

強制振動外力による構造物の物理特性値の同定

IDENTIFICATION OF PHYSICAL PARAMETERS OF STRUCTURE BY EXCITATION FORCE

斉藤 芳人*、星谷 勝**

Yoshihito SAITO and Masaru HOSHIYA

* 武蔵工業大学客員研究員 (株)前田建設工業技術研究所(〒179 東京都練馬区旭町1-39-16)

** Ph. D. 武蔵工業大学教授 土木工学科(〒158 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

In order to identify the physical parameters including the unknown masses of the structural system, a method using the control force excited by an actuator which is installed on the system is proposed. And a numerical example is demonstrated to show the efficiency of the proposed method where a linear MDOF shear beam with an actuator on the top of floor is taken up as an example structure. As the result, even if all points of the system can not be observed, the proposed method can identify the all physical parameters accurately. Furthermore, it is clarified that the velocity observations are more useful information in the identification than the displacement observations.

Key Words: physical parameter, identification, Kalman-filter, MDOF system

1. まえがき

一般に、構造物の地震観測や常時微動観測によって得られた時系列データからその動特性を推定する場合、観測された時系列データを周波数領域に変換して伝達関数を求め、その形状から動特性を推定するスペクトル解析法が用いられている。しかし、その周波数応答関数の形状が複雑で動特性を推定しにくい場合、一般にはこれにスムージングを施してからその動特性を推定している。従って、高次の固有振動数や特に減衰の推定は困難である¹⁾。こうした周波数領域での解析法に対し、時間領域での解析法として、第二著者らはモード特性を直接未知パラメータとして線形多自由度系の動特性を推定する手法を提案し²⁾³⁾、常時微動観測記録を用いて鉄筋コンクリート4階建構造物の動特性を推定している⁴⁾。また、多変量ARMAモデルにより構造系の運動方程式を表現し、その係数を同定することで、その係数とシステムの関係式を用いて間接的に動特性を推定する手法があり、土岐・佐藤・生木ら⁵⁾はこのARMAモデルの係数同定にバッチ処理である2段階最小二乗法⁶⁾を用いている。また、第二著者らはカルマンフィルタによる逐次型処理法を用いてARMA係数をシーケンシャルに処理して同定している⁶⁾。

こうした動特性の同定手法では全て地震動や微動などの加速度を入力として用いており、同定結果から得られる動特性の推定値はあくまでシステムのモード特性(固

有振動数や減衰定数)であり、これから質量や剛性といった物理特性値を推定するためには、任意1質点の質量が既知である必要がある。しかし、実際の構造物における質量は必ずしも正確に算定されているとは限らない。

ところで近年、土木・建築技術の発達にともない地震時や強風時における安全性・居住性の向上を目的とした構造物の振動制御に関する研究が活発に行われており、実大規模の建物も建設されるようになってきている⁷⁾。こうした振動制御問題を扱う場合には、まず対象となるシステムの動特性を十分に把握し、モデル化することが必要である。そこで、制振建物の制振装置を利用した強制振動試験や自由振動試験の結果から、対象システムの動特性の推定が行われているが、一般には前述と同様にモード特性の推定しか行われておらず、物理特性値そのものを同定することは行われていない。しかし、制御ゲインの設定やシステム全体のエネルギーを考える場合には、その質量を精度良く把握しておく必要がある⁸⁾。

そこで著者らは構造系をARMAモデルで表現し、制振装置の制御力を入力として各係数を同定することで物理特性値を間接的に推定する手法を示した⁹⁾。その場合システムの支配方程式は容易な形で表現できるが、同定すべき未知パラメータの数が物理特性値を直接同定する場合に比べて多くなるという欠点があった。

本研究では、こうした制振装置を利用した起振力を入力として物理特性値を直接同定する手法を提案し、その

有用性と未知パラメータの同定精度について数値解析的に検討する。

2. 拡張カルマンフィルタによる物理特性値の同定手法の定式化

拡張カルマンフィルタ^{9), 10), 11)}による構造物の動特性の同定では、対象システム中の推定しようとするパラメータと運動方程式を組み込んだ状態方程式と観測方程式を設定する必要がある。

