ファジィ・エキスパート・システムの 現状と展望[†]

馬野 元秀*

1. はじめに

1970年代から1980年代にかけて、エキスパート・システムに関する研究が非常に盛んに行なわれ、多くの分野でさまざまなエキスパート・システムが開発されるようになった^{1)~3)}。しかし、これらのエキスパート・システムでは、あいまいさについては、あまり考慮されていない。

しかし、人間の有用な知識のほとんどは、非常にあいまいであり、明確な形に書くことができないことが多い。そこで、このようなあいまいな知識をファジィ集合により表現し、利用するという試みが行なわれるようになってきた⁴⁾。これがファジィ・エキスパート・システムである。

本稿では、まず、通常エキスパート・システムについてまとめ、次にファジィ推論法について述べ、最後にファジィ・エキスパート・システムについて考察する。

2. エキスパート・システム

エキスパート・システム^{1)~3)}とは、一言でいうと、「ある分野の専門家と同じような高度の問題解決を行なうことのできるシステム」ということができる。ただし、適用される分野は、問題解決のためのアルゴリズムが明確に分かっている比較的

簡単な分野ではなく、問題の定式化が十分に行なわれておらず、人間の専門家の経験によってのみ解決が可能である、診断、設計、解釈、監視、制御、立案、予測などの分野である。

このような問題を計算機で解決するためには、特定の問題領域に固有の経験則を専門家から取り出し、それを計算機内に蓄積し、有効に利用する必要がある。この専門家の知識を重要視することが、エキスパート・システムの本質であり、エキスパート・システムが知識ベース・システムと呼ばれるのは、このためである。

知識表現の方法には、ルール(記述はif ~ then ~; 推論はパターン・マッチング)、フレーム(記述は階層的データと付加手続き; 推論は付加手続きの実行)、オブジェクト(記述はデータと手続き; 推論はメッセージ交換による手続きの実行)、述語論理(記述は述語; 推論は推論規則)、ネットワーク(記述は名前つき有向グラフ; 推論はグラフのパターン・マッチング)、手続き(記述は従来のプログラム; 推論はプログラムの実行)などがある⁵⁾が、現在、多くの場合にルールが用いられている。

そして、エキスパート・システムは図1のような基本構造を持つべきであるとされている^{2),3)}。すなわち、

- ① 専門家の知識を蓄積・管理するための知識ベース
- ② 利用者が与えるデータや一時的なデータを記憶するための作業記憶
- ③ 知識ベース内の知識と作業記憶内のデータを

[†] Perspectives and Trends of Fuzzy Expert Systems
Motohide UMANO

* 大阪大学 大型計算機センター
Computation Center, Osaka University

図1. エキスパート・システムの基本構造

利用して、推論を行なうための推論機構

- ④ 専門家から専門知識を獲得し、知識ベースの構築を支援するための構築支援インタフェース
- ⑤ 利用者との応答をスムーズに行なうための利用者インタフェース
- ⑥ 利用者の要求に応じて、推論で得た結論の理由を説明するための説明機構

である。

最初エキスパート・システムは、1960年代の後半にStanford大学で開発されたDENDRAL⁶⁾という有機化合物の分子構造を質量分析機などのデータから発見的に同定するシステムで、プロダクション・システム(ルールに基づくシステム)を用いて作成された。

そして、1970年代に入ると、MYCIN(血液感染症の診断と治療支援)、CASNET(緑内障の診断と治療支援)、INTERNIST(内科全般の診断と治療支援)、HEARSAY-II(話言葉の理解)などのエキスパート・システムが作成された。

MYCIN、CASNET、INTERNIST、HEARSAY-IIなどのエキスパート・システムは、かなり一般的な知識表現のモデルを持っていた。したがって、これらの知識ベースを別の知識に入れ替えるだけで、新しいエキスパート・システムを作成できることになる。

最初にこれを行なったのがMYCINであった。

このMYCIN固有の知識を取り除いたものは、EMYCIN(empty MYCIN または essential MYCIN)と呼ばれ、知識表現と推論機構以外に、ルール表現のための簡易言語、ルールの自然言語への変換機能、説明機能なども持っていた。これを用いて、建築物の構造解析用有限要素法パッケージの使用に関する支援を行なうSACONや出血性の傷の同定の支援を行なうCLOTなどが作成された。いずれも、極めて短期間でシステムを作成することができ、EMYCINの威力が示された。

