

送出し架設反力のファジィ制御システム へのGAの適用

APPLICATIONS OF THE GENETIC ALGORITHM(GA) THEORY ON A FUZZY THEORY BASED ADJUSTING
SYSTEM FOR REACTION FORCES INTRODUCED IN A GIRDER BY THE LAUNCHING ERECTION METHOD

田中喜隆* 古田均** 今成正一*** 三浦芳雄**** 松尾和則*****
Yoshitaka TANAKA, Hitoshi FURUTA, Shouichi IMANARI, Yoshio MIURA, and Kazunori MATSUO

* コスモ技研(株) (〒550 大阪市西区南堀江)

** 工博 関西大学教授 総合情報学部 (〒569 高槻市霊仙寺町)

*** 高田機工(株) (〒556 大阪市浪速区敷津)

**** (株)横河ブリッジ (〒592 堺市築港新町)

***** 横河技術情報(株) (〒273 千葉県船橋市山野町)

When adjusting the reaction forces under the launching erection method, it has been proved that fuzzy control is quite useful. However, if the membership function is unsuitable, the fuzzy control can cause divergence in the control results, and may require a great deal of time to obtain the control results. Thus it is very important to determine an optimum membership function for the fuzzy control. However, it is difficult to find a suitable function in a short time, because there are so many candidates proposed for the membership functions.

Accordingly, this paper attempts to develop a technique for determining an optimum membership function by applying the Genetic Algorithm.

Key Words: erection of girder bridge, fuzzy control, genetic algorithm

1. まえがき

橋梁の架設工法の一つに送出し工法があり、鉄道や道路を跨ぐ跨線橋など、桁下空間に制約がある場合などによく用いられる。架設時における形状および反力の管理は、現状では各架設ステップの反力を前もって解析して求めておき、実際の送出し時にその反力になることを確認することにより管理している。もし所定の反力が得られないときは、ジャッキ操作により各ステップで調整が行われている。この場合のジャッキ操作量は、経験的あるいは試行錯誤的に決定されることが多いが、曲線桁の場合などでは非常に複雑なジャッキ操作が必要となり、人間の判断のみで調整量を決定することは容易ではない。

このような送出し架設時の反力調整にファジィ制御を応用することが考えられるが¹⁾、適切な制御結果を得るためには、ファジィ制御に用いるメンバーシップ関数が妥当なものでなくてはならない。

ところで、1つのメンバーシップ関数の候補は無限にあり、たとえこれを有限個となるように離散化してもある程度の個数となる。さらにファジィ制御に使用するメンバーシップ関数は複数個あるため、全メンバーシップ関数の組合せは膨大なケース数となる。最適なメンバーシップ関数は、この膨大なケースの中から探索することになる。厳密な最適解を求めるためには全ケースについ

てファジィ制御のシミュレーション計算が必要となるが、その計算時間の増加から現実的なものではなくなる。

しかしながら、メンバーシップ関数が最適でなくとも、ある程度満足できる近似解であれば、実用レベルでは十分であると考えられる。近似解を探す場合に、探索空間についての知識が利用できれば速い探索が可能であるが、そうでない場合には探索空間についての知識を動的に蓄積しながら探索手順を制御する必要がある。

遺伝的アルゴリズム(以下GA: Genetic Algorithm)は、このようにメンバーシップ関数がファジィ制御の結果にどのように影響するかが事前に把握できない場合などにおいて有効な探索方法である。つまり、問題に固有な知識がないため、探索空間を狭めることに失敗し、組合せ爆発を起こす可能性がある場合に適用できる汎用的な手法である²⁾。以上のことから、本研究では送出し架設時の反力調整をファジィ制御する場合のメンバーシップ関数の決定にGAを応用し、計算機による数値シミュレーションを行い、その有効性について確認する。

