I-260　WILFS 法による構造同定と最適振動制御

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

アクティブな最適振動制御を時々刻々行う際、経時変化する構造パラメーターなどを適宜推定しておくことは極めて重要である。そのため、著者らは、文献 1) において、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振動制御を即座に実施できるようなアルゴリズムを提案した。ここでは、前論文で述べなかったアルゴリズムの全体像を示すとともに、数値シミュレーションにより、その有効性を明らかにする。

2. 構造同定を伴う振動制御アルゴリズム

(1) 最適振動制御

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。

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + W_1\ddot{z}_g(t) \quad (1) \quad , \qquad Y(t_k) = P'h(X(t_k)) + V(t_k) \quad (2)$$

ここに、$\ddot{z}_g$ は地震入力、X は状態量（変位、速度と構造パラメーター）、U は制御力、Y は観測加速度、V は観測ノイズなどである（文献 1) 参照）。

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の下で、拡張された評価関数を考える。ラグランジェの未定乗数法を用いて、これを最小化することにより、最適制御力は次のようになる。

$$U(t) = -\frac{\Delta t^2}{8}R^{-1}\hat{B}^T(\hat{Q}+\hat{Q}^T)\hat{X}(t) - \frac{\Delta t^2}{8}\alpha R^{-1}\hat{B}^T\hat{W}_2\ddot{z}_g(t) \quad (3)$$

上式における ^ は、以下のアルゴリズムによって推定される構造パラメーターと状態量を意味する。

(2)WILFS 構造同定アルゴリズム

WILFS(Weighted Iterated Linear Filter-Smoother) 法による構造同定では、地動加速度と絶対加速度応答の観測の下で、拡張カルマンフィルターとスムージングの効率化を図ることにより、最適な状態推定を時々刻々行う。以下に、そのアルゴリズムを示す。なお、記号やアルゴリズムの詳細は紙面の都合上割愛するが、講演会当日に説明する。

(初期条件)

$$\eta^{(1)} = \hat{X}^{(1)}_{k/k-1} \ , \ \xi^{(1)} = \hat{X}_{k-1/k-1} \quad (4)$$

$$P^{(1)}_{k/k} = W_k P_{0/0} \quad (5)$$

(予測値の計算)

$$\bar{X}_k = \xi^{(i)} + \int_{t_{k-1}}^{t_k} f(\bar{X}(\tau),\tau)d\tau \quad (6)$$

$$\hat{X}^{(i)}_{k/k-1} = \bar{X}_k + \Phi_{k/k-1}(\xi^{(i)})\{\hat{X}_{k-1/k-1} - \xi^{(i)}\} \quad (7)$$

(拡張カルマンフィルターの演算)

$$K^{(i)}_k = P^{(i)}_{k+1/k}{M^{(i)}_{k+1}}^T[M^{(i)}_{k+1}P^{(i)}_{k+1/k}{M^{(i)}_{k+1}}^T + R(k+1)]^{-1} \quad (8)$$

$$\eta^{(i+1)} = \hat{X}^{(i)}_{k/k-1} + K^{(i)}_k[Y_k - h^{(i)}_k - M^{(i)}_k\{\hat{X}^{(i)}_{k/k-1} - \eta^{(i)}\}] \quad (9)$$

(スムージングの演算)

$$S^{(i)}_{k-1} = P_{k-1/k-1}\Phi^T_{k/k-1}(\xi^{(i)}){P^{(i)}_{k/k-1}}^{-1} \quad (10)$$

$$\xi^{(i+1)} = \hat{X}_{k-1/k-1} + S^{(i)}_{k-1}\{\eta^{(i+1)} - \hat{X}^{(i)}_{k/k-1}\} \quad (11)$$

式 (6) ~ (11) を反復的に繰り返すと、式 (9) の $\eta^{(i+1)}$ は収束し、時刻 k の最適推定値 $\hat{X}_{k/k}(=\eta^{(n)})$ が得られる。

