小口径トンネルロボットのファジィ方向制御法* (シミュレーションによる検討)

青島伸一^{*1}, 武田幸喜^{*1}, 藪田哲郎^{*1}

Fuzzy Directional Control for Small Tunnelling Robot (Investigations by Simulations)

Shin'ichi AOSHIMA, Kouki TAKEDA and Tetsuro YABUTA

This paper describes a fuzzy directional control method for directional correction of a small-diameter tunnelling robot which constructs conduits of telecommunication cables. The directional control of a tunnelling robot conventionally depends on both the experience and intuition of the operator, and there have been no studies with regard to its automation. Therefore, in order to establish automatic control technology for a small-diameter tunnelling robot we proposed the fuzzy directional control method which can utilize both the experience and knowledge of operators as a control rule. This fuzzy control uses a fuzzy rule set for [deviation, angular deviation] and [head angle (control input)]. We obtained an optimum fuzzy rule and optimum fuzzy set of values by using a dynamic simulator. Moreover, we obtained a fuzzy control method which can be applied to change the initial position of the robot. Simulation results clarified the validity of the proposed fuzzy control methods.

Key Words: Tunnelling Robot, Fuzzy Control, Directional Control, Conduit, Telecommunication cable, Simulation

1. はじめに

本小口径トンネルロボットは無排土式で押込み推進させながらロボット先端のヘッド角を制御し、方向修正を行う。この方向制御は現状ではオペレータの経験と知識に頼っている。しかし、現在、施工品質の均一化、作業の効率化などの観点から方向制御の自動化が望まれている。そこで、著者らは各種制御則を適用し、方向制御自動化の検討を行っており、計画線に対する偏差と偏角をフィードバックする制御法は既に提案している⁽¹⁾⁽²⁾。そのほか、この分野の自動化の例としてシールド掘進機の方方向制御にファジィ制御を適用したものがあ⁽³⁾。このファジィ制御はオペレータの経験と知識を制御規則として有効に利用できるといわれており、各分野で盛んに応用研究が行われている。上述の例では、偏差と偏差の変化量および偏角と偏角の変化量に関する2組のファジィ制御規則から得られる出力を結合係数で結び最終的な制御入力を求めることを特徴としている。それに対して、本報告では偏差と偏角

および制御入力に関する1組のファジィ制御規則を用いたファジィ制御法を本小口径トンネルロボットの方方向制御法に適用しその有効性を検討した⁽⁴⁾。具体的にはまず、前報で報告した方向制御シミュレータ⁽²⁾を用い、ファジィ制御規則を色々変化させ最適ファジィ制御規則を求めた。次に、初期位置を変化させた場合の偏差と偏角の最適ファジィ集合代表値を求めた。さらに、初期位置が変化しても対応できるファジィ制御規則とファジィ集合代表値を求め、その有効性を確認した。

2. システム構成

図1にトンネルロボットのシステム構成を示す。本システムはヘッド角修正機能を持つトンネルロボット

図1 トンネルロボットのシステム構成

* 平成2年11月2日 日本ロボット学会第8回学術講演会において講演、原稿受付 平成3年7月1日。

^{*1} NTT フィールドシステム研究開発センタ (〒319-11 茨城県東海村白方白根162)。

本体、埋設管、埋設管を押込む押管装置、油圧装置、操作盤よりなる。埋設管は押管装置により油圧で1本ずつ押込まれる。このとき、オペレータはヘッド角を逐次修正し、計画線に沿うように方向制御を行う。ロボットのヘッドの直径は34 cm、埋設管の長さは約2.5 m、直径は32 cmである。

3. ダイナミックモデル推定

図2で、本トンネルロボットのヘッド角とピッチング角について定義する。ヘッド角はロボット本体とヘッドのなす角であり、ピッチング角は計画線とロボット本体とのなす角、そして、ピッチング角変化量は1ストローク前と現在のピッチング角の差分である。トンネルロボットの施工データの分析により、現時刻のトンネルロボットの姿勢を近似的に表すピッチング角変化量の時系列項は、方向修正量に大きな影響を与えることがわかった⁽⁵⁾ので、この時系列項を含めたダイナミックモデルで上記入出力関係を表した。生成したダイナミックモデルを式(1)に示す。このモデルは方向修正量がヘッド角とロボットの姿勢を近似的に表すピッチング角変化量の時系列項および確率分布項の和で表せる確率モデルで表した⁽¹⁾。パラメータ a_n , b_n は最小二乗法によって推定される。以下に推定法を述べる。式(2)は観測ベクトル値 $\{\Delta\theta_p(k)\}$, $\{\theta_h(k)\}$ を式(1)に代入することによって得られる。評価関数 J は式(3)で表される。係数ベクトル α の最小二乗推定ベクトル α_e はこの評価関数 J を最小にする α となる。ベクトル α_e の右肩についている $'$ は推定値であることを意味する。この推定係数ベクトル α_e は最小二乗法を適用することにより式(4)のように与えられる⁽⁶⁾。 α_e を決定するためのデータ数 na の最小数は $3n+1$ となる。

