FRI	同 T-FRI
	库来提高推理效率		
CK <sup>[98]</sup> 及其加权算法 <sup>[99]</sup>	保证结论模糊集的正规凸性,	计算复杂度较高, 推广性较差	适用于不同类型的隶属函数,处理多前
	灵活性高		件变量, 多规则的内插
		5 1 Mar 4 1	

动态 T-CK<sup>[98]</sup>况 基于广义函数的算法[77] 保证结论模糊集的正规凸性, 计算复杂度较高 适用于不同类型的隶属函数,处理多前 灵活性高 件变量的规则内插和外插 属性加权-KH<sup>[100]</sup>}, 同相应未加权的算法,且使用 同原始未加权的算法 同原始未加权的算法 -CCL<sup>[100]</sup>, -T-FRI<sup>[89]</sup> 最少数目的规则,具有更高的 推理精度

• 模式识别

模糊规则插值在执行实际模式识别任务时也获 得了较好的结果,例如使用加权的插值推理技术处 理经典分类和回归问题<sup>[89, 88, 38]</sup>:计算机视觉与图像 超分辨率重建[33]; 以及一般疾病诊断, 尤其在乳腺 肿块风险分析[115]和大肠息肉检测[116]的具体应用中 发挥潜在的作用。

大数据处理及其他

近年来,对于大数据的处理及其应用成为热门 研究课题之一。作为大数据目前最流行的平台之 一, MapReduce 是用于处理和生成大数据集的编程 模型和实现相关应用的有效工具。为了管理由于大 数据的多样性带来的不确定性,基于模糊规则的分 类机制被引入 MapReduce 中。然而由于模糊规则集 合本身可能存在的稀疏特性, Jin et al (2018)<sup>[117]</sup>首 次进行尝试,将 MapReduce 与模糊规则插值结合起

来,提出一种基于动态模糊推理及插值的 MapReduce 分类系统,用于提高大数据模式下模糊 推理的精度。

此外,模糊插值技术在函数逼近[118,119]和学生学 业成绩评价[120]中也有进一步的应用。

下面列举两个真实案例的实际应用结果。

 用于乳腺X射线影像中肿块分类的基于模糊规 则的计算机辅助诊断系统(CADx)

在模糊 if-then 规则中,由于前件和结论属性常 采用具有语义含义的模糊集进行描述,因此基于模 糊规则系统对结论的推理过程相比其他机器学习 方法 (如神经网络) 更加清晰透明,容易解释。具 有可解释性的 CADx 系统也是近年来人工智能技术 在医学疾病检测与诊断领域迫切追求的。Li et al. (2020)<sup>[115]</sup>利用属性加权的模糊规则插值方法构造 了一个用于乳腺 X 射线影像肿块分类的 CADx 系

统。这一应用的贡献主要有两个方面:一是当未知的肿块观测无法匹配规则库中的任何规则时,该系统能够为其推导出一个基于插值推理的结论,同时结合那些直接由规则匹配推理得出的结论,显著地提高了系统的分类精度;二是系统的诊断结果是具有可解释性的,这是因为用于推理的模糊规则是通过具有语义特性的肿块形态学和密度特征刻画的。这两点在真实乳腺 X 射线影像数据库上的仿真实验结果分别举例如下。

在模糊规则插值诊断结果的可解释性方面,对 于图8所示的乳腺X射线影像和其中所包含肿块的 感兴趣区域(ROI)图像,该系统利用下面2条模糊规 则,通过属性加权的T-FRI算法进行插值推理。



(a) 乳腺 X 射线影像(b)肿块 ROI 图像 图 8 由基于属性加权 T-FRI 插值推理的恶性肿块

Rule 1: If 密实度(F12) is Large and 凸性(F4) is Medium-small and 圆度(F3) is Medium-small and NRL 熵(F9) is Medium-large and NRL zero-crossing 计数(F11) is Large and 肿块强度均值(F16) is Medium, then 肿块 is 恶性。

Rule 2: If 密实度(F12) is Medium-large and 凸性 (F4) is Medium and 圆度(F3) is Medium and NRL 熵 (F9) is Medium-large and NRL zero-crossing 计数 (F11) is Large and 肿块强度均值(F16) is Medium, then 肿块 is 恶性。

肿块特征密实度(F12)、凸性(F4)、圆度(F3)、 NRL 熵(F9)、NRL zero-crossing 计数(F11)、肿块强 度均值(F16)分别是从图像中提取出用于描述肿块 形状、边缘以及密度的特征描述子,它们被用作规 则的前件属性。根据特征数值的大小,相应模糊化 后的隶属函数取值为"Small, ..., Medium, ..., Large" 等语义值。

这 2 条规则的结论都是恶性。考虑到每个肿块 特征所表示的物理含义(比如圆度反应肿块形状与 圆形的相似度),利用这 2 条最近邻规则进行规则 插值,可以得到如下的中间规则:

