

|||||  
**入門講座** ファジィ理論入門 ⑧  
 |||||

# ファジィ推論(1)<sup>†</sup>

水本 雅晴\*

## 1. はじめに

われわれは、日頃「夕焼けならば明日は晴れる」「スピードの速い車は危険である」「高熱が何日も続けば肺炎の可能性がかなり高い」といった「…ならば…である」といった形の知識をもとに「今日はきれいな夕焼けだから、明日は快晴だろう」といった推論を行っています。このように「推論」というのは、いま知られているいくつかの事実から何らかの新しい事実をみいだすことをいいます。

このような日頃行っている推論はファジィ集合を用いて表すことが可能であって、これを“ファジィ推論”と呼んでいます。ファジィ推論はファジィ制御、ファジィエキスパートシステム、ファジィ意思決定などにおいて非常に重要な役割を果たしています。もしファジィ推論の考え方がなかったとしたら、今日のファジィの隆盛および実用化は考えられなかったことでしょう。

ご存知のように、ファジィ制御はファジィ推論を応用したものでありますが、簡単にいって、熟練したオペレータがもっている「温度が高い」「圧力がかなり低い」というような情報をファジィ集合により表現し、「温度が高く、温度変化がかなり大きく、圧力が高ければ、バルブを大きく開く」といった判断・操作方法をファジィ規則の形で記述し、ファジィ推論をおこない、熟練オペレータ

と同じような巧妙な制御をコンピュータで実現しようとするものであります。

このようにファジィ推論はファジィ制御に非常に重要な役割を果たしていますが、ファジィ制御で使用されているファジィ推論法はごく限られたものであり、他にも数多くのファジィ推論が提唱されています。今回は、ファジィ制御で使用されているファジィ推論法に的をしぼり、次回ではそれ以外のファジィ推論法を紹介することにしましょう。

## 2. ファジィ推論とは

まず、コンピュータや論理学で使用されている推論(記号推論)から始めてみましょう。有名な推論の例として

規則：人間は死ぬ  
 事実：孔子は人間である (1)  
 結論：孔子は死ぬ

があります。ここでの推論方法は、最初の2つの文の「人間」という共通項を媒介として、孔子は「死ぬ」という結論を導き出すものであります。「人間は死ぬ」という言い方をもう少し正確に記しますと、「もし $x$ が人間であれば、 $x$ は死ぬ」となります。これは「 $A(x$ が人間である)ならば、 $B(x$ は死ぬ)である」と表わせます。そこで先の推論を書き直してみますと

規則： $A$ ならば $B$ である  
 事実： $A$ である (2)  
 結論： $B$ である

<sup>†</sup> Fuzzy Reasoning (1)

\* Masaharu MIZUMOTO

大阪電気通信大学 経営工学科

Department of Management Engineering, Osaka Electro-Communication University

のようになります。この推論は、「 $A$ ならば $B$ である」の“ $A$ ”と「 $A$ である」の“ $A$ ”とが一致しているから、結論として「 $B$ である」を得ようというものであり、これが2値論理に基づいた推論の本質であるといえます。この推論においては $A$ や $B$ の中身はどんなものでもよく、記号でもよいことがわかります。この意味から、この推論は**記号推論**と呼ばれ、コンピュータによる推論はこの記号推論に基づいています。

一方、われわれが行っている推論はどうでしょうか。たとえば

$$\begin{array}{l} \text{規則：健康な人は長生きする} \\ \text{事実：孔子は非常に健康である} \end{array} \quad (3)$$


---

結論：孔子はかなり長生きするだろう

といったものがあります。このような推論は人間には簡単にできますが、2値論理に基づいた記号推論、いかにすればコンピュータで行わせることは極めて困難であることがわかります。実際、「健康」と「非常に健康」とは記号的に一致していませんから、先ほど述べた記号推論では結論が得られないのです。でも、われわれ人間ならば「健康」と「非常に健康」との“意味”を考えて、意味的にどのように似かよっているかを判断して、孔子は「かなり長生きするだろう」といった結論を下すことができるのです。

このような推論の例としては他にも

$$\begin{array}{l} \text{規則：もし車のスピードが速ければ、その車は} \\ \quad \text{危険である。} \\ \text{事実：あの赤の車のスピードはすごく速い} \end{array}$$


---

結論：あの赤の車は非常に危険である  
とか

$$\begin{array}{l} \text{規則：もしトマトが赤ければ、熟している} \\ \text{事実：このトマトは少し赤い} \end{array}$$


