

# 時系列モデルを用いた多自由度系の 瞬間最適予測制御

斉藤芳人<sup>1</sup>・星谷 勝<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 武蔵工業大学 客員研究員 前田建設工業(株)技術研究所(〒176 練馬区旭町1-39-16)

<sup>2</sup>正会員 Ph. D. 武蔵工業大学教授 土木工学科(〒158 世田谷区玉堤1-28-1)

離散化された多自由度系システムに対し、フィードバック系とフィードフォワード系を分離して設計する瞬間最適予測制御則を提案した。また、時間遅れや観測条件の制約および観測ノイズに対処するため入力地震動をリアルタイムに予測する手法および観測ノイズを含む一部の観測情報のみからシステムの全状態量を精度よく予測する手法を提案し、本手法の有効性を ACTIVE-TENDON 制御機構を有するモデル構造物のシミュレーション解析により検証した。また、本手法のフィードバックおよびフィードフォワード制御の特徴について考察した。

**Key Words :** prediction control, AR model, Kalman filter, Optimal control, Instantaneous optimal control

## 1. はじめに

近年、建設技術の発達にともない建築構造物の高層化が進められ、地震時や強風時は勿論、小地震や風振動等の比較的弱い外乱に対しても安全性および居住性の面からこうした振動を制御しようとする研究が活発に行われており、実際に制振建物も建設されるようになってくる<sup>1)</sup>。ところで振動制御に関する研究において、機械や航空機の分野では最適レギュレータ理論<sup>2)</sup>による制御が多用されている。これは状態量(構造物の応答量)と制御量の2次形式で表現された評価関数を最小にするための必要条件としてリカッチ方程式を誘導し、これを解くことにより最適フィードバックゲインを求めるものである。また、制御力を状態フィードバック系と外乱に依存するフィードフォワード系の和として表現すると、外乱に依存するフィードフォワード系を決定するためには逆時間解析が必要となり、事前に外乱の情報が全継続時間にわたって既知でなければならない。そこで、一般には外乱をゼロまたはホワイトノイズと仮定し、フィードバック系のみによって制御を行っている。西村ら<sup>3)</sup>は、地震入力を受ける構造物の振動制御問題に対し、成形フィルタの考え方を取り入れて、フィードフォワード系の設計を行っているが、それがフィードバック系の設計と分離しておらず、フィードフォワード併用制御系を一つのフィードバック系として設計する間接的な方法といえる。また、Yangら<sup>4),5)</sup>は時間依存型の評価関数を導入することで、各時刻における入力地震加速度を利用した瞬間最適制御則を提案した。さらに、佐藤ら<sup>6)</sup>はその評

価関数中にシステムへの入力地震エネルギーを導入したアルゴリズムを提案している。しかし、評価関数中の状態量に関わる重み行列に関しては明確な算定手法は示されていない。

一方、実際に制御を行う際には入力やシステムの応答値をセンサーで感知してから制御力を計算するまでの時間と制振装置へ指令が出されてから実際に制御力が作用するまでの時間が合計された時間遅れが存在する。従って、制御遅れを解決するためには将来の応答値あるいは入力を予測する必要がある。さらに、多自由度系構造物ではその全状態量を観測することはさまざまな制約から現実的ではない。そこで、現時刻までの情報から将来の値を予測する手法として、時系列モデルやニューラルネットワークを用いた研究<sup>7)-11)</sup>がある。

以上の研究をふまえ、ここでは瞬間最適予測制御則<sup>12)</sup>を決定する評価関数中の状態量に関わる重みの算定にリカッチ方程式を利用する新たな制御則を提案する。さらに、本手法で設計されるフィードバック系が離散型の最適レギュレータ理論から得られるそれと一致し、フィードバック制御系とフィードフォワード制御系の設計が分離できることを示す。また、制御遅れを解決するため、入力地震動をリアルタイムに予測する手法および、ノイズを含む一部の観測情報から全状態量を精度よく予測する手法を提案し、ACTIVE-TENDON 制御機構を有するモデル構造物のシミュレーション解析により、本手法の妥当性を検証するとともに本手法を適用した場合のフィードバックおよびフィードフォワード制御の特徴について考察する。

## 2. 瞬間最適予測制御則の定式化

多自由度系 ( $N$  自由度) に外力が作用する場合の運動方程式は次式で表せる。

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (1)$$

ここに、

$M$ : 質量マトリクス

$C$ : 減衰マトリクス

$K$ : 剛性マトリクス

$x(t)$ : 地盤に対する相対変位

$f(t)$ : 各質点に作用する外力

ここで、

$$X = [x(t) \quad \dot{x}(t)]^T \quad (2)$$

とすると、式 (1) は次の状態方程式で表現される。

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bg(t) \quad (3)$$

ここに、

$$A = \begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} O & O \\ O & -M^{-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$g(t) = [O \quad f(t)]^T$$