ダイナミックモデル

$$\Delta\theta_p(k) = a_1\Delta\theta_p(k-1) + \dots + a_n\Delta\theta_p(k-n) + b_0\theta_h(k) + b_1\theta_h(k-1) + \dots$$

図2 ヘッド角とピッチング角変化量の定義

$$+ b_n\theta_h(k-n) + e(k) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\Delta\theta_p(k-n)$:ピッチング角変化量, $\theta_h(k-n)$:ヘッド角, $e(k)$:残差, n :モデルの次数

$$\Delta\theta_p = Z\alpha + E \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$J = [\Delta\theta_p - Z\alpha]^T [\Delta\theta_p - Z\alpha] \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\alpha_e = [Z^T Z]^{-1} Z^T \Delta\theta_p \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$\alpha = [a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_n]^T$$

$$\alpha_e = [a_1', a_2', \dots, a_n', b_0', b_1', \dots, b_n']^T$$

$$\Delta\theta_p = [\Delta\theta_p(n+1), \Delta\theta_p(n+2), \dots, \Delta\theta_p(na)]^T$$

$$E: \text{誤差ベクトル}, Z = [Z_1 \quad Z_2]$$

ここで、

$$Z_1 = \begin{bmatrix} \Delta\theta_p(n) & \Delta\theta_p(n-1) & \dots & \Delta\theta_p(1) \\ \Delta\theta_p(n+1) & \Delta\theta_p(n) & \dots & \Delta\theta_p(2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta\theta_p(na-1) & \Delta\theta_p(na-2) & \dots & \Delta\theta_p(na-n) \end{bmatrix}$$

$$Z_2 = \begin{bmatrix} \theta_h(n+1) & \theta_h(n) & \dots & \theta_h(1) \\ \theta_h(n+2) & \theta_h(n+1) & \dots & \theta_h(2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \theta_h(na) & \theta_h(na-1) & \dots & \theta_h(na-n) \end{bmatrix}$$

na : データ数

表1に上記推定法を用いて推定された土質の異なる各地区のパラメータ推定値を示す。土の種類は土、砂、ロームの3種類、 N 値は0~7の土質の各地区の実測データを使っている。 N 値は土質の硬さ、締り具合を表す数値で、値が大きいほど硬い。本報告におけるシミュレーションではこれらの値を用いている。

4. シミュレータ

図3でシミュレータで用いる各パラメータを定義する。下方の軌道が計画線であり、上方の軌道がロボットの軌道である。ストローク K における計画線の位置を $Yd(k)$ 、計画線の傾きを $\theta d(k)$ 、ロボットの位置を $Y(k)$ 、ロボットのピッチング角を $\theta p(k)$ 、ピッチング角変化量を $\Delta\theta p(k)$ 、1ストロークの長さを L 、残差を $e(k)$ 、モデルの次数を n とおく。なお、本モデルでは次数は3とした⁽¹⁾。

表1 土質の異なる各地区のパラメータ推定値

District	Soil	N value	a_1	a_2	a_3	b_0	b_1	b_2	b_3	$e(k)$
Koshigaya	Clay	0	0.198	0.062	0.128	-0.056	0.144	-0.007	-0.066	No (0.0030)
Okayama	Clay	0~2	0.168	0.113	0.093	-0.043	0.120	-0.010	-0.023	No (0.0137)
Yokosuka	Clay	4~5	0.128	0.154	0.122	-0.080	0.166	-0.008	-0.048	No (0.0056)
Sayama	Loam	5	0.633	0.089	-0.030	0.160	-0.090	0.012	-0.053	No (0.0049)
Tousento	Sand	5	0.735	-0.052	0.109	-0.006	0.053	0.035	-0.068	No (0.0055)
Zama 2	Loam	5~7	0.145	0.216	0.305	0.064	0.058	-0.040	-0.037	No (0.0059)
Zama 1	Loam	7	0.204	0.294	0.149	0.078	0.049	-0.096	-0.022	No (0.0084)