---

結論：このトマトはやや熟している

といったものがあります。

人間が行っているこのような日常的推論をファジィ集合を用いて模擬することが可能であり、これを**ファジィ推論**と呼んでいます。

上の例の推論形式を定式化してみますと

$$\begin{array}{l} \text{規則：If } x \text{ is } A \text{ then } y \text{ is } B \\ \text{事実： } x \text{ is } A' \end{array} \quad (4)$$


---

結論：  $y \text{ is } B'$

のようになります。ここで、 $A, A', B, B'$ はファジィ概念であり、それぞれ全体集合 $X, X, Y, Y$ におけるファジィ集合で表されるものとします。

このファジィ推論形式を簡単に

$$\begin{array}{l} \text{規則： } A \Rightarrow B \\ \text{事実： } A' \end{array} \quad (5)$$


---

結論：  $B'$

と表すことにしましょう。

ファジィ推論は、記号推論の場合と違って、先ほどの例からもわかるように、 $A$ と $A'$ は必ずしも一致していなくてもよいところに特徴があります。もし $A' = A$ のときに $B' = B$ となれば、すなわち

$$\begin{array}{l} \text{規則： } A \Rightarrow B \\ \text{事実： } A \end{array} \quad (\text{分離規則}) \quad (6)$$


---

結論：  $B$

であれば、式(2)の記号推論の場合と一致します。ちなみに、式(6)のことを**分離規則(modus ponens)**といいます。

式(5)のファジィ規則 $A \Rightarrow B$ はファジィ条件文であり、そのメンバーシップ関数は含意規則 $a \rightarrow b$ を用いて

$$\mu_{A \Rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) \rightarrow \mu_B(y) \quad (7)$$

と与えられます。すなわち、ファジィ規則 $A \Rightarrow B$ はファジィ関係となっています。すると式(5)の結論 $B'$ は、ファジィ集合 $A'$ とファジィ関係 $A \Rightarrow B$ との合成(max-min合成)“ $\circ$ ”を行うことによって得られます。このことを**推論の合成規則**とよんでいます。すなわち

$$B' = A' \circ (A \Rightarrow B) \quad (8)$$

のように与えられます。これをメンバーシップ関数の形で書くと

$$\mu_{B'}(y) = \bigvee_x \{ \mu_{A'}(x) \wedge [\mu_A(x) \rightarrow \mu_B(y)] \} \quad (9)$$

のようになります(図1)。ここで、 $\bigvee = \max$ 、 $\wedge = \min$ を表します。

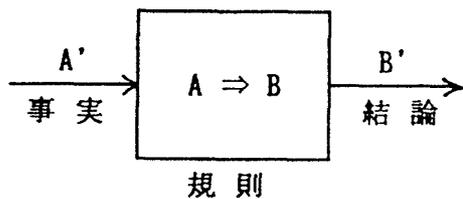


図1  $A' \circ (A \Rightarrow B) = B'$ の説明図

式(7)を表す含意規則  $a \rightarrow b$  は数多く提案されていますが、これについては次回に譲りましょう。ここでは、ファジィ制御やファジィエキスパートシステムで使用されているmamダニ(E. Mamdani、ロンドン大学教授、ファジィ制御の提唱者)の方法について説明しましょう。

### 3. マムダニのファジィ推論法

mamダニのファジィ推論法では、含意規則として

$$a \rightarrow b = a \wedge b \quad (10)$$

を採用しています。すると結論  $B'$  は式(9)より

$$\mu_{B'}(y) = \bigvee_x \{ \mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) \} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} &= \bigvee_x \{ \mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x) \} \wedge \mu_B(y) \\ &= @ \wedge \mu_B(y) \end{aligned} \quad (12)$$

のようになります(図2参照)。ここで

$$@ = \bigvee_x \{ \mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x) \} \quad (13)$$

であります。図2からわかるように、 $@$ はファジィ集合  $A'$  と  $A$  の交わりの高さとなっていますが、 $A'$  と  $A$  がどの程度一致しているかを示す“一致度”を表しているといえます。結論  $B'$  はこの一致度  $@$  と  $\mu_B(y)$  との  $\min(\wedge)$  を取ることによって得られます。たとえば、 $A'$  と  $A$  の一致度  $@$  が 0.8 であれば、 $B$  の高さ 0.8 までの部分を結論  $B'$  としようとするものであります。この方法は  $@$  によって  $B$  の頭をカットしていることから、“頭切り法”と呼ばれることがあります。

