

ファジィ制御によるシールド推進

SHIELD TUNNELING USING THE FUZZY CONTROL

榎奥村組 ○浅野 剛

竹内幹雄

背野康英

大熊一由

By Takeshi ASANO, Mikio TAKEUCHI, Yasuhide SENO
and Kazuyoshi OHKUMA

ファジィ理論は、あいまいな表現を数量化して取り扱うことが可能であり、熟練オペレーターが制御に関して持つノウハウをコンピューターに取り入れるための手法として有効である。今回、ファジィ理論を用いたシールド機械の方向制御用ファジィコントローラーを開発し、このコントローラーと自動測量装置とを組み合わせ、自動方向制御システムとして実施工現場に適用した。本報告は、この施工結果について述べるものである。適用現場では、 $R=352\text{m}$ の曲線部と直線部および緩和曲線部の施工を行い、蛇行量を 30mm 以内に収めることができた。

今回の施工により、ファジィコントローラーは曲線区間においても人間による制御と同等な制御性能を持つことが確認された。

キーワード：ファジィ理論、シールド工法、自動制御

1. まえがき^{1) 2) 3) 4)}

近年、建設工事においては、作業環境の複雑化・大規模化、技能労働者の高齢化・減少および作業の安全性の向上などの理由により、従来人間が行ってきた制御をコンピューターにより自動化しようとする動きが盛んである。ところが、人間による制御は、経験や勘に基づいた主観的なものであるため、これをコンピューターに取り入れるためには、従来の制御方法では困難なことが多かった。

1965年にL. A. Zadehによって提案されたファジィ理論は、人間の持つあいまいさを数量化して取り扱うもので、ファジィ理論を制御に取り入れたファジィ制御は、地下鉄運転制御や浄水場薬液注入制御等に応用されており、実用段階に入ったといえる。

筆者らは、昭和61年より東京電力㈱・技術研究所と共にファジィ理論に関する研究を開始し、シールド掘進制御のうち、①切羽の安定をはかるための制御と、②方向制御に適用し、実証試験を通してその

有効性を確認した。

本報告では、上記の方向制御用ファジィコントローラーをさらに発展させ、曲線施工を含むシールド機械の方向制御に適用し、良好な結果を得たので、その概要を述べるものである。

2. ファジィ制御⁵⁾

ここでは、後述するシールド機械のファジィ制御に用いた制御規則とファジィ推論法の概略を述べる。

(1) 制御規則の形式

制御規則は、次のような前件部（IF～の部分）が2変数、後件部（THEN～の部分）が1変数のものを用いた。

IF x is A AND y is B THEN z is C

ここに、

x, y : プロセスの状態量（入力変数）

z : プロセスへの操作量（出力変数）

A, B : x, y を示すファジィ集合

C : z を示すファジィ集合

一般にN個ある制御規則は式(1)のように表現できる。

$$R^i: (x \text{ is } A_j, y \text{ is } B_k) \rightarrow z \text{ is } C_i, i=1 \sim n \quad \dots\dots\dots(1)$$

これを、ルールテーブルで示すと表-1のようになる。

表-1 ルールテーブル

z		y	
		B ₁	B _k
x	A ₁	C ₁	
			
			
	A _j		C _i

(2) ファジィ推論法

例として、n個の制御規則に $x=x', y=y'$ が入力されたとき、 $z=z'$ を求める推論法を以下に示す。

規則 R^i について、あるプロセスの状態 (x', y') が前提を満足する度合い W_i は、ファジィ集合 A_j 、 B_k のメンバーシップ関数を $A_j(x'), B_k(y')$ とすると式(2)となる。

$$W_i = \min(A_j(x'), B_k(y')) \quad \dots\dots\dots(2)$$

次に、 C_i' を (x', y') に対する規則 R^i による推論結果を示すファジィ集合とすると、そのメンバーシップ関数 $C_i'(z)$ は、ファジィ集合 C_i のメンバーシップ関数 $C_i(z)$ を用いて次のように表現される。

$$C_i'(z) = W_i * C_i(z) \quad \dots\dots\dots(3)$$

式(3)のようにすべての規則について $C_i'(z)$ を求め、次のような関数 $C(z)$ を定義する。

$$C(z) = \frac{n}{\sum_{i=1}^n} C_i'(z), \quad V \text{はmax} \quad \dots\dots\dots(4)$$

