

I-18 掘削型小口径管推進機の

オートナビゲーションシステムに関する研究

On the Study of an Autonavigation System for Discharge-Type Microtunneling Machines

吉田 耕一* 辻村 健*

Koichi YOSHIDA Takeshi TSUJIMURA

【抄録】レーザターゲット位置検知システムを備えた掘削型小口径管推進機の方角制御オペレーションにおいて、得られた位置偏差に対してどのようにマシンの方向修正を行えばよいかはオペレータのスキルに大きく依存していた。本論文では方向修正量に対するマシンの運動特性を表す方向修正モデルを導入し、直接計測の困難なマシン先端体の位置・姿勢や周囲の土質状態と関わるパラメータをオンライン推定する技術について述べる。このマシン挙動の予測を可能にするモデルの導入により、最適な方向修正量を算出・提示可能なオートナビゲーションシステムを構築し、現場施工実験の評価区間においてマシンの良好な方向修正制御動作が維持できることを確認した。

【Abstract】 On the operation for discharge-type microtunneling machines equipped with laser target positioning system, how to perform direction control of the driving machine based on the obtained sensing data largely depends upon the skill of operators. In this paper, a direction control model which represents the dynamic behavior of the driving machine for head angle control is introduced and an on-line estimation method is adopted to estimate the posture of the driving machine and the model parameters matching the soil condition of the ground, for which direct observation is almost impossible. The direction control model to predict the behavior of the driving machine makes it possible to give an optimal control of the head angle. A prototype of auto navigation system with machine state estimator and optimal direction controller is designed and experimentally applied to an actual construction site, and validity of the navigation system to maintain sound control performance is confirmed.

【キーワード】小口径管推進機、エースモール工法、自動制御、カルマンフィルタ、最適制御

【Keywords】Microtunneling, Acemole, Automatic control, Kalman filter, Optimal control

1 はじめに

推進工法はその経済性や環境条件の面から開削工法に代わる施工法としてクローズアップされてきており、更なる適用範囲の拡大や高精度化が追求されている。その代表的方式には圧入方式・オーガ方式・バランス方式等が含まれるが、これらは施工区間の線形や土質条件に加え経済性や低公害性等を考慮に入れて選定される。泥土圧バランス方式の一種であるエースモールDL工法は掘削用カッターヘッドを交換することにより普通土からレキ玉石地盤までといった広範囲な土質への対応と長距離推進を可能にしており[1][2]、基盤設備創設コスト削減を目指した新しいオペレーションシステムも開発されている[3]。

本論文は従来その施工品質がオペレータのスキルに大きく依存していた掘削型の埋設管推進機（エースモールDL工法）の高精度な自動方向制御を目指したオートナビゲーションシステムに関するものである。本システムは先端体の方向修正操作に対する運動特性を表した状態

変化モデルを導入することにより直接観測することが困難なマシン全体の位置・姿勢の状態推定機能とモデルに基づいた最適フィードバック制御による方向修正支援機能を実現している。

ここでは、マシン状態変化モデルの構成法とカルマンフィルタによる状態推定法及び最適方向修正制御システムの設計法について説明し、オートナビゲーションシステムの構造を示すとともに現場施工実験における評価結果により本システムの有効性を検証する。

2 推進機のセンシングシステム

図1は本システムの制御対象である埋設管推進機の全体構成を示している。先端体先端のカッターにより周囲の地盤を掘削しながら元押し装置の推進力により前進し、一定長の推進管を順に継ぎ足していくことにより管路を形成してゆく。マシンの推進方向は、内蔵された油圧ジャッキにより方向修正部を上下左右に傾動させることにより制御することができる。

*NTT アクセスサービスシステム研究所 (〒305-0805 茨城県つくば市花畑)

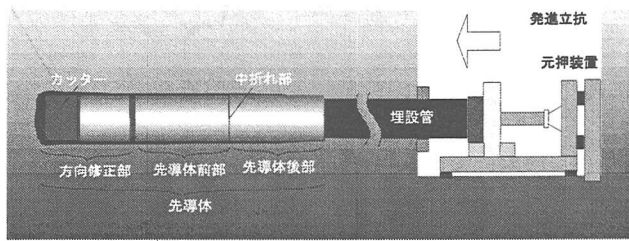


図 1: 掘削型埋設管推進機の構成

図2は直線施工時のレーザターゲット方式によるセンシングシステムを示している。レーザセオドライトが発するレーザ光が先導体後部に配置されたレーザ受光装置のターゲット面に照射されると、その照射位置からレーザ受光装置の基準線（レーザ光）に対する変位を求めることができる。一方、レーザ光に対する先導体後部の傾斜角は直接得られないため、数十 cm 推進した後のレーザ受光装置の基準線（レーザ光）に対する変位と比較したときの変分から近似的に水平および垂直方向の傾斜角を求めている。ただし、これはこの間先導体が回転運動をしないという仮定に基づいているために必ずしも正確な値ではない。この傾斜角から中折れ部の水平・垂直変位が求まり、さらに先導体前部と後部の水平方向の相対角を検出する中折れ角センサの値を用いて方向修正部の水平位置が、先導体前部に設置されたピッチング計から垂直位置が求められている。

図3は曲線施工時の電磁法による水平位置検知と液圧差法による垂直位置検知システムを示している。水平方向に関しては、先導体に内蔵された発信コイルが生成する誘導磁界を地上から磁界検出装置により検知して計画線からの水平変位を求めている。垂直方向に関しては、先導体内蔵の圧力センサが基準液圧との差を検知することにより深度を得ている。