式 (3) を離散化すると<sup>13)</sup>

$$X(n+1) = \Phi X(n) + \Gamma' g(n) \quad (6)$$

となる。ここに、

$$\Phi = I + \Delta A + \frac{1}{2!} A^2 \Delta^2 + \dots + \frac{1}{r!} A^r \Delta^r + \dots \quad (7)$$

$$\Gamma' = \left[ I + \frac{1}{2!} A \Delta + \frac{1}{3!} A^2 \Delta^2 + \dots + \frac{1}{r!} A^{r-1} \Delta^{r-1} + \dots \right] B \\ = [O \quad \Gamma] \quad (8)$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

ただし、 $\Gamma$  は  $(2N \times N)$  の行列で、 $(N \times N)$  の行列  $\Gamma_1$  および  $\Gamma_2$  からなり  $\Delta$  は時間刻みを示す。

従って、式 (6) は次式となる。

$$X(n+1) = \Phi X(n) + \Gamma f(n) \quad (10)$$

ここで、ACTIVE-TENDON 機構により各質点に制御力を作用させることが可能な場合を想定し、外力を次のように各質点に作用する制御力  $U(n)$  と地震入力  $-m\ddot{y}(n)$  で表現すると式 (10) は次式となる。

$$X(n+1) = \Phi X(n) + \Gamma U(n) - \Gamma m \ddot{y}(n) \quad (11)$$

ここに、

$$U(n) = [u_1(n) \quad u_2(n) \quad \dots \quad u_N(n)]^T \quad (12)$$

$$m = [m_1 \quad m_2 \quad \dots \quad m_N]^T \quad (13)$$

ここで、離散型の最適レギュレータ理論を用いたフィードバック制御則は、地震外力をゼロまたはホワイトノイズと仮定して、次の評価関数を最小にするように決定さ

れる。

$$J = \sum_{n=0}^{\infty} [X(n+1)^T Q X(n+1) + U(n)^T R U(n)] \quad (14)$$

ここで  $Q$  は状態量に関する重み行列、 $R$  は制御力に関する重み行列を示す。なお、ここでは重み行列  $Q$  をシステムの振動エネルギーを評価するように、また重み行列  $R$  は対角成分からなるように次式で定義する。

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{K}{2} & O \\ O & \frac{M}{2} \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & r_N \end{bmatrix} \quad (15)$$

最適フィードバック制御力  $U(n)$  は式 (16) に示すリカッチ方程式の正定唯一解  $S$  によって式 (17) で表される。

$$S = Q + \Phi^T S \Phi - \Phi^T S \Gamma [R + \Gamma^T S \Gamma]^{-1} \Gamma^T S \Phi \quad (16)$$

$$U(n) = G(n) X(n) \quad (17)$$

ここに、

$$G(n) = -[R + \Gamma^T S \Gamma]^{-1} \Gamma^T S \Phi \quad (18)$$

一方、システムへの地震入力エネルギーを考慮した瞬間最適予測制御則<sup>12)</sup> は次式のような時間依存型の評価関数を導入することで定式化される。

$$J(n) = [X(n+1)^T Q^* X(n+1) + U(n)^T R^* U(n) \\ + 2(-m\ddot{y}(n)) P^T X(n+1)] \quad (19)$$

ここに、

$$P^T = [O \quad P] \quad (20)$$

式 (11) で表現されたシステムの制約条件下において、式 (19) の評価関数を最小にする最適化問題を考え、離散時間空間においてラグランジェの未定乗数法<sup>14)</sup> を適用し、制御力を求めると、式 (21) のようなフィードバック+フィードフォワード制御力が求まる。

$$U(n) = G(n)^* X(n) + G_{ff}(n) \quad (21)$$

ここに、

$$G(n)^* = -[R^* + \Gamma^T Q^* \Gamma]^{-1} \Gamma^T Q^* \Phi \quad (22)$$

$$G_{ff} = [R^* + \Gamma^T Q^* \Gamma]^{-1} \Gamma^T [Q^* \Gamma + P^T] m \quad (23)$$

以上の定式化をふまえ、ここでは瞬間最適予測制御則を決定する評価関数中の重み  $R^*$  には  $R$  をそのまま用い、 $Q^*$  には式 (16) のリカッチ方程式の解  $S$  を用いることを提案する。これによって、式 (18) および式 (22) を比較してわかるように瞬間最適予測制御則から求まるフィードバックゲインと離散型の最適レギュレータ理論から求まるそれとが一致する。さらに、式 (22) および式 (23) から瞬間最適予測制御則の評価関数中の重み  $P^T$  ( $P$ ) はフィードフォワード系のみに関係し、フィードバック系には影響しない。また、 $R^*$  は両制御系に共通である。従って、フィードバックゲインに対するフィードフォワードゲインの相対的な大きさは  $P$  で設定し、