2. 送出し架設反力調整のファジィ制御

送出し架設時に発生する反力誤差および高さ誤差という2変数に対して、これらを修正するためのジャッキ調整量をファジィ推論により計算するものである。この方

法は、人が経験的にを行っている制御をまねており、大きな誤差を生じている支点ほどより大きな調整量をジャッキに与えるものである。

2. 1 メンバシップ関数

ファジィ制御を行うための重要な要因の1つがメンバシップ関数の形状である。メンバシップ関数の形状を決定するパラメータについては、経験的に大まかなオーダーは把握できるが、同じ構造物でも発生している誤差により最適なものが異なる。したがって、架設時の各ステップごとに仮定したメンバシップ関数により制御のシミュレーションを行い、満足する結果が得られない場合は再度メンバシップ関数を仮定する試行錯誤的な方法による必要がある。

架設時に発生する誤差は当然事前に知ることができないため、現場でいかに短時間でメンバシップ関数を決定できるかが重要である。しかしながら、メンバシップ関数形状を規定するためのパラメータの組合せ数は膨大なものとなり、すべての組合せの場合について制御計算を行うことは実用的ではない。そこで、本研究ではGAを利用して短時間で最適あるいは最適に非常に近い解を得る方法について検討した。

図-1、2、3に示すように3つのメンバシップ関数A、B、Cはその形状を2つの変数により定義できる。GAでは、それらの変数に上下限値を定め、その間を7等分した各々の値を離散変数と見なす。すなわち1つの変数は8個の値を取り得る。したがって、制御のためのメンバシップ関数の全組合せ数は $8^2 \times 8^2 \times 8^2 = 262,144$ とおりである。関数形状については左右非対称の場合なども考えられるため、実際にはこの組合せよりはるかに多くなるが、ここではGAの妥当性を評価するため、全組合せに対しても数時間以内で計算できることを前提として、この程度の組合せになるようにとどめた。

A：反力誤差

反力誤差の大小は、全支点に生じている反力誤差の絶対値の平均値に対する比率で定義する。

XA1はメンバシップ関数の幅を決定するパラメータである。このメンバシップ関数は、ある支点の反力誤差が全体の平均誤差より大きい小さいか（マイナスに大きい小さいか）の程度を表すものである。ここではXA1の範囲は平均誤差程度から平均誤差の3倍程度までとしたが、計算時間に対する制約がなければ上限値についてはもう少し大きい方が無難であろう。XA2はメンバシップ関数の頂点の位置を決定するパラメータである。メンバシップ関数を非対称にする場合はXA2を0に固定してもよいが、ここではメンバシップ関数を対称としたため、非対称性を若干考慮する意味からXA2を0とせず、0付近の小さな値になるように考えた。

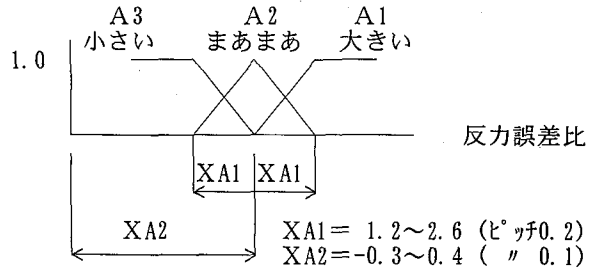


図-1 メンバシップ関数A

B：高さ誤差

このメンバシップ関数は、ある支点の高さ誤差の大きさの程度を表すものである。XB1の範囲は橋梁の規模により変化させるべきものであるが、ここでは支間が数十メートルの一般的な橋梁を想定して範囲を定めた。XB2は反力誤差の場合と同様に、0付近の小さな値とした。

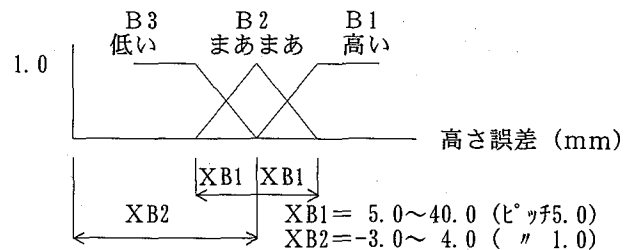


図-2 メンバシップ関数B

C：ジャッキ調整量

これはファジィ推論の結論部であり、各支点の調整量を、その支点に発生している反力誤差に対する比率で与えたものである。ファジィラベルの分割数は入力部より多くし5分割とした。XC1が大きすぎるとファジィ制御が発散するため、大きくUP・DOWNでも調整量比が1.0よりあまり大きくならないように設定した。

