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*

青島伸一^{*1}, 武田幸喜^{*2}, 藪田哲郎^{*1}

Directional Control and Optimum Feedback Gain for a Small Tunnelling Robot

Shin'ichi AOSHIMA, Kouki TAKEDA and Tetsuro YABUTA

This paper describes a directional control method and optimum feedback gains for directional correction of a small diameter tunnelling robot which constructs conduits for 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 feedback directional control method and evaluated the control laws by a dynamic simulator. Results clarify that both a directional error feedback loop and a position error feedback loop are necessary for stable control. Moreover, we obtained optimum feedback gains to minimize position error by using a dynamic simulator. Simulation results clarified the validity of the proposed directional control method.

Key Words: Tunnelling Robot, Directional Control, Feedback Control, Feedback Gain, Optimum Gain, 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し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。それを実現するためには、各種方向制御アルゴリズムを検証評価するための方向制御に関するダイナミックシミュレータが必要となる。そこで著者らは過去の軌跡を考慮したダイナミックモデルを作成し、最小二乗法によってそのパラメータ推定を行い各土質におけるダイナミックモデルを求めた⁽¹⁾。本報では、このモデルを基に、横軸をストローク、縦軸を位置とした、小口径トンネルロボットの軌跡を表示するダイナミックシミュレータを作成した。次に、計画線に対するロボット本体の位置偏差とピッチング角度偏差にゲインをかけたものを次の入力ヘッド角とするフィードバック制御則を作り、この制御則を用いた方向

制御シミュレーションを上記ダイナミックシミュレータにより行い、本制御則における最適フィードバックゲインを求めた⁽³⁾。さらに初期偏差を変化させた場合の最適フィードバックゲインについても検討を行った。

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本体1、埋設管2、埋設管を押し込む押管装置3、油圧装置4、操作盤5よりなる。埋設管は押管装置により油圧で1本ずつ押し込まれる。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

図1 トンネルロボットのシステム構成

* 平成2年9月24日 第68期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成3年6月28日。

^{*1} 正員、日本電信電話(株)伝送システム研究所(〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根162)。

^{*2} 日本電信電話(株)伝送システム研究所。

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⁽²⁾。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⁽⁴⁾。 α_e を決定するためのデータ数 n_a の最小数は $3n+1$ となる。

ダイナミックモデル

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

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 : 誤差ベクトル

$$Z = [Z_1 Z_2]$$

ここで,

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

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

n_a : 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, 締まり具合を表す数値で, 値が大きいほど硬いことを示す。モデルの次数は次数とピッチング角変化量の推定誤差の分散との関係を求め, 分散がほぼ一定値とみなせるようになったときの最小の次数とした。検討の結果, 本モデルの次数は 3 となった。また, $N_0(m, \sigma)$ は, 平均値 m , 標準偏差 σ の正規分布を表している。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 $Y_d(k)$, 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

表 1 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	-0.046	No (0. 0.030)
Okayama	Clay	0~2	0.168	0.113	0.093	-0.043	0.120	-0.010	-0.023	No (0. 0.137)
Yokosuka	Clay	4~5	0.128	0.154	0.122	-0.080	0.166	-0.008	-0.048	No (0. 0.056)
Seyama	Loam	5	0.633	0.089	-0.030	0.160	-0.090	0.012	-0.053	No (0. 0.049)
Tousentou	Sand	5	0.735	-0.052	0.109	-0.006	0.053	0.035	-0.068	No (0. 0.055)
Zama 2	Loam	5~7	0.145	0.216	0.305	0.064	0.058	-0.040	-0.037	No (0. 0.059)
Zama 1	Loam	7	0.204	0.294	0.149	0.078	0.049	-0.096	-0.022	No (0. 0.084)

図 2 ヘッド角とピッチング角および ピッチング角変化量の定義

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。

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, 次章式 (7) で示す本提案のフィードバック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