If 肿块 is 不十分似圆形规则的 and 肿块轮廓 is 不规则的 and 肿块密度 is 稍高, then 肿块 is 恶性。

最终的插值结果也表明观测的肿块为恶性肿 瘤。从这个示例可以看出,通过语义丰富的模糊规 则的插值推理,对乳腺肿块进行分类,可以清晰地 解释诊断推理的过程。

在推理精度方面,基于属性加权模糊规则插值的 T-FRI 方法在两个真实乳腺 X 射线影像数据集上获得的 AUC(即 ROC 曲线下的面积)分别为 0.9614和 0.9023。这一性能可与目前文献中在相同数据上得到的最优结果相比,它们的 AUC 值分别为 0.9650和 0.8940。然而这些分类系统及其获得的结果并不容易被明确的解释。更重要的是,当遇到更稀疏的规则库的情况时,属性加权的模糊规则插值方法较非加权的算法在性能改进方面将变得更加显著(详细实验结果可参考文献<sup>[115]</sup>)。

• 图像超分辨率重建的应用

基于自适应网络的模糊推理系统 (Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System, ANFIS)是基于模糊规则推理机制的一种网络结构。 它能够高效正确地完成推理任务的前提是有充足 的训练数据。然而某些实际应用无法始终满足这一 假设。Yang et al. (2019)<sup>[33]</sup>提出了一种基于稀疏数据 的 ANFIS 构造方法,实现 ANFIS 间的插值。该方 法首先将待插值的 ANFIS 分解为一组模糊规则,然 后以规则簇的形式进行规则插值,利用插值获得的 中间规则构造新的 ANFIS。这一方法成功地解决了 在数据匮乏时利用 ANFIS 进行推理的问题,它被应 用在函数拟合以及一些经典的分类回归任务中。此 外,ANFIS 插值方法被用于实现图像超分辨率重 建。下面给出这一实际应用案例的结果。

图9展示了用于图像超分辨率重建的 ANFIS 插 值方法及其对比算法的结果。可以看出,使用原始 ANFIS 得到的图像存在明显的噪声和不清晰的边 缘,使用插值后的 ANFIS 可以得到明显的改善。定 量性能指标是图像超分辨率重建文献中常用的峰 值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)和结构

Original ANFIS Interpolated ANFIS Ground Truth PSNR/SSIM = 28 22/0 80 PSNR/SSIM = 30 05/0 85

相似度(Structure Similarity, SSIM)。结果在各自图像

的底部给出,与图像所示的结论一致。

图 9 图像超分辨率重建结果

# 总结与展望

本文综述了基于模糊稀疏规则库的规则插值方 法。当输入的观测值未能与规则库中的任何规则匹 配时,传统的基于模糊规则的 CRI 推理方法无法得 出合理有效的结论, 在仅有这种稀疏规则库的条件 下,模糊规则插值方法能够进行插值近似推理。从 理论意义上讲,它弥补了因规则无法完全覆盖论域 而导致不能正确推理的缺陷。本文首先介绍了基于 模糊规则的推理系统中常用的相关概念及符号表 示。在此基础上,将文献中模糊规则插值算法分为 基于 $\alpha$ -截集的和基于中间规则的两大经典类别,分 别介绍了其中具有代表性的方法。汇总了对模糊规 则插值算法评价的常用指标,对前述代表算法进行 了评估与讨论,并且列举了模糊规则插值方法的实 际应用案例,从理论和应用角度分别评价了模糊插 值推理技术在基于模糊规则的推理系统中的价值。

为促进模糊规则插值方法进一步深入发展,可 能需要开展以下工作:

(1) 多维的输入变量在解决实际问题时是一个常见 的问题, 文献中有许多模糊规则插值方法能够 解决包含多个前件属性的模糊规则的插值推 理。然而,这些方法在执行时都假定规则中的 前件属性对于插值具有等同的重要性。然而不 同的属性通常对决策过程的贡献不同(直观的

例子比如决策树),因此可能导致不准确甚至不 正确的插值结果出现。尽管已经提出一些方法 [121, 38, 89, 14, 100, 88] 对不同的前件属性赋予不同的 权重,并且将其用于对插值推理过程进行加权 处理,但这些方法仍然存在权重学习算法复 杂,对模糊规则插值方法加权不够合理等问 题。这将是多输入系统的一个重点研究方向。