このファジィ推論法では、2値論理における記号推論のように  $A'$  と  $A$  が完全に一致しているか否かの場合だけでなく、 $A$  と  $A'$  が一致している程度に応じて、 $B$  とほどほどに一致した結論  $B'$  が導けるところに特徴があります。

もし  $A' = A$  であるとすれば、 $@ = 1$  となり  $B' = B$  となることがわかり、式(6)の分離規則を満たしていることがうなずけます。逆に、 $A'$  と  $A$  が完全に離れている場合には  $@ = 0$  となり  $B' = \emptyset$  (空集合) となることがわかります。このように  $A'$  と  $A$  が離れていく ( $@$  が小さくなる) につれて、 $B'$  の背が低くなっていくことがわかります。この場合、 $A'$  が  $A$  から横方向に離れていくにつれて、 $B'$  は  $B$  と縦方向に離れていっていることに注意してください。

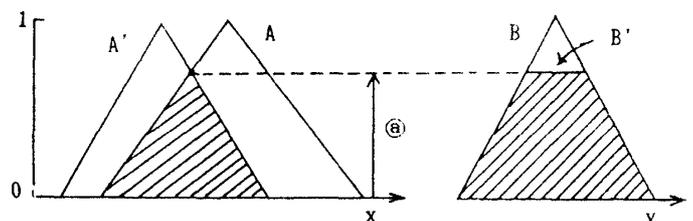


図2  $A'$  と  $A \Rightarrow B$  からの推論結果  $B'$

ところで、ファジィ制御の議論では、 $A'$  はファジィ集合ではなく、確定した値(たとえば、偏差や偏差の変化分といった観測値)とする場合が多くあります。では、 $A'$  が確定した値  $x_0$  であった場合、

$$\begin{array}{l} \text{規則： } A \Rightarrow B \\ \text{事実： } x_0 \\ \hline \text{結論： } B' \end{array} \quad (14)$$

の結論  $B'$  はどのようなになるでしょうか。

$A' = x_0$  である場合、 $x \neq x_0$  に対して

$$\mu_{A'}(x) = 0, \quad \mu_{A'}(x_0) = 1$$

となることに注意してください。すると、結論  $B'$  は式(11)より

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \bigvee_{x \neq x_0} \{0 \wedge \mu_A(x) \wedge \mu_B(y)\} \\ &\quad \bigvee \{1 \wedge \mu_A(x_0) \wedge \mu_B(y)\} \\ &= \mu_A(x_0) \wedge \mu_B(y) \end{aligned} \quad (15)$$

のようにきわめて簡単に与えられます(図3参照)。これは図2において  $A'$  を限りなく細くした場合に相当し、 $@ = \mu_A(x_0)$  となっていることがわかります。

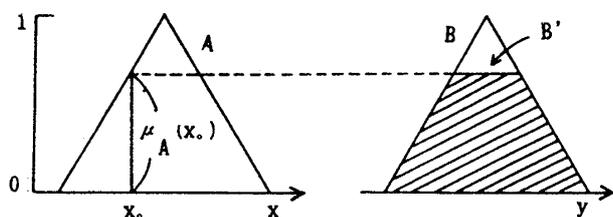


図3  $x_0$  と  $A \Rightarrow B$  からの推論結果  $B'$

【参考】 図3からもわかるように推論結果  $B'$  は  $B$  の頭切りをすることによって得られます。これは式(15)で  $\wedge (= \min)$  を使用しているからです。 $\wedge$  の代わりに他の積演算を用いることも可能です。たとえば

代数積:  $a \cdot b = ab$

限界積:  $a \odot b = 0 \vee (a + b - 1)$

$$\text{激烈積: } a \wedge b = \begin{cases} a \cdots b = 1 \\ b \cdots a = 1 \\ 0 \cdots a, b < 1 \end{cases}$$

といった積演算を式(15)で使用しますと、推論結果  $B'$  は図4のようなものとなります。通常は  $\min$

を使った頭切り法がよく使用されますが、最近では代数積を使った場合も見受けられます。

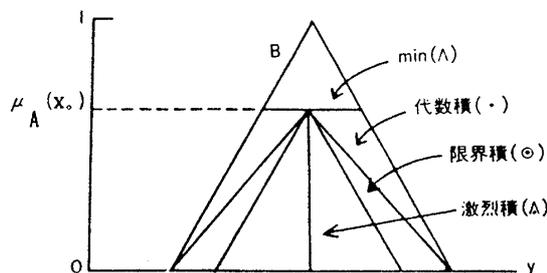


図4 種々の積演算による推論結果  $B'$

次に、式(5)で述べてきた簡単な形のファジィ推論形式を一般化し、条件部(前件部ともいいます)が  $\text{and}$  で結ばれているようなファジィ規則が複数個あるつぎのような**多重ファジィ推論**を考えてみましょう。このファジィ推論形式はファジィ制御、ファジィエキスパートシステムなどで最もよく使用されているものです。