このようなエキスパート・システムから知識ベースの内容だけを取り除き、知識ベースの作成・管理・保守・デバッグの機能や説明機能を残したものは、エキスパート・システム構築支援ツール(単にツールまたはシェル)と呼ばれる。この後、EXPERT、AGE、HEARSAY-III、OPS5(以上は、ルールに基づいている)、FRL、KRL、UNITS(以上は、フレームに基づいている)などのエキスパート・システム構築支援ツールが作成された。

このようなツールが提供されると、エキスパート・システムを比較的容易に作成できるようになる。そこで、大学だけでなく、企業がシステムの故障診断や各種の支援用のエキスパート・システムを開発し始めた。

ツールが使われると、その結果として、ツールに対する高機能化の要求が出てくる。これに答え

たのが第2世代ツールと呼ばれるもので、以前のツール(第1世代ツール)が単一の知識表現しかサポートしていなかったのに対して、ルールやフレームなどを含めた複数の知識表現法を可能にしている。代表的なものとして、KEE(開発はIntelli Corp)、ART(Inference)、Knowledge Craft(Carnegie Group)、LOOPS(Xerox)などがある。また、国産のツールも開発されて、各社の汎用機やワークステーション上でも利用できるようになった。また、パソコン上で稼動するツールも出てきている。

そして、最近では、診断用、設計用、スケジューリング用などのように用途をしぼる代わりに、その分野により適した知識表現や推論機構を採用し、より使い易くしたものもある。また、既存のFortranやCobolのプログラムやデータベースとの統合ができるものも増えてきた。

3. ファジィ推論

機械的な推論と人間が行なっている推論とは、ずいぶん異なっているという認識はかなり以前からあり、人間の推論の定式化がいろいろと試みられてきた。あいまい推論、デフォルト推論、非単調推論、定性的推論、帰納推論、事例ベース推論などが研究されているが、ここではあいまい推論について考えよう。

あいまい推論と呼ばれるものは、推論過程のどの部分をどのようにあいまいにするかによって、いくつかの方法がある。大きく分けて、

- (1) 確信度を用いた推論
 - (2) ファジィ制御における推論
 - (3) 近似推論(Zadehによる)
 - (4) その他のファジィ推論
- の4つに分類できると思われる。

(1) 確信度を用いた推論

確信度(CF: certainty factor)は、最初にMYCIN⁷⁾でプロダクション・システムと共に使われて以来、知識工学の分野で広く用いられている。

確信度はデータ(事実)がどれくらい確かであるかを0と1の間の数値を使って表わす(MYCINでは、-1と+1の間の数値で表わした)。1はそのデータが確実に正しいことを表わし、0はそのデータが確実に誤っていることを表わす。したがって、確信度をもつデータは、例えば、

0.9: 太郎は高熱である

0.6: 太郎はよく咳がでる

と書かれる。確信度はルールの結論部にも記述することができ、例えば、

if x が高熱である & x はよく咳がでる

then x はカゼである: 0.8

と書かれる。

このような確信度が付いたデータやルールを用いて、どのように推論していくかについて、文献⁸⁾では次の3段階に分けて考えている。

① ルールの個々の条件に一致するデータの確信度から、条件部全体としての確信度を求める。これには、例えば、最小値を求める演算を用いる。上の例では、

$$\min(0.9, 0.6) = 0.6$$

となる。

② 条件部全体の確信度(①で求めたもの)とルールの結論の確信度から、推論結果に対する確信度を求める。これには、例えば、かけ算を用いる。上の例では、

$$0.6 \times 0.8 = 0.48$$

となる。したがって、

0.48: 太郎はカゼである

が推論できたことになる。

③ 2つ以上のルールが同じ推論結果を導き出すとき、それぞれの確信度からその推論結果に対する全体的な確信度を求める。これには、例えば、最大値を求める演算を用いる。上の例では、別のルールが同じ推論結果「太郎はカゼである」を0.72の確信度で導くときには、これらはまとめられて、

$$\max(0.48, 0.72) = 0.72$$

となる。ただし、結論が動作であるようなルールでは、条件部が最も良く満足されるルールのうちの1つが選ばれ、その動作部が実行されるので、

この③は適用されない。

確信度を用いた推論は、通常の推論に確信度を計算する部分を追加するだけですむので、ソフトウェアとして実現するのはそれほど難しくない。したがって、現在のエキスパート・システム構築支援ツールでは、確信度が利用できるのが普通になっている。そして、確信度の計算方法は状況により大きく異なるので、①～③の演算はユーザが自由に定義できるようになっているものが多い。