- (2) 近年来出现有将模糊规则插值扩展到模糊集合 的衍生拓展集合上的算法研究,比如前文表 1 中属于第一大类的基于区间值 II-型模糊集的 算法<sup>[41, 51, 52]</sup>和基于粗糙-模糊集的算法<sup>[40, 54]</sup>, 以及属于第二大类的基于区间值 II -型模糊集 的算法<sup>[86, 41]</sup>和基于粗糙-模糊集的算法<sup>[85]</sup>。这 两类模糊集都是对不确定知识的高阶表示,用 于更精确的解释和处理模糊系统中存在的不 确定性。尽管这些算法在表示和运算上比基于 传统模糊集的规则插值算法具有较高的复杂 度,但它们提供了实现更准确推理的一种有效 方案,因此在某些对精度要求较高的系统中值 得深入研究。
- (3) 目前大部分提出的模糊规则插值算法都是基于 Mamdani 类型的模糊规则实现的。最近出现一 些算法将传统的基于中间规则的 T-FRI 方法扩 展到建立 Takagi Sugeno Kang (TSK)模糊模型 的插值推理机制<sup>[33,96]</sup>。TSK 模糊推理模型由于 其规则后件是由线性函数表示的,因此在对连 续值的预测问题中有很好的应用。对稀疏模糊 TSK 规则插值方法的研究将会进一步促进模 糊插值推理的实际应用。
- (4) 模糊规则插值算法能够有效的获得正确合理的 插值推理结论的前提条件之一是,存在 n 条 (n ≥ 2)与输入观测值相关的模糊规则作为算 法输入。这 n 条规则一般是从规则库中选择出 的与观测值最邻近的。传统的方法是从整个规 则库中与观测值进行相似度计算和选择。然而 模糊规则可能存在分布不均匀的情况,例如选 择出的 n 条规则可能差异很小,相互之间本身 存在很高的相似性,这将很难反映出规则库的 整体情况。利用这样的 n 条近邻规则对观测值 进行插值推理可能产生有偏估计。选择出的近 邻规则是实现模糊规则插值的重要前提和基 础,然而文献中鲜有对近邻规则选取的深入研 究,这也将是下一步探索的方向之一。
- (5)"维数灾难"问题一直也是基于模糊规则的推



理系统需要解决的重要难题。系统输入的前件 属性增加,并且与每个前件变量相对应的模糊 语义值增多都会提高系统的精度,但规则库中 的模糊规则数量会同时呈指数增长,从而很大 程度上增加了系统的计算复杂性。模糊分层推 理模型为解决该问题提供了一种有效的途径, 它由多层连接的低维模糊系统组成,使得每个 子系统的输入极大的减少。如何将分层模型与 模糊规则插值结合从而实现稀疏规则库上的 高效插值推理将十分值得期待。

#### 参考文献

- Zadeh, L A. Fuzzy sets. Information and control,1965, 8(3):338–353.
- [2] Ross, T J. Fuzzy logic with engineering applications. Chichester, UK:JohnWiley & Sons,2005.
- [3] Terano, T, Asai, K, and Sugeno, M. Applied fuzzy systems.Boston, USA:Academic Press,2014.
- [4] Zimmermann, H. Fuzzy set theory and its applications.Berlin, Germany:Springer Science & Business Media,2011.
- [5] Zadeh, L A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. IEEE Transactions on Systems, Manand Cybernetics,1973, (1):28–44.
- [6] Mamdani, E H and Assilian, S. An experiment inlinguistic synthesis with a fuzzy logic controller.International journal of human-computer studies,1999, 51(2):135–147.
- [7] Baranyi, P Z, Tikk, D, Yam, Y, K άczy, LT, and N ádai, L.A new method for avoiding abnormal conclusion for α-cutbased rule interpolation//Proceedings of the 1999 IEEE international fuzzysystems conference. Seoul, Korea, 1999: 1383–1388.
- [8] Tikk, D and Baranyi, P. Comprehensive analysis of a newfuzzy rule interpolation method. IEEE Transactions onFuzzy Systems,2000, 8(3):281–296.
- [9] Kóczy, L and Hirota, K. Approximate reasoning bylinear rule interpolation and general approximation.International Journal of Approximate Reasoning,1993,9(3):197–225.
- [10] Kóczy, L and Hirota, K. Interpolative reasoningwith insufficient evidence in sparse fuzzy rule bases.Information Sciences, 1993, 71(1):169–201.

- [11] Burkhardt, D G and Bonissone, P P. Automatedfuzzy knowledge base generation and tuning//Proceedings of the1992Proceedings IEEE International Conference on FuzzySystems. San Diego, USA,1992: 179–188.
- [12] Koczy, L T and Hirota, K. Size reduction by interpolationin fuzzy rule bases. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 1997, 27(1):14–25.
- [13] Tan, Y, Shum, H, Chao, F, Vijayakumar, V and Yang,L. Curvature-based sparse rule base generation for fuzzyrule interpolation. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems,2019, 36(5):4201–4214.
- [14] Chen, S-M and Adam, S I. Weighted fuzzy interpolatedreasoning based on ranking values of polygonal fuzzysets and new scale and move transformation techniques.Information Sciences, 2018, 435:184–202.
- [15] Huang, Z and Shen, Q. Fuzzy interpolative reasoning viascale and move transformations. IEEE Transactions onFuzzy Systems,2006, 14(2):340–359.
- [16] Huang, Z and Shen, Q. Fuzzy interpolation andextrapolation: A practical approach. IEEE Transactionson Fuzzy Systems, 2008, 16(1):13–28.
- [17] Jin, S, Diao, R, Quek, C, and Shen, Q. Backward fuzzyrule interpolation. IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2014, 22(6):1682–1698.
- [18] Yang, L, Chao, F, and Shen, Q. Generalized adaptivefuzzy rule interpolation. IEEE Transactions on FuzzySystems,2017, 25(4):839–853.
- [19] Naik, N, Diao, R, and Shen, Q. Dynamic fuzzy ruleinterpolation and its application to intrusion detection.IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2017, 26(4):1878–1892.
- [20] Kovács, S and Kóczy, L T. Approximate fuzzy reasoningbased on interpolation in the vague environment of thefuzzy rule base as a practical alternative of the classicalcri//Proceedings of the 7th International Fuzzy SystemsAssociation World Congress. Prague, Czech Republic,1997: 144–149.
- [21] Kovacs, S and Koczy, L T. Approximate fuzzy reasoningbased on interpolation in the vague environment of thefuzzy rulebase //Proceedings of IEEE InternationalConference on Intelligent Engineering Systems. Budapest, Hungary, 1997: 63–68.