ゲイン全体の大きさは  $R^*$  で設定することができる。以上からフィードバック系とフィードフォワード系の設計は分離され、フィードバック系は離散型の最適レギュレータ理論から、フィードフォワード系は瞬間最適予測制御則から設定されると考えることもできる。さらに、著者らの文献<sup>12)</sup>にも示したように、ここでは行列  $P$  を次式で定義する。

$$P = \beta \Gamma_2^{-1} R \quad (24)$$

$\beta = 1$  のとき、外乱相殺型の制御方式となり、 $\beta = 0$  でも式 (23) よりフィードフォワードゲインは算出される。従って  $\beta$  を 0 から 1 の間で変化させることで、フィードフォワードゲインの大きさを設定する。

### 3. 入力地震加速度のリアルタイム予測

2. で示したような定式化によって時間遅れを考慮したフィードフォワード制御力を作用させるためには、何らかの式で 1 ステップ将来の地震動を予測する必要がある。しかし、地震動のような非定常な外乱を微分方程式として記述することはできない。そこで、1 ステップ将来の入力地震加速度を現在までの観測情報からリアルタイムに予測する手法を提案する。

#### (1) 入力地震加速度の予測手法の定式化

一般に、入力地震加速度の 1 ステップ予測には式 (25) のような時変型の  $AR$  モデルに基づいて、式 (26) および式 (27) に示すような状態方程式と観測方程式を設定し、各係数をカルマンフィルタで時々刻々同定しながら 1 ステップ将来の入力地震加速度を予測している<sup>9), 11)</sup>。

$\ddot{g}(n) = \alpha_1 \ddot{g}(n-1) + \alpha_2 \ddot{g}(n-2) + \alpha_3 \ddot{g}(n-3) + w(n)$  (25)  
ここに、 $w(n)$  はホワイトノイズ

$$[\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3]^T_n = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3]^T_{n-1} \quad (26)$$

$$\ddot{g}(n-1) = [\ddot{g}(n-2) \ \ddot{g}(n-3) \ \ddot{g}(n-4)]$$

$$[\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3]^T_{n-1} + w(n-1) \quad (27)$$

このとき、カルマンフィルタをそのまま適用していくと推定誤差共分散の値が時間とともに減少していくため、各係数は変動しにくくなる傾向がある。しかし、地震動のような非定常な時系列データに対し、こうした傾向は好ましいものではない。そこで、次のような手法を提案する<sup>15)</sup>。

- [1] 各時間ステップにおいて新たな観測データが得られるたびに、カルマンフィルタのアルゴリズムを数回繰り返す (ここでは、3 回とする)。
- [2] 各繰り返しにおける 1 回目の推定誤差共分散には、常にその初期値を用いる。
- [3] 一般に  $AR$  係数の値には、 $\alpha_1 > \alpha_2, \alpha_3$  の傾向があることから初期値を

$$[\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3]^T = [1 \ 0 \ 0]^T \quad (28)$$

とする。

- [4] 事前解析の結果から推定誤差共分散の初期値は、対角成分からなり、全て 0.01 とする。また、観測誤差共分散の値は 5 000 とする。

#### (2) 解析例

ここではまず Taft-EW 成分 (時間刻み 0.02 秒 : 2 000 データ) を用いた場合の解析例を示す。

図—1 および図—2 には、それぞれ既往の手法<sup>9), 11)</sup> および本手法を適用した場合の予測値と真の値を重ねて示してある。また、各図の上段には各  $AR$  係数の変動の様子も一緒に示してある。既往の手法では、各  $AR$  係数は初期の部分では変動しているが、時間が経過するにつれて変動しにくくなっている。それに対し、本手法では一様に各係数は変動しており、その予測値も本手法のほうが真値に近いことがわかる。また、表—1 には全継続時間におけるリアルタイムな予測値と真値の差の自乗和を代表的な 3 地震について示してある。同表からも、本手法による予測精度が既往の手法に比べて向上していることがわかる。

### 4. 非観測点を含む全状態量の予測

2. で示したような定式化によって時間遅れを考慮したフィードバック制御力を作用させるためには式 (11) を用いて 1 ステップ将来の状態量を予測すればよい。しかし、多自由度系の場合その全状態量を観測することは現実的ではない。また、観測される状態量 (応答変位および応答速度) には一般にノイズが存在する。こうした問題に対しては 3. と同様に、同一次元の最適オブザーバーとも言える<sup>16)</sup>カルマンフィルタが適用されている。しかし、多自由度系の場合のように予測すべき状態量の数が多くなると、逆行列の算定などの演算処理に時間を要し、リアルタイムな予測手法として用いるにはアルゴリズムが複雑である。そこで、ここではノイズを含む一部の観測情報をもとに非観測点を含む全状態量を簡便に推定する手法を提案する。なお、予測された状態量はずきのステップで作用させるフィードバック制御力の算定にのみ用いられ、フィードフォワード制御力の算定には関係しない。

#### (1) 状態量予測手法の定式化

まず、式 (10) より、 $X(n+i)$  と  $X(n)$  の関係は

$$X(n+i) = \Phi^i X(n) + \sum_{j=0}^{i-1} \Phi^{i-1-j} \Gamma f(n+j) \quad (29)$$