$$\begin{array}{l} \text{規則 1 : } A_1 \text{ and } B_1 \Rightarrow C_1 \\ \text{規則 2 : } A_2 \text{ and } B_2 \Rightarrow C_2 \\ \dots\dots\dots \\ \text{規則 } n : A_n \text{ and } B_n \Rightarrow C_n \\ \text{事実 : } x_0 \text{ and } y_0 \\ \hline \text{結論 : } C' \end{array} \quad (16)$$

ここで、 $A_i$  は集合  $X$  での、 $B_i$  は  $Y$  での、 $C_i$  は  $Z$  でのファジィ集合であり、 $x_0, y_0$  はそれぞれ  $X, Y$  の要素であるとして。

事実「 $x_0$  and  $y_0$ 」とファジィ規則「 $A_i$  and  $B_i \Rightarrow C_i$ 」( $i=1, \dots, n$ )から得られる推論結果  $C'_i$  は式(15)の類推から

$$\mu_{C'_i}(z) = \mu_{A_i}(x_0) \wedge \mu_{B_i}(y_0) \wedge \mu_{C_i}(z) \quad (17)$$

と与えられます。すると、式(16)の最終的な結論  $C'$  は、各ファジィ規則からの推論結果  $C'_i$  ( $i=1, \dots, n$ )の結び( $\cup$ )をとることによって得られます。すなわち、

$$\begin{aligned} C' &= C'_1 \cup C'_2 \cup \dots \cup C'_n \\ \mu_{C'}(z) &= \mu_{C'_1}(z) \vee \dots \vee \mu_{C'_n}(z) \end{aligned} \quad (18)$$

となります。ここで、 $\vee = \max$  を表します。

結論  $C'$  はファジィ集合の形で与えられますが、ファジィ制御では確定した指令(操作量や操作量の変化分)を機械に与える必要があるため、 $C'$  の代表点を求めることがあります。この代表点  $z_0$  を求めることを非ファジィ化といいます。次の重心法がよく使われています。

$$z_0 = \frac{\sum z_i \cdot \mu_{C'}(z_i)}{\sum \mu_{C'}(z_i)} \quad (19)$$

このファジィ推論法は  $x_0$  と  $y_0$  が与えられてから  $z_0$  を求めるまでに、まず式(17)で  $\min (= \wedge)$  を、式(18)で  $\max (= \vee)$  を、そして式(19)の重心法で代表点  $z_0$  を求めていることから **min-max-重心法** と呼ばれることがあります(図5参照)。

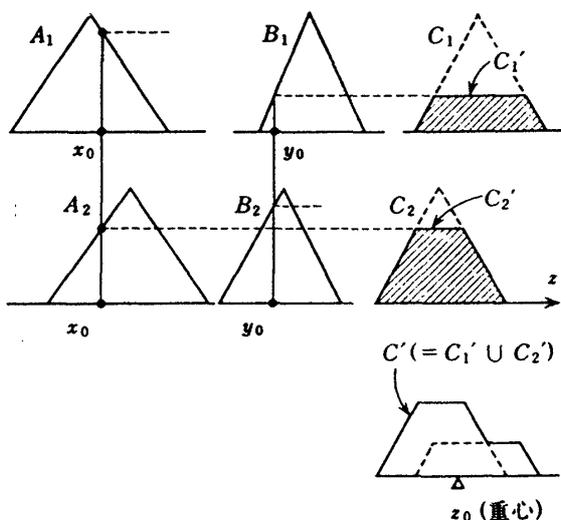


図5 min-max-重心法によるファジィ推論

つぎに簡単なファジィ推論の例を与えてみましょう。

【例】今、車を運転している場面を想像してください。先行車との衝突をさけるためにわれわれもっている思考や判断は「車間距離が24 mで、スピードが毎時78 kmであるならば、83度の角度でブレーキを踏む」などといった正確な形ではなく、「車間距離が小さくて、スピードが速いならば、ブレーキをかなり強く踏む」といった大ざっぱな