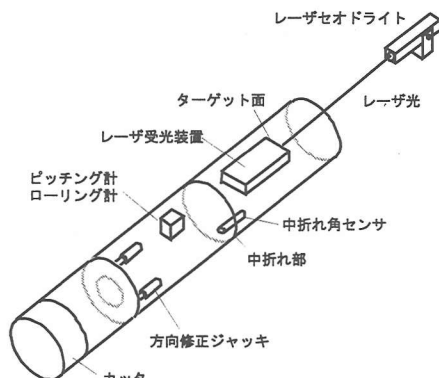


図 2: レーザターゲット法による位置検知システム

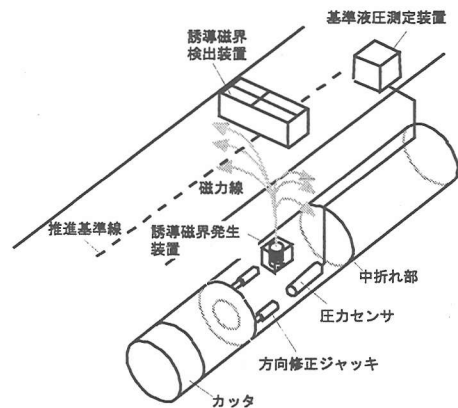


図 3: 誘導磁界検知法と液圧差法による位置検知システム

3 マシンの状態変化モデル

図4はマシンの状態変化モデルを表すための各部位の位置や角度の定義を示している。基線からみたカッター先端部の水平変位を X_c 、方向修正部の変位を X_h 、中折れ部の変位を X_m 、レーザ受光部の変位を X_t とする。また、基線に対する先導体前部の傾斜角（ヨーイング角）を θ_H 、先導体後部の傾斜角を θ_{Hr} 、先導体前部を基準としたときの方向修正部の傾斜角（ヘッド角）を η_H 、先導体後部を基準とした先導体前部の傾斜角（中折れ角）を ϕ とする。一方、垂直方向に関しても同様な座標系を定義して状態変化モデルを導出できるが、ここでは水平方向について説明する。

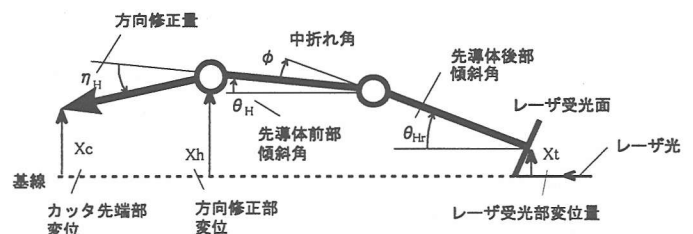
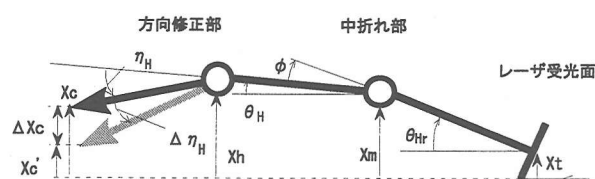


図 4: 状態変化モデルの座標系

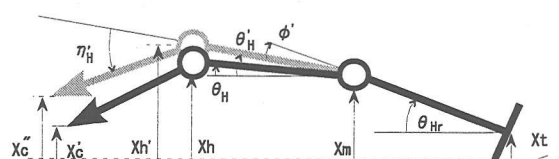
図5は方向修正動作を行った場合のマシンの単位推進長あたりの状態変化モデルを示したものである。

(a) は方向修正部（ヘッド角）を η_H から $\Delta\eta_H$ だけ変化させたときの様子を示している ($\eta'_H = \eta_H + \Delta\eta_H$)。このときヘッドマシン周囲の地盤からの反力がなければマシン先端は方向修正部の長さが L_h のとき $\Delta X_H = L_h \Delta\eta_H$ だけ変化することになる。しかしながら実際は (b) に示すような地盤からの反力による影響が考えられるので状態変化モデルとして次のような仮定をおく

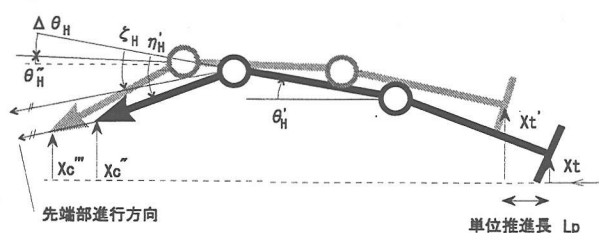
< 仮定 1 > ヘッド角の変化 $\Delta\eta_H$ によるマシン先端の変位 ΔX_H の内、ある一定の割合 k_{encH} だけが地盤側へ食い込む。また、 k_{encH} の大きさに応じて先導体前



(a) ヘッド角の修正



(b) 地盤からの反動による中折れ角の変化



(c) 単位推進長前進時のマシン位置・姿勢の変化

図 5: 単位推進長における状態変化モデル

部のヨーイング角 θ_H や中折れ角 ϕ が変化する。

このとき、図 5(b) に示す地盤からの反動を考慮した後のマシン先端 X_c'' と先導体前部のヨーイング角 θ_H' は次のように表すことができる。ただし、下向き（進行方向右側）の変位を正とする。

$$X_c'' = X_c + k_{encH} L_h \Delta \eta_H \quad (1)$$

$$\theta_H' = \theta_H - \frac{L_h}{L_h + L_f} k_{encH} \Delta \eta_H \quad (2)$$

