

VI-16

フィードフォワード制御によるシールド誘導手法

東急建設㈱ 施工本部 土木技術部 正会員 酒井 邦登
 武蔵工業大学 工学部 土木工学科 正会員 星谷 勝

1. はじめに

シールドを誘導するためには、測量結果から計画路線との偏差を求め、この偏差を無くするようなシールドの方向制御が必要となる。測量結果から認識される現状のシールド位置・姿勢に基づいて、路線線形を確保する自動制御技術の進展が望まれているが、実際には制御手法の問題から、なかなか計測結果に基づいた制御を含めた自動誘導にまでは発展していない。そこで、著者らはカルマン・フィルタ理論を応用することでシールド位置の予測結果に基づくフィードフォワード制御を開発・実用化したので、ここに報告するものである。

2. フィードフォワード制御

シールドのように複雑で大規模なシステムを取扱う場合、効率的な制御系の設計が問題となる。ここで、制御系は制御対象の不確定さや、外乱の存在の下でも有効に働く制御系としてフィードバックが考えられる。しかし、フィードバック制御は安定性を得られるが、計測結果に基づいて制御計算を行い、実際に制御の動作に至るには相当の時間を要するため、目標値の変化に対しては、応答が遅れる欠点があり、シールドの掘進に制御が追従できないことが多い。そこで、定量的な予測手法を採用すれば、制御の動作に至るまでの時間を短縮することができ、予測結果に対する制御、いわゆるフィードフォワード制御が可能となると考えられる。

図-1にコンピュータによる制御の基本形を示す。

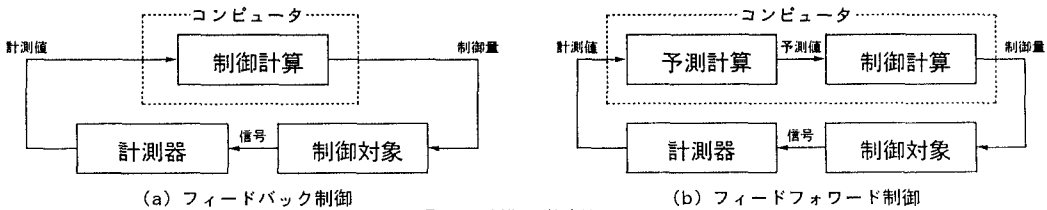


図-1 制御の基本形

フィードフォワード制御には、シールド位置の将来予測が前提条件となるため、統計的解析モデルの自己回帰モデルを用いて予測計算を行うことにした。この手法に関しては、文献 [1],[2] に委ねることとする。

3. 制御手法

計測データをもとにシールド位置の制御を行うためには、シールドジャッキの操作状況とシールド位置偏差の物理的意味を考慮に入れた関係式の誘導が必要となる。観測データとしては、シールド方向の計画とのずれを横軸のスケールである掘進距離で微分した方向ずれの変化率を取扱うこととする。

シールド方向のずれの掘進距離に対する変化率が、シールドジャッキに作用させるモーメントに比例するものとしてベクトル量の関係を水平方向、鉛直方向に分離して示すと次のように書ける。

$$a_i = \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \propto M_x \quad (1) \quad b_i = \frac{\partial \phi_i}{\partial t} \propto M_y \quad (2)$$

ここに、 θ_i ：シールドの方向ずれ（水平成分）、 ϕ_i ：シールドの方向ずれ（鉛直成分）、 a_i ：方向ずれの変化率（水平成分）、 b_i ：方向ずれの変化率（鉛直成分）、 t ：掘進距離（横軸のスケール）、 M_x ：全偏心モーメント（水平成分）、 M_y ：全偏心モーメント（鉛直成分）、である。

次に、ジャッキ稼働パターンを物理量に変換し、偏心モーメントとの関係を考える。ただし、掘進する地盤には硬軟等の不均質性を有するだけでなく、シールドジャッキ各々に癖を有しているため、シールドマシン全体について考えることには無理がある。したがって、方向ずれの変化率と偏心モーメントの変換係数は、シールド機

の図心に関する全体的なものではなく、ジャッキ各々に関して設定するのが妥当と考えられる。方向ずれの変化率を、油圧およびジャッキ稼働パターンの可観測である物理量に関連させると、式 (3), (4) で表現される。

$$a_i = \sum_{j=1}^m K_{ij}^x \cdot V_j x = \sum_{j=1}^m \frac{P}{l_n} \cdot (r_i - r_0) \cdot S_i \quad (3) \quad b_i = \sum_{j=1}^m K_{ij}^y \cdot V_j y = \sum_{j=1}^m \frac{P}{l_n} \cdot (s_i - s_0) \cdot S_i \quad (4)$$