形でおこなっています。このようなファジィ規則に対するファジィ推論をみてみましょう。

規則1：車間距離が小さく、スピードが速い  
 $\Rightarrow$ ブレーキ力を強く

規則2：車間距離が大きく、スピードが遅い  
 $\Rightarrow$ ブレーキ力を弱く

ここで、波線の言葉はファジィ集合で表され、ファジィ規則は図6のようになります。

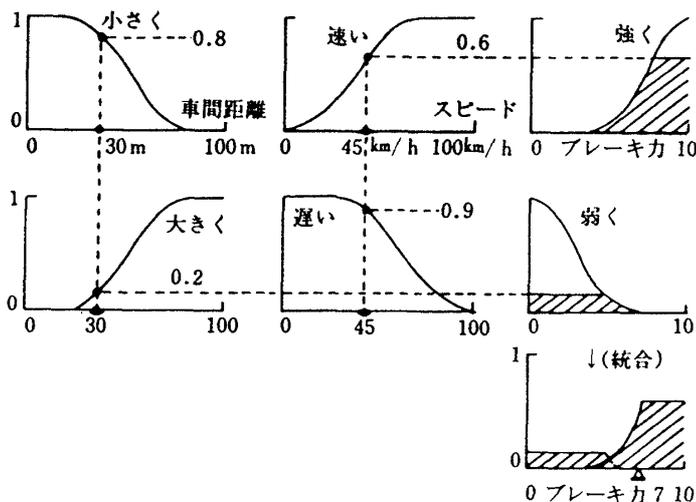


図6 先行車と衝突しないようにブレーキをかける場合のファジィ推論

いま、先行車との距離が30 mで、スピードが毎時45 kmであった場合のブレーキ力をファジィ推論で求めてみますと以下ようになります。

図6の規則1において、まず、車間距離30 mとファジィ集合「小さく」との適合度0.8と、スピード45 kmと「速い」との適合度0.6を求めます。0.8と0.6の小さい方の値0.6によってブレーキ力「強く」の頭切りを行います(斜線部分)。すなわち、車間距離が「小さく」て“かつ”スピードが「速い」というように **and** の関係になっていることから適合度0.8と0.6の小さい方(min)の値0.6を採用し、この小さい方の値0.6とブレーキ力「強く」との **min** を取ることにより「強く」の頭切りを行おうとするものです。この場合、適合度が1に近いと、「強く」の頭切りが少しだけ行われ、ブレーキ力「強く」の影響力が強く残ることになります。逆に、適合度が小さいと、頭切りが

大きく行われ、ブレーキ力「強く」の影響力が小さくなることが想像できます。

規則2では、ブレーキ力「弱く」の頭切りを行います。この例では適合度が0.2と小さいために「弱く」の頭切りが大きく行われ、ブレーキ力「弱く」の影響力が少なくなっていることがわかります。

以上のことより、ブレーキ力を「強く」しようという影響力（「意見の強さ」と考えてもよいでしょう）が強いですが、「弱く」という影響力も少しあることから、両者の影響力（意見）を統合するという意味で斜線部分の重ね合わせを行います。その重ね合わせの結果の代表値として、その重心値（バランス点）を求め、その重心値を実際のブレーキ力としようとするものです。すなわち、車間距離が30mで、スピードが毎時45kmのときにはブレーキ力を7にすることを表しています。同様な方法で、他の車間距離やスピードに対してもブレーキ力を求めることができることがわかるといえます。

以上述べてきたファジィ推論法は、数多くのファジィ制御用のソフトウェアツールやハードウェアに搭載されています。しかし、演算として非線形性の強い演算 min や max を使っていることから、このマムダニの min-max-重心法は必ずしも直感に合った方法ではないことが指摘されています。そこで、min のところを掛算に、max のところを足算に置き換えた「代数積-加算-重心法」や、後件部を定数や関数にした簡略化推論法、関数型推論法などが提案されています。

次に、今後ファジィ制御法の主流となると思われる簡略化推論法について述べてみましょう。

### 4. 簡略化推論法

式(16)の多重ファジィ推論形式において、後件部の  $C_i$  がファジィ集合でなく定数  $z_i$  であるようなファジィ推論形式

$$\begin{array}{l}
 \text{規則 1 : } A_1 \text{ and } B_1 \Rightarrow z_1 \\
 \dots\dots\dots \\
 \text{規則 } n : A_n \text{ and } B_n \Rightarrow z_n \\
 \text{事実 : } x_0 \text{ and } y_0 \\
 \hline
 \text{結論 : } z_0
 \end{array}
 \tag{20}$$

