小口径管推進工法における方向制御の研究*

金 森 康 継^{*1}, 根 津 紀 久 雄^{*2}Study of Auto Steering Control Method
in the Small-Diameter Pipe Thrust Method

Yasutsugu KANAMORI and Kikuo NEZU

In the small-diameter pipe thrust method, the successful operation is dependent on the experience of skilled operators. Because of this, we forecast that we cannot cope with increasing work demand in the future. Therefore, improvement of the control system is required. The objectives of this study are to examine the auto steering control method by means of a construction experiment using a model plant and to compare the accuracy of the sequence, the fuzzy, and the neural network-driven fuzzy controls with the manual one.

Key Words: Sequence Control, Neural Network, Fuzzy Set Theory, Steering Control System, Small-Diameter Pipe Thrust Method

1. 結 言

下水道は、従来は開削工法で布設されていたが、昨今の騒音、振動などの環境問題や交通障害などの社会情勢から、推進工法の採用が多くなってきた⁽¹⁾。

小口径管推進工法は、呼び径 700 mm 以下の埋設管に用いられる工法で、遠隔操作により方向制御を行いつつ、掘削、推進して、管を布設する工法である。その方向修正は、先導体と呼ばれる掘削装置の先端で行われる。小口径管推進工法において、正確な掘削を行うためには、土質や推進機の状態に合わせた高度で複雑な機械操作を必要とするが、現状ではこの操作は熟練オペレータによる長年の経験と勘に頼っている。しかし、作業環境の複雑化に伴うオペレータ育成の困難化さらに熟練オペレータの高齢化による不足から、今後ますます増えるであろう下水道事業に対応できなくなる可能性も考えられる。そこで、熟練を必要としない自動方向制御システムの開発が望まれている。また、開発に際し、モデルプラントを用いてシステムを実証することは、費用の面でも非常に有用である⁽²⁾。

本研究は、実機に即したモデルプラントを製作し、方向修正のための自動制御システムとして、シーケンス制御、ファジィ制御、ニューラルネット駆動形ファジィ制御と熟練オペレータによる手動制御とを、施工実験を通じて比較し、制御方式の検討を行うものである。

2. 実験の概要

実験装置は、発進台、ブラケット、キャリッジおよび油圧ユニットからなる推進装置、先導体と誘導管よりなる推進管、計測装置および制御システムで構成される。実験装置の仕様を表 1 に示す。

2・1 推進装置 実験装置の外観を図 1, 2 に、実験装置の全体構成を図 3 に示す。また、推進装置を図 4 に示す。図 3 において、方向修正を行うには方向修正用油圧ユニット内にある上下、左右用 2 個の電磁弁を介して方向制御シリンダを操作する。また、制御量は方向制御シリンダ内部に組み込まれたポテンショメータにより検出される。図 4 においてキャリッジ⑩は、動力伝達および制御機構を有する。キャリッジ後部のスクリー回転モータ③は、キー溝を有するカップリング⑥を介してキャリッジ前面に固定された推進管⑦内のスクリーオーガに回転力を伝達する。キャリッ

* 原稿受付 平成 6 年 5 月 17 日。

^{*1} 正員, 酒井重工業(株) (〒365 鴻巣市大字箕田 3257-1)。^{*2} 正員, 群馬大学工学部 (〒376 桐生市天神町 1-5-1)。

ジ右側には、上下方向制御用油圧シリンダ2本⑪が固定され、一方のシリンダを伸ばすと同時に他方を縮めることによりシリンダロッドに固定された制御用レバー⑫を揺動して、ロッド⑧とA部に示す上下方向の制御棒⑬を介し、先導体先端の上下方向の首振りを行う。また、キャリッジ上側には、上下方向と同仕様の左右方向制御用の油圧シリンダ2本⑤が固定され、上下方向と同様に、B部に示す左右方向制御用の制御棒2本④を介し、先導体先端の左右方向の首振りを行う。キャリッジ後部に固定された推進シリンダ(圧力流量可変)②は、後方に反力ピン①を有し、ピンの両側は発進台⑨上に固定されたブラケット⑭に係止される。推進時は、反力ピンに係止した状態で推進シリンダを伸ばして推進管⑦を前進させる。推進シリンダ②が伸びきったときは、ブラケット⑭に係止された反力ピン①を上方向にもち上げ、推進シリンダを縮めて、ピンをブラケット前方の係止用切欠穴に入れて再び推進シリ

