

技術情報

シリーズ第6回

「小口径管推進工法の高度化に関する研究」 ファジィによる方向制御事例 5

* 高津 知司

建設省土木研究所
機械施工部
機械研究室
研究員

** 黒澤 友博

NTTフィールドシステム研究開発センタ
土木システム開発プロジェクトグループ
主任技師

*** 川上宏一郎

NTTフィールドシステム研究開発センタ
土木システム開発プロジェクトグループ

1. 圧入式一工程方式の概要

通信ケーブル用管路の非開削工法として長距離曲線施工が可能な圧入式一工程方式の推進システム(エースモールPL30システム)を開発し、これまでに施工延長60kmを推進している。また、1スパンの推進距離としては、最大260m、曲線施工では曲率半径80mの施工実績がある。地下通信設備は、マンホール間隔が平均150m、最大で250mとなるため、管路線形も自ずから曲線区間を含む場合が少なくない。PL30システムは長距離・曲線施工を可能にするために特殊な位置検知装置、センサを備えているが、熟練したオペレータは位置検知装置、センサから得られる情報から、経験的な知識に基づいてマシンの状態を推測し、複雑な計画線形にマシンを沿わせるように方向制御を行っている。従って、方向制御の自動化のためには、熟練オペレータの経験的な知識を制御則に盛り込む必要がある。そこで、経験的な知識を制御に取り込めるファジィ理論を応用し、オペレータの技術力に依存しない高精度な施工が可能な方向制御システム¹⁾を構築した。

(1) PL30システム²⁾³⁾⁴⁾

本システムは、無排土圧入方式により $\phi 300\text{mm}$

の管を推進する工法であり、推進管の内部には $\phi 75\text{mm}$ の通信ケーブル用管路を7条敷設できる。この工法では、長距離・曲線推進を実現するために以下の方式を採用している。

① 推力の低減方式

先端抵抗力を先端ジャッキに、推進管などにかかる周辺摩擦力を元押しジャッキにそれぞれ分担させ、双方のジャッキを交互に動作させるものである。

② 位置検知技術

従来からの光学検知方式は推進距離・線形に制約を受けるため、電磁界を利用した水平位置検知

* 略歴

高津知司(たかつ・ともじ)/昭和62年3月京都工芸繊維大学大学院工学研究科修了(工学修士)。同年4月建設省土木研究所研究員、現在に至る。

** 略歴

黒澤友博(くろさわ・ともひろ)/昭和55年3月東北大学土木工学科卒業。平成元年4月NTTフィールドシステム研究開発センタ主任技師、現在に至る。

*** 略歴

川上宏一郎(かわかみ・こういちろう)/昭和63年3月京都大学大学院工学研究科修了(工学修士)。平成元年8月NTTフィールドシステム研究開発センタ社員、現在に至る。