また、確信度を区間 $[0,1]$ の部分区間に拡張する方法も提案されている⁹⁾。

(2) ファジィ制御における推論

ファジィ制御は、オペレータの経験的な制御知識をファジィ集合を含むルールの形で記述し、ファジィ推論により制御動作を決定する方法である^{10),11)}。

いま、システムの温度を一定に保つのに、目標温度との差 E 、 E の変化量 ΔE 、温度調整のための操作の変化量 ΔU を考えて、

$r1$: if E =ほぼゼロ & ΔE =正で小さい
 then ΔU =負で小さい
 $r2$: if E =ほぼゼロ & ΔE =ほぼゼロ
 then ΔU =ほぼゼロ
 $r3$: if E =負で小さい & ΔE =ほぼゼロ
 then ΔU =正で小さい

のようなルールを作ったとする。ここで、「負で小さい」、「ほぼゼロ」、「正で小さい」は、全体集合 $\{-6, -5, \dots, 0, \dots, 6\}$ におけるファジィ集合で、

負で小さい = NS
 $= \{0.3/-4, 0.7/-3, 1/-2, 0.7/-1, 0.3/0\}$
 ほぼゼロ = ZO
 $= \{0.3/-2, 0.7/-1, 1/0, 0.7/1, 0.3/2\}$
 正で小さい = PS
 $= \{0.3/0, 0.7/1, 1/2, 0.7/3, 0.3/4\}$

とする。

いま、センサから E が -2 で、 ΔE が 1 であると分かったとする。このとき、次のようにして、操作の変化量 ΔU を決める。

① 観測値とルールの各条件との一致度を求める。これは条件のファジィ集合のメンバシップ関数の値とする。いまは、

E	ΔE
$r1: \mu_{ZO}(-2)=0.3, \mu_{PS}(1)=0.7$	
$r2: \mu_{ZO}(-2)=0.3, \mu_{ZO}(1)=0.7$	
$r3: \mu_{NS}(-2)=1, \mu_{ZO}(1)=0.7$	

となる。

② 条件部全体の一致度を求める。これには、普通、min を用いる。いまは、

$$\begin{aligned} r1: \min(0.3, 0.7) &= 0.3 \\ r2: \min(0.3, 0.7) &= 0.3 \\ r3: \min(1, 0.7) &= 0.7 \end{aligned}$$

となる。

③ 条件部全体の一致度により結論のファジィ集合に重み付けをする。いまは、

$$\begin{aligned} r1: \Delta U &= 0.3 \times NS \\ &= 0.3 \times \{0.3/-4, 0.7/-3, 1/-2, 0.7/-1, 0.3/0\} \\ &= \{(0.3 \times 0.3)/-4, (0.3 \times 0.7)/-3, (0.3 \times 1)/-2, (0.3 \times 0.7)/-1, (0.3 \times 0.3)/0\} \\ &= \{0.09/-4, 0.21/-3, 0.3/-2, 0.21/-1, 0.09/0\} \\ r2: \Delta U &= 0.3 \times ZO \\ &= \{0.09/-2, 0.21/-1, 0.3/0, 0.21/1, 0.09/2\} \\ r3: \Delta U &= 0.7 \times PS \\ &= \{0.21/0, 0.49/1, 0.7/2, 0.49/3, 0.21/4\} \end{aligned}$$

となる。なお、この場合に、かけ算の代わりに、min を用いることも多い。

④ 重み付けをした各ルールの結論を結合する。これには、普通、和集合を求める演算を用いる(同じ要素のグレードの max)。いまは、

$$\begin{aligned} &0.3 \times NS \cup 0.3 \times ZO \cup 0.7 \times PS \\ &= \{0.09/-4, 0.21/-3, 0.3/-2, 0.21/-1, \end{aligned}$$

$$0.3/0, 0.49/1, 0.7/2, 0.49/3, 0.21/4\}$$

となる。

⑤ 結合された結論から1つの値を選ぶ。これには、普通、重み付き平均(重心)を求める。いまは、

$$\begin{aligned} & (0.09 \times (-4) + 0.21 \times (-3) + 0.3 \times (-2) \\ & + 0.21 \times (-1) + 0.3 \times 0 + 0.49 \times 1 \\ & + 0.7 \times 2 + 0.49 \times 3 + 0.21 \times 4) \\ & \div \\ & (0.09 + 0.21 + 0.3 + 0.21 + 0.3 \\ & + 0.49 + 0.7 + 0.49 + 0.21) \\ & = 2.4 \div 3 = 0.8 \end{aligned}$$