ンダを伸ばし、推進管⑦を土中に埋設してゆく。

ブラケット⑭は、キャリッジ⑩の左右および上方向の振れを制限する役目も有する。また、推進管は、発進台の溝におかれた管受けローラ⑮の上を直進する。

2・2 推進管 先導体を図5に示す。

先導体は、先端に取り付けられたカッターフードを球形座面で滑動支持する方向修正機構を有し、4本のコントロールロッド(直径 6×10^{-3} m)とキャリッジ上に配置された上下、左右各一对の複合油圧シリンダにより方向修正をする。先端は、油圧ユニット内の電磁弁によって、それぞれ対の油圧シリンダをつねに等しく伸縮作動させることで、全方位に最大約 0.052 rad 傾斜できる構造となっている。制御量は、各シリンダに取り付けられたポテンシオメータの変位量で表示する。

先導体の後方には、推進距離ごとに同じ外径(60×10^{-3} m)の誘導管を逐次連結する。

3. 計測制御装置の概要

3・1 ずれ量、ピッチングの算出方法 ずれ量と

Parts Name	Stock	Specifications
Pump for Thrust Cylinder	1	Discharge: $33.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}$
Thrust Cylinder	1	Stroke: $425 \times 10^{-3} \text{ m}$ Thrust: $0 \sim 2.6 \times 10^5 \text{ N}$ Speed: $0 \sim 8.7 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$
Screw Motor	1	Number of Revolution : 0.25 s^{-1} Torque : $114.7 \text{ N} \cdot \text{m}$
Pump for Steering Cylinder	1	Discharge: $8.93 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}$
Steering Cylinder	4	Stroke: $\pm 8 \times 10^{-3} \text{ m}$
Potentiometer (Control Rate)	4	Stroke: $\pm 8 \times 10^{-3} \text{ m}$
Potentiometer (Displacement)	4	Stroke: $0 \sim 20 \times 10^{-3} \text{ m}$
Stroke Sensor	1	Stroke: $0 \sim 2 \text{ m}$

図 1 実験装置の外観(1)

図 2 実験装置の外観(2)

図 3 実験装置の全体構成

図 4 推進装置

図 5 先導体

図 6 ずれ量とピッチングの算出方法

ピッチングの計測方法を図 6 に示す。

図 6 において、 O_o は推進距離の基準点、 O_m は発進台に取り付けたポテンシオメータによる変位の計測位置である。

ポテンシオメータにより計測された O_m の位置における推進管の変位量 s から、先導体先端でのずれ量 Z と、ピッチング p は次のように求まる。

$\triangle O_a O_b O_c$ と $\triangle O_a O_b O_e$ の相似関係を使って、

$$Z = \frac{sf}{a-b-d} \quad \text{.....(1)}$$

ここに、

$$f = a-b-d+c+e \quad \text{.....(2)}$$

また、ピッチング角 θ は、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{s}{a-b-d} \dots\dots\dots (3)$$

であるから、ピッチング $p(\%)$ は、

$$p = 1000 \tan \theta = 1000 \frac{s}{a-b-d} \dots\dots\dots (4)$$

となる。

ただし、1パーミル(‰)は1mにつき 1×10^{-3} mの傾きである。式(1)、式(4)を用いてずれ量、ピッチングを計算する。

3.2 計測装置 推進管の変位計測は、発進台最前部に取り付けられているポテンシオメータ(ストローク： $0 \sim 20 \times 10^{-3}$ m)により行う。ポテンシオメータは、垂直な取付板上に上下左右4個固定され、先端の当て板がばねで軽く推進管を押している。

ストロークセンサ(ストローク： $0 \sim 2$ m)は、キャリッジ後部に固定され、ストロークセンサのワイヤ先端は、ブラケットとコマにより発進台側に固定される。埋設管の推進距離は、推進シリンダが伸びて、キャリッジが前進、ワイヤが伸びることにより検出される。

