

小口径推進機の自動方向制御システムの開発

日本電信電話(株) アクセスサービスシステム研究所 正会員 ○栗田 輝久
 日本電信電話(株) アクセスサービスシステム研究所 正会員 日野 英則
 日本電信電話(株) アクセスサービスシステム研究所 正会員 杵山 義弘
 日本電信電話(株) アクセスサービスシステム研究所 吉田 耕一

1. 目的

非開削工法は工事コストが開削工法と比較して必ずしも経済的でないことや、適用場所の制限があるなどのため、管路工事全体からみると普及が十分でないのが現状である。非開削工法の適用をさらに拡大するためには道路線形、地下埋設物箇所への柔軟な対応や、高精度な長距離・曲線施工を可能にする推進機的位置検知技術および制御技術の高度化が必要不可欠である。そこで、我々は高精度連続位置検知システムを用いた自動方向制御システムを研究開発し、その有効性を確認した。

2. 推進機的位置検知システム

本システムの制御対象とする動的圧入型小口径推進機の全体構成を図-1に示す。動的圧入とは先導体前部の振動部が周囲の地盤を流動化することで前面抵抗を低減させ、硬土質地盤での推進を可能とする工法である。

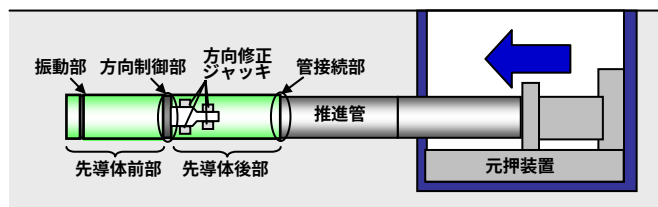


図-1 動的圧入型小口径推進機の構成

図-2に水平方向および垂直方向の位置検知システムを示す。水平方向にはこれまでレーザセオドライトが発するレーザ光を先導体に配置された受光装置のターゲット面で受光し、その受光位置から基準線（レーザ光）に対する変位を求めるレーザ・ターゲット方式と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の受信器によりマシンの絶対値を検知する電磁法を用いていた。しかし、レーザ・ターゲット方式は直線推進区間のみでの使用に限定され、また曲線推進区間で用いられている電磁法は、作業者が推進停止中に地上で計測するため、位置検

知データが断続的となるほか、磁性体近傍や河川下などでは使用できない。これらの問題を解決するため、光ジャイロシステムを開発した。先導体内部に搭載された光ファイバジャイロを用いて角速度を連続的に検出し、この角速度を積分して算出される角度変化量と基準点からの移動距離からマシンの相対位置をリアルタイムに検出する。また、垂直方向に関しては、先導体内の圧力センサが基準液圧との差を検出し、リアルタイムに相対深度を求める液圧差法を採用している。

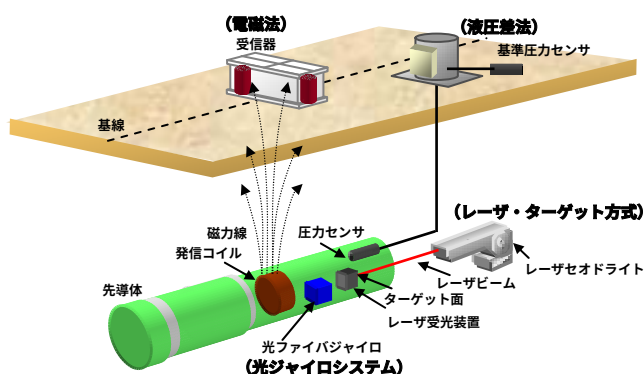


図-2 位置検知システム

3. オートナビゲーションシステム

オートナビゲーションシステムでは位置・姿勢検知、マシン挙動予測、制御までをシステム化している。図-3はオートナビゲーションシステムの構成を示している。小口径推進の方向制御においてはまず現在の推進マシン位置、姿勢を正確に検知することが必要不可欠であり、制御を行う際の重要な要因となり、推進精度を大きく左右する。2項で述べた光ジャイロシステムにより、これまで不可能だった水平位置情報がリアルタイムかつ高精度に検知できるため、後述するマシン挙動モデルの状態推定を正確にオンラインで行え、同時に推定された状態のフィードバックにより次の最適制御量を求めて高精度な方向制御を実現することが可能である。