方向修正に関するシミュレータは前述したダイナミックモデル [式(1)] とロボットのピッチング角と位置の算出式 [式(5), (6)] によって構成される。方向制御のシミュレーションは以下のように行う。まず, 式(7)で示すように, ある制御則を用いてヘッド角を求める。次にそのヘッド角を式(1)のダイナミックモデルに代入し, 方向修正量を計算する。

シミュレータ

$$\begin{aligned} \Delta\theta_p(k) = & a_1\Delta\theta_p(k-1) + \dots + a_n\Delta\theta_p(k-n) \\ & + b_0\theta_h(k) + b_1\theta_h(k-1) + \dots \\ & + b_n\theta_h(k-n) + e(k) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

$$\theta_p(k) = \theta_p(k-1) + \Delta\theta_p(k) \dots\dots\dots (5)$$

$$Y(k) = Y(k-1) + L\sin(\theta_p(k)) \dots\dots\dots (6)$$

制御則

$$\theta_h(k) \leftarrow \text{制御則} \dots\dots\dots (7)$$

5. ファジィ推論法

本報告では, 小口径トンネルロボットの方向制御の制御入力であるヘッド角の決定法に関して, 以下の多重ファジィ制御規則を用いた。また, 実際の制御入力であるヘッド角を求める非ファジィ化手法としては「代数積-加算-重心法」を用いた。

多重ファジィ制御規則

「IF x is A AND y is B THEN z is C 」

前件部 x として小口径トンネルロボット本体の計画線に対する偏差, 前件部 y として計画線に対する偏角, 前件部 A として x を示すファジィ集合, 前件部 B として y を示すファジィ集合, 後件部 z として小口径トンネルロボットのヘッド角, 後件部 C として z を示すファジィ集合をとり, ファジィ制御規則を用いて, 偏差, 偏角のファジィ集合の代表値である三角形の頂点での偏差, 偏角の値の絶対値を大きい順に $A, B, C, \dots, Z, 0$ としたとき $A-B > B-C > \dots > = Z$ となるように, $A, B, C, \dots, Z$ の値を決定する。以下に非

図3 シミュレータで用いるパラメータの定義

ファジィ化の手法を示す。実際の制御では, ある与えられた偏差, 偏角によって制御入力ヘッド角を非ファジィ化によって求める際, 式(8)に示す四つの多重ファジィ制御規則が必要となる。今, 平面上の格子点 $(X_1, Y_1), (X_1, Y_2), (X_2, Y_1), (X_2, Y_2)$ (ただし, $X_1 < X_2, Y_1 < Y_2$) での高さをそれぞれ Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 とする。これを, ファジィ推論化すると式(8)のように表せる。

$$\begin{array}{rcl} X_a \text{ and } Y_a & Z_a \\ X_a \text{ and } Y_b & Z_b \\ X_b \text{ and } Y_a & Z_c \\ X_b \text{ and } Y_b & Z_d \\ X_0 \text{ and } Y_0 & \\ \hline Z_0 & \dots\dots\dots (8) \end{array}$$

ただし, X_a, X_b は位置偏差のファジィ集合, X_0 は X_a, X_b のファジィ集合に含まれる。 Y_a, Y_b はピッチング角度偏差のファジィ集合, Y_0 は Y_a, Y_b のファジィ集合に含まれる。 Z_a, Z_b, Z_c, Z_d はヘッド角のファジィ集合, Z_0 は Z_a, Z_b, Z_c, Z_d のファジィ集合に含まれる。

この場合, 点 X_0, Y_0 が与えられたときの点 Z_0 の求め方を図示すると図4のようになる。図4は, ファジィ集合 X_a, X_b が同じ幅の三角形であり, 高さ0.5交わるものとする。ファジィ集合 Y_a, Y_b についても同様である。ファジィ集合 Z_a, Z_b, Z_c, Z_d については同じ幅の三角形ではあるが, 隣と0.5の高さで交わる必要はないとする。前記多重ファジィ制御規則に偏差 $x = X_0$, 偏角 $y = Y_0$ が入力されたとき, 非ファジィ化の手法として「代数積-加算-重心法」を用いると, 任意