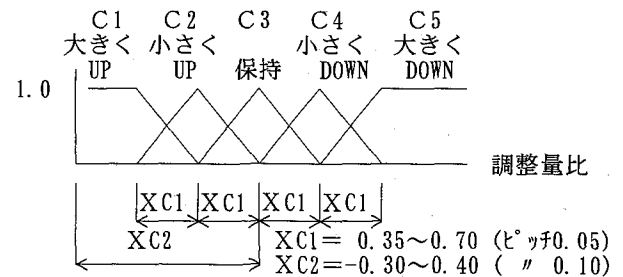


図-3 メンバシップ関数C

2. 2 ファジィ推論および制御
これらのファジィ制御をまとめると

反力	高さ	調整
A1：大きい	B1：高い	C1：大きくジャッキUP
A2：まあまあ	B2：まあまあ	C2：小さくジャッキUP
A3：小さい	B3：低い	C3：ジャッキ保持
		C4：小さくジャッキDOWN
		C5：大きくジャッキDOWN

となる。
次にこれらのファジィ集合のルールについてまとめる。
いま x を測定反力、 y を測定高さ、 z をジャッキ調整量
とすると、

- R1: If x is A1 and y is B1 then Z is C5
- R2: If x is A1 and y is B2 then Z is C4
- R3: If x is A1 and y is B3 then Z is C4
- R4: If x is A2 and y is B1 then Z is C4
- R5: If x is A2 and y is B2 then Z is C3
- R6: If x is A2 and y is B3 then Z is C2
- R7: If x is A3 and y is B1 then Z is C2
- R8: If x is A3 and y is B2 then Z is C2
- R9: If x is A3 and y is B3 then Z is C1

2. 3 簡略ファジィ推論

ファジィ推論にはmamダニ法を用いる場合が多いが、
ここでは簡略ファジィ推論を採用した。この方法はmam
ダニ法に比べて重心計算などの非ファジィ化手順が省略
できるため簡潔であり、計算時間を大幅に短縮できるこ
とから、本研究のように、メンバーシップ関数を変えな
がら何度も推論を繰り返す場合には有効な推論方法であ
る³⁾。つぎのような制御規則が与えられているものとす
る。

- R₁: If x is A₁₁ and y is B₁₂ then z is C₁₃
- R₂: If x is A₂₁ and y is B₂₂ then z is C₂₃
- ⋮
- R_n: If x is A_{n1} and y is B_{n2} then z is C_{n3}

計算の手順はつぎのとおり。

①各ルールの適合度 w_i を計算する。

$$w_i = \mu_{A_{i1}}(x^*) \times \mu_{B_{i2}}(y^*) \tag{1}$$

ここに

- w_i : i 番目のルールの条件に対する適合度
- $\mu_{A_{i1}}, \mu_{B_{i2}}$: メンバーシップ関数
- x^*, y^* : 測定誤差 (非ファジィ数)

②推論結果を算出する。

$$z^* = \frac{\sum_{i=1}^n w_i C_{i3}}{\sum_{i=1}^n w_i} \tag{2}$$

これは、後件部の定数 b_i を適合度 w_i で加重平均したもの
であり、このファジィ推論の出力である。

3. GAによるメンバーシップ関数の決定

3つのメンバーシップ関数A、B、Cの形状を決定す
る6つの離散変数XA1、XA2、XB1、XB2、XC1、XC2の全組
合せの中から制御に最適なものをGAにより探索する。
すなわち、離散変数を遺伝子と考えて、まず最初に特定
の個数の遺伝子を初期状態として発生させる。これらの
遺伝子のなかから適応度の低いもの、つまりファジィ制
御の結果が悪いものを淘汰させる。つぎに残された遺伝
子集団のなかで交叉させて新しい遺伝子を生成する。た
だし、初期集団の設定方法や探索空間の性質により、探
すべき空間に到達するまでに探索が収束してしまうこと
が考えられるため、突然変異を起こさせてこれまでの探
索点から別の点にジャンプさせる。この方法のアルゴリ
ズムを図-4に示す。

