I-179　構造同定を伴う震動制御アルゴリズムの開発

鳥取大学大学院　学生員　井上　潤
鳥取大学工学部　正会員　野田　茂

1. まえがき

近年、コンピューターで情報処理を行うインテリジェントビルの発達により、その社会的中枢機能の重要性が増している。これらの構造物が強震時に損傷を受けると、そのものの崩壊だけでなく、都市全体のシステムダウンにつながる恐れがある。そのため、アクティブな最適震動制御を時々刻々行うことは合理的である。しかしながら、その際、経時変化する構造パラメーターを適宜推定しておく必要がある。そこで、本研究では、各センサーの観測情報から、時々刻々、構造同定を行って自らの体質を認知し、それに基づいて、最適な震動制御を即座に実施できるような実用的アルゴリズムを提案する。

2. 研究の方法

本研究では、逐次型の推定制御アルゴリズムの有効性を確認するため、最も単純なモデルを対象とする。図１には、ここで用いる震動制御装置付き線形多自由度構造物を示す。

(1) 構造同定の効率化

ここでは、式(1)の非線形連続型状態方程式と式(2)の非線形離散型観測方程式を考える。

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + BU(t) + W_1\ddot{z}_g(t) \qquad (1)$$

$$Y(t_k) = Ph(t_k) + V(t_k) \qquad (2)$$

ここに、式(1)において、$Z(t)$は変位と速度からなる状態量ベクトル、$U(t)$は制御力ベクトル、$\ddot{z}_g(t)$は地動加速度、A, BとW_1は未知パラメーター（例えば、質量、減衰と剛性）からなるマトリックスとベクトルである。式(2)において、$Y(t_k)$は、観測量である絶対加速度応答ベクトル、$h(t_k)$は状態量から計算される絶対加速度応答ベクトル、$V(t_k)$は観測ノイズベクトル、Pは観測位置マトリックスを示す。

本方法では、地動加速度と観測点の絶対加速度応答から、拡張カルマンフィルターとスムージングの効率化を図って、最適な状態推定を時々刻々行うことを考えている。本アルゴリズムでは、以下に述べるような理由から、WILFS(Weighted Iterated Linear Filter-Smoother)と称する構造同定法を提案する。

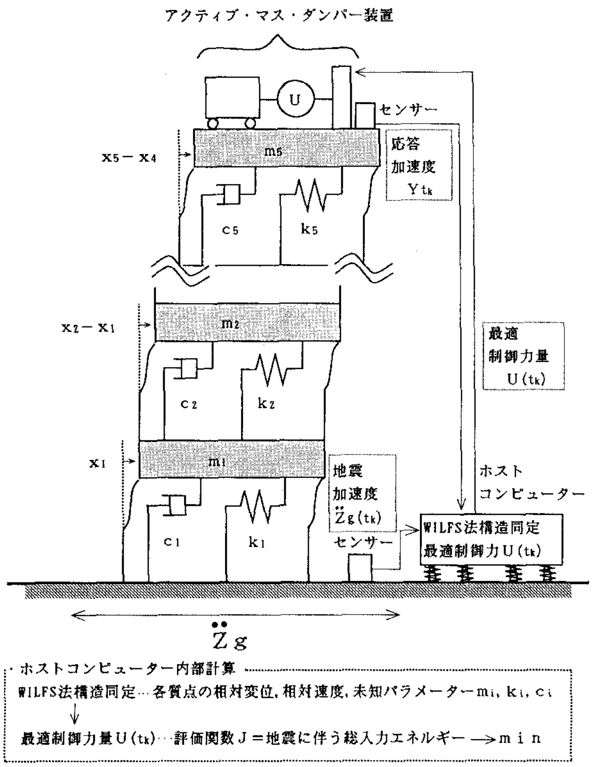

図１　制御装置付き線形多自由度構造物

フィルター理論に基づく最適推定においては、式(1)と式(2)の非線形式を等価な線形式に変換するために、状態量に関する偏微分計算を行って、推移マトリックスや観測量への変換マトリックスを計算しなければならない。これには、テーラー展開に伴う近似計算を必要とする。このようなことから、推定誤差の増大をおさえるために、重み付きのグローバルな繰り返し法が提案されている。しかし、時々刻々に最適な制御力を決定するためには、このような同定法は適さない。

上記の理由のため、本研究では、観測時点で最適制御を実施できるように、状態方程式や観測方程式の非線形性に伴う誤差の増大を低減させることを考える。これは、繰り返し線形近似による現推定値の改善とスムージングによる前推定値の改善を、微小な時間帯において、交互にかつローカルに繰り返すことにより実施できる。その結果、最適な状態推定量（各質点の相対変位、相対速度と未知パラメーター m_i, k_i, c_i）が求

められることになる。この操作はILFS法[1]と呼ばれる。しかし、この方法ではローカルな繰り返し推定を行うため、推定誤差共分散が小さくなることが考えられる。そこで、本研究では、次ステップの推定時において、推定誤差共分散に重みをかけ、効率的な推定が行えるような工夫を施す。これがWILFS法である。