に対する簡略化推論法を見てみましょう。

結論  $z_0$  はつぎのようにして求められます(図7参照)。事実「 $x_0$  and  $y_0$ 」と各規則の前件部「 $A_i$  and  $B_i$ 」との適合度は、掛算・を使って

$$h_i = \mu_{A_i}(x_0) \cdot \mu_{B_i}(y_0) \tag{21}$$

と与えられます(この場合、min を使うことも可能です)。この適合度  $h_i$  は、 $x_0, y_0$  が与えられたときに、 $z_i$  が得られる度合を表しているものといえます。各規則から確定値  $z_1, z_2, \dots, z_n$  が得られる度合が  $h_1, h_2, \dots, h_n$  であることから、最終的な結論  $z_0$  はこれら  $z_1, \dots, z_n$  を適合度  $h_1, \dots, h_n$  で荷重平均することにより得られます。すなわち

$$z_0 = \frac{h_1 z_1 + h_2 z_2 + \dots + h_n z_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n} \tag{22}$$

と与えられます。

この方法では、頭切りや統合といった操作を踏まずに結論  $z_0$  が求まりますので、処理速度が格段に早くなるだけでなく、後件部が定数であるので

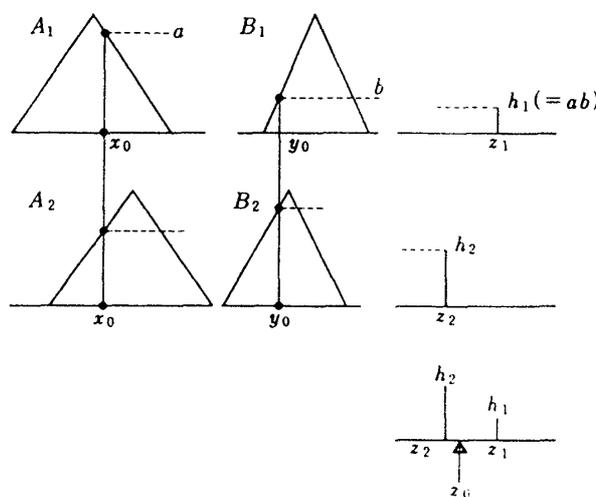


図7 簡略化推論法によるファジィ推論

ファジィ集合の形状を気にする必要がなくなります。

簡略化推論法では後件部が定数  $z_i$  でありましたが、これを一般化して関数値  $f_i(x,y)$  にしたのが関数型推論法であります。

簡略化推論法の適用例の1つとして、PID制御の実現を示してみましよう。

よく知られているように、PID制御の操作量  $u$  は、偏差  $e$ 、偏差の変化分  $\Delta e$  および偏差  $e$  の積分値  $\int edt$  の線形結合で表現されます。すなわち

$$u = \alpha e + \beta \Delta e + \gamma \int edt \quad (23)$$

となります。ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  は係数です。

簡単な場合として、PD制御

$$u = \alpha e + \beta \Delta e \quad (24)$$

が簡略化推論法によって実現されることを示してみましよう。

偏差  $e$  の取り得る範囲の最小値を  $e_1$ 、最大値を  $e_2$  とします。同様に、偏差の変化分  $\Delta e$  の最小値を  $\Delta e_1$ 、最大値を  $\Delta e_2$  とします。すなわち

$$e_1 \leq e \leq e_2, \quad \Delta e_1 \leq \Delta e \leq \Delta e_2 \quad (25)$$

とします。これより、 $e_1$  と  $e_2$  を両端とする偏差  $e$  に対するファジィ集合  $e_1$ 、 $e_2$  を図8のように与え、ファジィ集合  $\underline{\Delta e_1}$ 、 $\underline{\Delta e_2}$  も同様に与えます。

すると、PD制御を実現するためのファジィ規則はつぎのようになります。

$$\begin{aligned} \text{規則 1 : } & \underline{e_1} \text{ and } \underline{\Delta e_1} \Rightarrow u_1 \\ \text{規則 2 : } & \underline{e_1} \text{ and } \underline{\Delta e_2} \Rightarrow u_2 \\ \text{規則 3 : } & \underline{e_2} \text{ and } \underline{\Delta e_1} \Rightarrow u_3 \\ \text{規則 4 : } & \underline{e_2} \text{ and } \underline{\Delta e_2} \Rightarrow u_4 \end{aligned} \quad (26)$$