ここで、 L_f は先導体前部の長さを表している。図 5(c) は (b) の地盤からの反動を受けた後の状態から単位推進距離 L_p だけ前進させたときの状態変位モデルを表している。このとき次の仮定を導入する。

< 仮定 2 > マシン先端は先導体前部を基準として ζ_H だけ傾いた方向に移動するものとし、 ζ_H はマシン周囲の土質が変化しなければ η_H' に一定の係数 $k_{\eta H}$ を乗じたものとする。

< 仮定 3 > 単位推進長当たりマシンの姿勢変化 ($\Delta \theta_h = \theta'' - \theta_H'$) は現在のヘッド角も含めた過去の有限個のヘッド角および方向修正操作とは無関係な外乱要素（バイアス成分）の線形和で与えられる。また、各ヘッド角の姿勢変化に及ぼす影響度を表す係数はマシン周囲の土質が変化しなければ一定であるとする。

上記 2 つの仮定は次の 2 式で表現される。

$$X_c''' = X_c'' + (\theta_H' + k_{\eta H} \eta_H') L_p \quad (3)$$

$$\theta_H'' = \theta_H' + \tilde{b}_0 \eta_H^{(1)} + \tilde{b}_1 \eta_H^{(0)} + \tilde{b}_2 \eta_H^{(-1)} + \dots + \tilde{b}_{nb} \eta_H^{(-nb+1)} + d_H \quad (4)$$

ただし、 $\eta_H^{(1)} = \eta_H'$ 、 $\eta_H^{(0)} = \eta_H$ であり、 $\eta_H^{(-i)}$ は現在地よりも $i \times L_p$ (m) だけ後方の地点でのヘッド角を表している。 $\tilde{b}_i$ は $\eta_H^{(i)}$ が $\Delta \theta_H$ へ影響を及ぼす度合いを表す係数、 d_H は外乱要素を示している。ここで、図 5(a) の時点でのマシン先端位置、先導体前部ヨーイング角、ヘッド角をそれぞれ $X_c[k]$ 、 $\theta_H[k]$ 、 $\eta_H[k]$ のように表し、(c) の単位推進距離前後の値を $X_c[k+1](=X_c''')$ 、 $\theta_H[k+1](=\theta_H'')$ 、 $\eta_H[k+1](=\eta_H^{(1)})$ のように表せば次式のような状態変化モデルが得られる。

$$\begin{aligned} X_c[k+1] &= X_c[k] + k_{encH} L_h \Delta \eta_H \\ &+ \left(\theta_H[k] - \frac{L_h}{L_h + L_f} K_{encH} \Delta \eta_H + k_{\eta H} \eta_H[k+1] \right) L_p \\ &= X_c[k] + L_p \theta_H[k] \\ &+ k_{encH} L_h \left(1 - \frac{L_p}{L_h + L_f} \right) \Delta \eta_H + k_{\eta H} L_p \eta_H[k+1] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \theta_H[k+1] &= \theta_H[k] + \sum_{i=0}^{nb-1} \tilde{b}_i \eta_H[k+1-i] \\ &- \frac{L_h}{L_h + L_f} k_{encH} \Delta \eta_H + d_H \\ &= \theta_H[k] + \left(\tilde{b}_0 - \frac{L_h k_{encH}}{L_h + L_f} \right) \eta_H[k+1] \\ &+ \left(\tilde{b}_1 + \frac{L_h k_{encH}}{L_h + L_f} \right) \eta_H[k] + \sum_{i=2}^{nb-1} \tilde{b}_i \eta_H[k+1-i] + d_H \\ &= \theta_H[k] + \sum_{i=0}^{nb-1} b_{Hi} \eta_H[k+1-i] + d_H \end{aligned} \quad (6)$$

式 (6) の最後の行の b_{Hi} は 2 行目の $\eta_H[k+1-i]$ の各係数を改めて書き直したものである。

先導体後部の挙動に関しては次の仮定を導入する。

< 仮定 4 > 先導体後部の基線に対する角度は先導体前部の角度に L_f (m) だけ遅れて追従する。

いま、 L_f/L_p の小数点第一位を四捨五入した整数を nd とすると、上記の仮定は次式で表現できる。

$$\theta_{Hr}[k] = \theta_H[k - nd] \quad (7)$$

直線推進時の水平方向運動に関してはレーザ受光面水平位置 X_t と先導体前部と後部の相対角度（中折れ角 ϕ ）が計測可能であり、これらは図 5 から次のように表すことができる。

$$X_t = X_c - L_h(\theta_H + \eta_H) - L_f \theta_H - L_r \theta_{Hr} \quad (8)$$

$$\phi = \theta_H - \theta_{H\tau} \quad (9) \quad \text{ただし,}$$

ただし, L_r は先導体後部の長さを表している.