となる。

したがって、操作の変化量 ΔU は0.8となり、温度調整用のつまみを0.8強くすればよい。

この推論方法は、データにあいまいさはないが、ルール条件と結論に自然な形であいまいさを入れることができる。ただしルール条件や結論はかなり制限された形になっている。我が国では、この推論が広く使われるようになってしまい、「例のファジィ推論法」や「あのファジィ推論法」で通じるようになってしまった。

この方法も、ソフトウェアとしての実現はそれほど難しくなく、かなり高速な処理も可能であり、汎用のファジィ制御用のツールも数社から発売されている。また、ハードウェア化されているのも、この推論方式である。

最近、従来型のエキスパート・システム構築支援ツールにこの形式のファジィ推論を追加したものが発売された¹²⁾。また、C言語にこの形式のファジィ推論を組み込んでいるものもある¹³⁾。

(3) 近似推論

あいまいな意味を持つ単語を含むデータとルールによる推論、

$$\begin{array}{l} \text{データ: } x \text{ はとても大きい} \\ \text{ルール: if } x \text{ が大きい then } y \text{ は小さい} \\ \hline \text{結 果: } y \text{ は?} \end{array}$$

を定式化しようとしても、確信度を使う方法ではまったく対処することができない。Zadehはファジィ集合の概念を用いて、このような推論を近似推論(approximate reasoning)^{※1}として定式化した¹⁴⁾。

上の推論の一般的な形式、

データ: x は A である

ルール: if x が P である then y は Q である

結 果: y は B である

を考える。ここで、 P と A は全体集合 U におけるファジィ集合で、 Q と B は全体集合 V におけるファジィ集合である。このとき、ルールは算術規則、

$$R = (\sim P \times V) \oplus (U \times Q)$$

により、 $U \times V$ 上のファジィ関係に変換される。ここで、 $\sim$ は補集合の演算を、 $\times$ は直積の演算を、 $\oplus$ は限界和の演算を表わす。また、これをメンバシップ関数の形で書くと、

$$\begin{aligned} \mu_R(u, v) &= (1 - \mu_P(u)) \wedge 1 \oplus 1 \wedge \mu_Q(u) \\ &= 1 - \mu_P(u) \oplus \mu_Q(u) \\ &= 1 - \mu_P(u) + \mu_Q(u) \wedge 1 \end{aligned}$$

となる。

このとき、 y に関するファジィ集合 B は

$$\begin{aligned} B &= A \circ R \\ &= \{\max_{u \in U} (\mu_A(u) \wedge \mu_R(u, v)) / v : v \in V\} \end{aligned}$$

により求めることができる。ここで、 $\wedge$ はminを表わす。この演算は、関係の合成の特別な場合になっているので、推論の合成規則(compositional rule of inference)と呼ばれる。

例として、上の近似推論を考えよう。いま、

$$U = V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$$

$$\text{大きい} = \{0.6/4, 1/5\}$$

$$\text{小さい} = \{1/1, 0.6/2\}$$

$$\text{とても大きい} = \{0.3/4, 1/5\}$$

とすると、ルールに対応するファジィ関係は、

注1 近似推論という言葉は、一般的にファジィ推論を表わすときにも使われるが、本稿では、ここで述べる特定のファジィ推論の形式を表わすものとする。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0.4 & 0.4 & 0.4 \\ 1 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

となり、推論の合成規則により、

とても大きい $\circ R$

$= \{1/1, 0.6/2, 0.3/3, 0.3/4, 0.3/5\}$

となる。

この近似推論は、その後、問題点が指摘され、算術規則や推論の合成規則の改良が提案されている^{15),16)}。

この方法は、ファジィ制御における推論法よりも一般的で、データにもルールの条件と結論にもあいまいさを入れることができるが、結論として動作を書くことはできない。

近似推論は、1 段の推論過程としては非常によく研究されているが、ソフトウェアによる実現という観点からみると、あまり進んでいない。それは、ルールの条件の数が多くなったり、ルールがたくさん存在するときに、ファジィ関係を表現するのに非常に多くのメモリを必要とする上に、実行速度が遅いからである。