多自由度系 (N 自由度) の最上部質点に、外力 (起振力) が作用する場合の運動方程式は式 (1) で表せる。

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = f \quad (1)$$

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 : 各質点の地盤に対する相対変位からなるベクトル

f : 最上階質点に作用する起振力 (f₁) 以外は全て 0 のベクトル

ただし、ここでは実用性を考慮して、減衰マトリクス C は次式のようなレーリー減衰を仮定する¹²⁾。

$$C = a_1 M + a_2 K \quad (2)$$

ここに、

$$a_1 = \frac{2\omega_1\omega_2(h_1\omega_2 - h_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (3)$$

$$a_2 = \frac{2(h_2\omega_2 - h_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (4)$$

h_i : i 次モード減衰

ω_i : i 次固有円振動数

ここで、各質点の応答変位および応答速度を

$$Z_1 = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]^T \\ = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_N]^T \quad (5)$$

$$Z_2 = [\dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \ \dots \ \dot{x}_N]^T \\ = [z_{N+1} \ z_{N+2} \ \dots \ z_{2N}]^T \quad (6)$$

また、構造物の未知パラメータを

$$Z_3 = \left[\frac{k_1}{m_1} \ \frac{k_1}{m_2} \ \frac{k_2}{m_2} \ \dots \ \frac{k_{N-1}}{m_N} \ \frac{k_N}{m_N} \right]^T \quad (7)$$

$$= [z_{2N+1} \ z_{2N+2} \ \dots \ z_{4N-1}]^T$$

$$Z_4 = [a_1 \ a_2]^T = [z_{4N} \ z_{4N+1}]^T \quad (8)$$

$$Z_5 = \left[\frac{1}{m_1} \right] = [z_{4N+2}] \quad (9)$$

ここに、

m₁ : 起振力の作用する最上階の質点質量

と状態空間表示すると、式 (1) は次のような状態方程式として表現することができる。

$$\frac{dZ}{dt} = \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \\ \dot{z}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_2 \\ -M^{-1}CX - M^{-1}KX + M^{-1}f \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_Z \quad (10)$$

ただし、式 (10) において右辺第 2 要素の [] z は [] の中を状態量 Z の要素および最上階に作用する起振力 f₁ で表現したことを示し、APPENDIX (I) に具体的な表現で示してある。また、拡張カルマンフィルタのアルゴリズムに適用する際の式 (10) に対する遷移行列は APPENDIX (II) に示してある。

観測方程式は Z₁ (応答変位) 及び Z₂ (応答速度) の一部あるいは全てが観測される (r 観測点) として、次式で表現できる。

$$Y = UZ + V \quad (11)$$

ここに、U は 0 と 1 からなり、観測位置を示す [r * (4N + 2)] の行列である。また、V は観測ノイズ (ホワイトノイズ) を示す。

以上より、最上階に起振力を作用させ、その応答値を観測することで、式 (10) および式 (11) の状態方程式および観測方程式が設定され、これに対し拡張カルマンフィルタのアルゴリズムを適用することで、未知パラメータ (物理特性値) を同定することができる。なお、本研究では、拡張カルマンフィルタのアルゴリズムに重み付きグローバルな繰返しを併用した EK-WGI 法^{1), 2), 3)}を用いる。

本手法の特徴は、システム (構造物) への入力として微動や地震動などの加速度値ではなく、制振装置を利用した起振力を作用させることで、起振力の作用する質点 (ここでは最上階質点) の質量 (1 / m₁) が同定されることにある。つまり、これを Z₅ (式 (7)) の同定結果に代入することで、順次 k₁ ~ k_N および m₂ ~ m_N が求まり、最終的に物理特性行列 M、K および C を算定することができる。