- [22] Kovács, S and Káczy, L T. The use of the concept of vagueenvironment in approximate fuzzy reasoning. Fuzzy SetTheory and Applications, Tatra Mountains MathematicalPublications, Mathematical Institute Slovak Academy ofSciences, Bratislava, Slovak Republic,1997, 12:169–181.
- [23] Bouchon-Meunier, B, Delechamp, J, Marsala, C,Mellouli, N, Rifqi, M, and Zerrouki, L. Analogy and fuzzyinterpolation in the case of sparse rules//Second International Conference on Soft and Intelligent Computing,Budapest, Hungary, 1999:132–136.
- [24] Bouchon-Meunier, B, Dubois, D, Marsala, C, Prade, H,and Ughetto, L. A comparative view of interpolationmethods between sparse fuzzy rules. //Proceedings Joint9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS InternationalConference (Cat. No. 01TH8569). Vancouver, Canada, 2001: 2499–2504.
- Bouchon-Meunier, B, Marsala, C, and Rifqi, M.Interpolative reasoning based on graduality. In Ninth IEEEInternational Conference on Fuzzy Systems.
   FUZZ-IEEE2000 (Cat. No. 00CH37063),San Antonio, USA, 2000: 483–487.
- [26] Jenei, S. Interpolation and extrapolation of fuzzyquantities revisited—an axiomatic approach. SoftComputing,2001, 5(3):179–193.
- [27] Jenei, S, Klement, E-P, and Konzel, R. Interpolationand extrapolation of fuzzy quantities-the multipledimensionalcase. Soft Computing,2002, 6(3-4):258–270.
- [28] Yam, Y, Wong, ML, and Baranyi, P Z. Interpolationas mappings between cartesian spaces. //Proceedings of the International Conference onIntelligent Technologies,Bangkok, Thailand, 2000, 3:459–466.
- [29] Yam, Y and Kóczy, L T. Representing membershipfunctions as points in high-dimensional spaces for fuzzyinterpolation and extrapolation. IEEE Transactions onFuzzy Systems,2000, 8(6):761–772.
- [30] Yam, Y and Kóczy, LT. Cartesian representationfor fuzzy interpolation. //Proceedings of the 37thIEEE Conference on Decision and Control, Tampa, USA, 1998, (3):2936–2937.
- [31] Yam, Y and Kóczy, LT. Fuzzy interpolation withcartesian representation and extensibility functions. //Proceedings Joint 9th IFSA World Congress and

20thNAFIPS International Conference, Vancouver, Canada, 2001: 2852–2857.

[32] Yam, Y, Kreinovich, V, and Nguyen, H T. Extracting fuzzysparse rules by cartesian representation and clustering. //Proceedings ofieee internationalconference on systems, man and cybernetics, Nashville, USA,2000, (5): 3778–3783.
[33] Yang, J, Shang, C, Li, Y, Li, F, and Shen, Q.

ANFIS Construction with Sparse Data via Group Rule Interpolation. IEEE Transactions on Cybernetics, DOI: 10.1109/TCYB.2019.2952267.

- [34] Bede, B. Mathematics of Fuzzy Sets and Fuzzy Logic.Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [35] Huang, D-M, Tsang, ECC, and Yeung, DS. A fuzzyinterpolative reasoning method. //Proceedings of2004 International Conference on Machine Learning andCybernetics, Shanghai, China, 2004, (3): 1826–1830.
- [36] Ughetto, L, Dubois, D, and Prade, H. Fuzzy interpolationby convex completion of sparse rule bases. //Proceedings of the Ninth IEEEInternational Conference on Fuzzy Systems. San Antonio, USA, 2000, (1): 465–470.
- [37] Chang, Y-C, Chen, S-M, and C-J. Lian Fuzzyinterpolative reasoning for sparse fuzzy-rule-basedsystems based on the areas of fuzzy sets. **IEEETransactions** Fuzzy Systems, on 2008,16(5):1285-1301.
- [38] Chen, S-M and Chen, Z-J. Weighted fuzzy interpolativereasoning for sparse fuzzy rule-based systems based onpiecewise fuzzy entropies of fuzzy sets. InformationSciences,2016, 329:503–523.
- [39] Chen, S-M, Chang, Y-C, Chen, Z-J, and Chen, CL.Multiple fuzzy rules interpolation with weightedantecedent variables in sparse fuzzy rule-based systems.International Journal of Pattern Recognition and ArtificialIntelligence,2013, 27(05):1359002.
- [40] Chen, S-M, Cheng, S-H, and Chen, Z-J. Fuzzyinterpolative reasoning based on the ratio of fuzziness ofrough-fuzzy sets. Information Sciences, 2015, 299:394–411.
- [41] Chen, S-M and Lee, L-W. Fuzzy interpolative reasoningfor sparse fuzzy rule-based systems based on intervaltype-2 fuzzy sets. Expert Systems with Applications, 2011, 38(8):9947–9957.