図4 非ファジィ化の手法

の Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 に対して、以下の双二次形式により制御入力であるヘッド角 Z_0 は、式(9)により求めることができる⁽⁷⁾。

$$Z_0 = abZ_1 + a(1-b)Z_2 + (1-a)bZ_3 + (1-a)(1-b)Z_4 \dots\dots\dots (9)$$

ただし、

$$a = (X_2 - X_0) / (X_2 - X_1)$$

$$b = (Y_2 - Y_0) / (Y_2 - Y_1)$$

ファジィ制御シミュレータのブロック線図を図5に示す。次章以降では、本章で述べた非ファジィ化の手法によりヘッド角を求め、方向制御を行った。

6. ファジィ方向制御法

小口径トンネルロボットの方向制御の制御入力であるヘッド角の決定法に関して、

多重ファジィ制御規則

「IF x is A AND y is B THEN z is C 」

前件部 x として小口径トンネルロボット本体の計画線に対する偏差、前件部 y として計画線に対する偏角、前件部 A として x を示すファジィ集合、前件部 B として y を示すファジィ集合、後件部 z として小口径トンネルロボットのヘッド角、後件部 C として z を示すファジィ集合とする。このファジィ制御規則を用いて、我々の常識的な小口径トンネルロボットの方向制御に関する知識から、ある制御規則を作成してみた。これを、表2に示す。また、この制御規則を用いた岡山地区のシミュレーション結果を図6に示す。シミュレータとしては4章で述べたものを用いた。計画線は初期位置、角度とも零の水平線とした。また、偏差

表2 ファジィ制御規則

Deviation									
Angular deviation		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
	NB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	NB
	NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	NS	NB
	NS	PB	PB	PM	PS	ZO	NS	NB	NB
	ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB
	PS	PB	PS	ZO	NS	NM	NB	NB	NB
	PM	PB	ZO	NS	NM	NB	NB	NB	NB
	PB	PB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB

図5 ファジィ制御シミュレータのブロック線図

の、ファジィ集合の三角形の頂点と底辺の両端の値として、

$$PB = 500[\text{mm}], PM = 150[\text{mm}],$$

$$PS = 50[\text{mm}], ZO = 0[\text{mm}],$$

$$NS = -PS, NM = -PM, NB = -PB$$

偏角の、ファジィ集合の三角形の頂点と底辺の両端の値として、

$$PB = 3[\text{deg}], PM = 2[\text{deg}],$$

$$PS = 1[\text{deg}], ZO = 0[\text{deg}],$$

$$NS = -PS, NM = -PM, NB = -PB$$

ヘッド角の、ファジィ集合の三角形の頂点と底辺の両端の値として、

$$PB = 1.5[\text{deg}], PM = 1.0[\text{deg}],$$

$$PS = 0.5[\text{deg}], ZO = 0[\text{deg}],$$

$$NS = -PS, NM = -PM, NB = -PB$$

ただし、前記で示したように $|PB| - |PM| > |PM| - |PS| > |PS|$, $|NB| - |NM| > |NM| - |NS| > |NS|$ になるように選択してある。また、残差 $e(k)$ は平均値零 [deg], 標準偏差 0.137 [deg] の正規分布で近似した。初期位置、角度はそれぞれ、500 [mm], 零 [deg] とした。ただし、 $PB \sim NS$ は通常のファジィ制御で用いる記号と同じ意味で用いている。なお、ファジィ集合の形は三角形とし、図7のように設定されている。図6を見てわかるように、収束はするようだが、整定時間が長いことがわかる。そこで、ファジィ制御規則を変化させず、偏差、偏角のファジィ集合代表値の条件を変化させ良好な制御ができる条件を検討してみた。その

図6 表2の規則を用いたシミュレーション結果

図7 ファジィ集合

シミュレーション結果を図8に示す。図6に比べ収束はかなり速くなっているが、良好な制御とはまだいえない。ファジィ制御規則が同じでも、偏差、偏角のファジィ集合代表値を変化させることにより収束の仕方にかなり影響がでることがわかった。そこで、以下のように最適ファジィ制御規則と偏差、偏角ファジィ集合代表値を決定した。[STEP 1] 最適ファジィ制御規則を若干修正する[STEP 2] 偏差、偏角ファジィ集合代表値を試行錯誤的に変化させ、シミュレーションを行い、偏差の絶対値の総和が最小となる値を求めSTEP 1, 2を繰り返し行い、最適な制御規則とファジィ集合代表値を決定する。その結果、表3に示す最適ファジィ制御規則を生成した。この規則を用いたシミュレーション結果を図9に示す。ただし、計画線は初期位置、角度とも零の水平線とした。また、残差 $e(k)$