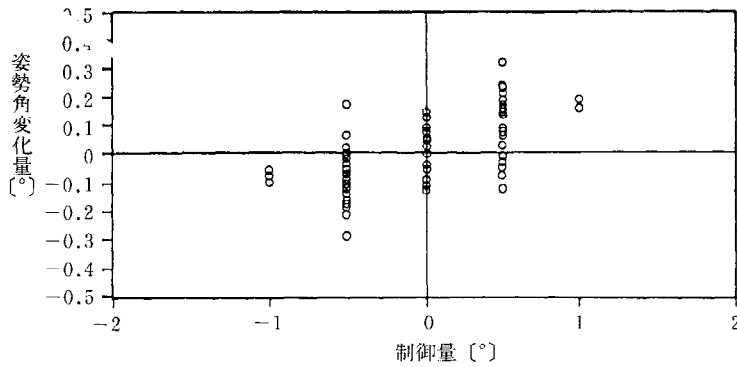


図 1.1 制御量と姿勢角変化量の関係

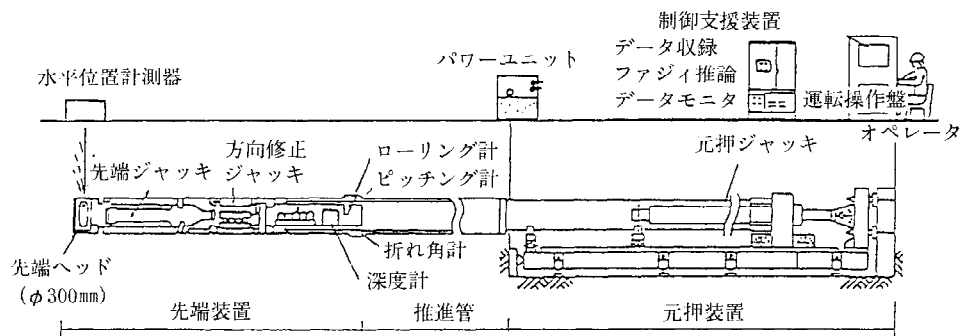


図 2.1 システム構成

方法(先端装置の先端ヘッド内部に収納した発信コイルから発生する電磁界を地上で受信器で検出して、計画線からの偏位量を測定する方法(精度: ± 2 cm以内))、液圧差を利用した垂直位置検知方法(シリコンオイルの満たされたパイプ端部の圧力と基準圧力の差を測定して計画線からの偏位量を測定する方法(精度: ± 1 cm以内))を採用している。

③ 方向制御機構

先端ヘッドを強制的に傾動(± 1.5 度以内)し、先端装置を追従させることにより行う。

(2) 従来システムの方方向制御上の課題

方向が変化する際、先端装置は周辺の土から種々の力を受けることになるが、この力の方向・大きさは、土質条件、埋設物等の影響により変化する。図 1.1 は、ある施工現場(土質: ローム)における傾動角(制御量)と先端装置の姿勢角変化量(制御効果)の関係を示したものである。明らかに、

制御量に対する姿勢角変化量のばらつきが大きいことがわかる。このような傾向は地盤の種類に関わらず見られるものである。以上のことから、目標とする制御効果に対する適切な制御量(傾動角)を従来の制御理論により求めることは、不可能であると考えられる。そこで、制御量を出力する方法として熟練オペレータが実際に行っている制御法の模倣を基本とする方式を採用することにした。熟練オペレータの持つ制御知識には曖昧表現されている情報が多く含まれることから、曖昧な情報を簡単に取り扱えるファジィ理論を適用した。すなわち、制御知識をファジィルールで表現し、推論をファジィ推論で行うことにより、熟練オペレータの操作に近い制御を実現できる新しい方向制御システムを開発した。

2. 新方向制御システムの概要

図 2.1 にシステム構成を示す。先端装置、元押し装置、パワーユニット、操作盤および制御支援

```

if (DT is PB) and (DS is PB) then DO is NB
if (DT is PM) and (DS is PB) then DO is NB
if (DT is PS) and (DS is PB) then DO is NM
if (DT is ZO) and (DS is PB) then DO is ZO
if (DT is NB) and (DS is NB) then DO is PM
if (DT is NM) and (DS is NB) then DO is PB
if (DT is NS) and (DS is NB) then DO is PB

```

但し、DT：偏角、DS：偏位、DO：傾動角

図3.1 制御則

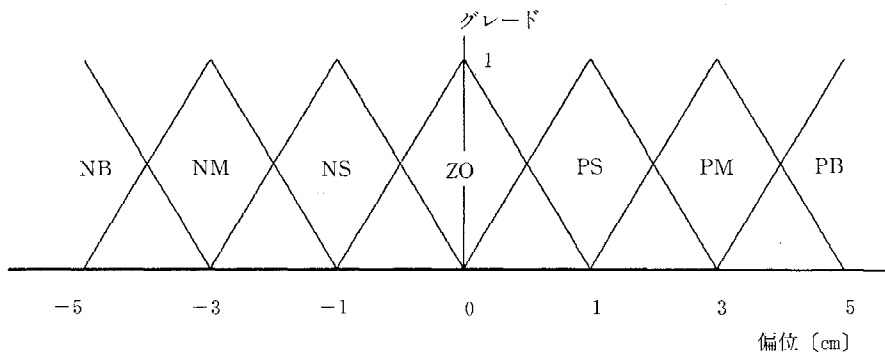


図3.2 偏位のメンバーシップ関数

装置からなる。制御支援装置はデータ処理機能、制御量推論機能、データモニタ機能を有しており、まず先端装置に搭載されているピッチング計、ローリング計、折れ角計、位置検知装置等からのデータを基に先端装置の姿勢、位置を計測し、水平方向、垂直方向の2方向について先端装置の計画線からの位置、姿勢のずれ量(偏位、偏角)を算出する。次に、この値を入力値として推論を実行して制御量(先端ヘッドの傾動角)を決定し、CRT上に表示する。オペレータは表示された指示通りの制御を行うことになる。