となる。従って、観測方程式を次式とすると、

$$y(n) = DX(n) \quad (30)$$

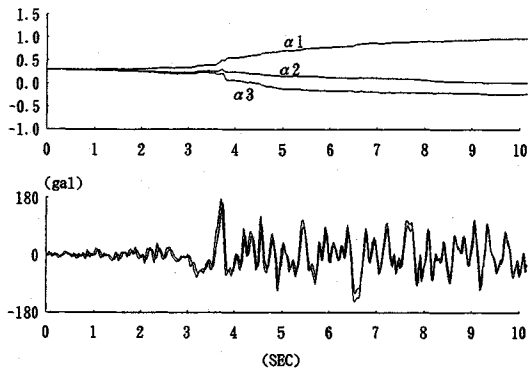


図-1 既往の手法による地震動の予測例 (TAFT-EW)

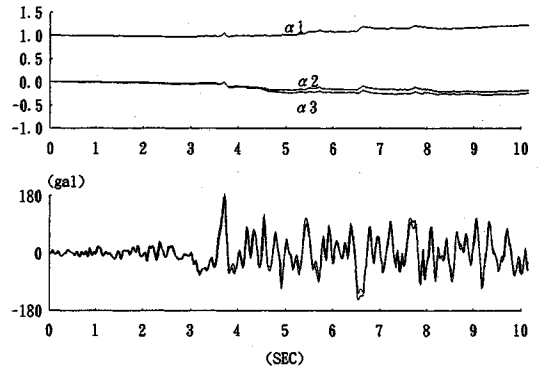


図-2 本手法による地震動の予測例 (TAFT-EW)

表-1 予測値と真値の差の自乗和

地震波名	データ 個数	時間刻み (SEC)	従来手法 (10°GAL <sup>2</sup> )	本手法 <sup>2</sup> (10°GAL <sup>2</sup> )
EL-CENTRO (NS)	2000	0.02	14.78	14.42
TAFT (EW)	2000	0.02	2.99	1.78
HACHINOHE (NS)	2000	0.01	1.55	0.57

ここに、 $D$  は観測位置を示す 1 と 0 からなる行列である。 $y(n+i)$  は式 (29) および式 (30) より、

$$y(n+i) = D\Phi^i X(n) + \sum_{j=0}^{i-1} D\Phi^{i-1-j} \Gamma f(n+j) \quad (31)$$

となる。ここで、可観測行列<sup>13)</sup>  $L$  は一般に次式となり

$$L = [D \ D\Phi \ \dots \ D\Phi^{s-1}]^T \quad (32)$$

$L$  は  $(s \times r) \times 2N$  の行列となる。ここに、 $N$  はシステムの自由度数、 $r$  は観測数である。従って、

$$s \times r = 2 \times N \quad (33)$$

を満たす整数  $s$  が存在したとき、行列  $L$  は正方行列となる。さらに、この逆行列が存在するときシステムは可観測となる。そこで、

$$Y(s) = [y(n) \ y(n+1) \ \dots \ y(n+s-1)]^T \quad (34)$$

$$F(s) = [f(n) \ f(n+1) \ \dots \ f(n+s-1)]^T \quad (35)$$

とおくと式 (29) および式 (30) より次式が得られる<sup>17), 18)</sup>

$$X(n+s) = \Phi^s X(n) + E F(s) \quad (36)$$

$$Y(s) = L X(n) + H F(s) \quad (37)$$

ここに、

$$E = [\Phi^{s-1} \Gamma \ \dots \ \Phi \Gamma \ \Gamma] \quad (38)$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D\Gamma & 0 & \dots & \vdots & 0 \\ D\Phi\Gamma & D\Gamma & \dots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & 0 & 0 \\ D\Phi^{s-2}\Gamma & D\Phi^{s-3}\Gamma & \dots & D\Gamma & 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