表3 ファジィ制御規則

		Deviation						
Angular deviation		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	NB
	NM	PB	PB	PB	PB	PE	NB	NB
	NS	PB	PB	PM	PS	ZO	NB	NB
	ZO	PB	PB	PS	ZO	NS	NB	NB
	PS	PB	PB	ZO	NS	NM	NB	NB
	PM	PB	PB	NB	NB	NB	NB	NB
	PB	PB	NB	NB	NB	NB	NB	NB

図8 シミュレーション結果

図9 表3の規則を用いたシミュレーション結果

は平均値零 [deg], 標準偏差 0.137 [deg] の正規分布で近似した。トンネルロボットの初期位置、角度はそれぞれ、500 [mm], 零 [deg] とした。偏差のファジィ集合代表値は、

$$PB=500[\text{mm}], PM=150[\text{mm}],$$

$$PS=50[\text{mm}], ZO=0[\text{mm}]$$

$$NS=-PS, NM=-PM, NB=-PB$$

偏角のファジィ集合代表値は、

$$PB=2.2[\text{deg}], PM=0.4[\text{deg}],$$

$$PS=0.2[\text{deg}], ZO=0[\text{deg}]$$

$$NS=-PS, NM=-PM, NB=-PB$$

ヘッド角のファジィ集合代表値は、

$$PB=1.5[\text{deg}], PM=1.0[\text{deg}],$$

$$PS=0.5[\text{deg}], ZO=0[\text{deg}]$$

$$NS=-PS, NM=-PM, NB=-PB$$

となった。図9を見てわかるように非常に良好な制御が行われていることがわかる。また、制御入力ヘッド角を調べたところ、所定の距離まではヘッド角を下方最大限の-1.5度に固定して最大限の速度で計画線に近づき、その後徐々に上方へヘッド角を制御し、計画線の角度に一致するように制御しており、ほぼ最適な制御を行っていることがわかる。次に、図9のファジィ制御と偏差、偏角のファジィ集合代表値を用いて初期位置を変化させたシミュレーションを行った。初期位置以外の条件は、図9と同じにした。その結果、図10に初期位置が200 [mm] の場合を示すが、このように、初期位置が下がってもそれに伴い、整定時間が短くなることはなく、初期位置 500 [mm] の場合とほぼ同じである。したがって、図9の偏差、偏角のファジィ集合代表値は初期位置が 500 [mm] のときにのみ有効であることがわかる。そこで、各初期位置に対する偏差、偏角のファジィ集合代表値を検討した。結果を表4に示す。表4を用いたシミュレーション結果を図11に示す。図11を見てわかるように、各初期位置のシミュレーションともほぼ最適な制御を行う。また、表4より、各初期位置と偏差、偏角のファジィ集合代表値

図10 シミュレーション結果

とは、ある関係があるように見える。そこで、各初期位置に対する偏差を図12に、各初期位置に対する偏角を図13に示した。図12, 13より初期位置に対する偏差と偏角のファジィ集合代表値に関する近似式を求めると初期位置 P_0 に対する、偏差のファジィ集合代表値に関する近似式

$$\begin{aligned} PB &= P_0 \\ PM &= 0.3P_0 \\ PS &= 0.1P_0 \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

初期位置 P_0 に対する、偏角のファジィ集合代表値に関する近似式

$$\begin{aligned} PB &= 0.812 + 0.0029P_0 \\ PM &= 0.224 + 0.00029P_0 \\ PS &= 0.0756 + 0.000159P_0 \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

になった。これらの近似式を用いたシミュレーション結果を図14に示す。図14と図11を比べてみると、ほぼ同じような制御が行われていることがわかる。したがって、初期位置に対する偏差、偏角のファジィ集合代表値を求める場合は、近似曲線式(10), (11)からファジィ集合代表値を求め、その値を使って方向制御すればよい。