ここで、 $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$ 、 $u_4$  は各点  $(e_1, \Delta e_1)$ 、 $(e_1, \Delta e_2)$ 、 $(e_2, \Delta e_1)$ 、 $(e_2, \Delta e_2)$  での式(24)の値であり、

$$\begin{aligned} u_1 &= \alpha e_1 + \beta \Delta e_1 \\ u_2 &= \alpha e_1 + \beta \Delta e_2 \\ u_3 &= \alpha e_2 + \beta \Delta e_1 \\ u_4 &= \alpha e_2 + \beta \Delta e_2 \end{aligned} \quad (27)$$

のようになります。

これより、偏差  $e$  および偏差の変化分  $\Delta e$  が与えられた時の結論(すなわち、操作量)  $u$  の求め方を図示しますと図9のようになります。すなわち、結論  $u$  は式(22)より

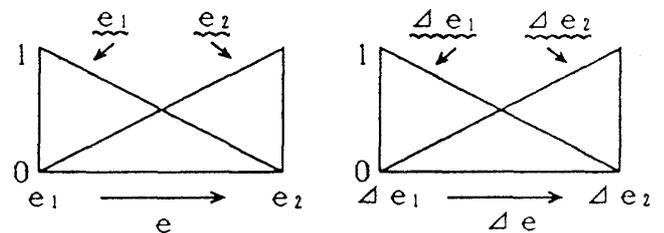
$$\begin{aligned} u &= \\ & \frac{abu_1 + a(1-b)u_2 + (1-a)bu_3 + (1-a)(1-b)u_4}{ab + a(1-b) + (1-a)b + (1-a)(1-b)} \\ & = abu_1 + a(1-b)u_2 + (1-a)bu_3 \\ & \quad + (1-a)(1-b)u_4 \end{aligned} \quad (28)$$

のように与えられます。ここで、分母=1となっていることに注意してください。なお、 $a, b$  は図8より

$$a = \mu_{\underline{e_1}}(e) = \frac{e_2 - e}{e_2 - e_1} \quad (29)$$

$$b = \mu_{\underline{\Delta e_1}}(\Delta e) = \frac{\Delta e_2 - \Delta e}{\Delta e_2 - \Delta e_1} \quad (30)$$

となっています。



(a) 偏差  $e$  の場合 (b)  $e$  の変化分  $\Delta e$  の場合

図8 偏差  $e$ 、偏差の変化分  $\Delta e$  に対するファジィ集合

ところで、式(27)で与えた後件部の定数  $u_1, u_2, u_3, u_4$  は格子点  $(e_1, \Delta e_1), (e_1, \Delta e_2), (e_2, \Delta e_1), (e_2, \Delta e_2)$  での高さと考えられますが、同一平面上にあることがわかります。したがって、 $u_1, u_2, u_3, u_4$  が同一平面上にあることに注意して、式(28)に式(27), (29), (30)を代入しますと

$$u = \text{式(28)} = \alpha e + \beta \Delta e \quad (31)$$

が得られます。すなわち、式(24)のPD式が得られ、PD制御が構成できることがわかります(図10(a)参照)。

同様な方法で、PID制御も実現できます。この場合、偏差  $e$  の積分値  $\int edt$  に対するファジィ集合を図8のように定めることになり、結局8個のファジィ規則でPID制御を構成することができます。

以上のことから簡略化推論法によってPID制御が実現されることがわかります。つまり、PID制御はファジィ制御の特別の場合であることがわかったと思います。

**【参考】**式(26)の後件部をファジィ化して  $u_1, u_2, u_3, u_4$  とすると、min-max-重心法を適用することが可能となります。この場合の推論結果を図示しますと図10(b)のような曲面となり、線形でない(すなわち平面でない)ことがわかります。このことから、min-max-重心法によってはPD制御(一般的にはPID制御)は実現できないことがうなずけます。

以上のことから、簡略化推論法においては前件部のメンバーシップ関数の形が図8のような三角型であり、後件部の値が同一平面上にあれば、推論結果は線形になる(つまり同一平面上にある)ことがわかります。しかし、min-max-重心法の推論結果は常に非線形な結果であり線形になることはありません。それもかなり複雑な式で表さなければなりません。たとえば図10(b)は分数式で表されますが、煩雑な場合分けが必要で、分子とも  $e$  と  $\Delta e$  の双2次式になります。