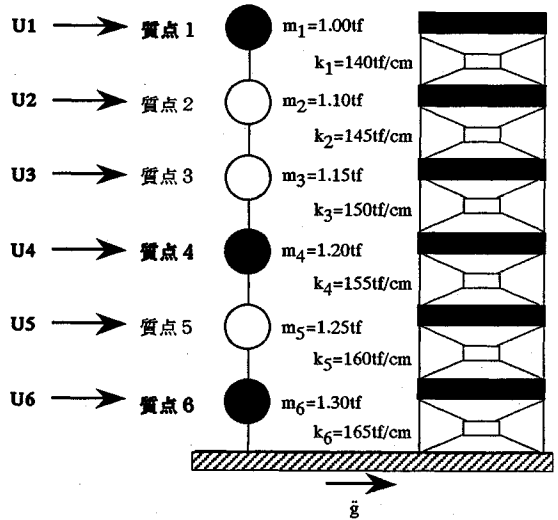


図-3 解析モデル

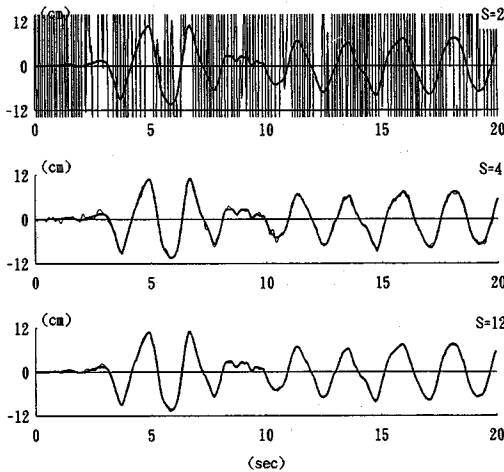
式 (37) を  $X(n)$  で解くと、次式となる。

$$X(n) = L^{-1} [Y(s) - H F(s)] \quad (40)$$

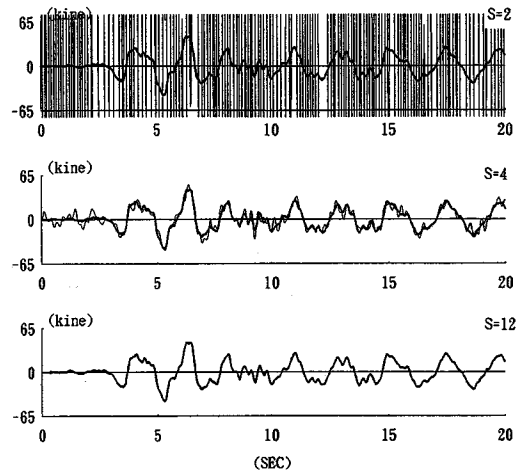
従って、式 (40) を式 (36) に代入することによって、次式を得る。

$$X(n+s) = \Phi^s L^{-1} Y(s) + [E - \Phi^s L^{-1} H] F(s) \quad (41)$$

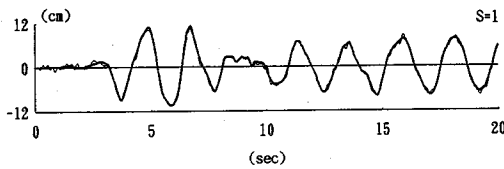
式 (41) を用いて現在  $(n+s-1)$  ステップの観測値を含めて過去  $s$  個の観測情報をもとに、1 ステップ将来  $(n+s)$  ステップの全状態量を予測することができる。しかし、観測数  $r$  と  $s$  の関係が式 (33) を満たすような整数  $s$  が存在しない場合には行列  $L$  が正方行列とはならず、 $L^{-1}$  が存在しない。また、式 (41) のままでは観測ノイズに対してなにも考慮されていない。そこで、ここでは  $s$  を大きく取り、次のように最小二乗法を適用して、式 (42) より行列  $A$  を算定し、この行列を用いて式 (43) から 1 ステップ将来の全状態量を予測することを提案する。



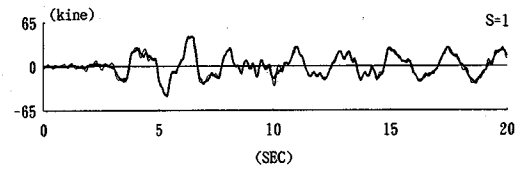
図—4 質点2の予測応答変位 (3点観測)



図—5 質点2の予測応答速度 (3点観測)



図—6 質点2の予測応答変位 (全点観測)



図—7 質点2の予測応答速度 (全点観測)

$$A = [L^T L]^{-1} L^T \quad (42)$$

$$X(n+s) = \Phi^s A Y(s) + [E - \Phi^s A H] F(s) \quad (43)$$

なお、式(43)において、マトリクス  $\Phi^s A$ 、および  $[E - \Phi^s A H]$  は定数マトリクスであり、事前に算定することが可能である。従って、カルマンフィルタのように、リアルタイムに逆行列の計算を行う必要がなく、計算時間の効率化がはかられる。

## (2) 解析例

ここでは、非観測点を含む全状態量の予測精度について考察する。解析モデルは図—3に示すような6自由度系 ( $N=6$ ) とする。減衰はレーリー減衰を仮定し、減衰定数は2%とした。入力地震加速度はTAFT-EW成分(時間刻み:0.02秒, データ数:ndata=1000)とし、制御力は作用させない。また、解析には各観測量とも  $\nu=0.1\%$  のノイズを真値に加えた。なお、観測ノイズは式(44)で示すようにノイズの無い真の各応答値の二乗和に対して定義し、ノイズはシステムの全固有振動数を網羅するように0.2~5.0(Hz)の周波数を持つ有帯域ホワイトノイズとした。

$$\nu = \frac{\sum_{n=0}^{n=ndata} V(n)^2}{\sum_{n=0}^{n=ndata} O(n)^2} \times 100 (\%) \quad (44)$$