4 状態推定器の設計

上述の状態変化モデルの変数であるヘッド先端部の水平変位 X_c や先導体の基線に対する傾斜角 θ_H などの値は直接観測不可能であり、式 (6) 中の係数 b_{Hi} と共に推定する必要がある。これらの未知変数を式 (6) や式 (5) の状態変化モデルを基にカルマンフィルタを用いて状態推定を行う。

4.1 システムの状態方程式表現

先ず, 以下のような推定すべき変数ベクトル $\mathbf{X}_H \in \mathbf{R}^{(nd+2+nb+3) \times 1}$ を定義する.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_H[k] &\equiv [\theta_{H[k]} \ \theta_{H[k-1]} \ \cdots \ \theta_{H[k-nd]} \ X_{c[k]}] \ * \\ &\ * \ [b_{H0} \ b_{H1} \ \cdots \ b_{Hnb-1} \ d_H \ k_{encH} \ k_{\eta H}]^T \end{aligned}$$

このとき，式 (5)，式 (6) は次の状態方程式で表すことができる。

$$\mathbf{X}_H[k+1] = \mathbf{F}_H[k]\mathbf{X}_H[k] + \boldsymbol{\omega}_H[k] \quad (10)$$

ただし、

$$\mathbf{F}_H[k] = \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & \mathbf{O}_{1 \times nd} & 0 & L_p \mathbf{h}_H[k] \\ & \mathbf{I}_{nd} & \mathbf{O}_{nd \times 2} & \mathbf{O}_{nd \times nb} \\ L_p & \mathbf{O}_{1 \times nd} & 1 & \mathbf{O}_{1 \times nb} \\ \hline & \mathbf{O}_{nb \times (nd+2)} & & \mathbf{I}_{nb} \\ \hline & \mathbf{O}_{3 \times (nd+2)} & & \mathbf{O}_{3 \times nb} \end{array} \right] * \left[\begin{array}{ccc} 1 & 0 & 0 \\ & \mathbf{O}_{nd \times 3} & \\ 0 & L'_h \Delta \eta_H[k] & L_p \eta_H[k+1] \\ \hline & \mathbf{O}_{nb \times 3} & \\ \hline & \mathbf{I}_3 & \end{array} \right]$$

また、 $L'_h = (1 - L_p/(L_h + L_f))L_h$ であり、 $O_{i \times j}$, I_k はそれぞれ i 行 j 列の零行列と k 次元単位行列を示している。 $\omega_H[k]$ は $E(\omega_H) = 0$, $E(\omega_H[k]\omega_H^T[k']) = \Sigma_{\omega_H} \delta_{kk'}$ のシステムノイズ、 $E(\cdot)$ は期待値、 $\delta_{kk'}$ はクロネッカの δ を意味している。

4.2 レーザー法使用時の観測方程式

この場合観測可能な信号はレーザ位置 X_t と折れ角 ϕ であるが、これらは式 (8), 式 (9), 式 (7) を用いることにより次の観測方程式で表現できる.

$$\mathbf{y}_{HL}[k] = \mathbf{H}_H \mathbf{X}_H[k] + \mathbf{v}_{HL}[k] \quad (11)$$

ただし、

$$\mathbf{y}_{HL}[k] = \begin{bmatrix} X_t[k] + L_h \eta_H[k] \\ \phi[k] \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_{HL} = \begin{bmatrix} -L_h - L_f & \mathbf{O}_{1 \times nd} & -L_r & 1 & \mathbf{O}_{1 \times (nb+3)} \\ 1 & \mathbf{O}_{1 \times nd} & -1 & 0 & \mathbf{O}_{1 \times (nb+3)} \end{bmatrix}$$

$v_{HL}[k]$ は $E(v_{HL}) = 0$, $E(v_{HL}[k]v_{HL}[k']^T) = \Sigma_{v_{HL}}\delta_{kk'}$ の観測ノイズを表している.

4.3 電磁法使用時の観測方程式

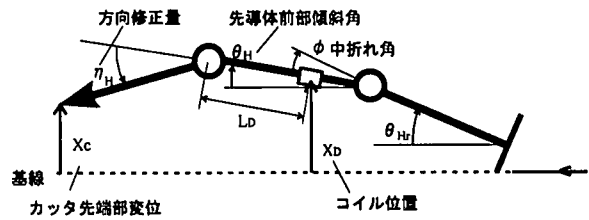


図 6: 状態変化モデルの座標系

先導体内蔵の誘導磁界発生装置の生成する磁界を地上の磁界検出装置により捕らえてマシンの水平位置を検知する電磁法においては、図 6 に示すように計画線との変位 X_D (コイル位置) が計測される。このときコイル位置に関する観測方程式として次式が成立する。

$$X_D = X_c - L_h(\eta_H + \theta_H) - L_D\theta_H \quad (12)$$

誘導磁界検出装置によるコイル位置検知は埋設管 1 本の長さ程度を目安に行われるが、現場状況に応じて不定期に計測されることもある。従って、観測方程式はコイル位置検知が行われる場合とそうでない場合とで異なることになる。コイル位置が計測されたときの観測方程式は次式で表される。

$$\mathbf{y}_{HD}[k] = \mathbf{H}_{HD}\mathbf{X}_H[k] + \mathbf{v}_{HD}[k] \quad (13)$$

ただし、

$$\mathbf{y}_{HD}[k] = \begin{bmatrix} y_D[k] \\ y_\phi[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_D[k] + L_h \eta_H[k] \\ \phi[k] \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{HD} &= \begin{bmatrix} \mathbf{H}_D \\ \mathbf{H}_\phi \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -L_h - L_D & \mathbf{O}_{1 \times nd} & 0 & 1 & \mathbf{O}_{1 \times (nb+3)} \\ 1 & \mathbf{O}_{1 \times nd} & -1 & 0 & \mathbf{O}_{1 \times (nb+3)} \end{bmatrix} \\ \mathbf{v}_{HD} &= [v_D \quad v_\phi]^T \end{aligned}$$