熟練オペレータの専門知識はファジィルールの形で表現され、ルール中に現れる曖昧さを含む単語はメンバーシップ関数により定義され、それぞれ制御支援装置に登録されている。

本システムには、ルール・メンバーシップ関数の地盤条件への適合性を簡単に評価し調整できる機能を有している。この機能を用いることにより、

推進中の地盤条件の変化に対しても柔軟に対応した制御が行えるため、特に長距離推進時において高精度な推進が実現できる。

以下に、ファジィ制御、ルール・メンバーシップ関数調整機能について詳しく述べる。

3. ファジィ制御³⁾⁶⁾

センサデータより先端装置の位置、姿勢等の情報を計算し、それを入力値としてファジィ推論をおこない、適切な制御量を出力するものである。

(1) 制御則(ファジィルール)

ルール則を作成するに当たっては、熟練オペレータの操作方法の模倣を基本とした。熟練オペレータからのヒアリング調査により、システムの入力項目を計画線勾配・水平位置・深度・水平折れ角・ピッチング角、出力項目を先端ヘッドの傾動角と定め、「計画線から外れたとき急激な修正は行わない」、「位置の偏差が小さければ方向の偏差を小さくする」を制御の基本的な考え方とした。

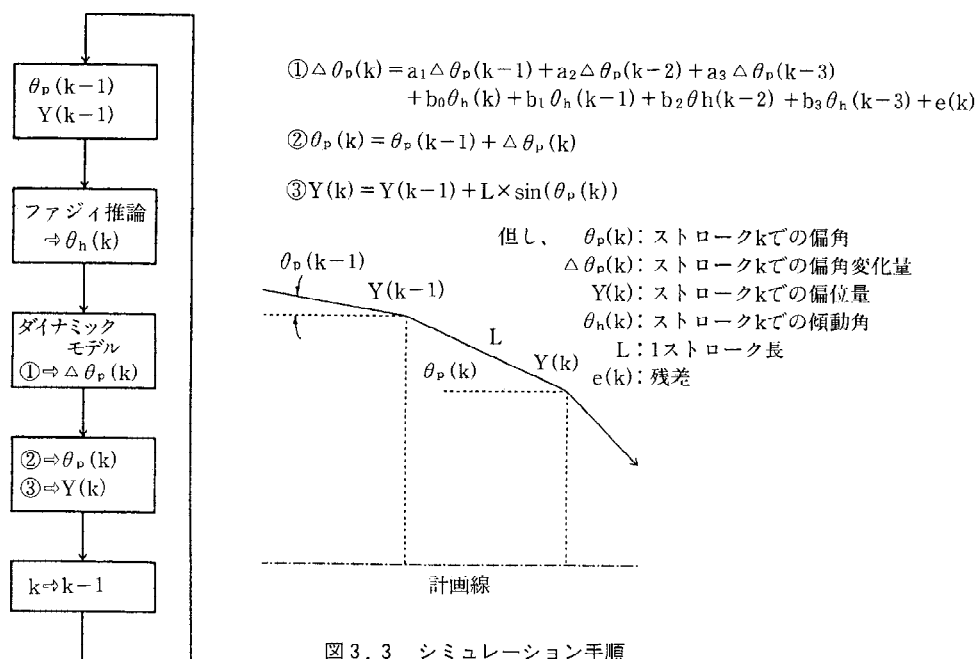


図 3.3 シミュレーション手順

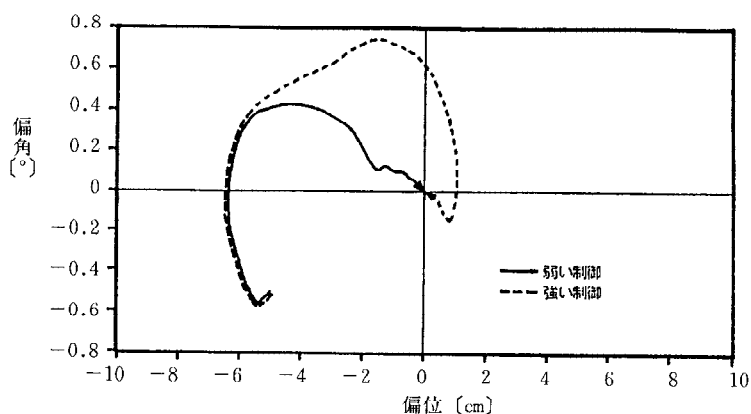


図 3.4 シミュレーション結果

入力変数は、計画線からの位置および角度のずれ量(偏位、偏角)をとり、それぞれに7つのファジィ変数を対応させた。各々のラベルを、PB: 正で大、PM: 正で中、PS: 正で小、NB: 負で大、NM: 負で中、NS: 負で小、ZO: 零、のように定めた。ファジィルールは上記の基本的な考え方を考慮し、このファジィ変数を用い記述した。図3.1にその一部を示す。

熟練オペレータの施工実績のデータを基に、入出力項目(偏位、偏角、傾動角)に対するメンバー

シップ関数を設定した。偏位のメンバーシップ関数を図3.2に示す。

(2) ルール・メンバーシップ関数適合性評価と調整

ファジィルール、メンバーシップ関数の地盤条件に対する適合性はダイナミックモデル⁷⁾を用いたシミュレーションにより行った。図3.3にシミュレーションの手順を示す。ある施工現場Aを対象にシミュレーションを行った結果、偏位-偏角図が図3.4中実線のように得られた。比較的良