しかし、最近、この推論方法に基づく System Z-II が作成されている (改良型の推論方法¹⁵⁾が使われている)¹⁷⁾。

(4) その他のファジィ推論法

ファジィ推論をプログラムとして実現しようとすると、インプリメントの事情も手伝って、さらにいくつかの方法が提案されている。

FLOPS (Fuzzy Logic Productuin System) という構文を OPS-5 に合わせたファジィ版のプロダクション・システムがある^{18),19)}。FLOPS では、ルールにファジィ数と簡単なファジィ集合を書くことができ、確信度も付加できる。また、結論として、動作を書くことができる。そして、データと条件との一致度は区間 $[0,1]$ の数値となり、これと確信度を考慮した値がしきい値を越えればそ

のルールが実行の候補となる。そして、ルールの実行は、バックトラックに基づいて 1 つずつ実行する逐次推論と、記憶管理システム (memory maintenance system) を利用して、実行可能なルールをすべて実行する並列推論とがある。

ファジィ・プロダクション・システムもファジィ版のプロダクション・システムである²¹⁾。ファジィ・プロダクション・システムでは、データとルールの結論部に可能性分布を、ルールの条件部にファジィ述語 (ファジィ集合) を書くことができる。さらに、結論部に、動作として Lisp の関数を自由に書くことができ、可能性分布の確信度も付加できる。そして、データと条件との一致度は区間 $[0,1]$ の数値または可能性分布となり、これと確信度を考慮した値が最も大きいルールの結論部が実行される。

さらに、FRIL (Fuzzy Relational Inference Language)²¹⁾ と呼ばれる論理プログラミングとファジィ関係に基づいた言語やファジィ Prolog^{22)~25)} (いくつかあり、あいまいさの取り扱い方もかなり異なる) など提案されている。

4. ファジィ・エキスパート・システム

知識工学の分野では、あるシステムがエキスパート・システムと呼ぶにふさわしいかどうかというような議論が行なわれている。例えば、「エキスパート」・システムと言えるくらい十分に難しい問題を解決しているか、知識ベースや推論機構にどのような知識表現の方法を採用し、それがうまく機能しているか、説明機構は十分であるか、各種インタフェイスは充実しているか、などについて考慮するわけである。しかし、確実な規準があるわけではないので、システムを作った者が勝手にエキスパート・システムと呼んでしまうことも多く、規準はだんだんと緩くなってしまいうのである (このような傾向はエキスパート・システムだけに限らない。新しい技術に付きものの現象のようである²⁶⁾)。

このような状況において、「ファジィ・エキスパ

ート・システムとは何か」という問にきちんと答えるのは難しい。しいて言えば、あいまいさを積極的に利用したエキスパート・システムとでもいえるだろう。

しかし、MYCINは確信度を使っている。MYCINはファジィ・エキスパート・システムと呼んでもよいのだろうか(普通は呼ばない)。ファジィ制御システムはどうであろうか。また、近似推論を使って作った簡単な例題はどうであろうか。ファジィ制御については、ファジィ・エキスパート・システムと呼んでもよいという意見と呼ぶべきではないという意見の両方がある。ファジィ理論の研究者にはファジィ・エキスパート・システムであると考えの人が多く、知識工学の研究者にはエキスパート・システムではないと考える人が多い。例えば、ファジィ理論の研究者が書いた文献¹¹⁾には、「ファジィ制御とは制御のためのエキスパート・システムであるといってよい」とあるが、知識工学の研究者が書いた文献³⁾には、「ファジィ制御はエキスパート・システムか否か賛否両論があるが、著者はエキスパート・システム(すなわち、AIシステム)ではないと考えている」とある(詳しい理由は書いていない)。

結局、あるシステムがファジィ・エキスパート・システムであるかどうかを確定的に決めることなどはできそうにない。知識表現や推論過程やインタフェイスのどの部分に、どのような種類のあいまいさを、どれくらい、どのように使っているかによって、「ファジィ・エキスパート・システムらしさ」が決まると考えるしかないだろう。すなわち、ファジィ・エキスパート・システムである度合いを考えるわけである(つまり、ファジィ・エキスパート・システムというものはファジィ集合となる。同じ議論により、通常のエクスパート・システムもファジィ集合となる)。ただし、ファジィ・エキスパート・システムらしさが低いものをファジィ・エキスパート・システムであると言うのは避けた方がよいだろう。そして、現状では、「ファジィ・エキスパート・システム」らしさは、ファジィ・「エキスパート・システム」らしさより