7. 初期位置の変化に対応できる ファジィ方向制御法

前章では、初期位置が変化するたびに近似曲線式(10), (11)より初期位置に対する偏差、偏角のファジィ

ィ集合代表値を求め、方向制御を行っていたが、本章では、初期位置が変化しても偏差、偏角のファジィ集合代表値を変えずに良好な制御が行える多重ファジィ制御規則と偏差、偏角のファジィ集合代表値を求めた。データは岡山地区のものを使い、偏差、偏角のファジィ集合代表値と初期位置以外の条件は、図6の場合と同じ条件で、偏差、偏角のファジィ集合代表値と初期位置を変化させたシミュレーションを行い、良好な制御ができるファジィ集合代表値を求めたが、あまり良い結果は得られなかった。そこで、ファジィ制御規則のファジィ集合代表値を多くしてみた。前章での偏差、偏角のファジィ集合代表値 PB , PM , PS , ZO , NS , NM , NB の七つのファジィ集合代表値に PH , NH を加えたファジィ集合代表値を九つにした

図12 各初期位置に対する偏差

図13 各初期位置に対する偏角

表4 各初期位置に対する最適ファジィ集合代表値

Initial Position (mm)		500	400	300	200	100	50
Deviation (mm)	PB	500	400	300	200	100	50
	PM	150	120	90	60	30	15
	PS	50	40	30	20	10	5
Angular Deviation (deg)	PB	2.2	1.9	1.7	1.4	1.2	0.9
	PM	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2
	PS	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

図11 表4の代表値を用いたシミュレーション結果

図14 近似式を用いたシミュレーション結果

ファジィ制御規則を作った。このファジィ制御規則を用い先ほどのように偏差、偏角のファジィ集合代表値と初期位置を変化させたシミュレーションを行い検討した結果、前章とほぼ同じような制御ができるシミュレーション結果を得ることができた。このファジィ制御規則を表5に示す。ただし、 PH は positive huge, NH は negative huge とした。岡山地区のシミュレーション結果を図15に示す。ただし、計画線は初期位置、角度とも零の水平線とした。また、残差 $e(k)$ は平均値零 [deg], 標準偏差 0.137 [deg] の正規分布で近似した。初期位置の角度は、零 [deg] とした。

偏差のファジィ集合代表値は、

$$\begin{aligned} PH &= 500[\text{mm}], PB = 160[\text{mm}], PM = 30[\text{mm}], \\ PS &= 2[\text{mm}], ZO = 0[\text{mm}] \\ NS &= -PS, NM = -PM, NB = -PB, \\ NH &= -PH \end{aligned}$$

偏角のファジィ集合代表値は、

$$\begin{aligned} PH &= 2.1[\text{deg}], PB = 0.75[\text{deg}], PM = \\ &0.3[\text{deg}], \\ PS &= 0.1[\text{deg}], ZO = 0[\text{deg}] \\ NS &= -PS, NM = -PM, NB = -PB, \\ NH &= -PH \end{aligned}$$

ヘッド角のファジィ集合代表値は、

表5 初期位置の変化に対応できるファジィ制御規則

		Deviation								
Angular deviation		NH	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PH
	NH	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	NB
	NB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	NB	NB
	NM	PB	PB	PB	PB	PB	PB	NB	NB	NB
	NS	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	NB	NB	NB
	ZO	PB	PB	PB	PS	ZO	NS	NB	NB	NB
	PS	PB	PB	PB	ZO	NS	NM	NB	NB	NB
	PM	PB	PB	PB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
	PB	PB	PB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
	PH	PB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB

図15 表5の規則を用いたシミュレーション結果

$$\begin{aligned} PB &= 1.5[\text{deg}], PM = 1.0[\text{deg}], PS = 0.5[\text{deg}], \\ ZO &= 0[\text{deg}] \end{aligned}$$

$$NS = -PS, NM = -PM, NB = -PB$$

とした。図15を見てわかるように、初期位置を変えた場合でも、収束が速くかつ良好に計画線に追従していくことがわかる。このファジィ制御規則は、初期偏差が500[mm]以内ならばすべてほぼ最適な制御を行うことができる。しかし、これは岡山地区の場合に適した偏差、偏角のファジィ集合代表値である。したがって地区が異なる場合には偏差、偏角のファジィ集合代表値は変わる可能性がある。そこで、岡山地区のファジィ制御規則と偏差、偏角のファジィ集合代表値を使って、ほかの地区でのデータのシミュレーションを行ってみた。ただし、条件は図15と同じにした。その結果、きれいに収束する地区もあるが、収束が遅い地区もある。そこで、ファジィ制御規則とそのほかの条件は図15と同じにして各地区の最適と思われる偏角のファジィ集合代表値を調べてみた。結果を表6に示す。表6の値を使ったシミュレーション結果を図16に示す。図16でわかるように、表6の各地区の PH , PB , PM , PS を使用すると、初期位置が500[mm]以内ならば、ほぼ最適な制御を行うことができる。