制御規則全体としての推論結果 Z' は関数 $C(z)$ の重心として求める。

$$z = \left(\int z \cdot C(z) dz \right) / \left(\int C(z) dz \right) \quad \dots\dots\dots(5)$$

3. シールド機械方向制御への適用

(1) 工事概要

シールド機械方向制御用ファジィコントローラーの適用工事の概略は以下の通りである。

施工法 : 泥土圧シールド (外径5440mm)

施工延長 : 1265m × 2本

土被り : 9~15m

間際水圧 : 0.75~1.2kg/cm²

線形 : 水平方向・352R (2ヶ所)

上下方向・-2~-4‰

図-1に工区平面図を示す。

(2) シールド機械方向制御用ファジィコントローラー

a) 入出力変数及びコントローラーのフロー

① 掘進開始時のジャッキパターン決定のための入出力変数を次の量とした。

入力変数

D_H : 水平方向蛇行量 (左が正)

θ_H : 計画線形とシールド機械の水平方向ずれ角 (左が正)

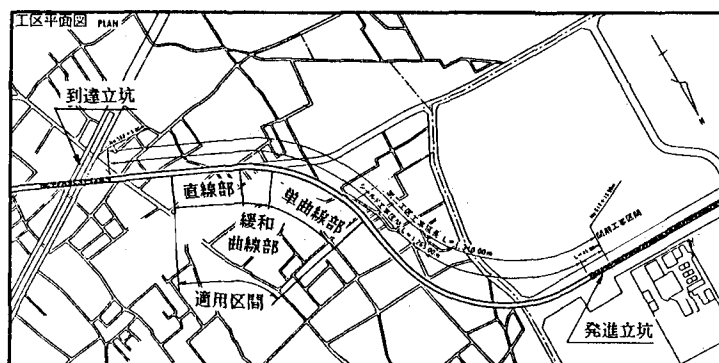


図-1 工区平面図

D_v : 上下方向蛇行量 (上が正)
 θ_v : 計画線形とシールド機械の上下方向
 ずれ角 (上が正)
 T_H : 次セグメントの水平テーパ量
 (左が正)

出力変数

ST_{TAG} : 目標ストローク差 (左が正)
 PI_{TAG} : 目標ピッチング (上が正)
 EH : 水平方向片押し度 (左が正)
 EV : 上下方向片押し度 (上が正)

- ② 掘進途中のジャッキパターン変更のための
 入出力変数を次の量とした。

入力変数

$\Delta ST : ST_{TAG} - ST_{FIN}$
 (ST_{FIN} は予測最終ストローク差)
 $\Delta PI : PI_{TAG} - PI_{FIN}$
 (PI_{FIN} は予測最終ピッチング)

出力変数

ΔEH : 水平方向片押し度変化量 (左が正)
 ΔEV : 上下方向片押し度変化量 (上が正)

コントローラーのフローチャートを図-2に示す。
 これに基づいてファジィコントローラーの説明を行う。

b) 目標ストローク差・ピッチングの計算方法

① 目標ストローク差: ST_{TAG}

ST_{TAG} は、計画線型から定まる基本ストローク
 差および入力変数 D_H , θ_H , T_H を基に以下の手
 順で決定する。

手順1: 計画線型より基本ストローク差を求め
 る。

手順2: 表-2に示す制御規則に基づき、ファ
 ジィ推論により基本ストローク差に対
 する増減量を計算し、 T_H を考慮しな
 い段階での目標ストローク差 ST' を
 決定する。