- [42] Cheng, S-H, Chen, S-M, and Chen, C-L. Fuzzyinterpolative reasoning based on ranking values ofpolygonal fuzzy sets and automatically generated weightsof fuzzy rules. Information Sciences, 2015, 325:521–540.
- [43] Cheng, S-H, Chen, S-M, and Chen, C-L. Adaptive fuzzyinterpolation based on ranking values of polygonal fuzzysets and similarity measures between polygonal fuzzysets. Information Sciences, 2016, 342:176–190.
- [44] Kov ács, S. Extending the fuzzy rule interpolation"five"by fuzzy observation//Computational Intelligence, Theory and Applications, Dortmund, Hungary: Springer.2006: 485–497.
- [45] Yang, L and Shen, Q. Closed form fuzzy interpolation.Fuzzy Sets and Systems, 2013, 225:1–22.
- [46] Lu ZhengDing, Fu HaiDong. New approach for interpolative reasoning with multi-dimensional sparsefuzzy rules. Journal of Chinese Computer Systems, 2004, 25(8):1468–1472(in Chinese).
  (卢正鼎, 符海东. 一种新的多维稀疏规则模糊插值推 理 方 法. 小型 微型 计 算 机 系 统, 2004,
- 25(8):1468—1472.)
  [47] Wang TianJiang, Lu ZhengDing, Li Fan. Fuzzyinterpolative reasoning based on geometric similarity.Computer Sciences,2004, 31(9):169–171+175(inChinese).
  (王天江,卢正鼎,李凡.基于几何相似的模糊插值推 理.计算机科学,2004,31(9):169--171+175.)
- [48] Hsiao, W-H, Chen, S-M, and Lee, C-H. A newinterpolative reasoning method in sparse rule-basedsystems. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 93(1):17–22.
- [49] Wang TianJiang, Lu ZhengDing. A linear interpolativereasoning approach under multi)dimensonal fuzzy rules.Computer Sciences, 2004, 31(6):173–176(in Chinese).

(王天江, 卢正鼎. 多变量规则的线性插值推理方法. 计算机科学, 2004, 31(6):173--176.)

- [50] Zhao HongWen. Fuzzy interpolative reasoning basedon
  "point-slope" in sparse rule base. ShuXue
  XueXiYuYanJiu, 2010, (11):90-91 (in Chinese).
  (赵洪文. 稀疏规则条件下的"点一斜"模糊插值推理
  方法.数学学习与研究, 2010, (11):90-91.)
- [51] Chen, S-M and Barman, D. Adaptive weighted

fuzzyinterpolative reasoning based on representative values and similarity measures of interval type-2 fuzzy sets. Information Sciences, 2019, 478:167–185.

- [52] Chen, S-M and Adam, S-I. Adaptive fuzzy interpolationbased on ranking values of interval type-2 polygonal fuzzysets. Information Sciences, 2018, 435:320–333.
- [53] Bai, Y. and Wang, D. Calibrate parallel machine tools byusing interval type-2 fuzzy interpolation method.International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2017, 93:3777–3787.
- [54] Chen, S-M, Zou, X-Y, and Barman, D. Adaptive weightedfuzzy rule interpolation based on ranking values and similarity measures of rough-fuzzy sets. InformationSciences, 2019, 488:93–110.
- [55] Chen, S-M and Adam, S I. Adaptive fuzzy interpolationbased on general representative values of polygonalfuzzy sets and the shift and modification techniques.Information Sciences,2017, 414:147–157.
- [56] Mendel, J M, John, R I, and Liu, F. Interval type-2 fuzzylogic systems made simple. IEEE transactions on fuzzysystems, 2006, 14(6):808–821.
- [57] Kózy, L T, Hirota, K, and Gedeon, T D. Fuzzy ruleinterpolation by the conservation of relative fuzziness.Journal of Advanced Computational Intelligence andIntelligent Informatics, 2000, 4(1):95–101.
- [58] Koczy, L T, Hirota, K, and Muresan, L. Interpolation inhierarchical fuzzy rule bases. // Ninth IEEE InternationalConference on Fuzzy Systems. San Antonio, USA,2000(1): 471–477.
- [59] Kóczy, L T and Hirota, K. Ordering, distance and closeness of fuzzy sets. Fuzzy sets and systems, 1993, 59(3):281–293.
- [60] K άzy, L T and Hirota, K. Rule interpolation by
   *α* -level sets in fuzzy approximate reasoning. J.
   BUSEFAL, Automne, URA-CNRS, 1991, 46:115–123.
- [61] Vass, G, Kalmár, L, and Kóczy, L T. Extension of thefuzzy rule interpolation method. Proceedings of the International Conference on FuzzySets Theory Applications, Liptószetmiklós, Czechoslovakia, 1992: 1–6.
- [62] Tikk, D. Investigation of fuzzy rule interpolation and theuniversal approximator property of fuzzy

controllers[Ph.D. thesis]. Department of Telecommunications and Telematics, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary, 1999.