小口径トンネルロボットの最大の特徴は、長距離で計画線が変化した場合でも管路を布設できることである。そこで、計画線が変化する場合について検討した。岡山地区のデータで図9の条件を使い行った。ただし、小口径トンネルロボットの初期位置は計画線の

表6 各地区の最適ファジィ集合代表値

District	Koshiya	Okayama	Yokosuka	Sayama	Tousento	Zama2	Zama1
N value	0	0-2	4-5	5	5	5-7	7
PH	1.4	2.1	1.7	4.0	2.3	2.9	3.5
PB	0.85	0.75	0.85	2.20	1.30	1.50	1.60
PM	0.3	0.3	0.3	1.1	0.3	0.3	0.3
PS	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

図16 表6の代表値を使ったシミュレーション結果

図 17 計画線が変化する場合のシミュレーション結果

始点と同じにした。シミュレーション結果を図 17 に示す。計画線は細線とし、小口径トンネルロボットの軌跡は実線とした。図 17 を見てわかるとおり計画線に沿ってきれいに追従している。

以上のシミュレーションの検討結果より、従来法⁽⁹⁾では必要であった。偏差および偏角の変化量を用いず、偏差と偏角および制御入力に関する簡単な 1 組のファジィ制御規則を用いるだけでも、初期位置が変化しても良好な方向制御を行えることがわかった。ただし、ファジィ集合代表値の調整は試行錯誤によって行わなければならない、時間がかかるので、今後、自動チューニングツールの検討が必要となる。また、本論文ではピッチング方向の二次元モデル（平面内運動）を取扱っているが、実際の掘削では、水平方向も加わり、三次元方向制御を行うことになる。したがって、実際には、三次元に拡張した場合のヘッド角修正入力による可制御性、次元軸間の干渉と土質の影響などの問題があるが、前述の論文⁽³⁾でピッチング水平方向独立のファジィ制御規則により、実際の掘削において良好な方向制御を行うと報告されていることから、本手法においても三次元に拡張できると考えられる。ただし、この問題は実用上、重要であるので、今後詳しい検討を行う必要がある。

8. お わ り に

本報告では偏差と偏角および制御入力に関する 1 組のファジィ制御規則を用いたファジィ制御法を小口径トンネルロボットの方向制御に適用し、前報で報告した方向制御シミュレータを用い、ファジィ制御規則を色々変化させ最適ファジィ制御規則を求めた。次に、初期位置を変化させた場合の偏差と偏角の最適ファジィ集合代表値を求めた。シミュレーション結果は本ファジィ制御法の有効性を示した。さらに制御規則数を増やすことにより、初期位置が変化しても良好な制御を行えるファジィ制御法を実現した。

最後に、本論文をまとめるにあたり、ご指導いただいた(株)NTT フィールドシステム研究所センタ光加入者ケーブルシステム研究部石原部長に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 青島・藪田・武村, 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 回ロボット学会講演会講演論文集 (1989-11), 715-716.
- (2) 青島・藪田・武村, 小口径トンネルロボットの方向制御法と最適フィードバックゲイン, 日本機械学会第 68 期全国大会講演論文集, (1990-9), 89.
- (3) 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 第 391 号/VI-8 (1988), 169.
- (4) 青島・武田・藪田, 小口径トンネルロボットのファジィ方向制御, 第 8 回ロボット学会講演会講演論文集, (1990-11), 519.
- (5) Aoshima, S. and Yabuta T., Dynamic Model Identification and Control for a Small Diameter Tunneling Robot (Presented at 111th ASME Winter Annual Meeting, DSC-14D Symposium on Robotics, Nov. 25-30, 1990) *Robotics Research*, DSC-26(1991), 187.
- (6) 相良・ほか 3 名, システム同定, (1983), 78, 計測自動制御学会.
- (7) 廣田・寺野, コンピュートロール 28 ファジィ制御, (1989), 36, コロナ社.