手順3: 次の規則により T_H を考慮した目標ス
 トローク差 ST_{TAG} を決定する。

$ST_{TAG} = ST'$

ただし、

IF $ST' \geq T_H + 25$ AND $ST' > 0$
 THEN $ST_{TAG} = T_H + 25$

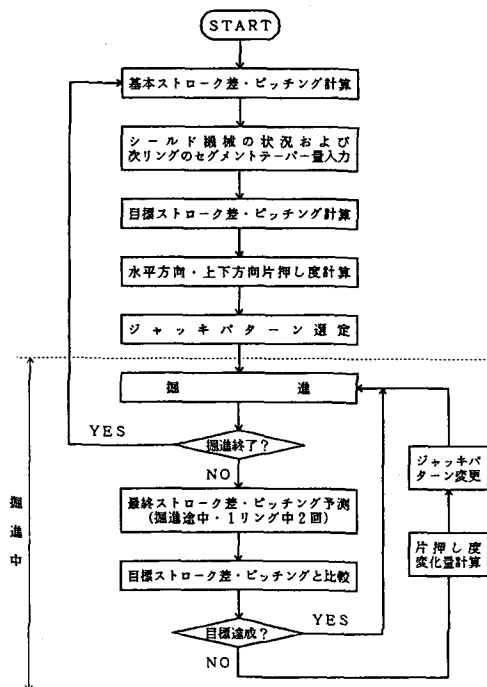


図-2 方向制御用ファジィコントローラーのフロー

表-2 制御規則 (水平方向)

		θ_H				
		NB	NS	ZO	PS	PB
D_H	NB	NB	NB	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NS	NS	ZO	ZO
	ZO	NS	NS	ZO	PS	PS
	PS	ZO	ZO	PS	PS	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PB	PB

IF $ST' \leq T_H - 10$ AND $ST' > 0$

THEN $ST_{TAG} = T_H - 10$

IF $ST' \leq T_H - 25$ AND $ST' < 0$

THEN $ST_{TAG} = T_H - 25$

IF $ST' \geq T_H + 10$ AND $ST' < 0$

THEN $ST_{TAG} = T_H + 10$

表-2におけるNB, NS, ZO, PS, PBは
 D_H , θ_H , ST_{TAG} に割り当てられるファジィ変
 数であり、図-3, 表-3に示すメンバーシップ関
 数により定義する。

② 目標ピッチング： PI_{TAG}

PI_{TAG} は、計画線型から定まる基本ピッチングおよび入力変数 D_v 、 θ_v を基に以下の手順で決定する。

手順 1：計画線型より基本ピッチングを求める。

手順 2：表-4 に示す制御規則に基づき、ファジィ推論により基本ピッチングに対する増減量を計算し PI_{TAG} を決定する。

表-4 におけるファジィ変数は D_v 、 θ_v 、 PI_{TAG} に割り当てられ、図-3、表-3 で定義する。

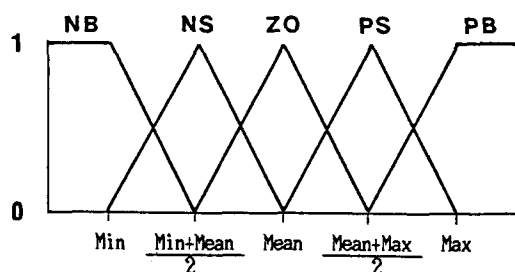


図-3 メンバシップ関数

表-3 メンバシップ関数のパラメーター

	min	mean	max
D_H (mm)	-50	0	50
θ_H (deg)	-1	0	1
D_v (mm)	-50	0	50
θ_v (min)	-10	0	10
ST (mm)	-15	0	15
PI (min)	-10	0	10

表-4 制御規則 (上下方向)

		θ_v				
		NB	NS	ZO	PS	PB
D_v	NB	NB	NB	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NS	NS	ZO	ZO
	ZO	NS	NS	ZO	PS	PS
	PS	ZO	ZO	PS	PS	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PB	PB

c) 掘進開始時のジャッキパターンの決定方法

目標ストローク差・目標ピッチングを達成するために必要な片押し度を式(6)、式(7)より求め、掘進開始時のジャッキパターンを決定する。

式(6)、式(7)は、EHと1リングあたりのストローク差 (S_o) および、EVと1リングあたりのピッチング変化量 (P_o) の関係を実測値に基づき決定したものである。

$$S_o = 75 \times EH \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$P_o = -60 \times EV - 7.3 \quad \dots\dots\dots(7)$$