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

[ダイナミックモデル]

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

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

5. 方向制御法

本報では, 計画線に対するロボット本体の位置偏差とピッチング角偏差にゲインをかけたものを次の入力ヘッド角とするフィードバック制御則を用いた方向制御法を考案した。この制御則を式 (7) に示す。

K_p は位置偏差フィードバックゲイン, K_a はピッチング角度偏差フィードバックゲインである。図 4 に本方向制御のブロック線図を示す。

次章以下ではこのフィードバックゲインの最適値を求めるため, 各種検討を行う。

制御則

$$\theta_h(k) = K_p[Y_d(k) - Y(k-1)] + K_a[\theta_p(k) - \theta_p(k-1)] \quad \dots\dots\dots (7)$$

K_p : 位置偏差フィードバックゲイン deg/mm

K_a : ピッチング角度偏差フィードバックゲイン (無次元)

6. 最適フィードバックゲイン

本章では, 土質の異なる各地区のダイナミックモデルを用いて, シミュレータを構成し, 第 5 章で示した制御則によって方向制御シミュレーションを行い, 偏差絶対値積分値を評価関数とし, これを最小にする最適フィードバックゲインを求めた。

以下に, 第 3 章の表 1 で示した岡山地区のパラメータ推定値を用いたシミュレーション結果を示す。計画線はすべて初期位置, 角度とも零の水平線とした。図 5 (a) は制御則, 式 (7) で角度偏差フィードバックゲイン $K_a=0$ (無次元) としたもので, 角度偏差量を使わ

ない場合のシミュレーション結果である。ただし, 位置偏差フィードバックゲイン $K_p=0.01$ deg/mm とし, 残差 $e(k)$ は平均値 0 deg, 標準偏差 0.13 deg の正規分布で近似した。初期偏差, 角度はそれぞれ, 500 mm, 0 deg とした。図を見てわかるように発散してしまう。図 5 (b) から図 5 (d) は, 位置, 角度偏差量の両方を使った場合である。図 5 (b) は $K_p=0.01$, $K_a=0.5$ とし, 図 5 (c) は $K_p=0.01$, $K_a=2$, また図 5 (d) は $K_p=0.01$, $K_a=4$ とした。その他の条件は図 5 (a) の場合と同じである。角度偏差量を入れると, 図 5 (b) は収束するが振動がはじめる。また図 5 (d) は収束するが整定時間がかかる。これらに対して, 図 5 (c) ではきれいにすばやく収束することがわかる。

このようにシミュレータを用いて本方向制御法の有効性を検討した結果, 位置偏差フィードバックゲインと角度偏差フィードバックゲインをうまく選択すれば, 良好な方向制御を行うことがわかった。

そこで, 次に, 最適フィードバックゲインを以下の方法で求めた。一例として N 値が 0~2 である岡山地区のデータを使って説明する。図 6 に $K_p=0.01$ deg/mm と固定したときの, K_a -過渡応答の偏差絶対値積分値特性を示す。ただし, 残差 $e(k)$ は平均値 0 deg, 標準偏差 0.13 deg の正規分布で近似し, 初期位置, 角度はそれぞれ, 500 mm, 0 deg とした。また, 計画線は初期値 0 mm の水平線とした。この図より, 偏差絶対値積分値が最小になる K_a を求めることができ

図 3 シミュレータで用いる各パラメータの定義

図 4 フィードバック方向制御のブロック線図

る。この場合、 $K_a=1.5$ となる。次に、上記と同様に、 K_p を0.01から10 deg/mmまで変化させて偏差絶対値積分値が最小になる K_a を求める。これらの結果を用いると、図7に示す K_p -最小偏差絶対値積分値特性が求まる。この図より偏差絶対値積分値が最小になる