ここに、

$V(n)$ : 有帯域ホワイトノイズ

$O(n)$ : ノイズがない真の観測量

観測点は質点1, 質点4および質点6の3点の変位および速度が観測されるものとした ( $r=6$ )。図—4および図—5には、ここで提案した手法により非観測点である質点2の状態量である応答変位および応答速度を予測した結果をその真の応答値と重ねて示してある。両図より、 $s=2$  ( $s=2N/r: r=6$ ) の場合、つまり観測ノイズに対してなにも考慮しない式(41)を用いた場合には、全く状態量を予測できないことがわかる。それに対し、式(43)を用いて  $s$  を増やして予測に用いる情報量を多くすることによって、観測ノイズの影響が除去されていくことがわかる。また、応答変位に比べ応答速度はノイズの影響を大きく受けることがわかる。

図—6および図—7には全状態量を観測した場合の質点2の予測状態量である応答変位および応答速度を真の応答値と重ねて示してある。この場合、 $s=1$  ( $s=2N/r: r=12$ ) とし、観測ノイズに対してはなにも考慮していない。両図より、全状態量を観測した場合でも式(33)を満たす  $s$  個の情報量だけではノイズの影響を大きく受けることがわかる。それに対し、本手法を適用することで、観測情報にノイズが存在する場合でも、一部の観測情報のみから全状態量を精度よく予測できることがわか

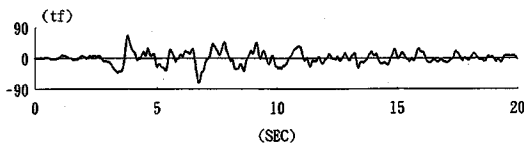


図-8 質点2のフィードバック制御力 (3点観測,  $s=12$ )

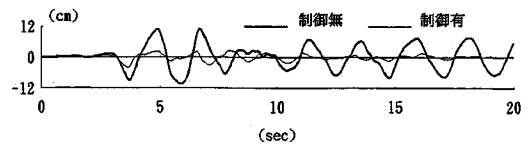


図-9 質点2の応答変位 (3点観測,  $s=12$ )

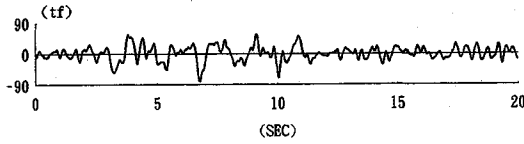


図-10 質点2のフィードバック制御力 (全点観測,  $s=1$ )

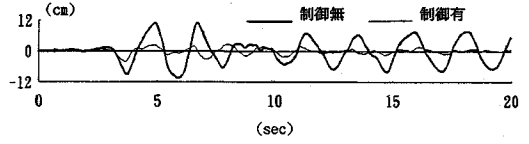


図-11 質点2の応答変位 (全点観測,  $s=1$ )

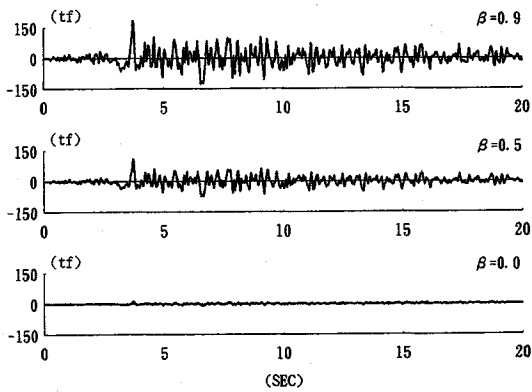


図-12 質点2のフィードフォワード制御力 (3点観測,  $s=12$ )

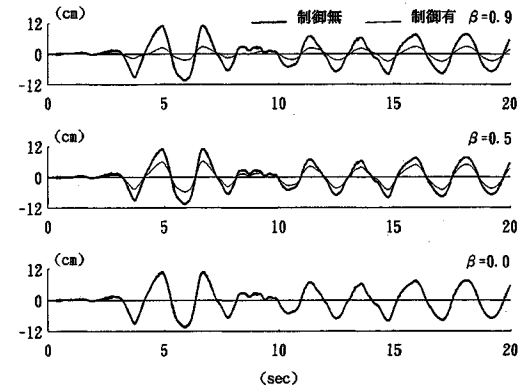


図-13 質点2の応答変位 (3点観測,  $s=12$ )

る。なお、本手法は現在の観測値も含め過去  $s$  個の情報を用いるが、こうした過去の情報は制御コントローラーのメモリー上に蓄えればよく、新たな観測値が得られるごとに更新するだけである。

## 5. 瞬間最適予測制御に関する数値解析例

4. で使用したモデルを用いて、ここでは ACTIVE-TENDON 方式の制御を考え、ここで提案した制御手法について、数値解析的に考察する。なお、制御力は全質点に作用させることができ、観測点および観測ノイズは 4. と同一条件とする。入力地震加速度は 2. と同様に TAFT-EW 成分 (時間刻み: 0.02 秒, データ数:  $n_{data}=1000$ ) とする。なお、評価関数中の重み行列  $R$  の対角成分  $r_{1-N}$  はここでは仮に全て同一とし、 $r=0.07$  とした。