首振り部の制御量検出は、図4におけるA、B部の上下方向、左右方向それぞれの方向修正シリンダに取り付けられたポテンシオメータ(ストローク： $\pm 8 \times 10^{-3}$ m)により行う。

3.3 制御システム 手動、シーケンス、ファジィ、ニューラルネット駆動形ファジィの各制御方式における計測制御システムを図7に示す。図7において、方向制御の目標値はずれ量とピッチングである。また、修正量は方向制御シリンダの制御量であり、ポテンシオメータによって、電圧で検出する。

ファジィ、ニューラルネット駆動形ファジィにおける制御システムを図8に示す。

図8において、各センサから検出されたデータはA/Dボードを介し、コンピュータに取り込まれる。コンピュータでは各制御方式による制御量の計算を行い、制御用シリンダの電磁弁をD/Aボード、リレー回路を介して開閉することにより、目標とする制御量

図7 計測制御システム

となるように方向修正する。各制御方式の方向制御出力は推進距離 100×10^{-3} m ごとに行い、最大値を1とした。

3.3.1 手動制御 現在、熟練オペレータは先導体の位置、姿勢とその変化を見ながら、土の硬さあるいは土質のアンバランス等が原因と考えられる制御の反応ならびにその他さまざまな条件を総合的に把握して制御量を決めていると考えられる。したがってこれらが方向制御操作において熟練を要する理由である。本実験における手動制御も、熟練オペレータにより行った。すなわち、熟練オペレータはコンピュータ画面に表示される先導体の位置と姿勢、換言すればずれ量とピッチングを連続的に確認しながらリモートコントロール装置のレバーを操作することにより方向修正を行う。

3.3.2 シーケンス制御 シーケンス制御の場合、熟練オペレータの言語則を取り入れることはできないが、土質が均一ならばある程度経験を制御規則に生かすことができると考えられる。そこで、シーケンス制御方式は、上下、左右のずれ量より修正量を判断し、上下と左右の方向修正シリンダにおける修正量を、 $\pm 1/4$, $\pm 1/2$, $\pm 3/4$, ± 1 の四とおりの制御量として出力させるものとした。シーケンス制御方式における上下、左右のずれ量と制御量の関係を表2に示す。

3.3.3 ファジィ制御⁽³⁾⁽⁴⁾ ファジィ制御方式では、方向制御の判断部分をファジィ推論で行う。具体

図8 ファジィ、ニューラルネット駆動形ファジィの制御システム

的には、方向制御に関する専門家の知識や経験をルール形で記述して、コンピュータが人間のエキスパートのように推論して結論を得る方式であり、推論演算には Max-Min 論理積、出力決定には重心法を用いた。

熟練オペレータへのアンケートの結果、制御量を求める際のパラメータは、上下方向についてはずれ量とピッチング、左右方向においてはずれ量の値とし、これらをもとにメンバシップ関数(M. F.)と規則表を作

成した。

本実験では図 9, 10, 11, 12 のメンバシップ関数および表 3, 4 の制御規則を用いた。ただし、NL, NM, NS, ZR, PS, PM, PL は、それぞれ Negative Large, Negative Medium, Negative Small, Zero, Positive Small, Positive Medium, Positive Large を意味する。

推論演算の過程を図 13 に示す。今、ルール R_1 : if

表 2 ずれ量と制御量の関係

Displacement $Z (\times 10^{-3} \text{ m})$	Control Rate S
$Z < -12$	$S = 1$
$-12 \leq Z < -8$	$S = 3/4$
$-8 \leq Z < -4$	$S = 1/2$
$-4 \leq Z < -2$	$S = 1/4$
$-2 \leq Z \leq 2$	$S = 0$
$2 < Z \leq 4$	$S = -1/4$
$4 < Z \leq 8$	$S = -1/2$
$8 < Z \leq 12$	$S = -3/4$
$12 < Z$	$S = -1$

図 9 上下、左右方向のずれ量についての M. F.