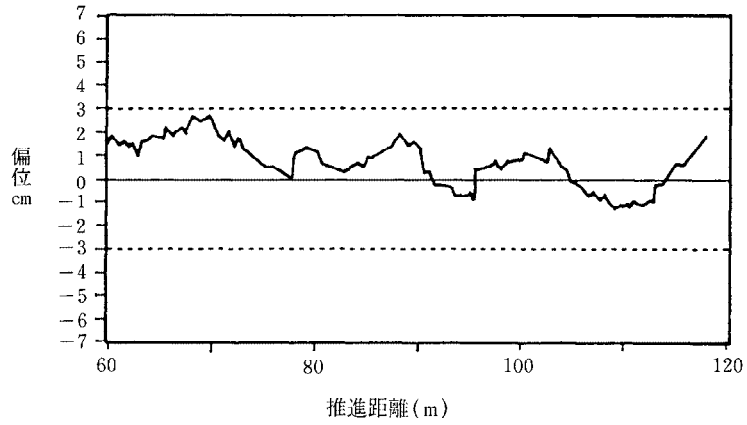


図 4.1 垂直方向偏位

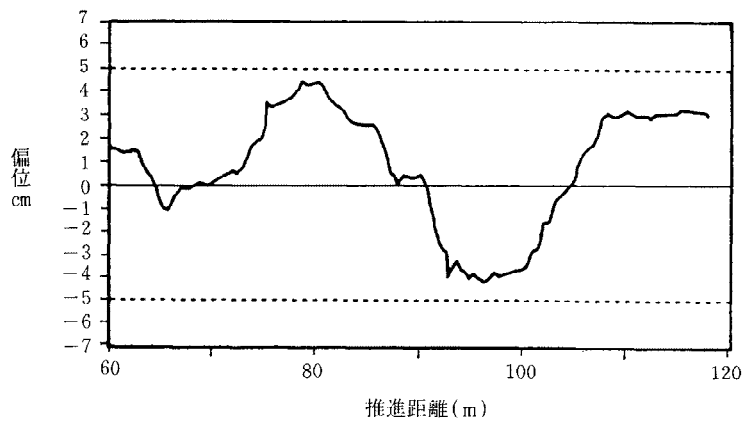


図 4.2 水平方向偏位

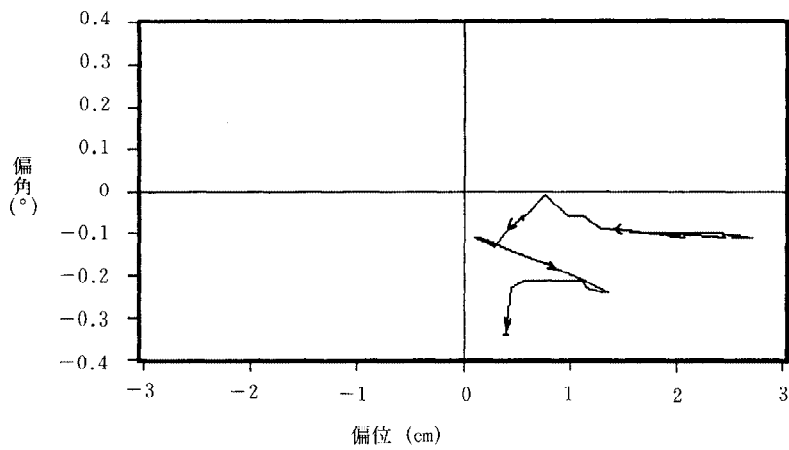


図 4.3 偏位－偏角図

好に集束していると判断できる。このルールに対し、計画線に近づけようとする制御を強くする(「強い制御」と図3.4中破線のような結果が得られる。この場合、オーバーランの挙動や制御量を変える頻度が高く実際的ではないと判断できる⁸⁾。このようにして、実地盤への本システムの適用の際には事前にシミュレーションを実施し、土質条件に適合するようにメンバーシップ関数、ファジィルールを調整する。

また、制御則の変更を簡単に現場で行うための機能も用意されている。これは、推進中に変更の必要が生じた場合、推進モニタ画面上で簡単な操作を行うことにより、ルール・メンバーシップ関数の変更およびシミュレーションの実施が行えるというものである。

4. 現場適用試験

ファジィ推論を推進システムに取り込み、所内で機能試験を実施した結果、シミュレーションと同様の結果が得られた。そこで、実地盤(土質: ローム、N値: 5)で試用試験を行い、(推進距離: 60m)、その制御性能、有用性の評価を行った。なお、オペレータの経験年数は1年程度、経験工事件数も5件程度であり、どちらかと言えば熟練度は低い。

推進を行った結果、推進精度は-12~27mm(垂直方向)、-42~43mm(水平方向)であり、目標値(垂直: ±30mm、水平: ±50mm)であった。図4.1、図4.2に推進軌跡を図4.3に一部の区間における偏位-偏角図を示す。偏位偏角軌道が右回りとなっており、シミュレーションに見られるような良好な制御が行われたと判断できる。また、経験年数1年程度の機械操作は一通りできる程度のオペレータでも、本システムを用いると熟練オペレータ並ではないが良質な施工が行えることが判明した。

5. 今後の課題

今回開発したシステムにより、当初問題であった熟練オペレータ不足に対応できるが、本システムでは個々の工事現場に合うように事前および施工中に推論を調整する必要がある。人間の判断で調整するのではなく、自動的に必要な調整を行いながら推進できるシステムの開発が重要である。加

えて、さらに多くの現場について分析を詳細に行って広範囲の現場に対応できる汎用性のある方向制御システムとする。

6. 謝 辞