- [63] Yam, Y, Baranyi, P, Tikk, D, and Kóczy, L T. Eliminatingthe abnormality problem of α-cut based interpolation. //Proceedings of the 8th IFSA World Congress, Taipei, China, 1999(2): 726–766.
- [64] Tikk, D, Kóczy, L T, and Moser, B. Stabilityof interpolative fuzzy kh-controllers. multi-dimensionalcase. //Proceedings of the Tempus JEP Modify Symposium,Budapest, Hungary, 1997,8.
- [65] Tikk, D, Baranyi, P, Yam, Y, and Koczy, L T. Stability of a new interpolation method. //Proceedings of the 1999 IEEE International Conference onSystems, Man, and Cybernetics, Tokyo, Japan, 1999(3): 7–9.
- [66] Tikk, D, Joá, I, Káczy, L, Várlaki, P, Moser, B, andGedeon, T D. Stability of interpolative fuzzy khcontrollers. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 125(1):105–119.
- [67] Wong, K W, Gedeon, T, and Tikk, D. An improvedmultidimensional α -cut based fuzzy interpolationtechnique//International Conference on ArtificialIntelligence in Science and Technology (AISAT 2000),Hobart, Australia,2000: 16–20.
- [69] Qian Hao, Tian YiHui, Wang Tao. New method ofFuzzy
  Interpolative reasoning based on
  Guassian-typemembership function. Journal of Liaoning
  University ofTechnology (Natural Science Edition), 2009,
  29(2):136–140(in Chinese).

(钱皓,田一慧,王涛.基于高斯型隶属函数新的模糊 插值推理方法.辽宁工业大学学报(自然科学版),2009, 29(2):136--140.)

- [70] Li Xia, Li RuiHua, Shi Yan. Fuzzy interpolative-typereasoning method using width of membership function.Computer Engineering and Applications, 2011, 47(11):139-141(in Chinese).
  (李霞,李瑞华,石岩.利用隶属函数宽度的模糊插值 推理方法.计算机工程与应用, 2011, 47(11):139-141.)
- [71] Bouchon-Meunier, B and Valverde, L. A fuzzy approachto analogical reasoning. Soft Computing, 1999,

3(3):141-147.

- [72] Turksen, IB and Zhao Zhong. An approximate analogical reasoning approach based on similarity measures.IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,1988,18(6):1049–1056.
- [73] Wu, Z, Masaharu, M, and Shi, Y. An improvementto k czy and hirota's interpolative reasoning in sparsefuzzy rule bases. International Journal of ApproximateReasoning, 1996, 15(3):185–201.
- [74] Baranyi, P, Gedeon, TD, and Kóczy, LT. A generalmethod for fuzzy rule interpolation: specialized for crisptriangular and trapezoidal rules. //Proceedings of theEUFIT'95,Aachen, Germany, 1995: 99–102.
- [75] Baranyi, P, Gedeon, TD, and Koczy, LT.
   Ruleinterpolation by spatial geometric representation.
   //Proceedings of theIPMU, Granada, Spain, 1996(96):
   483–488.
- [76] Baranyi, P and Kóczy, LT. Multidimensional fuzzy ruleinter-and extrapolation based on geometric solution. //Proceedings of the 7th International Power Electronics and Motion ControlConference,Budapest, Hungary, 1996(3): 443–447.
- [77] Baranyi, P, Kóczy, LT, and Gedeon, TD. A generalized concept for fuzzy rule interpolation. IEEE Transactionson Fuzzy Systems, 2004, 12(6):820–837.
- [78] Baranyi, P, Gedeon, T D, and Kóczy, L T. Ageneral interpolation technique in fuzzy rule baseswith arbitrary membership functions. //1996 IEEEInternational Conference on Systems, Man andCybernetics. Information Intelligence and Systems, Beijing, China, 1996(1): 510–515.
- [79] Baranyi, P, Mizik, S, K óczy, L T, Gedeon, T D, and Nagy, Fuzzy base interpolation L rule based on 1998IEEE semanticrevision. //Proceedingsof the International Conference on Systems, Man, andCybernetics.San Diego, USA, 1998(2):1306-1311.
- [80] Baranyi, P and Kóczy, L T. A general and specializedsolid cutting method for fuzzy rule interpolation. JournalBUSEFAL, URA-CNRS, Universit é Paul Sabatier,1996, pages13–22.
- [81] Kawaguchi, M F and Miyakoshi, M. A fuzzy ruleinterpolation technique based on bi-splines in multipleinput systems. //Ninth IEEE International Conference onFuzzy Systems. San Antonio, USA,

2000(1): 488-492.