図 10 ピッチングについての M. F.

表 3 上下方向の制御規則

	Pitching				
	NL	NS	ZR	PS	PL
Displacement	NL	PL	PM	PS	ZR
	NS	PM	PS	PS	ZR
	ZR	PM	PS	ZR	NS
	PS	PS	ZR	NS	NS
	PL	PS	ZR	NS	NL

表 4 左右方向の制御規則

Displacement (Right & Left)	NL	NS	ZR	PS	PL
Control Rate	PL	PS	ZR	NS	NL

図 11 上下方向の制御量についての M. F.

図 12 左右方向の制御量についての M. F.

ずれ量=NS and ピッチング=NL, then 制御量=PM
 で、ルール R₂: if ずれ量=NL and ピッチング=NS,
 then 制御量=PL (ただし、表 3 では if ずれ量=NL
 and ピッチング=NS, then 制御量=PM である) とす
 る。図 13 におけるルール R₁において、ずれ量= x_1^0 か
 つピッチング= x_2^0 なる入力値が入ってきたとすると、
 x_1^0 のグレードと NS 集合のグレードとの論理積、 x_2^0
 のグレードと NL 集合のグレードとの論理積をとる。
 さらにずれ量とピッチングの論理積をとると、PM' が
 決まる。ルール R₂においても同様にして PL' が決ま
 る。これらの論理和をとって合成すると、制御量は図
 に示すようになる。これを重心法によって非ファジィ
 化すると、制御量の出力 y^0 が決まる。

3・3・4 ニューラルネット駆動形ファジィ制御

ファジィ推論にはチューニングの問題がある。ニュー
 ラルネットワークの学習機能を駆動させることにより
 チューニングが可能なニューラルネット駆動形ファ
 ジィ推論が提案されている⁽⁵⁾。ニューラルネット駆動形
 ファジィ制御は、ファジィ制御で用いる if..., then...
 形式の推論ルールによりモデルを構成するため熟練オ
 ペレータの経験則を取り入れることができ、かつ学習
 性を用いることでより適応土質の広がる可能性がある。
 本制御方式において、上下の場合の入力は、ずれ量
 とピッチングの 2 変数とし、左右の場合、ずれ量の 1
 変数とした。上下方向の場合、実施工データにおける
 ずれ量とピッチングに対する制御量を調べると、ずれ
 量とピッチングがともに正、ずれ量とピッチングがと
 もに負のときの制御出力が多いため、ずれ量とピッチ
 ングに対する制御量の入出力データを 2 分割した。こ
 のとき、ずれ量とピッチングの入力変数を x_1 , x_2 に、
 これらに対する出力を y に設定して前件部の同定を
 行った。また前件部のファジィ数のメンバシップ値は
 誤差伝ば学習モデル 3 層 [2×2×2] すなわち、入力層
 2、中間層 2、出力層 2 の各ユニット数を用いて決定

した。左右方向の場合、3 層 [1×2×2] を用いた。制
 御量の推定値 y_i^* は入力データ x_{i1} , x_{i2} に対する学習
 後の推定値 ey_i より、シングルトンの式(5)で求め
 た。

$$y_i^* = \frac{\sum_{s=1}^N \mu_{As}(x_{i1}, x_{i2}) xey_{is}}{\sum_{s=1}^N \mu_{As}(x_{i1}, x_{i2})} \quad (i=1, \dots, N) \quad \dots\dots\dots(5)$$

ただし、

μ_{As} : 各推論ルールにおけるメンバシップ値

ey_{is} : 後件部の推定値

N : データ数

4. 実 験

4・1 実験方法

4・1・1 土質条件 実験に供した土質条件を表 5
 に示す。

表 5 における標準貫入試験値、すなわち N 値につ
 いては、動的円すい貫入試験により求めた試験値を標
 準貫入試験値への換算式を用いて換算したものであ
 り、湿潤密度、含水比については土質試験法⁽⁶⁾により
 求めた。