K_p は0.07 deg/mmとなり、そのときの K_a は K_p が0.07 deg/mmのときの K_a -過渡応答の偏差絶対値積分値特性により7.8 (無次元)と求まる。したがって、岡山に関する最適ゲインは $K_p=0.07$ deg/mm, $K_a=7.8$ (無次元)となり、最適ゲイン比は K_a/K_p mm/deg = 111 mm/degとなる。図8にこの最適な K_a, K_p を使った場合の方向制御シミュレーション結果を示す。初期位置は500 mm, 計画線は位置が0 mmの水平線とした。図に示されるように、良好な制御が行われていることがわかる。

本研究の目的はさまざまな土壌に対して、はん用的に適用できるトンネルロボットのフィードバック制御則を得ることである。しかし現時点では使用できる建

(a) $K_a=0$ (角度偏差量を使わない場合)

(b) $K_p=0.01, K_a=0.5$

(c) $K_p=0.01, K_a=2$

(d) $K_p=0.01, K_a=4$

図5 方向制御シミュレーション結果

図6 K_a -過渡応答の偏差絶対値積分値特性
[$K_p=0.01$ deg/mm 固定]

図7 K_p -最小偏差絶対値積分特性

図8 最適ゲインを使った場合の方向制御シミュレーション結果

設データが少ないため、すべての N 値に関するデータおよび同一 N 値での複数の建設データについて検討することができない。はん用的に適用できる制御則を得るためには、より多くの建設データを考慮する必要がある。そこで本論文ではゲインの N 値および初期値依存性に関する検討を行い、これら検討結果を用いた、はん用的な簡易ゲイングラフを得る手法のみを示した。まずはじめに前述した手法を用い、 N 値の異なる各地区における最適ゲイン K_a, K_p を求めた。この場合もすべての地区で良好な制御が行われたそこで次に土壌の硬さに関し、ある程度の指標となり得る N 値とフィードバックゲインとの関係を求めることにした。この結果を用いて N 値と $K_p, K_a, K_a/K_p$ との関係を図示すると、それぞれ図 9, 10, 11 のような関係になる。白丸が求めた値である。ただし、 $N=5$ の場合は複数であるので平均値を示している。また、 N 値が 0 ~ 2 のような場合は平均値とした。この場合は N 値は 1 となる。実線は近似曲線であり最小二乗法によって求めた。 K_p, K_a に関する近似曲線式をそれぞれ、式 (8), (9) に示す。

$$K_p = 0.054 + 1.38 N^5 \dots\dots\dots (8)$$

$$K_a = 7.13 + 0.00113 N^4 \dots\dots\dots (9)$$

これらの式から算出したフィードバックゲインを用いて行った各地区におけるシミュレーション結果により、すべて良好な制御を行うことが確認された。したがって、実際の K_a, K_p を求める場合は、施工する場所の N 値に対応する K_a, K_p を近似式で求め、その値を使って方向制御すればよい。ただし、実際に本制御法を使用する際には、同一の N 値に対して多数の建設データのダイナミックモデルを同定し、それらを用いた複数のシミュレーション結果に基づき N 値とゲインの関係を求める必要があると考える。

しかし、これは初期偏差が約 500 mm の場合に適したゲインである。したがって初期偏差が異なる場合には最適ゲインは変わる可能性がある。

そこで、岡山のデータを使って初期偏差を、250, 750, 1000, 1500, 2000, に変え、フィードバックゲイン値は初期偏差 500 の場合の最適フィードバックゲイン値を用い、方向制御シミュレーションを行った。その結果を図 12 に示す。初期偏差が違えば、方向制御シミュレーションの収束にかなり影響が出てくるのがわかる。

そこで、各初期値における位置偏差フィードバックゲイン K_p (deg/mm) と、ピッチング角度偏差フィードバックゲイン K_a (無次元) を前と同じ方法で求めた。そして求めた最適 K_p, K_a を使った場合の方向制御シ