- [82] Kawaguchi, M F and Miyakoshi, M. Fuzzy splinefunctions and nonlinear interpolation of if-then rules. //Proceedings of the International Conference on Soft Computing, Alberta, Canada,2000: 785–792.
- [83] Kawaguchi, M F and Miyakoshi, M. Fuzzy splineinterpolation in sparse fuzzy rule bases. A NewParadigm Of Knowledge Engineering By Soft Computing, Singapore,2001: 95–120.
- [84] Kawaguchi, M F, Miyakoshi, M, and Kawaguchi, M.Linear interpolation with triangular rules in sparse fuzzyrule bases//Proceeding of IFSA World Congress, Prague, Czech Republic, 1997: 138–143.
- [85] Chen, C, Parthal án, N M, Li, Y, Price, C, Quek, C, andShen, Q. Rough-fuzzy rule interpolation. InformationSciences, 2016, 351:1–17.
- [86] Chen, C and Shen, Q. Transformation-based fuzzy ruleinterpolation using interval type-2 fuzzy sets. Algorithms, 2017, 10(3):91, 20.
- [87] Jin, S, Peng, J, Li, Z, and Shen, Q. Backward fuzzy ruleinterpolation. Information Sciences, 2020, 506:99–112.
- [88] Li, F, Li, Y, Shang, C, and Shen, Q. Fuzzy knowledge-basedprediction through weighted rule interpolation.IEEE Transactions on Cybernetics,2020, 50(10):4508–4517.
- [89] Li, F, Shang, C, Li, Y, Yang, J, and Shen, Q.Fuzzy rule based interpolative reasoning supported byattribute ranking. IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2018,26(5):2758–2773.
- [90] Shen, Q and Yang, L. Generalisation of scale andmove transformation-based fuzzy interpolation. Journalof Advanced Computational Intelligence and IntelligentInformatics, 2011, 15(3):288–298.
- [91] Yang, L and Shen, Q. Adaptive fuzzy interpolation. IEEETransactions on Fuzzy Systems, 2011, 19(6):1107–1126.
- [92] Das, S, Chakraborty, D, and Kóczy, L T. Linear fuzzy rulebase interpolation using fuzzy geometry. InternationalJournal of Approximate Reasoning,2019, 112:105–118.
- [93] Jin, S, Shen, Q, and Peng, J. Transformation basedbackward fuzzy rule interpolation with multiple missingantecedent values. Backward Fuzzy Rule

Interpolation, Singapore, Springer. 2019, 75-89.

- [94] Li, F, Shang, C, Li, Y, and Shen, Q. Featureranking-guided fuzzy rule interpolation. //2017 IEEEInternational Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Naples, Italy, 2017: 1–6.
- [95] Li, F, Li, Y, Shang, C, and Shen, Q. Improving fuzzy ruleinterpolation performance with information gain-guidedantecedent weighting. Soft Computing,2018, 22(10):3125–3139.
- [96] Chen, T, Shang, C, Yang, J, Li, F, and Shen, Q.A New Approachfor Transformation-basedFuzzy Rule Interpolation. IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2020, 28(12):3330–3344.
- [97] Li, Y-M, Huang, D-M, and Zhang, L-N. Weighted fuzzyinterpolative reasoning method. // Proceedings of the 2005 InternationalConference onMachine Learningand Cybernetics, Guangzhou, China, 2005(5): 3104–3108.
- [98] Chen, S-M and Ko, Y-K. Fuzzy interpolative reasoningfor sparse fuzzy rule-based systems based on  $\alpha$ -cuts and transformations techniques. IEEE Transactions on FuzzySystems,2008, 16(6):1626–1648.
- [99] Chen, S-M, Ko, Y-K, Chang, Y-C, and Pan, JS.Weighted fuzzy interpolative reasoning based onweighted increment transformation and weighted ratiotransformation techniques. IEEE Transactions on FuzzySystems,2009, 17(6):1412–1427.
- [100] Li, F, Shang, C, Li, Y, Yang, J, and Shen, Q. Interpolationwith just two nearest neighbouring weighted fuzzy rules.IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2020, 28(9):2255–2262.
- [101] DeKleer, J. An assumption-based tms. ArtificialIntelligence,1986, 28(2):127–162.
- [102] Fu, X and Shen, Q. Fuzzy compositional modeling. IEEETransactions on Fuzzy Systems, 2010, 18(4):823–840.
- [103] Ding, L, Shen, Z, and Mukaidono, M. A new method forapproximate reasoning. //Proceedings of the NineteenthInternational Symposium on Multiple-Valued Logic,Guangzhou, China, 1989:179–185.
- [104] Ding, L, Shen, Z, and Mukaidono, M. Revision principlefor approximate reasoning, based on linear revisingmethod. //Proceedings of the Second InternationalConference on Fuzzy Logic and Neural

Networks, Iizuka'92, Iizuka, Japan, 1992: 305-308.