表 5 によると、対象土質は典型的な関東ロームであ
 る⁽⁶⁾。

4・1・2 実験方法 実験ピットの概要を、図 14 に
 示す。

表 5 土質条件

N-value	3 ~ 5
Wet unit weight	13.73 kN/m ³
Water content	90 %

図 13 上下方向制御における推論演算の過程

図14において、推進管路部分は開削後土を埋め戻し、 N 値が5程度になるまで転圧を行った。推進速度は約 8.33×10^{-4} m/s、スクリーオーガの回転速度は 0.25 s^{-1} で一定とし、埋設位置は約0.35 m間隔で実験を行った。実施工に合わせるために、スタートから推進距離0.5 mまでは管位置がずれないように調整し、その後、手動、シーケンス、ファジィ、ニューラルネット駆動形ファジィの順に制御実験を行い、これら各制御方式の施工精度を調べた。

4・2 実験結果 手動制御による上下方向のずれ量およびピッチングと制御量の関係、左右方向のずれ量

図14 実験ピットの概要

図15 手動制御による上下方向の実験結果

図16 手動制御による左右方向の実験結果

図17 シーケンス制御による上下方向の実験結果

量と制御量の関係をそれぞれ図15、図16に、シーケンス制御による上下方向のずれ量およびピッチングと制御量の関係、左右方向のずれ量と制御量の関係をそれぞれ図17、図18に示す。

ファジィ制御による上下方向のずれ量およびピッチングと制御量の関係、左右方向のずれ量と制御量の関係をそれぞれ図19、図20に、ニューラルネット駆動形ファジィ制御による上下方向のずれ量およびピッチングと制御量の関係、左右方向のずれ量と制御量の関係をそれぞれ図21、図22に示す。

ただし、シーケンス制御の上下方向についてはずれ量のみをパラメータとして制御量を出力し、ピッチングの値は参考までに載せたものである。

手動、シーケンス、ファジィ、ニューラルネット駆動形ファジィ各制御方式における、上下方向でのずれ量、ピッチング、制御量の分散値を表6に示す。表6において、ニューラルネット駆動形ファジィ制御は、N.F.と略記した。

図18 シーケンス制御による左右方向の実験結果

図19 ファジィ制御による上下方向の実験結果

図20 ファジィ制御による左右方向の実験結果

5. 考 察

各制御方式において、それぞれ上下、左右方向で 20×10^{-3} m 以内のずれとなる良好な精度結果を得た⁽⁷⁾。

手動制御による上下、左右方向の実験結果である図 15、図 16 と、シーケンス制御による上下、左右方向の実験結果である図 17、図 18 を比較すると、手動制御の場合、蛇行を生じさせないために最も重要な初期の推進において、1.5 m 付近までできるだけ制御量を抑えて、蛇行を生じさせないように操作していることがわかり、表 6 に示した上下方向でのずれの分散値も、手動制御 11.83、シーケンス制御 20.53 で、手動制御のほうが優れている。

ファジィ制御、ニューラルネット駆動形ファジィ制御をシーケンス制御と比較すると、表 6 における上下方向のずれ量の分散は、シーケンス制御 20.53、ファジィ制御 27.86、ニューラルネット駆動形ファジィ制御 18.41 であり、ファジィ制御のほうが、シーケンス制御の値より大きい。図 17 と図 19 を比較すると、大きなずれを生じていないファジィ制御のほうが精度がよい。この原因は、表 2 の制御規則に示したように、シーケンス制御は断続的な値を出力するのに対し、ファジィ制御は連続的な値を出力するからであり、その結果として、表 6 における制御量分散値がシーケンス制御で 0.0677 であるのに対して、ファジィ制御が 0.0287 で小さく、制御量を抑えた蛇行の生じにくい制御を行っていると考えられる。

図 21 ニューラルネット駆動形ファジィ制御による上下方向の実験結果

図 22 ニューラルネット駆動形ファジィ制御による左右方向の実験結果

シーケンス制御では、規則作成において言語的規則を形成できず、またピッチングをパラメータに取り入れられないため、実際のオペレータ操作には近づきにくく、入力値の範囲によって一定の値が定められているため、土質への広範な対応において問題がある。