シールド位置の制御には目標到達点を設定して、これに要する方向のずれを算出し、カルマン・フィルタにより時々刻々と修正される最適変換係数から、制御量の最適ジャッキ稼働パターンを決定する。

さて、現在シールドの方向ずれを (θ_i, ϕ_i) とし、すりつけ点の j 点先の目標点でのシールドの方向ずれを $(\theta_{i+j}, \phi_{i+j})$ とする。そのとき、シールド方向ずれの掘進距離に対する変化率が定常に推移するものと仮定すれば、制御量は、式 (5), (6) のように既知量だけで表現される。

$$\sum_{i=1}^m K_{ij}^x \cdot V_j x = a_{i+j} = \frac{\theta_{i+j} - \theta_i}{j \cdot \Delta t} \quad (5) \quad \sum_{i=1}^m K_{ij}^y \cdot V_j y = b_{i+j} = \frac{\phi_{i+j} - \phi_i}{j \cdot \Delta t} \quad (6)$$

次に、式 (5), (6) より、最適ジャッキ稼働パターンは、以下のように制御に必要な方向変化率と可能ジャッキ稼働パターンによる制御モーメントの自乗誤差 G を最小にすることで求められる。

$$G = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^m K_{ij}^x \cdot V_j x - a_{i+j}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^m K_{ij}^y \cdot V_j y - b_{i+j}\right)^2} \rightarrow \text{Minimum} \quad (7)$$

以上より、最適ジャッキ稼働パターンが決まることが明らかになったが、このパターンは一意には決まらない。全部のジャッキ稼働パターンの中から、式 (7) を満足する最適なものを早く探索することが問題となる。

4. 軌道設定方法

シールド位置の偏差が生じたときに、シールドトンネルの線形を計画路線に修正するため最適制御量の算出には、前述の目標到達点までの距離と座標が与えられていることが前提となっている。基本的には、一番近い将来点において、シールド位置の偏差が0になることが望ましいが、偏差の程度、あるいは過去の軌跡に無関係な制御を行なうことは許されないの、目標到達点の変更が必要となる。そこで、無理のないシールド線形を確保するため、簡便なシールド位置の偏差修正用の目標到達点設定手法として、通常の掘進時には数 m 先で計画路線、偏差が大きいときには無理の無い程度に偏差を設定しておけば良いと考えられる。図-2に軌道設定例を示したが、軌道は滑らかに目標到達点に達しており、制御手法としては実用に供することができるものとする。

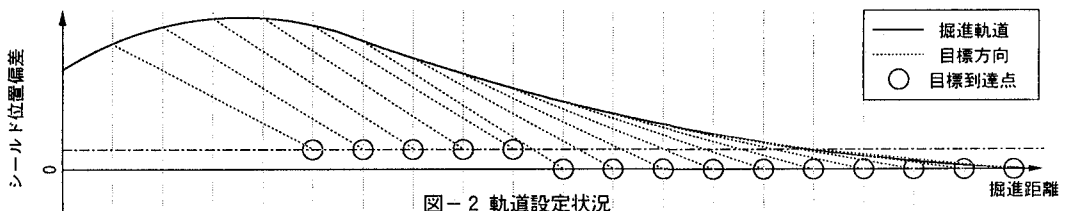


図-2 軌道設定状況

5. おわりに

本研究は、カルマン・フィルタ理論を効率良く用いることで、シールド位置の予測に基づくフィードフォワード制御を可能としたもので、目標到達点の設定を変更するだけで、刻々と変化する地盤に対応して最適ジャッキパターンの選択を自動的に行なえることが判明した。

今後、実施工への適用を重ねて、制御量と制御結果の関係を解明していく予定である。

【参考文献】

1. 星谷勝・酒井邦登：拡張カルマン・フィルタを援用したシールド位置予測、土木学会第41回年次学術講演会概要集、VI-25, 1986.
2. 酒井邦登・星谷勝：カルマン・フィルタを用いたシールド位置の予測と制御、土木学会論文集第385号/VI-7, pp.69~78, 1987.
3. Sakai, K. and Hoshiya, M.: Automatic conduction method of behaviors on driving shields using Kalman filtering theory, Proc. 2nd East-Asia Pacific Conference Structural Engineering and Construction, 1989.
4. Jazwinski, A.H.: Stochastic Processes and Filtering Theory, Academic Press, 1970.
5. 赤池弘次・中川東一郎：ダイナミックシステムの統計的解析と制御、サイエンス社、1972.