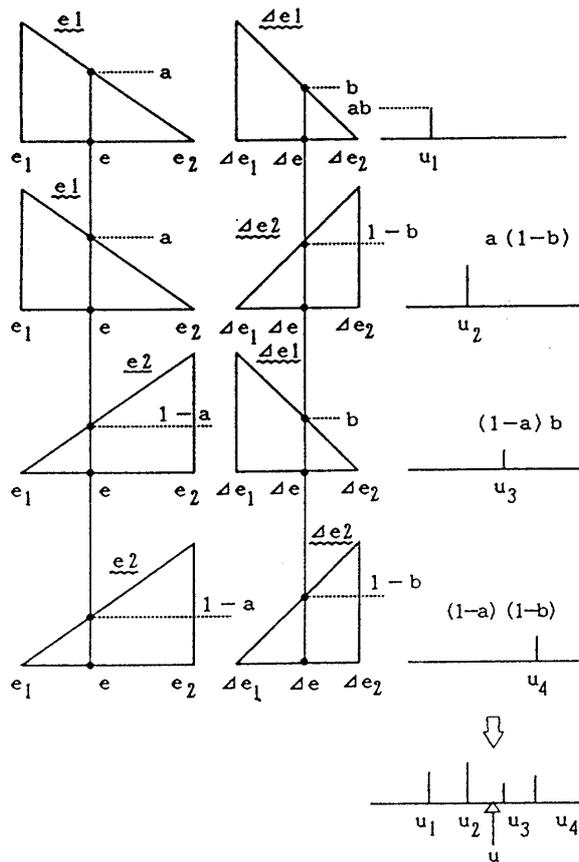
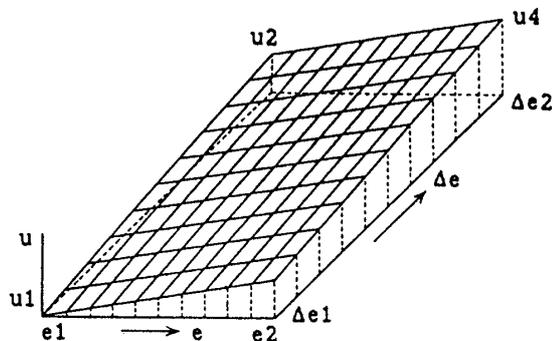
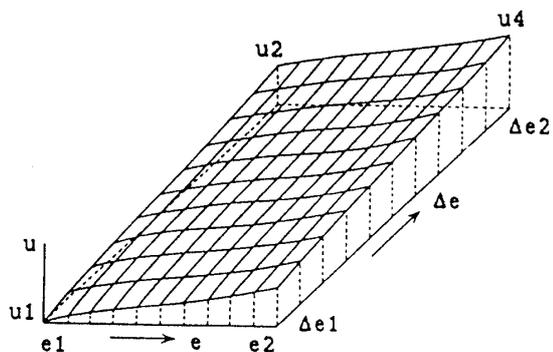


図9 式(26)による  $e, \Delta e$  からの  $u$  の求め方



(a)簡略化推論法による場合



(b)min-max-重心法による場合

図10 式(26)からの  $e, \Delta e$  による  $u$  の図示

以上、ファジィ制御で使用されているファジィ推論法としてマムダニの方法(min-max-重心法)と簡略化推論法について紹介してきました。この場合、ファジィ制御の結果の解析や安定性、学習などを議論する場合には、計算の容易さなどから簡略化推論法が用いられるでしょう。しかし、ハードウェア構成の点からは回路構成の容易さなどから min-max-法が今後とも用いられるものと思われれます。

今回は、ファジィ制御で使われているファジィ推論法以外のファジィ推論法について述べてみる予定です。

(1992年2月28日受付)

[問い合わせ先]

〒572 寝屋川市初町 18-8

大阪電気通信大学 経営工学科

水本 雅晴

TEL: 0720-24-1131 (内線) 2361

FAX: 0720-24-0014

E-mail: mizumoto@mzlab.osakac.ac.jp

## 著者紹介



水本 雅晴 (みずもと まさはる)

大阪電気通信大学経営工学科

1966年、大阪大学基礎工学部電気工学科卒業。1971年、同大学院博士課程修了。工学博士。同年、同大学情報工学科助手。1978年、大阪電気通信大学工学部経営工学科助教授。1980年、同大学教授となり、現在に至る。1980～81年、フンボルト奨学生としてドイツ・アーヘン工科大学に滞在。日本ファジィ学会誌編集委員長、日本ファジィ学会理事。

ファジィ理論とその応用、特に、ファジィ推論、ファジィ制御法、ファジィ・ニューロ、ファジィ演算、ファジィ数などの研究に従事。著書に「ファジィ理論とその応用」(サイエンス社)など。

日本ファジィ学会、国際ファジィシステム学会、計測自動制御学会、システム制御情報学会、人工知能学会、電子情報通信学会、情報処理学会などの会員。