また、コイル位置が計測されないときの観測方程式は次式で表される。

$$y_\phi[k] = \mathbf{H}_\phi \mathbf{X}_H[k] + v_\phi[k] \quad (14)$$

ここで, $\mathbf{v}_{HD}[k]$ は $E(\mathbf{v}_{HD}) = 0$, $E(\mathbf{v}_{HD}[k]\mathbf{v}_{HD}^T[\ell]) = \Sigma_{\mathbf{v}_{HD}}\delta_{k\ell}$ の観測ノイズを表している.

4.4 カルマンフィルタによる状態推定

いま、 $E(\omega_H[k]v_H^T[k]) = O_{(nd+nb+5) \times 2}$ と仮定すると、以下のようなカルマンフィルタが構成され未知変数ベクトル $X_H[k]$ の推定値 $\hat{X}_H[k]$ を求めることが可能になる[5].

[フィルタ方程式]

$$\hat{X}_H[k] = \hat{X}'_H[k] + K_H[k] (y_H[k] - H_H[k] \hat{X}'_H[k]) \quad (15)$$

$$\hat{X}'_H[k+1] = F_H[k] \hat{X}_H[k] \quad (16)$$

[カルマンゲイン]

$$K_H[k] = \hat{\Sigma}'_H[k] H^T[k] (H_H[k] \hat{\Sigma}'_H[k] H^T[k] + \Sigma_{vH})^{-1} \quad (17)$$

[誤差の共分散行列方程式]

$$\hat{\Sigma}_H[k] = \hat{\Sigma}'_H[k] - K_H[k] H_H[k] \hat{\Sigma}'_H[k] \quad (18)$$

$$\hat{\Sigma}'_H[k+1] = F_H[k] \hat{\Sigma}_H[k] F_H^T[k] + \Sigma_{\omega H} \quad (19)$$

$$y_H[k] = H_H X_H[k] + v_H[k] \quad (20)$$

ただし、観測値ベクトル y_H や観測行列 H_H は観測手段によって次のように切り替えて推定を行う。

【レーザターゲット法】

$$\begin{aligned} y_H[k] &= y_{HL} \\ \Sigma_{vH} &= \Sigma_{vHL} \\ H_H &= \begin{bmatrix} H_t \\ H_\phi \end{bmatrix} \end{aligned}$$

【電磁法】

$$\begin{aligned} y_H[k] &= \begin{cases} y_{HL} & \text{コイル位置検出時} \\ \phi[k] & \text{コイル位置検知なし} \end{cases} \\ \Sigma_{vH} &= \begin{cases} \Sigma_{vHD} & \text{コイル位置検出時} \\ \Sigma_{vHD2,2} & \text{コイル位置検知なし} \end{cases} \\ H_H &= \begin{cases} H_{HD} & \text{コイル位置検出時} \\ H_\phi & \text{コイル位置検知なし} \end{cases} \end{aligned}$$

5 方向修正制御器の設計

ここではカルマンフィルタにより推定された状態モデルを用いてマシンの水平方向制御を行うことを考える。水平と垂直方向の運動は独立と考えることができるためそれぞれ個別に方向制御システムを構築すればよい。

いま、ある均質な土質の状態ヘッド角操作（方向修正量）に対するマシンの状態変化に関するパラメータがカルマンフィルタにより推定され、それぞれある一定の値 b_{Hi} , k_{encH} , $k_{\eta H}$ を保っているものとする、式(5), 式(6), 式(7)の状態変化モデルは状態ベクトル x_H

$$x_H[k] \equiv [\theta_H[k] \theta_H[k-1] \cdots \theta_H[k-nd] X_c[k] \mid * \eta[k-1] \cdots \eta[k-nb+1]]^T$$

を定義することにより次の状態空間表現で記述できる。

$$x_H[k+1] = A_H x_H[k] + B_H v_H[k] + d_H \quad (21)$$

$$X_t[k] = C_H x_H[k] \quad (22)$$

ただし、

$$v_H[k] = \Delta \eta_H[k] = \eta_H[k+1] - \eta_H[k]$$

$$A_H =$$

$$\left[\begin{array}{c|c} \begin{matrix} 1 & O_{1 \times (nd+1)} \\ I_{nd} & O_{nd \times 1} \\ L_p & O_{1 \times nd} & 1 \\ O_{1 \times (nd+2)} \end{matrix} & \begin{matrix} (b'_{H0} + b'_{H1}) & b'_{H2} & \cdots & b'_{Hnb-1} \\ O_{nd \times (nb-1)} \\ k_{\eta} L_p & O_{1 \times (nb-2)} \\ 1 & O_{1 \times (nb-2)} \\ I_{nb-2} & O_{(nb-2) \times 1} \end{matrix} \end{array} \right]$$

$$B_H = \begin{bmatrix} b'_{H0} \\ O_{nd \times 1} \\ \frac{k_{enc} L'_h + k_{\eta} L_p}{1} \\ O_{(nb-2) \times 1} \end{bmatrix}$$