ファジィ制御、ニューラルネット駆動形ファジィ制御は、ずれ量とピッチングの値によつて的確な制御量を出力するのでオペレータの感覚に合っている。

小口径管推進工法の方方向制御を自動化するためにはシーケンス制御よりもきめ細かい制御を行う必要があり、この点で、ファジィ制御や、ニューラルネット駆動形ファジィ制御が有効であると考えられる。

下水道埋設管においては、特に上下方向の管路こう配がパーミル単位で厳しいため、左右方向より重要である⁽⁷⁾⁽⁸⁾。この点で、上下方向において、図 19 に示したファジィ制御、図 21 に示したニューラルネット駆動形ファジィ制御ともに、図 15 に示した手動制御と比較して大きなずれを生じることなく、十分な施工ができていると考えられる。ただし、図 19 における推進距離 2.5 m 付近に現れるずれ量の下方向への急激な変化は、管接続作業中にずれ量計測用ポテンシオメータがずれてしまったためである。このポテンシオメータのずれは、管接続時にスクリー接続用スプリングピンの抜き差しにより生じるものと考えられる。より正確にずれ量を計測するためには、これを防ぐための計測方法を工夫する必要がある。しかし、手動と比較するとずれ量も小さいので、ファジィ制御とニューラルネット駆動形ファジィ制御は実施工にも十分適用でき手動制御に近い施工ができるものと考えられる。なお図 15 における手動制御の推進終了付近における急激な上方向へのずれの発生は、推進力の方向が上向きに傾いたために生じたものである。

表 6 上下方向の分散値

Control Method	Displacement	Pitching	Control Rate
Manual	11.83	1.30	0.0447
Sequence	20.53	1.80	0.0677
Fuzzy	27.86	2.36	0.0287
N. F.	18.41	1.31	0.0390

ファジィ制御と、ニューラルネット駆動形ファジィ制御のどちらが方向制御に適しているかは、さらに実験を重ねて判断すべきであろう。

小口径管推進工法では、実物大の推進機によって1制御システムについてのみ確認試験を行っているのが実状である。本実験のように、モデルプラントによって実験を行うと、システムの実証も容易であり、比較する制御方式も拡大する。本研究では、小口径管推進工法において、モデルプラントによってシステムを十分実証できることも確認された。

6. 結 言

小口径管推進工法における方向制御について、各種の制御方式による模型実験を行った結果、得られた結論は以下のとおりである。

(1) ずれに対する出力値は、ファジィ制御、ニューラルネット駆動形ファジィ制御の場合、連続的である。オペレータへのアンケートによりメンバシップ関数、規則表を作成した上で実証試験を行ったので、これら制御方式の出力値は、熟練オペレータによる手動制御の感覚に近い。

(2) 小口径管推進工法の自動方向制御には、ファ

ジィ制御とニューラルネット駆動形ファジィ制御が有用であることが模型実験を通じて確認された。

(3) 同一土質条件であれば、モデルプラントによって、小口径管推進機の方向自動化システムを実証できることが確認できた。

文 献

- (1) (社団法人)日本下水道協会編, 下水道協会誌, 30-351 (1993-2), 4-17.
- (2) 青島・ほか2名, 小口径トンネルロボットのダイナミックモデル推定, 第7回日本ロボット学会学術講演会, (1989-11), 715-716.
- (3) 林・ほか4名, 土木施工技術へのファジィ理論の応用—トンネル掘削機の制御を中心に—, 日本ファジィ学会誌, 2-3(1990-8), 340-351.
- (4) 本多・大里, ファジィ工学入門, (1991-4), 136-166, 海文堂.
- (5) 林・ほか2名, ニューラルネット駆動型ファジィ推論による推論ルールの獲得, 日本ファジィ学会誌, 2-4(1990-11), 585-597.
- (6) 土質工学会編, 土質試験法—第2回改訂版, (1988-8), 2.3.1-2.4.18, 土質工学会.
- (7) (社団法人)日本下水道管渠推進技術協会編, 推進工法高度化検討委員会最終報告書, (1992-2), 4.
- (8) 日本推進工法協会編, 推進工法講座, (1988-4), 241-266, 日本推進工法協会.