- [105] Mukaidono, M, Ding, L, and Shen, Z. Approximatereasoning based on revision principle. //Proceedings of the NAFIPS'90, Toronto, Canada, 1990(1): 94–97.
- [106] Shen, Z, Ding, L, and Mukaidono, M. Methods of revisionprinciple. //Proceedings of the 5th IFSA World Congr,Seoul, Korea, 1993: 246–249.
- [107] Shen, Z, Ding, L, and Mukaidono, M. Fuzzy resolutionprinciple. //Proceedings.The EighteenthInternational Symposium on Multiple-Valued Logic,Palma de Mallorca, Spain, 1988:210–215.
- [108] Tikk, D, Johany &, Z C, Kov &, S, and Wong, K W.Fuzzy rule interpolation and extrapolation techniques:Criteria and evaluation guidelines. Journal of advancedcomputational intelligence and intelligent informatics,2011, 15(3):254–263.
- [109] Johany &, Z C and Kov &, S. Survey on variousinterpolation based fuzzy reasoning methods. ProductionSystems and Information Engineering,2006, 3(1):39–56.
- [110] Kovács, S and Kóczy, L T. Application of an approximate fuzzy logic controller in an agysteering system, path tracking and collision avoidancestrategy. Fuzzy Set Theory and Applications, TatraMountains Mathematical Publications, MathematicalInstitute Slovak Academy of Sciences,1999, 16:456–467.
- [111] Vincze, D and Kovács, S. Using fuzzy rule interpolationbased automata for controlling navigation and collisionavoidance behaviour of a robot. //2008 IEEEInternational Conference on Computational Cybernetics, Stara Lesn, Slovakia, 2008: 79–84.
- [112] Kovács, S and Kóczy, L Τ. Application of interpolation-basedfuzzy logic reasoning in //2004 behaviour-based controlstructures. IEEE International Conference onFuzzy Systems (IEEE Cat. No. 04CH37542),Budapest, Hungary, 2004(3): 1543-1548.
- [113] Bart ók, R. and V ás árhelyi, J. Fuzzy Rule InterpolationBased Object Tracking and Navigation for SocialRobot. //J ármai K., Boll ó B. (eds) Vehicle andAutomotive Engineering 2. VAE 2018. LectureNotes

in Mechanical Engineering. Springer, Cham.https://doi.org/10.1007/978-3-319-75677-6 31.

- [114] Naik, N, Diao, R, Shang, C, Shen, Q, and Jenkins, P.D-fri-winfirewall: Dynamic fuzzy rule interpolation forwindows firewall. // 2017 IEEE International Conferenceon Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Naples, Italy, 2017: 1–6.
- [115] Li, F, Shang, C, Li, Y, and Shen, Q. Interpretablemammographic mass classification with fuzzyinterpolative reasoning. Knowledge-Based Systems,2020,105279(191):1–13.
- [116] Nagy, S, Sziová, B, and Kóczy, L T. The effect of imagefeature qualifiers on fuzzy colorectal polyp detectionschemes using kh interpolation-towards hierarchical fuzzyclassification of coloscopic still images. // 2018IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE),Rio de Janeiro, Brazil, 2018: 1–7.
- [117] Jin, S, Peng, J, Xie, D. A new MapReduce approachwith dynamic fuzzy inference for big data classificationproblems. International journal of cognitive informaticsand natural intelligence, 2018, 12(3):40–54.
- [118] Wong, K W and Gedeon, T D. Petrophysical propertiesprediction using self-generating fuzzy rules inferencesystem with modified alpha-cut based fuzzy interpolation.// Proceedings of The Seventh International Conferenceof Neural Information Processing ICONIP (2000), Taejon, Korea, 2000: 1088–1092.
- [119] Berecz, A. Fuzzy rule interpolation based toollife modeling using rbe-si and fripoc. // 20095th International Symposium on Applied ComputationalIntelligence and Informatics, Timisoara, Romania, 2009: 11–16.
- [120] Johany &, Z C. Student evaluation based on fuzzy ruleinterpolation. Int. J. Artif. Intell., 2010, 5(A10):37–55.
- [121] Chen, S-M and Chang, Y-C. Weighted fuzzyrule interpolation based on ga-based weight-learningtechniques. IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2011,19(4):729–744.



LI Fang-Yi,Ph.D. Herresearch interests include fuzzyinterpolative reasoning,machine learning,and image classification. **LI Ying,** Ph.D., Professor. Her research interests include imageprocessing, computation intelligence, and signal processing.

Yang Jing,Ph.D. candidate. Her research interests includefuzzysystem, deep learning.

#### Background

This paper addresses the challenging problem of fuzzy rule interpolation (FRI), in the area of computational intelligence in general and that of fuzzy systems in particular. FRI deals with intelligent approximate reasoning with imprecisely described sparse knowledge. It has become a maturing research topic, with a wide range of theoretical approaches proposed over the past three decades, involving different practical applications. Whilst a diversity of FRI algorithms have been developed there lacks a systematic introduction to this important topic in the literature. This paper presents a survey of representatives of seminal and state-of-the-art FRI techniques, offering a comparative overview of the underlying approaches in a unified presentational framework.

This work is funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 61871460), Shaanxi Provincial Key R & D Program (No. 2020KW-003), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 3102019ghxm016).