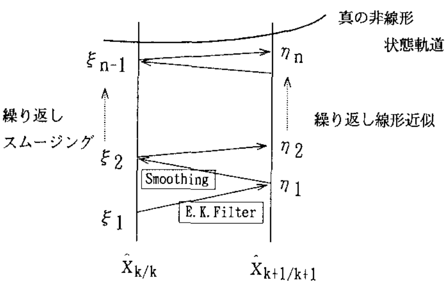

図１　ILFS(Iterated Linear Filter-Smoother)法による精度の改善

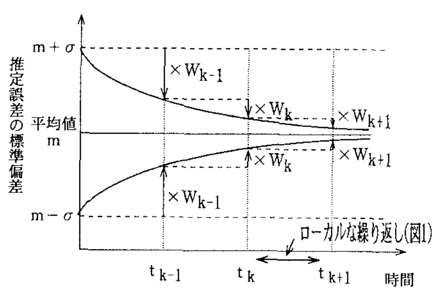

図２　WILFS(Weighted-ILFS)法の考え方

図1は一連のアルゴリズムの収束性を示したものである。ここでは、時々刻々と微小な時間帯において、ローカルな繰り返しを併用している。そのため、式(9)の繰り返し線形近似によって、現推定値の改善を、式(11)のスムージングによって、前推定値の改善を図ることが容易である。さらに、ローカルな繰り返しを行うときの誤差分散の初期値は、図2(式(5))に示すように、初期推定誤差分散に重み(W_k)をかけて、低減させる。これにより、安定したかつ効率的な推定値を得ることができる。

本方式では、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、最適な状態推定量を求めることができる。

3. 数値計算例および考察

上述した逐次型推定制御アルゴリズムの有効性を確認するため、最上階にアクティブマスダンパーを設置した線形5自由度構造物を計算の対象とした。ここでは、全質点の加速度応答と地動加速度(El Centro 波)をセンサーで検知し、最上階の最適制御力を求めた。

図3は、図4のような制御力が作用するときの変位応答の一例を示したものである。無制御時に比べて、応答量はかなり低減されており、制御の効果は明らかである。特に、最上階(質点5)では揺れにくくなっている。図4は、既知の構造パラメーターを与えて求めた制御力と比べても、それほど遜色のない結果である。

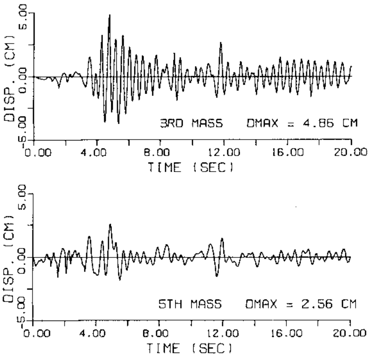

図3　同定と制御時の変位応答

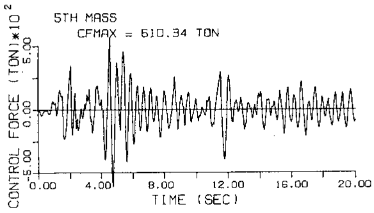

図4　最適制御力

逐次的に求められる構造パラメーターのうち、剛性の時系列変化は図5、減衰の時系列変化は図6のようになる。入力加速度の強震部付近で、剛性の推定値はよくない。しかし、全体的に見れば、地動と応答の観測値に追随して、剛性は真の値に収束していく傾向にある。このことは、入力加速度に応じて、反復計算の重みを変更することにより、推定精度をよくできることを示唆している。剛性に比べて、減衰が推定応答に与える感度は小さかった。図6のように、最下層(質点1)の減衰の同定結果を除くと、推定値は時系列的に極端に変化しなかった。

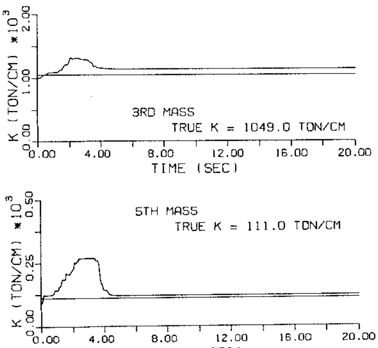

図5　同定を伴う剛性の変化

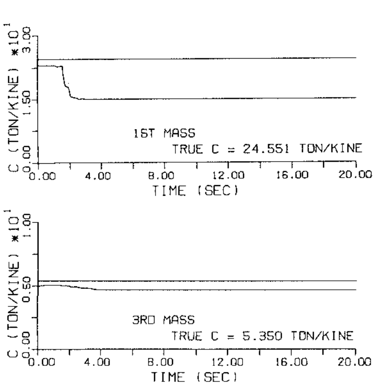

図6　同定を伴う減衰の変化

多自由度系の構造同定は、効率化を図らなければ、難しいと言われている。本研究では、このような構造同定を伴いながら、最適制御を実施している。同定の精度は一部よくない点もあるが、全体的にはバランスのとれた同定と制御を行うことができた。

4. あとがき

1) WILFS 法では、構造同定を時々刻々行えるために、最適な状態推定値を容易に得ることができる。同時に、開閉ループ制御則を用いて、逐次的に最適振動制御を行えるメリットを有する。

2) 本アルゴリズムを多層の建築構造物に適用したところ、観測量に基づいてパラメーターの安定解が得られるとともに、無制御時に比べて制振効果の有効性が明らかになった。

参考文献

1) 井上　潤・野田　茂：構造同定を伴う震動制御アルゴリズムの開発、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集、第1部、pp.534 ～ 535、平成4年9月.