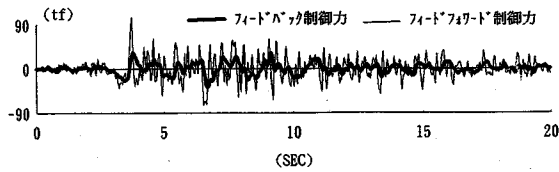
### (1) フィードバック制御

ここでは、4. で提案した手法により予測した状態量のみから制御を行うフィードバック制御について考察する。

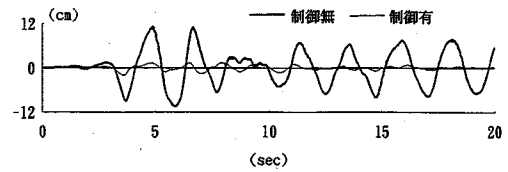
図-8 には 3 点観測の場合で、 $s=12$  とした場合の非観測点である質点 2 に作用する制御力をまた、図-9 には同点の応答変位を非制御の場合の応答変位とともに示してある。なお、全状態量を観測し、さらに観測ノイズの無い場合の制御力とそのときの応答変位、つまり理論値は同図と完全に一致した。一方、図-10 および図-11 には全状態量を観測し、 $s=1$  で観測値にノイズが存在する場合の制御力および応答変位を同様に示してある。応答変位に関してはあまり大きな違いはないが、制御力に関しては、全状態量を観測した場合でもノイズに対してなら考慮しない場合には図-8 に示した本来の制御力とは異なり、ノイズの影響による無駄な制御力が作用していることがわかる。

### (2) フィードフォワード制御

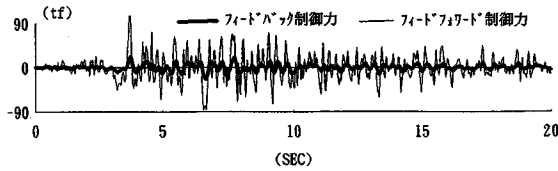
ここでは、3. で示した手法により予測した入力地震加速度に対し、制御を行うフィードフォワード制御について考察する。評価関数中の重み  $P$  を決める  $\beta$  に関しては、 $\beta=0.9, 0.5, 0.0$  の 3 種類を設定した。図-12 および図-13 には、それぞれの  $\beta$  に対して質点 2 に作用する制御力および同点の応答変位を非制御の場合と



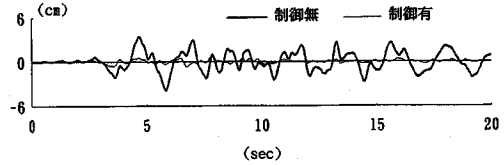
図—14 質点2のフィードバックおよびフィードフォワード制御力 (3点観測,  $s=12$ ,  $\beta=0.5$ )



図—16 質点2の応答変位 (3点観測,  $s=12$ ,  $\beta=0.5$ )



図—15 質点6のフィードバックおよびフィードフォワード制御力 (3点観測,  $s=12$ ,  $\beta=0.5$ )



図—17 質点6の応答変位 (3点観測,  $s=12$ ,  $\beta=0.5$ )

もに示してある。同図より、 $\beta$ の値が1.0に近づくに従って制御力は大きくなり、その応答値変位も非制御の場合より小さくなっていることがわかる。なお、当然ながら予測値が完全に真値と一致し、 $\beta=1.0$ の場合には完全な外乱相殺型の制御方式となり、応答値は常に0となる。一方、 $\beta$ が0.0の場合にはほとんど制御力は作用せず、応答変位も低減されないことがわかる。また、制御力は外乱である入力地震動と同じような動きをしており、応答値も非制御の場合とその波形形状は同様に振幅だけが低減していることがわかる。

### (3) フィードバック+フィードフォワード制御

図—14および図—15にはフィードバック+フィードフォワード制御を適用した場合の質点2および質点6の制御力をフィードフォワード制御力とフィードバック制御力に分け、それぞれを重ねて示してある。また、図—16および図—17にはそのときの応答変位を非制御時の応答変位とともにそれぞれ示してある。なお、ここでは $\beta=0.5$ とした。併用制御によって、フィードフォワード制御時に比べ、大きく応答変位が低減されていることがわかる。また、フィードバック制御のみの場合に比べ、フィードフォワード制御力が外乱である地震入力を低減するため、その分応答は低減している。また図—14からわかるように、フィードバック制御力は建物の固有周期に対応した周波数特性を持つものに対し、フィードフォワード制御力は入力である地震動の周波数特性に大きく影響されることがわかる。さらに、図—14および図—15から建物の下層ほどその応答量(状態量)が小さくなり、フィードバック制御力に対するフィードフォワード制御力の割合は下層ほどおおきくなっている。

## 6. まとめ

離散化された多自由度系システムに対し、フィードバック系とフィードフォワード系を分離して設計する瞬間最適予測制御則を提案した。さらに、入力地震動をリアルタイムに予測する手法および観測ノイズを含む一部の観測情報のみから全状態量を精度よく予測する手法を提案し、その有効性をACTIVE-TENDON制御機構を有するモデル構造物のシュミレーション解析により検証した。以下に本研究の成果をまとめる。