図 9 N 値と K_p との関係 図 10 N 値と K_a との関係 図 11 N 値と K_a/K_p との関係 図 12 初期偏差が異なる場合の方向制御シミュレーション結果
(初期偏差 500 の場合の最適ゲイン使用)

図 13 初期偏差と最適 K_p との関係 図 14 初期偏差と最適 K_a との関係 図 15 初期偏差と最適 K_a/K_p との関係

図 16 各初期偏差に対する最適ゲインを用いた方向制御シミュレーション結果

ミュレーション結果により各初期偏差とも、きれいに収束していることがわかる。初期偏差と最適な K_p , K_a , K_p/K_a との関係を図 13, 14, 15 に示す。白丸は、計算値であり、実線は近似曲線である。この近似曲線式をそれぞれ式(10), (11)に示す。

$$K_p = 0.01 + 1.289/X_0^{0.5} \dots\dots\dots (10)$$

$$K_a = 7.477 + 0.0003X_0 \dots\dots\dots (11)$$

この場合の X_0 は、初期偏差である。初期偏差が大きくなるほど位置偏差フィードバックゲインは小さくなり、角度偏差フィードバックゲインはほぼ一定となることがわかる。式(10), (11)を使えば岡山地区における初期偏差が変わった場合の最適な K_p , K_a を求めることができる。

近似曲線式(10), (11)から求めた岡山地区の各初期偏差に対する最適ゲイン K_p deg/m, K_a (無次元)を用いた図 16 のシミュレーション結果より、各初期偏差とも良好な方向制御を行うことが確認された。実際の方向制御の際は、計画線とトンネルロボットとの初期偏差を求め、近似曲線式を使って求めた最適フィードバックゲインを用いて方向制御を行えばよい。

はん用的な簡易ゲイングラフを得るためには、十分な建設データが得られた後に、上述した手法を用い、各初期値に対し図 9, 10 のグラフをつくるか、あるいは、各 N 値に対し、図 13, 14 のグラフをつくり、それらをまとめて K_a と K_p に関する二つのグラフをつくれればよい。さらにこれらのグラフから最小二乗法などを用い K_a , K_p に関する近似式を得ることもできる。

7. お わ り に

本報では、始めに、前報で求めた小口径トンネルロボットの方向修正量に関するダイナミックモデルを基に、トンネルロボットの軌跡を表示するダイナミックシミュレータを作成した。次に、計画線に対するロボット本体の位置偏差とピッチング角度偏差にゲインをかけたものを次の入力ヘッド角とするフィードバック制御則を作り、この制御則を用いたシミュレーションを上記ダイナミックシミュレータにより行い、本制御則における最適フィードバックゲインを求めた。その結果、位置偏差フィードバックゲイン K_p , および角度偏差フィードバックゲイン k_a は、土質の硬さを表す N 値が大きいほど大きくなり、ゲイン比は N 値が大きいほど小さく、 N 値が 0~7 の場合、 $k_a/K_p=30\sim 140$ mm/deg の範囲に入ることを明らかにした。また、初期偏差を変化させた場合の最適フィードバックゲインについても検討し、初期偏差が大きくなるほど位置偏差フィードバックゲインは小さくなり、角度偏差フ

ィードバックゲインはほぼ一定であることを明らかにした。さらに、任意の N 値, 初期偏差に適応できるゲインを得ることができる, はん用的な簡易ゲイングラフの作製法を示した。

最後に, 本論文をまとめるにあたり, ご指導いただいた NTT(株)伝送システム研究所線路システム研究部石原部長に感謝する。

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.

- (2) Aoshima, S. and Yabuta, T., Dynamic Model Identification and Control for a Small Diameter Tunneling Robot, 111th ASME Winter Annual Meeting, DSC-14 D Symposium on Robotics, *Robotics Research*, DSC-Vol. 26(1990), 187.
- (3) 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.
- (4) 相良・ほか3名, システム同定, (1983), 78, 計測自動制御学会.