キーワード 小口径推進 自動化 最適制御理論 フィードバック制御

連絡先 〒305-0805 茨城県つくば市花畑 1-7-1 日本電信電話(株)アクセスサービスシステム研究所 TEL0298-68-6220

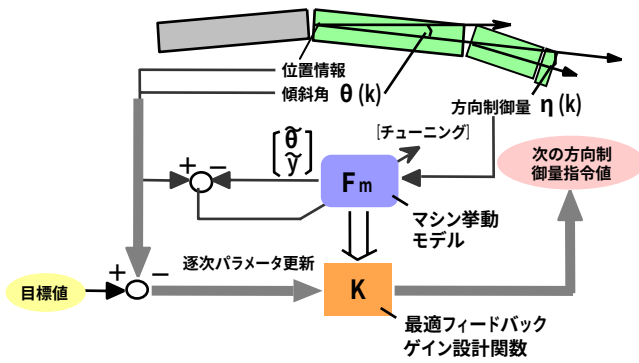


図-3 オートナビゲーションシステム

3-1. マシン挙動モデル

推進マシンの水平・垂直方向の運動は独立で互いに干渉しないと考え、水平、垂直方向のモデルをそれぞれ設計する。また、水平と垂直方向の運動特性は同様な挙動モデルで表すことができるので、マシン先導体の基線に対する位置・姿勢を定義した図-4を用いて解説する。

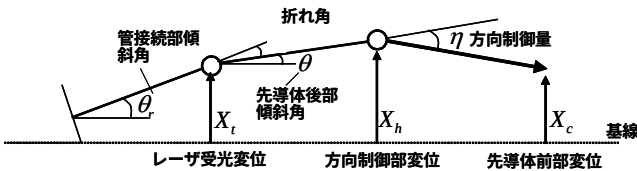


図-4 状態変化モデルの座標系

マシンの姿勢変化 ($\Delta \theta$) は現在のヘッド角も含めた過去のヘッド角及び方向制御とは無関係なノイズ成分の線形和で与えられるものとする。以上より、

$$\theta[k+1] = \theta[k] + \sum_{i=0}^{nb-1} b_i \eta[k+1-i] + \omega[k] \quad (1)$$

と表せる。ここで、 k は単位推進長 L_p 推進長毎に1ずつ増加する正数であり、 $\eta[k+1-i]$ は現時点より $L_p \times i$ (m) 過去の方方向制御量を表す。 b_i は方向制御量に対する重み係数、 ω はノイズ成分を表している。

また、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_p (m) だけ遅れて追従するものとして、

$$\theta_r[k] = \theta[k-nd] \quad (2)$$

として表せる。なお、 nd は L_f / L_p とする。次に、先導体の方向修正部変位 X_h の単位推進長毎の状態変化を次式で記述する。

$$X_h[k+1] = X_h[k] + L_p \theta[k] \quad (3)$$

これまで水平方向の θ は直接検知不可能なパラメータであり、 X_h や式(1)中の b_i とともにカルマンフィルタを用いて推定する必要があった。しかし、光ジャイロシステムにより直接検知可能になったため、よ

り高精度なモデルの構築が実現した。

3-2. 最適フィードバック制御

次に上記の状態方程式を用いてマシンの方向制御を行うことを考える。式(1), (2), (3)より新たに状態ベクトル X を定義する。

$$X[k] = \begin{bmatrix} \theta[k] \\ \theta[k-1] \\ \vdots \\ \theta[k-nd] \\ \dots \\ \eta[k-1] \\ \vdots \\ \eta[k-nb+1] \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中の nb は2以上の整数とする。さらに、式(5)を満足させるフィードバックゲイン K を求める。

$$\eta[k+1] = \eta[k] - KX[k] \quad (5)$$

なお、 K は収束性の早さと修正量の大きさを調和させる指針に基づき設計される。これにより、推進の蛇行を極力抑制し、なおかつ迅速に基線からの誤差をなくす方向制御が可能になる。

4. 検証結果

所内実験の結果を図-5, 6に示す。本システムの提示に基づいた方向制御の結果、水平・垂直ともシステム予測値と実測値の差が ± 30 mm 以内であり、モデルおよびアルゴリズムの有効性が確認できた。

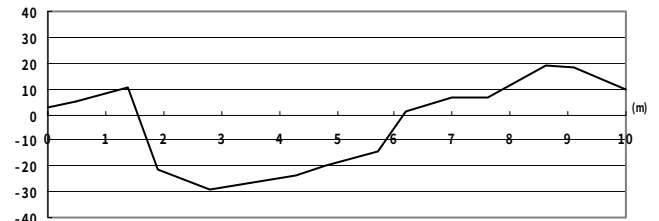


図-5 システム予測値と電磁法計測値の差（水平）

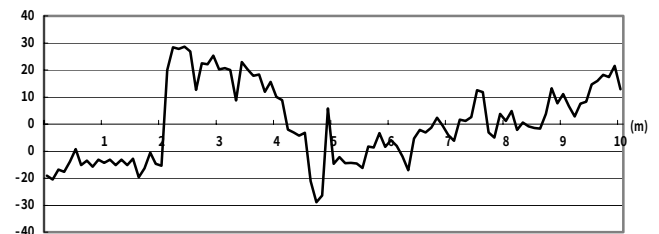


図-6 システム予測値と液圧差法計測値の差（垂直）

5. まとめ

本システムは動的圧入型推進機を対象に開発したが、ほかの推進工法においてもそのマシン特性を反映したシステム構築が可能であり、汎用性が高く、技術の発展性が大いに期待できる。