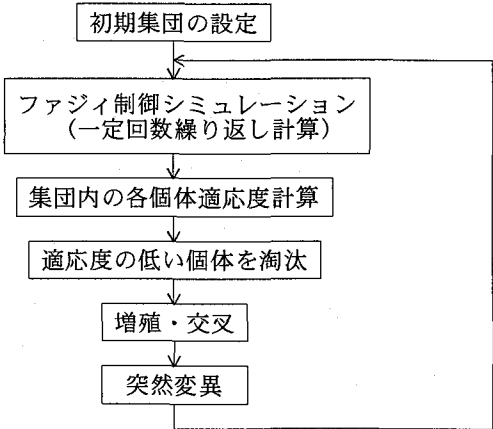


図-4 GAによる処理フロー

3. 1 評価関数

GA探索を進めるために用いる評価関数を定める必要
がある。ここでは一定回数ファジィ制御を行った後に残
留している反力誤差および高さ誤差を最小にすることを
目的として式(3)に示すように評価関数 F_i を決定し
た。

$$F_i = \frac{1}{\alpha_R \varepsilon_{Ri} + \alpha_H \varepsilon_{Hi}} \tag{3}$$

ここに

- ε_{Ri} : 残留している反力誤差 (絶対値の平均)
- ε_{Hi} : " 高さ誤差 (")
- α_R : ε_{Ri} に乗ずる重み
- α_H : ε_{Hi} " "

評価関数には反力誤差と高さ誤差の2つの異なった次
元の数値が含まれており、それぞれの重みについては、
ここでは使用者が重みを入力し、最終的な制御結果から
判断して重みを修正して再計算するものとした。

3. 2 変数の遺伝子型表現へのコーディング

通常GAでは解空間の各要素を0, 1の並びからなるストリングとして変換する。ここでは表-1に示すように変数Xを0から7までの添字をもつ変数Dに置き換えて、その添字の値を2進数にしたものをストリングにする。1つの変数は8個の値を取り得るので、2進数表現するには3ビットの長さとなる。全体で6つの変数が存在するので、ストリング長は $3 \times 6 = 18$ ビットとなる。

表-1 変数とストリング

n	0	1	2	3	4	5	6	7
変数	(000)	(001)	(010)	(011)	(100)	(101)	(110)	(111)
D1(n):XA1	1.20	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20	2.40	2.60
D2(n):XB1	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00
D3(n):XC1	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
D4(n):XA2	-0.30	-0.20	-0.10	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40
D5(n):XB2	-3.00	-2.00	-1.00	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00
D6(n):XC2	-0.30	-0.20	-0.10	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40

たとえば, XA1=1.40, XB1= 5.00, XC1=0.60,
XA2=0.10, XB2=-1.00, XC2=0.40の
場合のストリングはつぎのとおりである。

変数D	D1(1)	D2(0)	D3(5)	D4(4)	D5(2)	D6(7)
Dの添字 (10進数):	1	0	5	4	2	7
ストリング(2進数):	(001	000	101	100	010	111)

3. 3 GAオペレーション

淘汰はルーレット式の選択により行った。これは、親世代の中からなるべく優秀な子世代を残すために、集団全体の適応度の合計に対する各個体の適応度の占める比率を、その個体の子世代として生き残る確率とする方法である。交叉は2つの個体をランダムに選び出し、つぎにランダムな個体内のある1点を境界として2つの個体を入れ換える、1点交叉によった。また、突然変異は、個体内のある1つのビットの0と1を置き換えるものとした。