も「ファジィ」・(エキスパート・)システムらしさで決まっているようである(知識工学の研究者とファジィ理論の研究者とのギャップはこのあたりにあると思われる)。その意味では、「ファジィらしさ」と「エキスパート・システムらしさ」の両方を兼ね備えたものを「ファジィ・エキスパート・システム」と呼ぶのがよいと思われる。

現状では、あいまいさを積極的に利用するには、ファジィ推論を使うことになる。すると、前節で述べたあいまい推論は、どれくらいファジィ推論らしいであろうか(ファジィ推論に対しても、「ファジィ推論らしさ」を考えるわけである)。筆者の意見では、確信度を用いた方法は、それなりのあいまいさを表現しているが、ファジィ推論らしさはかなり低いと思われる。なぜならば、確信度による推論では、データと条件とが完全に一致しなければならないからである。筆者は、ファジィ推論と呼ぶための規準として、少なくとも次のものを提案したい。

[ファジィ推論の規準]知識またはデータ(またはその両方)にファジィ集合が含まれており、知識と等しくないデータからでも、それなりの結果を導くことができる推論形式をファジィ推論と呼ぶ。ただし、知識にもデータにもファジィ集合が含まれていない場合は、同じ推論機構により通常の推論と同じ結果を導き出せる必要がある。

したがって、ルールによる知識表現の場合には、

データ： x は P' である	
ルール：if x が P である	then y は Q である
<hr/>	
結 果： y は Q' である	

のようになり、 P とよく似たデータ P' からは Q とよく似た結果 Q' を導くことができなければならない。ただし、 P' と P と Q とから直接 Q' を導き出す必要はなく、間接的に Q' を導ければよいので、例えば、 P' と P との一致度 c と Q の組み合わせを導ければよい。

したがって、ファジィ制御における推論も近似推論もファジィ推論といえる(近似推論の方がフ

ファジィ制御における推論よりもファジィ推論らしき(大きい)が、確信度を用いた推論はファジィ推論といえない。しかし、現状では、「ファジィ推論」を使ったとか、「ファジィ・エキスパート・システム」であると言っているものでも、確信度しか使っていないものもある。また、あいまいな意味を持つ言葉による表現が可能なので、ファジィ集合を使っているように見えるが、内部の処理は確信度とまったく変わらないものもある。

さて、ファジィ理論とエキスパート・システムに関連した英語の論文集として、文献^{27)~30)}がある。これらには、いくつかのエキスパート・システム(と称するもの)が出ている。これらを列挙すると、人間の顔の復元、医療診断(MEDAS、RDAS、TOXDAS、EMERGE、CADIAC-2、PROTIS、SPHINX)、構造物の信頼性評価(SPERIL-II)、音声認識、石油探査(SPII-2)などがある。かつこの中には、名前の付いているシステムをあげたが、名前の付いていないシステムもある。また、日本語の文献³¹⁾には、「エキスパート・システム」という章があり、バスのダイヤ編成、構造物の信頼性評価、意思決定支援、医療診断への応用について述べられている。また、文献³²⁾では、医療診断支援システム、腕時計デザイン支援システム、証券投資支援システムが紹介されている。

これらを見ても、どのようなあいまいさを、どの部分に、どれくらい、どのように使っているかについてはさまざまであり、確信度とほとんど変わらないもの、確信度を拡張したもの、最後の判定の部分でファジィ集合を使っているもの、ファジィ集合を含むルールによるもの(これにもいろいろある)などがある。また、ファジィ推論の方法もさまざまである。

もっとも、あいまいさが多ければ多いほど、良いというものではない。不必要なあいまいさは正しい解を隠してしまい、計算時間を増大させるだけである。解いている問題に合わせて、適切な部分に適切なあいまいさをうまく導入する必要がある。そうすれば、

- ① いままで表現できなかった知識をうまく表現できる
- ② 知識の量を減らすことができ、結局、速度の向上につながる
- ③ 本来、対象としていなかった入力に対しても対処できる

などという長所を生かすことができる。

現在のところ、実用化されているものは、ファジィ制御システムを除いてほとんどない。今後、「ファジィ」「エキスパート・システム」構築支援ツール(「ファジィ」にも「エキスパート・システム」にも強調がある)に関する研究が、非常に重要である。現在、ファジィ・エキスパート・システム構築支援ツールは、ほんの研究段階のものしか存在していない。