エースモールPL30システムのファジィ方向制御システムは、建設省官民連帯共同研究「小口径管推進工法の高度化」(昭和63年~平成2年度)の成果の一部であります。本研究に対し貴重な助言を頂いた永田伸之日本大学教授、竹下貞雄立命館大学教授に感謝を申し上げます。また、研究に協力して頂いた建設省土木研究所およびNTTフィールドシステム研究開発センタの諸氏に感謝の意を表します。

7. 参考文献

- 1) Takatsu, T., Takeda, H. and Cho, K., A Concept of Strategy for a Standard in the Micro-tunnelling System, U.S.A. Symposium on Flexible Automation, A Pacific Rim Conference, ISCIE, Kyoto Japan (1990), pp.493-pp.496.
- 2) 野村、保科、塩見、梅津、方向制御可能なトンネル機械の設計と特性、土木学会論文集、No.352(1984), p.99-107.
- 3) 野村、保科、梅津、トンネル機械の水平位置計測法、土木学会論文集、No.358(1985), p.61-68.
- 4) 野村、トンネル機械の方向制御方法、電子通信学会論文誌、Vol.J68 D No.11(1985), p.1941-1947.
- 5) 菅野道夫、ファジィ制御、日刊工業新聞社.
- 6) 桑原、原田、背野、竹内、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、No.391(1988), p.169-178.
- 7) Aoshima, S. and Yabuta, T., Dynamic Model Identification and Control for a Small Diameter Tunnelling Robot, Proc. 11th ASME Winter Annual Meeting(1990).
- 8) Toshio, T., Tomohiro, K., Fumihide, S., Kouichirou, K., and Yoshihiro, H., Directional Control Employing Fuzzy Reasoning of a Microtunnelling System, 8th International Symposium on Automation and Robotics in Construction(1991), pp.893-pp.900.