4. 計算例

計算モデルは図-5に示す8つの支点を持つ曲線桁である。これは実際に送出し工法により架設された桁をモデル化したものである。このような桁は送出し工法によるものとしては比較的大規模であり、曲線桁のため反力調整は容易ではないことが多い。なお、人口数は100、交叉確率は0.5、突然変異確率は0.1として計算した。ただし、これらはすべて計算機によるシミュレーションである。計算の手順は図-4に示したとおりである。その中のファジィ制御シミュレーションのフローを説明する。

①ファジィ推論により、ある支点到に発生している反力誤差、高さ誤差からどの程度その支點反力を調整するのが適当か計算する。これをすべての支點について求める。

- ②反力調整後の全支點の反力および高さの残留誤差を求める。この計算は事前に求めておいた影響値を利用する。
- ③残留している誤差を初期誤差に置き換え、再度①②を繰り返す。

この計算例では①～③を5回繰り返した。

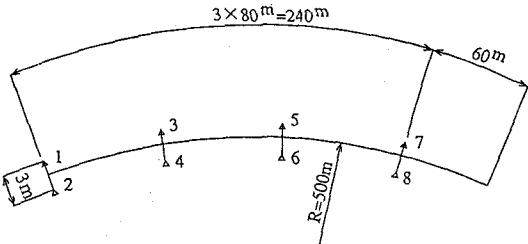


図-5 解析モデル

ケース1

表-2の反力誤差に対するファジィ制御のためのメンバーシップ関数をGAにより計算した。このケースでは、高さ誤差は与えていないので、反力誤差に乗ずる重み $\alpha_R=1.0$ 、高さ誤差に乗ずる重み $\alpha_H=0.0$ とした。第13世代でこの計算として、最も評価関数の大きい解が得られた。各世代の平均値は改善される傾向にあったが、評価関数の最大値はほぼ横ばいのため探索は50世代で打ち切った。あらかじめ全組合せのなかから抽出した最大値は1.166であり、GAによる最大値は1.158であったが、ストリングは前者が(010011, 001000, 001000)に対し、後者が(010011, 001000, 001001)であり、18ビット目が異なるのみであった。両者の調整後に残留している反力誤差を表-3に示す。

表-2 反力誤差

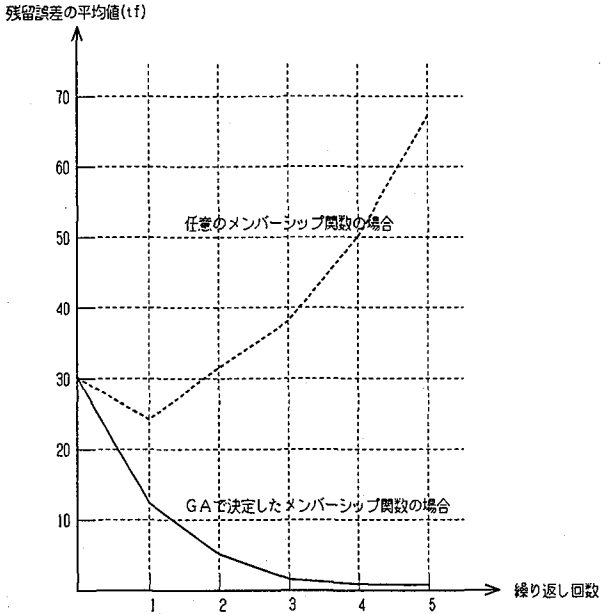
支 点	1	2	3	4	5	6	7	8
反力誤差(tf)	-22.3	23.0	13.7	-13.6	49.3	-51.4	-33.3	34.7

表-3 制御後の残留反力誤差

支 点	1	2	3	4	5	6	7	8
全組合せの抽出(tf)	0.3	0.0	1.3	-1.3	0.6	-1.4	1.2	-0.7
GA (tf)	0.3	0.0	1.4	-1.4	0.5	-1.3	1.2	-0.8