$$C_H =$$

$$[-(L_h + L_f) \quad O_{1 \times (nd-1)} \quad -L_r \quad 1 \mid -L_h \quad O_{1 \times (nb-2)}]$$

$$d_H = [d_H \ 0 \ \cdots \ 0]^T$$

また、 $b'_i = L_p b_i$

ここで、 $X_t[k] \rightarrow 0$ なる方向制御を実現するために式(21), 式(22)の線形システムを次のように座標変換する。

$$x'[k+1] = A' x'[k] + B' v_H[k] + d' \quad (23)$$

$$X_t[k] = C' x'[k] \quad (24)$$

ただし、

$$x'[k] = T x_H[k]$$

$$T = \begin{bmatrix} I_{nd+1} & O_{(nd+1) \times nb} \\ C_H \\ O_{(nb-1) \times (nd+2)} & I_{nb-1} \end{bmatrix}$$

$$A' = T A_H T^{-1}$$

$$B' = T B_H$$

$$C' = [O_{1 \times (nd+1)} \quad 1 \quad O_{1 \times (nb-1)}]$$

$$d' = T d_H$$

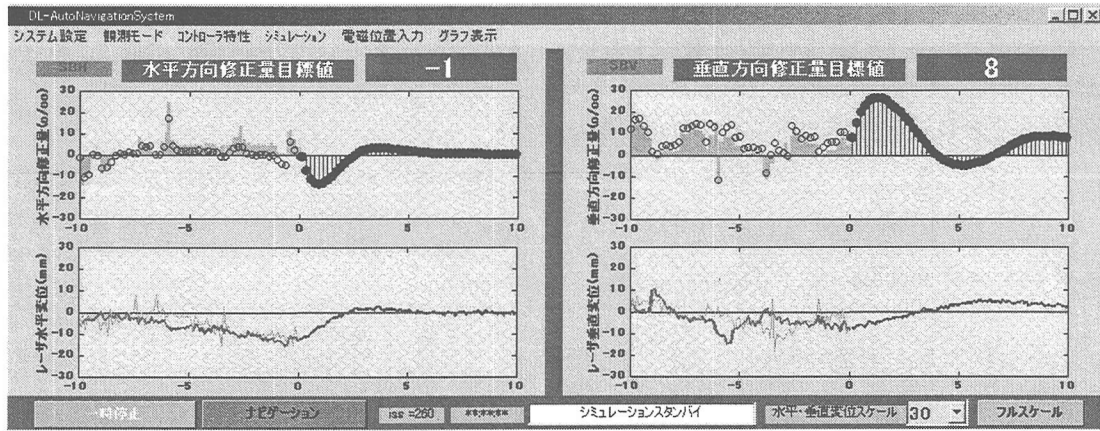


図 7: オートナビゲーションシステムのユーザインターフェイスソフト表示例

このとき、 d_H が十分小さければ次式のような状態フィードバック制御を行うことにより、 $x' \rightarrow 0$ を得て $X_t \rightarrow 0$ が実現される。

$$\nu_H[k] = -K x'[k] = -K T x_H[k] \quad (25)$$

フィードバックゲイン K は例えば次のような評価関数 J

$$\begin{aligned} J &= \sum_{k=0}^{\infty} q_{X_t} X_t^2[k] + \nu_H^2[k] \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} q_{X_t} x'^T[k] C'^T C' x'[k] + \nu_H^2[k] \end{aligned} \quad (26)$$

を選べば、これを最適化する LQR 制御理論により以下のように決定できる [6]。

$$K = (1 + B'^T P B')^{-1} B'^T P A' \quad (27)$$

ただし、 P は次のリカッチ方程式の解である。

$$\begin{aligned} P &= q_{X_t} C'^T C' + A'^T P A' \\ &\quad - A'^T P B' (1 + B'^T P B')^{-1} B'^T P A' \end{aligned} \quad (28)$$

ここで、 q_{X_t} は X_t の収束性に関する重みを表し、大きくなるほど 0 への収束性 (応答性) が増大する。

6 方向修正制御実験

ここでは、前述した状態推定法と方向修正制御法をインプリメントしたオートナビゲーションシステムのプロトタイプとこれを用いた現場施工実験の結果について述べる。

6.1 オートナビゲーションシステム

先端体内部の各種センサ情報はシーケンサにより操作盤内に逐次転送され、増設リンクユニットを通じてナビ

ゲーション用 PC に入力される。データ解析結果・方向修正制御指令値の表示や各種パラメータ設定は外部設置された液晶タッチパネル上でユーザインターフェースソフトウェアを介して実行される。システムにより提示された最適方向修正量はオペレータにより操作盤上でマシンヘッド (方向修正部) 傾動用油圧ジャッキを操作することにより反映される。

図 7 は施工実験に用いたソフトウェアの動作例を示しており、画面中左右にそれぞれ水平方向と垂直方向に関する情報が表示されている。何れのグラフの横軸も相対推進距離を表しており、0m が現在位置を示している。これより左側はこれまでに得られた観測結果を、右側は今後最適方向修正制御を行った場合のシミュレーションによる予想応答を示している。上側のグラフは方向修正量を示しており、横軸負側 (過去のデータ) の棒グラフはオペレータにより実際にマシンに与えられた方向修正量を、○印はナビゲーションシステムが算出した最適方向修正量を意味している。下側のグラフはレーザーターゲット部の変位を示しており、横軸負側の太線が実際に観測されたデータを表している。細線はある地点より 2m 程度過去に推定されていた状態変化モデルを基にその時点でのレーザーターゲット部変位を予想したものであり、太線との比較をすることによって推定された状態変化モデルの妥当性を評価する上での目安を与える。また、電磁法使用時にはコイル位置に関するグラフ表示へ切り替えられる [4]。