3. 数値解析

3.1 解析モデル

解析モデルは図-1 に示すような諸元からなる 6 自由度系モデルとする。図中の黒く塗りつぶした質点は、後に示す一部の質点位置でしか観測されない場合の観測質点位置を示す。減衰は 1 次および 2 次のモード減衰とともに 2 % とし、レーリー減衰を仮定する。また、起振入力は、事前に対象構造物の各固有振動数は分からないが、それらを網羅する周波数帯域 (ここでは 0.2 ~ 5.0 Hz) がある程度特定できる場合を想定し、全固有周波数を含む有帯域のホワイトノイズとする。このとき時間刻みは 0.02 秒、データ個数は 2500 個 (継続時間 50 秒) とし、図-2 に起振入力波形 (25 秒間) をまた、図-3 および図-4 には質点 1 の真の応答変位波形

とそれに10%のノイズを付加した同変位波形を示してある。

なお、拡張カルマンフィルタのアルゴリズムに必要な任意の初期条件（初期状態量； Z_0 及び初期誤差共分散； P_0 ）は、表-1に示す値を用いる。ただし、 P_0 は対角要素のみ表中の値を用い、その他の要素はゼロとする。また、各グローバルな繰り返し時の重みは、1000とし、状態方程式に付加するノイズの分散値 $Q(i)$ および観測方程式に付加するノイズの分散値 $R(i)$ は対角成分のみからなりそれぞれ0.0、0.0、0.1とする。また、観測にともなうノイズの大きさは、観測波形と正規性のノイズに対する標準偏差の比率で表し、1%、5%、10%の場合について検討する。

表-1 状態量及び誤差共分散の初期値

状態量	k_1/m_1	k_1/m_2	k_2/m_2	k_2/m_3	k_3/m_3	k_3/m_4	k_4/m_4
Z_0 (真値)	200 (140)	200 (127)	200 (132)	200 (126)	200 (130)	200 (125)	200 (129)
P_0	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
状態量	k_4/m_5	k_5/m_5	k_5/m_6	k_6/m_6	a_1	a_2	$1/m_1$
Z_0 (真値)	200 (124)	200 (128)	200 (123)	200 (127)	0.06 (0.0425)	0.003 (0.00182)	1.5 (1.0)
P_0	1000	1000	1000	1000	1.0	1.0	1.0