また、GAにより決定したメンバーシップ関数を使用したファジィ制御による反力誤差の収束状況を図-6に示す。あわせて初期集団のなかの任意の(010011, 110100, 110111)となるストリングを持つ個体で定義されるメンバーシップ関数による場合についても同図に示す。前者が順調に収束しているのに対して後者は発散傾向にあり、メンバーシップ関数により制御結果が大きく異なる。

ることがわかる。なお、全組合せのなかから抽出した最適解のメンバーシップ関数による収束状況とGAによる結果はほぼ同じであった。



図－6 反力誤差収束状況

ケース2

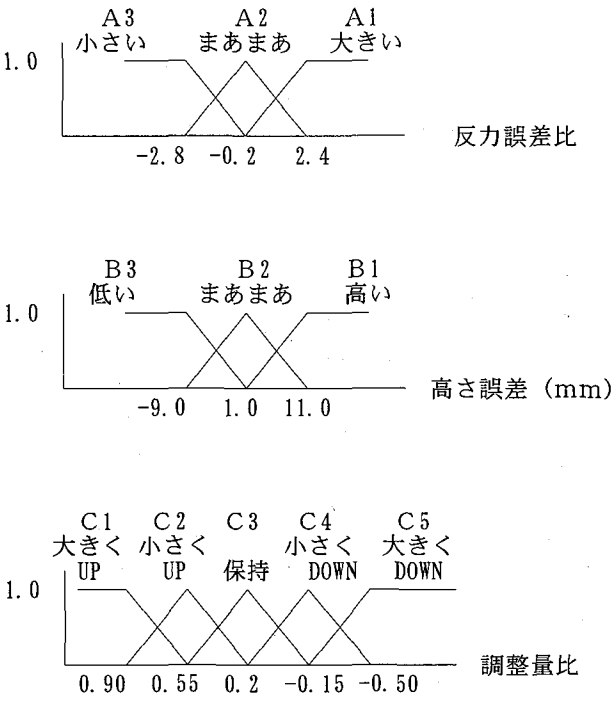
表－4の反力誤差および高さ誤差に対するファジィ制御のためのメンバーシップ関数を計算した。反力誤差に乗ずる重み $\alpha_R=0.2$ 、高さ誤差に乗ずる重み $\alpha_H=0.8$ とした。第20世代でこの計算として、最も評価関数の大きい解が得られた。全組合せのなかの最大値は0.260であり、GAによる最大値は0.252であったが、両者のストリングはそれぞれ(111001, 000011, 100101)と、(111001, 000001, 100101)であり、これもケース1と同様1ビット異なるのみであった。GAにより求めたメンバーシップ関数を図－7に、これによるファジィ制御後の残留誤差を表－5に示す。

表－4 反力誤差および高さ誤差

支 点	1	2	3	4	5	6	7	8
反力誤差(tf)	-44.1	46.4	96.5	-101.8	-46.1	49.7	-0.4	-0.3
高さ誤差(mm)	15.0	15.0	5.0	5.0	-5.0	-5.0	-15.0	-15.0

表－5 制御後の残留誤差

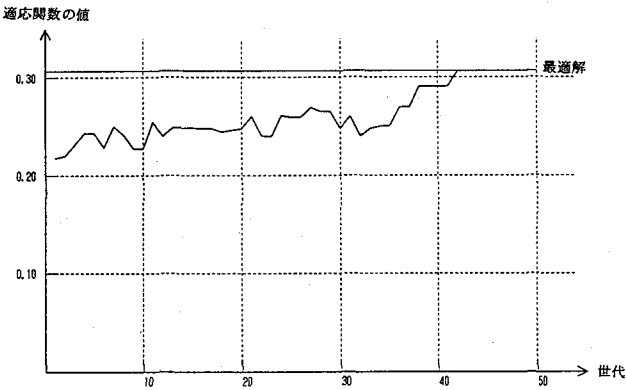
支 点	1	2	3	4	5	6	7	8
反力誤差(tf)	1.2	-0.5	3.8	-5.2	4.9	-4.3	-6.8	6.9
高さ誤差(mm)	2.6	-3.4	-4.0	10.3	2.1	-2.6	-2.3	-4.0