6.2 施工実験結果

方向制御の現場施工実験はエースモール DL50 を対象に実施した。表 1 はナビゲーションに関連するマシン外形寸法諸元を示す。

表 1 DL50 先導体諸元

外形寸法	$\phi 457 \times 3257 \text{ mm}$	
重量	2198 kgf	
方向修正ジャッキ	12t $\times$ 20st $\times$ 3 本	
方向修正部	L_h	1000 mm
先導体前部	L_f	1117 mm
先導体後部	L_r	1144 mm
発信コイル位置	L_D	745 mm

推進データをサンプリングする単位推進長は $L_p = 0.1 \text{ m}$ とした。従って、〈仮定 4〉で導入した先導体後部の遅れに関する次数は $nd = 11$ と選んだ。また、〈仮定 3〉に関しては式 (6) において $nb = 5$ とした。

図 8 はレーザターゲット法によって直線区間を推進したときの方向修正制御の評価結果を示している。図 7 の表示と同様、水平方向修正量 η_H を示すグラフ中の○印がシステムにより算出された最適方向制御量を、棒グラフがオペレータにより実際に与えられた方向修正量を示している。また、レーザターゲット部水平変位 X_t のグラフ中の太線が観測値、細線がある地点から 2m 過去の状態モデルを用いてその地点の変位を予測した値をプロットしたものである。具体的には 2m 前の状態推定値 X_H を初期値に式 (21) を 2m にわたって積分して求めた値であり、従って初期値に誤差があれば推定値に累積されて現れることになるが、同図より X_t の応答の傾向は捕らえておりマシンの状態モデルとしては妥当な推定結果が得られているといえる。また、実際の方向修正量はマシン方向修正ジャッキの特性による限られた精度でのオペレータによるマニュアル操作のためシステムによる最適修正量とは数 $^{\circ}/_{\infty}$ の誤差が生じているが、本評価区間においては良好な方向修正動作を維持できることが確認できた。

図 9 の太線はこの間における先導体の水平位置及び姿勢の推定結果を示している。細線は従来の操作盤でのデータ処理による推定値を示しており、これはレーザ受光部変位の 60cm 推進間隔での変化から先ず先導体後部の基準線に対する角度を求め、さらに中折れ角センサの情報を加えて先導体の位置・姿勢を求めたものである。同図からわかるように 60cm 間隔の差分に基づくデータ処理法ではノイズが多く含まれ、特に元押開始直後等に現れるレーザ変位データの不連続な変化に対しては先導体位置・姿勢推定値に大きな誤差を発生させるため経験の浅いオペレータをミスリードする可能性もあり得る。一方、状態変化モデルに基づく推定値はマシンの構造やセンサ情報の誤差分散等に基づいて算出されているためより平滑化された推定結果が得られている。

また、状態変化モデル式 (5)、式 (6) 等の各パラメータの評価区間での推定値はほぼ一定であり、表 2 に水平・垂

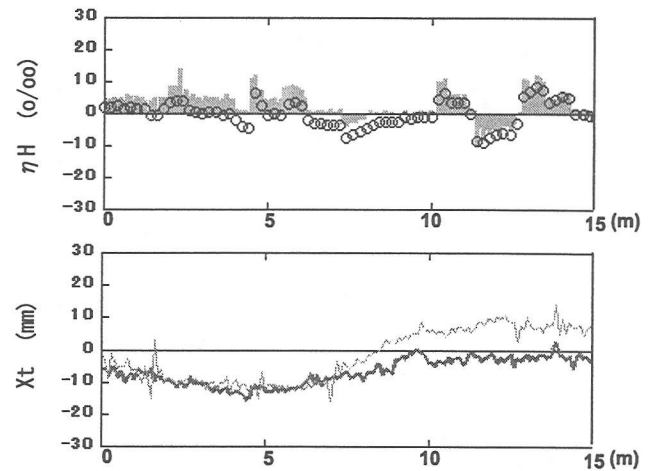


図 8: 水平方向修正制御の評価結果

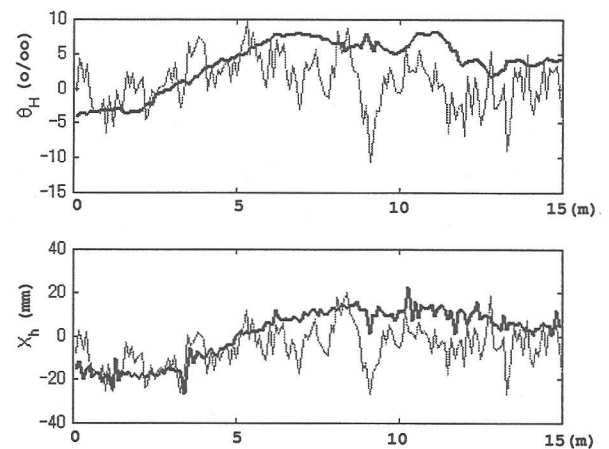


図 9: 先導体水平位置・姿勢の推定結果

直方向の値を合わせて示す。図 10 は垂直方向修正制御の評価結果を示しており、 Y_t はレーザターゲット部の垂直変位を表している。

表 2

状態変化モデルのパラメータ推定値

b_{H0}	-0.207	b_{V0}	-0.691
b_{H1}	0.199	b_{V1}	0.471
b_{H2}	0.024	b_{V2}	0.295
b_{H3}	-0.032	b_{V3}	-0.04
b_{H4}	0.1	b_{V4}	0.079
k_{encH}	0.9	k_{encV}	0.74
$k_{\eta H}$	0.1	$k_{\eta V}$	0.47