EH、EVとジャッキパターンの関係は、あらかじめデータファイル化しておき、掘進にあたっては最も適合度の高いジャッキパターンを選択する。

d) 掘進中の最終ストローク差とピッチングの予測式

式(8)、式(9)により最終ストローク差、最終ピッチングを予測する。

$$ST_{FIN} = (ST_{NOW} - ST_{INT}) \frac{L_2}{L_1} + ST_{INT} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$PI_{FIN} = (PI_{NOW} - PI_{INT}) \frac{L_2}{L_1} + PI_{INT} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで

ST_{NOW} ：現在のストローク差 (左が正)

ST_{INT} ：掘進開始時のストローク差 (左が正)

PI_{NOW} ：現在のピッチング (上が正)

PI_{INT} ：掘進開始時のピッチング (上が正)

L_1 ：現在までのストローク

L_2 ：残りのストローク

e) 掘進中のジャッキパターンの変更

目標ストローク差・目標ピッチングと、予測ストローク差、予測ピッチングのズレの大小により、掘進中にジャッキパターンを変更する。ジャッキパターン変更のための制御規則を次に示す。

IF ΔST is PB THEN ΔEH is PB
 IF ΔST is ZO THEN ΔEH is ZO
 IF ΔST is NB THEN ΔEH is NB
 IF ΔPI is PB THEN ΔEV is PB
 IF ΔPI is ZO THEN ΔEV is ZO
 IF ΔPI is NB THEN ΔEV is NB

PB, ZO, NBは ΔST , ΔPI , ΔEH , ΔEV に割り当てられるファジィ変数であり、図-4、表-5のように定義する。

ジャッキパターンの選択は掘進開始時と同様、得られるEH, EVに最も適合度の高いジャッキパターンを選択する。ただしシールドジャッキが追従ジャッキではないため、使用ジャッキ本数が増加するようなジャッキパターンは選択しない。

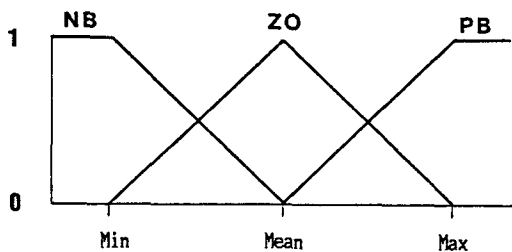


図-4 メンバシップ関数

表-5 メンバシップ関数のパラメーター

	min	mean	max
$\Delta ST(mm)$	-10	0	10
$\Delta PI(min)$	-10	0	10
ΔEH	-0.15	0	0.15
ΔEV	-0.15	0	0.15

(3) シールド機械方向制御システム

シールド機械の方向制御システムを図-5に示す。本システムはシールド機の位置検出装置とファジィコントローラーを組み合わせているため、掘進開始時のジャッキパターンを自動的に決定できる。また、掘進中もストローク差・ピッチングの状況によりジャッキパターンを変更させる点では、熟練オペレーターと同じ思考回路を持つ制御システムであると言える。

(4) 適用結果とその評価

a) 適用結果

ファジィコントローラーによる施工区間は、図-1に示したように単曲線部200 m、緩和曲線部65m、直線部 150 mである。単曲線部の施工結果を図-6、図-7に示す。

ファジィコントローラーによる施工区間においては、水平・上下方向とも蛇行量を30mm以内で施工することができた。さらに緩和曲線部はもちろん単曲線部においても急激なジャッキ操作によりセグメントの組み立て作業に支障をきたすことがなかった。