図－7 GAにより決定したメンバーシップ関数

ケース3

ケース2と同じ表－4の反力誤差および高さ誤差に対して計算した。ただし、ケース2では残留反力誤差がやや大きいと思われるので、ここでは反力誤差に乗ずる重み $\alpha_R=0.4$ 、高さ誤差に乗ずる重み $\alpha_H=0.6$ とした。このケースでは図－8に示すとおり、局所的な最適解から抜け出して第42世代で真の最適解の探索に成功した。全組合せは、前にも説明したように約26万通りである。この場合の残留誤差を表－6に示す。
 なお、表－6の高さ誤差のうち、支点4の誤差が表－4の初期値より大きい。この残留誤差が許容値より小さい場合には問題ないが、そうでない場合には重みを変更するなどして再計算する必要がある。



図－8 GAによる探索状況

表-6 制御後の残留誤差

支 点	1	2	3	4	5	6	7	8
反力誤差(tf)	0.7	-0.1	1.2	-2.6	0.3	0.6	-0.4	0.1
高さ誤差(mm)	3.6	-0.1	-4.4	12.0	3.9	0.1	-5.7	-9.5

5. 考察

本研究では、全組合せについてファジィ制御のシミュレーション計算が可能な組合せ数になること考慮して、組合せ数があまり多くならないようにした。それでも各1ケースにつき5回のファジィ制御計算を含むため、比較的高速なクラスのパソコンでも、全ケースの計算には約3時間を要した。それに対してGAによる方法では5分程度の計算で実用上十分と考えられる解を得ることができた。

計算例の3つのケースでは、最適解の探索に成功したのは1ケースのみであり、他の2ケースについては最適解には到達できなかったが、そのストリングは1ビット異なっているのみであった。探索方法をもう少し工夫することで、精度を向上させることは可能であると思われるが実用上は現状のままで問題ないため、ここではあえて探索方法については追求しなかった。

制御計算に使用した簡略ファジィ推論はマムダニの方法に比較して計算時間が1/10程度に短縮できた。したがって本システムのように短時間に計算を行う必要がある場合に適した推論方法であると言える。

6. あとがき

ファジィ制御においてメンバーシップ関数が適切でなければ、制御結果が発散してしまったり、収束はするが繰り返し回数が多くなったりする。

したがって、メンバーシップ関数の決定は重要な作業である。しかし、そのメンバーシップ関数は必ずしも最適なものである必要はなく、ある程度それに近ければ適切なファジィ制御が可能である。本研究ではメンバーシップ関数の候補の中から、ある程度満足できるものを短時間で探すためにGAによる手法を検討した。メンバーシップ関数を試行錯誤的に決定することは非常に煩わしく時間も要することから、本研究のように、現場にて即時にメンバーシップ関数を決定し制御する必要がある場合にGAは有効な手法であることが、数値シミュレーションレベルではあるが確認できた。

送出し架設時における反力制御以外にも、土木の分野でファジィ制御を応用できる問題は数多く存在するものと思われる。GAによる探索は、どのような場合にも適用できる汎用的な手法であるため、他のどのようなファジィ制御システムのメンバーシップ関数の決定においても利用できるものと思っている。

参考文献

- 1) 下田 雄 : ファジィ理論による送出し架設反力調整システム, 構造工学論文集 Vol. 40A, PP. 579-592, 1994
- 2) 樋口哲也, 北野宏明: 遺伝的アルゴリズムとその応用, 情報処理, (社)情報処理学会, 1993. 6
- 3) 秋山孝正: ファジィ理論を用いた道路交通流解析, 土木計画学研究・論文集, pp. 13-27, 1993.
- 4) 菅野道夫: ファジィ制御, 日刊工業新聞社, 1988. 5

(1995年9月18日受付)