図 11 は水平計画線は直線でありながら垂直計画線の勾配が途中で変化するためにレーザターゲット法が使用できない状況において、先導体内部に設置された誘導磁界発生装置（コイル）による磁界を地表で検知する電磁法に

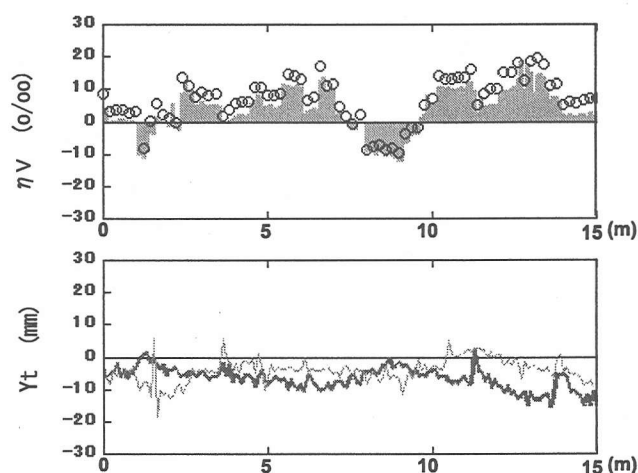


図 10: 垂直方向修正制御の評価結果

よって方向修正制御を行った場合の評価結果を示す。誘導磁界検出装置によって測定された基準線に対するコイルの変位 X_D が■印で、電磁法による1管毎の位置検知の間は折れ角センサのみによる状態推定を行ってコイル位置を計算した値を実線で表示している。同図より電磁法によるコイル位置検知直前の状態変化モデルによる推定値と誘導磁界検出装置による測定値の誤差は10~20mm程度であり、本評価区間での状態変化モデルの有効性が確認できるとともに、良好な方向修正制御動作が維持されていることがわかる。

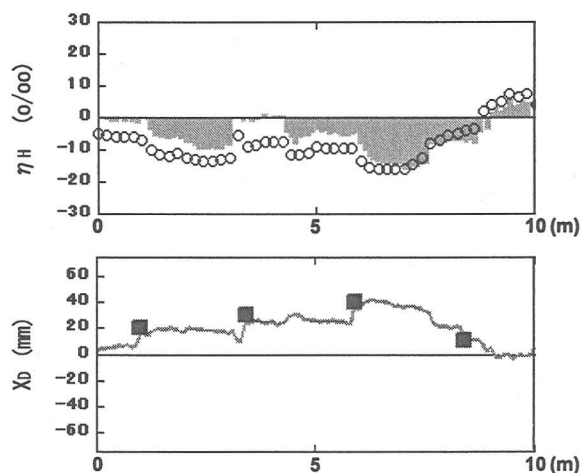


図 11: 電磁法使用時の方向修正制御評価結果

同図の施工区間は計画線が水平方向には直線でありながら垂直方向の勾配が途中で変化するためレーザが使用不可能となり電磁法を用いた方向修正による施工となった。曲線施工が必要な場合には式(10)の状態方程式の位置・姿勢変数を曲線を基準とする変位量とした状態方程式に拡張することによって対応可能であると考えられるが、現場施工実験による検証は今後の課題である。

7 まとめ

掘削型の埋設管推進機の高精度な自動方向制御を目指したオートナビゲーションシステムを開発した。本システムは先導体の方向修正操作に対する運動特性を表した状態変化モデルを導入することにより直接観測することが困難なマシン全体の位置・姿勢の状態推定機能とモデルに基づいた最適フィードバック制御系による方向修正制御支援機能を実現している。

現場施工実験の結果、レーザーターゲット法および電磁法それぞれの観測手法による推進評価区間において良好な方向修正制御動作を維持できることが確認できた。

謝辞

最後に、本研究の実行に当たり多大なる御指導をいただいたNTTアクセスサービスシステム研究所事業化担当の宮島部長に感謝の意を表します。また、本研究に関わる施工実験の遂行や検証に御助力と御助言をいただいた同研究所シビルシステムPの日野主幹研究員、栗田社員に感謝いたします。

参考文献

- [1] 谷戸：小口径管推進工法の選定比較マニュアル，近代図書，1998。
- [2] 小口径管推進工法研究会：小口径管推進工法の計画と設計，(財)経済調査会，1997。
- [3] 栗田，宮武，三河：知識データベースと最適制御理論を用いた推進管理・制御の自動化システム，第11回非開削技術研究発表会論文集，pp.3-10，2000。
- [4] 吉田，辻村：掘削型小口径管推進機のオートナビゲーションシステム，第11回非開削技術研究発表会論文集，pp.11-18，2000。
- [5] 中野，西山：パソコンで解くカルマンフィルタ，丸善，1996。
- [6] 美多，原，近藤：基礎デジタル制御，コロナ社，1988。