ファジィ・エキスパート・システム構築支援ツールが普及して、多くのファジィ・エキスパート・システムが作成されるようになると、実用化されるシステムも増加していくものと思われる。また、通常のエクスパート・システムの中には、少しファジィ化することにより、実用レベルに達するものもあると思われる。

また、知識表現の方法としては、現在、ルールに基づく方法が主流であるが、知識工学ではいろいろな表現法が使われている。ルール以外のファジィ知識の表現に関する研究を進める必要がある。この意味で、複数の知識表現法を提供する第2世代ファジィ・エキスパート・システム構築支援ツールの開発も重要な研究テーマである(ファジィ的にも、1段上に上がる必要がある?)。通常のエクスパート・システムが歩んだ道、または今後歩む道はファジィ・エキスパート・システムの研究にとって、大きな指針になると思われる。

5. おわりに

以上、まず、通常のエクスパート・システムについてまとめ、ファジィ推論法について述べた後、ファジィ・エキスパート・システムについて考察した。

ファジィ・エキスパート・システムの研究は、まだ、端緒についたばかりで、これから研究していかなければならないことがたくさんある。本稿がファジィ・エキスパート・システムの研究の発展に役立てば幸いである。

参 考 文 献

- 1) D. A. Waterman(1986) : A Guide to Expert Systems, Addison-Wesley(Reading, Mass., USA).
- 2) 溝口(1986) : 「エキスパート・システムの基礎、現状、動向、将来」、日経データプロ(編) : エキスパート・システム — 理論と応用、日経マグローヒル、pp.17-87.
- 3) 上野(1987) : 「エキスパート・システム概論」、情報処理、Vol.28、pp.147-157.
- 4) L. A. Zadeh(1983) : “The Role of Fuzzy Logic in the Management of Uncertainty in Expert Systems,” Fuzzy Sets and Systems, Vol.11, pp. 199-227.
- 5) 新田(1987) : 「エキスパート・システムにおける知識表現と推論」、情報処理、Vol.28、pp.158-166.
- 6) B. Buchanan, G. Sutherland and E.A. Feigenbaum(1969) : “Heuristic DENDRAL : A Program for Generating Explanatory Hypotheses in Organic Chemistry,” in Machine Intelligence 4, American Elsevier(New York, USA), pp.209-254.
- 7) B. Buchanan and E.H. Shortliffe(eds.) (1984) : Rule-Based Expert Systems-The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project, Addison-Wesley(Reading, Mass., USA).
- 8) P.H. Winston (1984) : Artificial Intelligence — Second Edition, Addison-Wesley(Reading, Mass., USA).
- 9) L. Appelbaum and E.H. Ruspini(1985) : “ARIES : An Approximate Reasoning Inference Engine,” in M.M. Gupta, A. Kandel, W. Bandler and J.B. Kiszka(eds.) : Approximate Reasoning in Expert Systems, North-Holland (Amsterdam, the Netherlands), pp.745-765.
- 10) E. H. Mamdani and S. Assilian(1974) : “An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller,” International Journal of Man-Machine Studies, Vol.7, pp.1-13.
- 11) 菅野(1988) : ファジィ制御、日刊工業新聞社。
- 12) 染谷、安信(1990) : エキスパートシステム構築ツール ES/KERNEL/W のファジィ推論、日本ファジィ学会誌、Vol.2、No.2(本号)。
- 13) J. Teichrow, E. Horstkotte and M. Togai (1989) : “The Fuzzy-C Compiler : A Software Tool for Producing Portable Fuzzy Expert Systems,” Proceedings of Third International Fuzzy Systems Association(IFSA)Congress (Seattle, Washington, USA), pp.708-711.
- 14) L. A. Zadeh(1975) : “The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning,” Information Sciences, Vol.8, pp.199-248 ; Vol.8, pp.301-357 ; Vol.9, pp.43-80.
- 15) M. Mizumoto, S. Fukami, K.Tanaka(1979) : “Some Methods of Fuzzy Reasoning,” in M. M.Gupta, R.K. Ragade and R.R. Yager(eds.) : Advances in Fuzzy Set Theory and Applications, North-Holland(Amsterdam, The Netherlands), pp.117-136.
- 16) M. Mizumoto (1982) : “Fuzzy Conditional Inference under Max $\odot$ Composition,” Information Sciences, Vol.27, pp.183-209.
- 17) K. S. Leung and W. Lam(1988) : “Fuzzy Concepts in Expert Systems,” IEEE Computer, Vol. 21, No.9, pp.43-56.
- 18) J. Buckley, W. Siler and D. Tucker(1986) : “FLOPS, A Fuzzy Expert System : Applications and Perspectives,” in H. Prade and C.V. Negoita(eds.) : Fuzzy Logic in Knowledge Engineering, Verlag TÜV Rheinland(Köln, West Germany), pp.256-274.
- 19) W. Siler, D. Tucker and J. Buckley(1987) : “A Parallel Rule Firing Fuzzy Production System with Resolution of Memory Conflicts by Weak Fuzzy Monotonicity, Applied to the Classification of Multiple Objects Characterized by Multiple Uncertain Feature,” International Journal of Man-Machine Studies, Vol.26, pp. 321-332.
- 20) 馬野(1988) : 「ファジィ・プロダクション・システムとその実現」、計測自動制御学会 関西支部シンポジウム「あいまい情報処理と知的システム制