(1) 離散化された多自由度系システムに対し、離散型の最適レギュレータ理論と瞬間最適予測制御則それぞれから求まるフィードバックゲインの関係を明確にし、両制御則を併用した、フィードバック+フィードフォワード併用制御手法を提案した。

(2) 入力地震動を時変型のARモデルで表現し、各係数をカルマンフィルタで予測する手法に改良を加え、その特徴と有効性を数値解析的に検証した。

(3) システムの可観測行列を利用して、過去に観測されたノイズを含む一部の状態量をもとに、非観測点を含む全状態量をリアルタイムに精度よく予測する簡便な手法を提案し、その妥当性を数値解析的に検証した。

(4) フィードバック制御において、全状態量を観測した場合でも、観測ノイズに対して何ら考慮しない場合にはノイズの影響による無駄な制御力が作用するのに対し、本手法を適用すれば、一部の観測情報からでもノイズの影響を除去することができる。

(5) フィードバック+フィードフォワード併用制御において、フィードバック制御力は建物の固有周期に対応した周波数特性を有するのに対し、フィードフォワード制御力は入力地震動の周波数特性に大きく影響され

る。また、フィードバック制御力に対し、フィードフォワード制御力の割合は下層ほど大きくなる。

最後に、本研究は第二著者の指導のもとで、第一著者が行ったものである。

#### 参考文献

- 1) T. Kobori : Technology Development and Forecast of Dynamical Intelligent Building (D.I.B), *Intelligent Structures*, pp.42-59, Elsevier Applied Science, 1990.
- 2) 加藤寛一郎：最適制御入門，東京大学出版会，1987.
- 3) 西村秀和，吉田和夫，下郷太郎：多自由度系に対する最適アクティブ動吸振器(カルマンフィルタを用いたフィードフォワード併合制御)，日本機械学会論文集(C)，55巻，pp. 2321-2329, 1989.
- 4) J. N. Yang : Control of Tall Buildings Under Earthquake Excitation, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol.108, No.EMS, pp.833-849, Oct., 1982.
- 5) J. N. Yang, A. Akbarpour and P. Ghaemmaghami : New Optimal Control Algorithms for Structural Control, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol.113, No.9, pp.1369-1386, Sep., 1987.
- 6) T. SATO, K. TOKI and K. SUGIYAMA : Optimal Control of Seismic Response of Structure, *Proceedings of JSCE*, Vol.7, No.1, pp.179s-188s., Apr. 1990.
- 7) 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.
- 8) 星谷勝，丸山収：多変量一次元ARモデルの逐次同定法，土木学会論文集，第416号/I-13, pp. 349-355, 1990.
- 9) 佐藤忠信，土岐憲三，橋本雅道：作用時間遅れを考慮した構造物の震動制御，土木学会論文集，第428号/I-15, pp. 139-202, 1991.
- 10) 佐藤忠信，土岐憲三，橋本雅道：構造物の地震応答における自己学習機能を有する震動制御，土木学会論文集，第471号/I-24, pp. 115-124, 1993.
- 11) 野田茂：遅延時間を考慮した非線形構造物の地震応答の予測制御，アクティブ制震(振)シンポジウム論文集，pp. 17-24, 1992.
- 12) 斉藤芳人，星谷勝：構造物の同定・予測・制御に関する基礎的考察，土木学会論文集，第428号/I-15, pp. 139-202, 1994.
- 13) 富沢稔：実用動的耐震設計法，オーム社，1983.
- 14) 加藤寛一郎：工学的最適制御(非線形へのアプローチ)，東京大学出版会，1991.
- 15) 星谷勝，斉藤芳人，志井修彰：カルマンフィルタを用いた地震動のリアルタイム予測，第79回年次学術講演概要集，1994.
- 16) 小郷寛，美多勉：システム制御理論入門，実教出版株式会社，1985.
- 17) PI, Y. L. and Mickleborough, N. C. : Time Domain Modal Identification of a Linear Vibrating Structure, *UNICIV Report No.R-249, The University of New South Wales*, April 1988.
- 18) 丸山収，相沢旬，星谷勝：ARMAモデルによる既存構造物の動特性の同定，土木学会論文集，第416号/I-13, pp. 439-447, 1990.

(1994.4.18 受付)

## INSTANTANEOUS OPTIMAL PREDICTION CONTROL OF A MDOF SYSTEM BY USE OF TIME SERIES MODELS

Yoshihito SAITO and Masaru HOSHIYA

This paper proposes a prediction control rule based on an optimal control algorithm and an instantaneous optimal control algorithm. And to compensate the time delay of control force, prediction methods on the input earthquake motion and the responses of a multi-degrees of freedom system (MDOF) is developed. Especially, in case of the MDOF, all responses can not be observed in general. So, using only a few points' observed information which includes the observation noise, all responses can be predicted accurately with this proposed method. And simulation analyses are demonstrated to show the usefulness and the characteristics of this method for the model system which are installed with active-tendon devices.