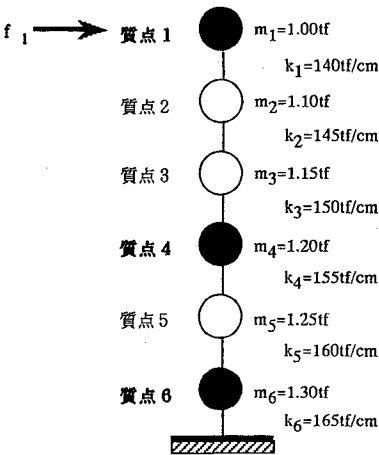


図-1 解析モデル

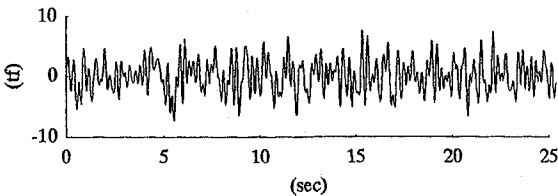


図-2 起振入力波形

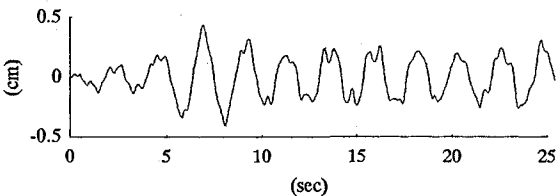


図-3、質点1の応答変位波形（ノイズ0%）

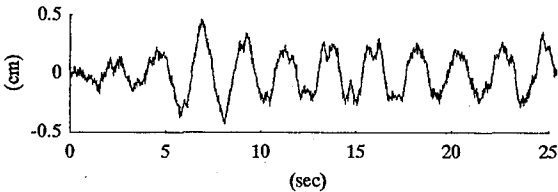


図-4 質点1の応答変位波形（ノイズ10%）

3.2 全質点位置で観測可能な場合

ここでは、全質点位置で応答変位または応答速度が観測できる場合を想定し、次の3ケースについて考察する。

(A1) 全質点で応答変位および応答速度が全て観測される場合

(A2) 全質点の応答速度のみが観測される場合

(A3) 全質点の応答変位のみが観測される場合

表-2には、上の各ケースについてグローバルな繰り返しにおいて最終的に同定された状態量から各物理特性値を計算し、それらの真値に対する比を示してある。同表中の $\hat{}$ は同定された推定値を示している。また、図-5～図-7にはノイズが10%の場合の、各グローバルな繰り返しにおいて同定された状態量から各質点の質量（ $m_1\sim m_6$ ）を求め、それらの真値に対する比の推移を示してある。同図より、全質点の応答変位および応答速度が全て観測される場合には、10%のノイズに対しても1回の繰り返しで、真値に収束し、精度の良い安定した同定結果となっている。また、全質点の速度のみが観測される場合にも、収束に要するグローバルな繰り返し回数は増すが、精度の良い安定した同定結果が得られる。それに対し、全質点の応答変位のみしか観測されない場合には真値には収束していないことが分かる。ただし、表-2から分かるように、この場合でも観測ノイズが小さくなるに従って、精度の良い同定結果が得られている。観測量に、応答変位よりも応答速度を用いた場合の方が同定精度が良いのは、APPENDIX (II)に示した遷移行列において、応答速度（ $Z_{N+1}\sim Z_{2N}$ ）が同定しようとしている状態量全てに関わっているのに対し、応答変位（ $Z_1\sim Z_N$ ）は減衰に関わる項（ Z_{4N} ， Z_{4N+1} ）には無関係であるためと考えられる。

3.3 一部の質点位置でしか観測できない場合

ここでは、一部の質点位置の応答変位または応答速度しか観測できない場合として、質点1、質点4および質点6において観測される場合を想定し、次の3ケースについて考察する。

(B1) 3質点で応答変位および応答速度が観測される場合

(B2) 3質点の応答速度のみが観測される場合

(B3) 3質点の応答変位のみが観測される場合

なお、実構造物への適用にあたって、一部の観測質点位置を選定する場合には、事前情報（設計時の解析モデ

表-2 物理特性値の推定結果（全質点で観測）

観測位置	全質点観測								
	速度・変位			速度			変位		
ノイズ	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
$\hat{m}_1/m_1$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.79
$\hat{m}_2/m_2$	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.36
$\hat{m}_3/m_3$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.82
$\hat{m}_4/m_4$	1.00	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99	1.00	1.01	1.12
$\hat{m}_5/m_5$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97
$\hat{m}_6/m_6$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.05
$\hat{k}_1/k_1$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	0.80
$\hat{k}_2/k_2$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01
$\hat{k}_3/k_3$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.04
$\hat{k}_4/k_4$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.98
$\hat{k}_5/k_5$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.01	1.05
$\hat{k}_6/k_6$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01
$\hat{a}_1/a_1$	1.00	1.01	1.02	1.00	1.01	1.03	1.00	1.00	0.98
$\hat{a}_2/a_2$	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	1.23

