# 粘性項を無視したモデルを用いた小口径管推進機械の ロバスト制御に関する研究

建設省中部地方建設局豊橋工事事務所　正会員　高津知司

## 1 まえがき

今日の日本においては，下水処理人口が約五千万人に達しようとしている．近年，特に下水処理人口の増加には著しいものがあるが，欧米諸国に比べるとまだ普及率は低いと言わざる得ない[1)]．このような事実からも，さらに下水道の面的整備を進めなければならない．

下水道の面的整備に重要なものに下水道管渠の埋設工事があるが，近年，その有用性が認識されて非開削工法の一つである"小口径管推進工法"が多用されるようになった．

しかし，小口径管推進工法も利点ばかりではなく，種々の解決が求められている課題がある．小口径管推進工法は曲線施工に適用しにくい，工法により適用土質が限られている等の課題があるが，施工量の増加にともなう熟練オペレータの減少による省技能化が最優先課題であった．そこで，建設省土木研究所において1988年から1991年にかけて，民間企業12社と共同で共同研究を行い，"小口径管推進工法用共通ファジィ・コントローラ"を開発した．このコントローラで，小口径管推進工法の"省技能化"はひとまず達成された[1)]．

さらに，著者は多方面から小口径管推進工法の自動化に関する研究を行った[2)]．その研究概要は，さらに高度な制御システムや種々の支援システムを開発する基礎となる小口径管推進工法における管渠の数学モデルを提案したものである．

提案された数学モデルは，2階常微分方程式で表現されているので管渠の質量，土の粘性係数およびバネ係数が必要になる．上の粘性係数は物理学や機械工学とは異なる次元で与えれれているので同定しなければならなかった[2),4)]．

本研究においては，粘性項を無視する事で簡略化したモデルを用いる事で制御が良好に行えるか否かを考察し，制御のアルゴリズム簡略化と高速化を試みた．

## 2 数学モデル

簡単化のために以下の仮定を設ける．

1. 対象とする地盤を均質なものとする．すなわち，代表的な力学的定数である粘性係数と弾性定数とが一定である．
2. 小口径管推進工法の特性より，管渠の施工計画線からの変位と偏角が小さい．
3. 推進速度は一定である．

上記の仮定より，埋設されつつある管渠の挙動が以下のような定常・線形の数学モデルによって表現できる[2)]．

$$
\begin{aligned}
dz_n(\tau) &= \mathcal{A}_n(\tau)z_n(\tau)d\tau + C^u(\tau)u(\tau)d\tau + G_n(\tau)dw(\tau) \\
z_n(t_n) &= z_{nt_n} \qquad (t_n \le \tau \le t_{n+1})
\end{aligned} \tag{1}
$$

新たに推進管渠の動特性を以下の様に書き換える．

$$
\begin{aligned}
dz_n(\tau) &= \widehat{\mathcal{A}}_n z_n(\tau)d\tau + C^u u(\tau)d\tau + \widehat{G}_n(\tau)dw(\tau) \\
z_n(t_n) &= z_{nt_n} \qquad (t_n \le \tau \le t_n)
\end{aligned} \tag{2}
$$

ただし，

$$
\widehat{\mathcal{A}}_n \triangleq \mathcal{A}_n\left(\frac{t_{n+1}-t_n}{2}\right)
$$

であり，$\widehat{G}_n(\bullet)$ は時変成分と無視した粘性項を正規性雑音と見なした係数行列である．また，$\widehat{\mathcal{A}}_n$においては，粘性係数を0として粘性項を無視している．

Table 1. シミュレーション実験に用いた諸定数

| $\ell_i$[m] | $m_i$[kg] | $d^o$[m] | $I_i$[kg·m$^2$] | Soil type | N number | $\mu$ | Water level[m] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.4 | 1100 | 0.85 | 540 | Loam | 10 | 0.3 | 5 |
| Depth[m] | D′[N/m] | D[N·sec/m] | $K_S$[N/m] | $K_J$[N/m] | $p_d$[N/m$^2$] | $F_0$[N] | V[m/sec] |
| 10 | $7.0\times10^3$ | $6.2\times10^2$ | $1.4\times10^5$ | $7.0\times10^5$ | $1.6\times10^5$ | $2.6\times10^5$ | $2.0\times10^{-3}$ |