(2) 最適制御力の決定

最適制御力 $U(t)$ は、ラグランジェの未定乗数法を用いると、時間依存型総入力エネルギーの評価関数と運動方程式の拘束条件よりなる拡張された評価関数を最小化することによって、求めることができる。式(3)の第1項と第2項は、時刻 $(t-\Delta t)$ から時刻 t までの振動エネルギーと制御エネルギーの和、第3項は同時間帯における総地震入力エネルギーである。総地震入力エネルギーを含めた評価関数の設定は、Satoら[2]の成果を発展させたものである。第4項は、式(1)の状態方程式を漸化式で表したものである。

$$
\begin{aligned}
J'(t) &= \frac{1}{2}\Delta t\{Z^T(t)Q_1Z(t)+U^T(t)RU(t)\}+\frac{1}{2}\Delta tS(t-\Delta t)+\alpha\{Z^T(t)Q_2Z(t)+Z^T(t)W_2\ddot{z}_g(t) \\
&\quad +E(t-\Delta t)\}+\Lambda[Z(t)-D(t-\Delta t)-\frac{\Delta t}{2}\{BU(t)+W_1\ddot{z}_g(t)\}] \qquad (3)
\end{aligned}
$$

ここに、Q_1, Q_2とW_2は未知パラメーターからなるマトリックスとベクトル、Rは制御力の重みマトリックス、αは第1項と第2項のエネルギーに対する第3項の総地震入力エネルギーの比を表す。なお、Λはラグランジェ乗数ベクトルである。

地震入力加速度、応答量（相対変位と相対速度）と未知パラメーターの推定値（$\hat{}$を付す）を用いると、フィードバック・フィードフォワード制御則から、最適制御力は次のようになる。式(4)は、応答量やパラメーターの推定値に依存している点を除くと、Satoら[2]の結果を発展させた式となっている。

$$
\begin{aligned}
U(t) &= -\frac{\Delta t^2}{8}R^{-1}\hat{B}^T(\hat{Q}+\hat{Q}^T)\hat{Z}(t) \\
&\quad -\frac{\Delta t^2}{8}\alpha R^{-1}\hat{B}^T\hat{W}_2\ddot{z}_g(t) \qquad (4)
\end{aligned}
$$

ここに、$Q=Q_1+\alpha Q_2$である。

図2は、WILFS法によって逐次的に同定されたパラメーターを用いて、最適な制御力を定めるアルゴリズムのフローを示したものである。

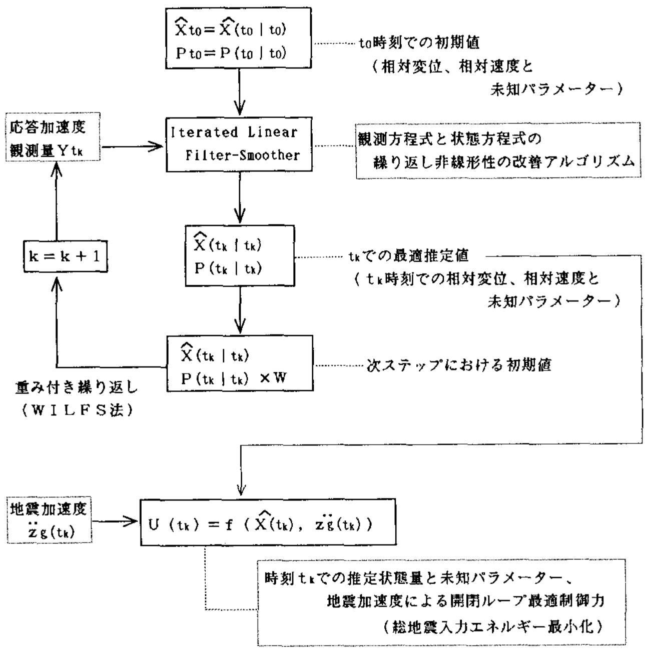

図2　WILFS法による逐次型最適制御のフローチャート

3. あとがき

1) 本研究では、1) ローカルな繰り返しによって観測方程式の、さらに2) スムージングを併用して状態方程式の非線形性に伴う推定誤差の増大を低減させる逐次型推定アルゴリズムを示した。

2) 最適制御力は、上記アルゴリズムによって推定した応答量と推定パラメーターを用いると、フィードバック・フィードフォワードの最適制御則から計算できる。このように、本方法は構造同定と制御力を同時に算出できる利点を有している。

参考文献

1) Wishner,R.P., Tabaczynski,J.A. and Athans,M. : A Comparison of three non-linear filters, Automatica, Vol.5, pp.487 ～ 496, 1969.

2) Sato,T., Toki,K. and Sugiyama,K. : Optimal control of seismic response of structures, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.7, No.1, pp.179s ～ 188s, April 1990.