b) 評価

制御結果は熟練オペレーターに匹敵するものであり、十分実用に耐えうるものであることがわかったが、次のような課題も残された。

- ① セグメントのテーパ量の入力が自動で行われていない。
- ② 目標ストローク差および目標ピッチングと

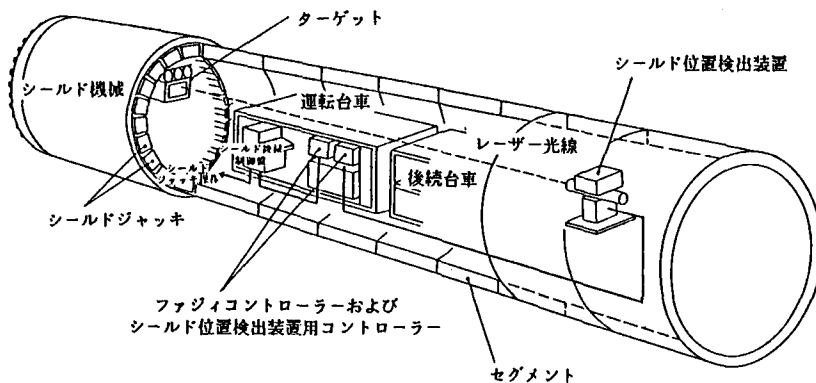


図-5 シールド機械の方向制御システム

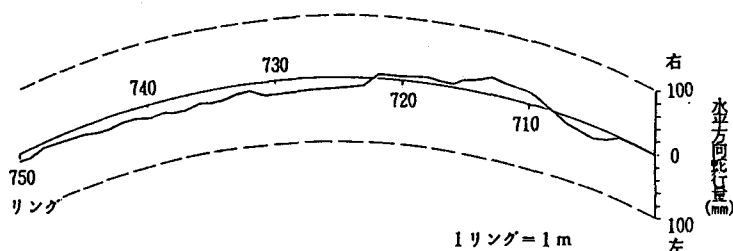


図-6 施工結果 (水平方向)

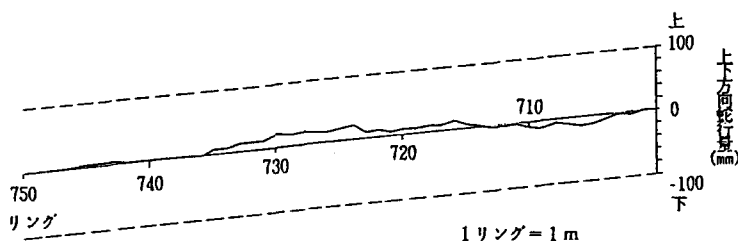


図-7 施工結果 (上下方向)

水平および上下方向片押し度の関係が1つの線形式で定義されており、地盤の変化による曲がり易さ等の影響が考慮されていない。

③ 掘進中は常にシールド機械の曲がり易さが一定していると仮定し、最終ストローク差、最終ピッチングの予想を行っている。

④ シールドジャッキが追従式でないため、ジャッキパターン変更の際に使用ジャッキ本数を増やすことができない。

今後はこれらの課題に取り組み、方向制御システムの完成を目指すとともに、より急曲線区間への適用、さらに方向制御にとどまらず、シールド掘進制御全体の自動化を目指し研究を続ける予定である。

4. あとがき

ファジィ制御を用いたシールド機械の方向制御について、実施工への適用結果を報告した。実施工では、良好な制御結果が得られており、改めてファジィ制御の有効性が確認できた。

今後は、シールドの掘進制御全体の自動化にむけて、鋭意研究開発を続ける予定である。さらに、建設ロボット、大規模システムの制御や意志決定問題

に対しても、ファジィ理論の適用を図っていく次第である。

最後に、ファジィ制御の実施工適用にあたって、多大なご協力を頂いた各工事所の関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Zadach, L. A., 「Fuzzy Sets」, In -formation and Control, 8, (1965), PP. 338~353
- 2) 安信誠二, 宮本捷二, 井原廣一, 「予見Fuzzy制御方式による列車自動運転」, システムと制御, Vol.28, No.10, (1984), pp.605~613
- 3) 柳下修, 伊藤修, 菅野道夫, 「ファジィ理論の浄水場薬品注入制御への応用」, システムと制御, Vol.28, No.10, (1984), pp.597~604
- 4) 桑原洋, 原田光男, 背野康英, 竹内幹雄, 「ファジィ理論のシールド掘進制御への適用」, 土木学会論文集, 第391号, (1988.3), pp.169~178
- 5) 菅野道夫, 「ファジィ制御」, 日刊工業新聞社, (1988), pp.67