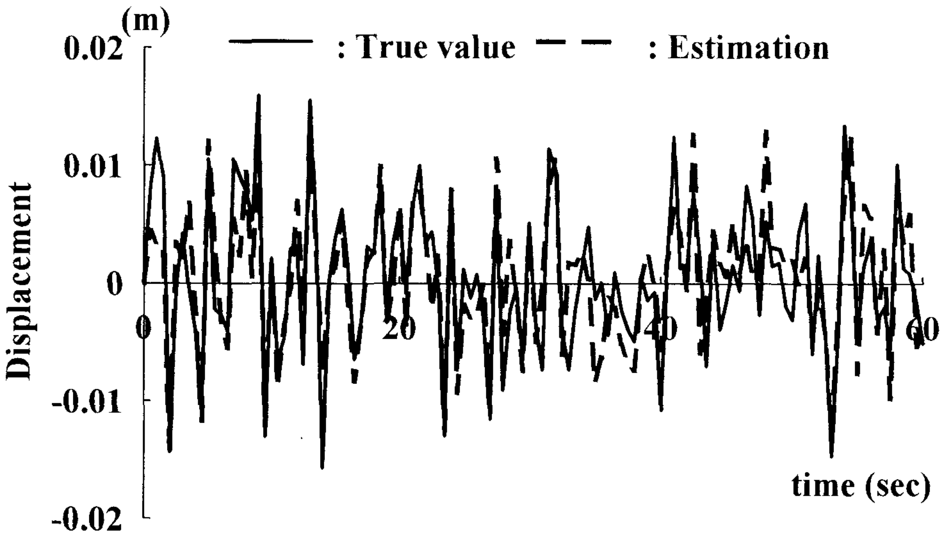


Fig.1. 推定・制御のシミュレーション

## 3　シミュレーション実験

シミュレーション実験のために使用した諸定数を表1に示す．対象管渠の口径は，700[mm] とした[2]．

システム状態量を生成するのには時変で粘性項を考慮している(1)式を用い，Kalman Filter のゲインと制御ゲインを求めるのには時不変で粘性項を無視した(2)式を用いた．さらに，計算量を低減および時不変モデルであるので，Kalman Filter のゲインと制御ゲインは定ゲインとして求めた[3]．

推定と制御の有効性を確認するシミュレーションの結果をFig.1 に示す．シミュレーション結果より，粘性項を無視したモデルを小口径管推進機械の方向制御に用いたときの，推定・制御のロバスト性が確認された．

**謝辞：**　ドイツのRuhr大学に客員研究員として招いていただき本研究を手掛ける機会を作っていただいたRuhr大学教授Dr. D. Stein および 研究スタッフのDr. A. Bornmann，土質工学分野について有効な助言をしていただいた建設省土木研究所動土質研究室の古関潤一博士（現東京大学生産技術研究所助教授），研究に関して種々のサポートをしていただいた建設省豊橋工事事務所の諸氏，さらに，ヨーロッパで本研究のヒントを与えて下さった(株)イセキ開発工機の藤森勲部長，ユーロイセキ(株)のYoshimura氏に感謝の意を表す．

最後に，研究実施方法，確率システム理論等に関して有効な助言をいただいた京都工芸繊維大学大住晃教授に感謝する．

## 参考文献

1) T. TAKATSU, H. TAKEDA and A. SUGIYAMA:On a common fuzzy control system for the micro-tunnelling; Introduction of control configured construction machine, No Trenches in Town (Proceedings of NO-DIG 92 Paris, International Society of Trenchless Technology, edited by Henry and Mermet), Balkema, Rotterdam, pp. 31–38 (1992).

2) T. TAKATSU, S. MIMURA and R. YOSHIDA: On a stocastic modelling for the steering control of the Micro-tunnelling system, Proceedings of the ISCIE International Symposium on Stochastic System Theory and Its Applications Osaka, Nov. 10-12, 1993, pp. 81–86 (1993).

3) S. T. ARIARATNAM and N. K. LOH: Optimal control and filtering of linear stochastic systems, Int. J. Control, Vol. 7, No. 5, pp. 433–445, 1968.

4) 石原研而：土質力学の基礎，　鹿島出版会(1976).

5) D. STEIN, K. MÖLLERS and R. BIELECKI: Microtunneling – Installation and Renewal of Nonman-Size Supply and Sewage Lines by the Trenchless Construction Method –, Verlag für Architektur und technische Wussenschaften, Berlin (1989).