- 御」(1988年9月21-22日)、pp.75-80.
- 21) J.F. Baldwin (1984): "FRIL——A Fuzzy Relational Inference Language," Fuzzy Sets and Systems, Vol.14, pp.155-174.
 - 22) 金井、石塚(1986):「Prolog-ELF: ファジィ論理を組み込んだ Prolog」、情報処理学会論文誌、Vol. 27、No.4、pp.411-416.
 - 23) T.P. Martin, J.F. Baldwin and B.W. Pilsworth (1987): "The Implementation of FPROLOG — A Fuzzy Prolog Interpreter," Fuzzy Sets and Systems, Vol.23, pp.119-129.
 - 24) 馬野(1987):「ファジィ集合の概念を用いた FS-Prolog について」、電子通信学会技術研究報告、Vol.86、No.345、pp.87-95、COMP86-81(コンピュータ・システム研究会)。
 - 25) 向殿(1988):「Fuzzy PROLOG とは何か」、Computer Today、No.25(1988年5月号)、pp.41-46.
 - 26) 林、北郷、星野(1989):特集 欠陥品だらけのリレーショナル・データベース、日経バイト、第70号(1990年4月号)、pp.266-326.
 - 27) M.M. Gupta, A. Kandel, W. Bandler and J.B. Kiszka (eds.) (1985): Approximate Reasoning in Expert Systems, North-Holland (Amsterdam, the Netherlands).
 - 28) H. Prade and C.V. Negoita (eds.) (1986): Fuzzy Logic in Knowledge Engineering, Interdisciplinary Systems Research 86, Verlag TÜV Rheinland (Köln, West Germany).
 - 29) E. Sanchez and L.A. Zadeh (eds.) (1987): Approximate Reasoning in Intelligent Systems, Decision and Control, Pergamon Press (Oxford, UK).
 - 30) H.-J. Zimmermann (1987): Fuzzy Sets, Decision Making, and Expert Systems, International Series in Management Science / Operations Research, Kluwer Academic Publishers (Boston, Massachusetts, USA).
 - 31) 寺野、浅居、菅野(編)(1989): 応用ファジィシステム入門、オーム社。
 - 32) 吉田(1989):「実用化に動き出したファジィ推論搭載のエキスパート・システム」、日経コンピュータ、1989年2月27日号 (No.194)、pp.103-112.

(1990年4月15日 受付)

[問い合わせ先]

〒567 茨木市美穂ヶ丘 5-1

大阪大学 大型計算機センター

TEL: 06-877-5111 (内線)2834

FAX: 06-876-3542

JUNET: umano@center.osaka-u.ac.jp

著者紹介

馬野元秀 (うまの もとひで)

大阪大学 大型計算機センター

1974年、大阪大学 基礎工学部 情報工学科卒業。1979年、同大学院 後期課程修了。工学博士。同年、岡山理科大学 理学部 応用数学科 講師。1985年、大阪大学 大型計算機センター 助手。その後、講師を経て、現在、同大学 助教授。ファジィ集合論の応用、特に、プログラミング言語、データベース、知識情報処理への応用に関する研究に従事。情報処理学会、電子情報通信学会、日本ソフトウェア科学会、人工知能学会、システム制御情報学会、ACM (Association for Computing Machinery)、IFSA 各会員。