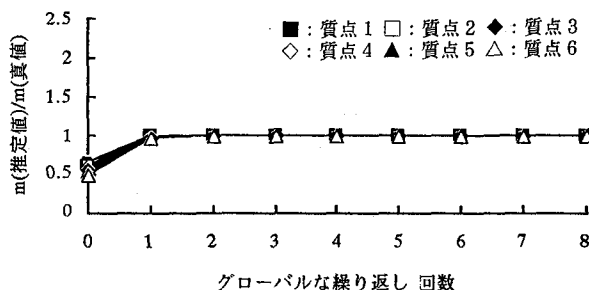


図-5 全質点観測（応答変位、応答速度）（10%ノイズ）

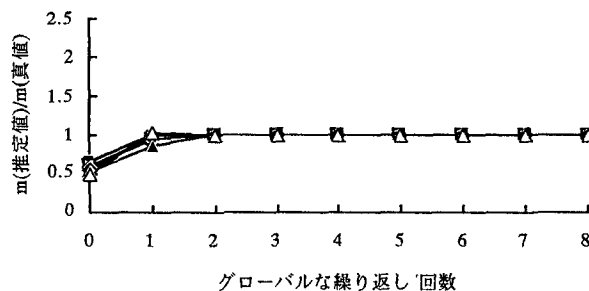


図-6 全質点観測（応答速度）（10%ノイズ）

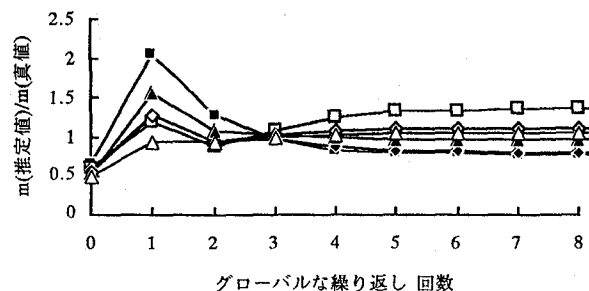


図-7 全質点観測（応答変位）（10%ノイズ）

表-3 物理特性値の推定結果（3質点で観測）

観測位置	3質点観測								
	速度・変位			速度			変位		
ノイズ	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
$\hat{m}_1/m_1$	0.99	0.99	1.02	1.00	1.01	1.04	0.93	1.26	-
$\hat{m}_2/m_2$	1.00	1.01	0.99	1.00	1.00	0.96	1.52	0.73	-
$\hat{m}_3/m_3$	1.00	0.99	0.97	1.00	0.99	0.97	1.22	1.37	-
$\hat{m}_4/m_4$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.82	0.99	-
$\hat{m}_5/m_5$	1.00	0.99	0.99	1.00	0.99	0.98	0.36	0.32	-
$\hat{m}_6/m_6$	1.00	1.00	0.98	1.00	1.00	0.99	1.23	1.31	-
$\hat{k}_1/k_1$	1.00	0.99	0.98	1.00	0.99	0.98	0.79	1.16	-
$\hat{k}_2/k_2$	1.00	0.99	1.01	1.00	1.00	1.03	0.66	0.75	-
$\hat{k}_3/k_3$	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	2.76	1.44	-
$\hat{k}_4/k_4$	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	1.35	2.34	-
$\hat{k}_5/k_5$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.92	0.67	-
$\hat{k}_6/k_6$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	-
$\hat{a}_1/a_1$	0.99	1.02	1.05	1.00	1.01	1.02	0.81	0.56	-
$\hat{a}_2/a_2$	1.02	0.99	0.95	1.00	1.02	1.07	1.50	2.10	-

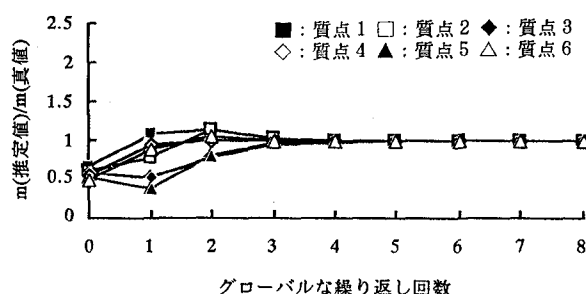


図-8 3質点観測（応答変位、応答速度）（5%ノイズ）

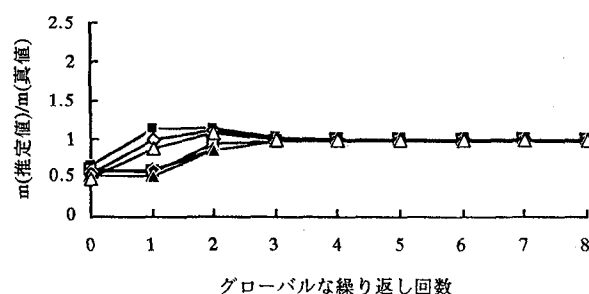


図-9 3質点観測（応答速度）（5%ノイズ）

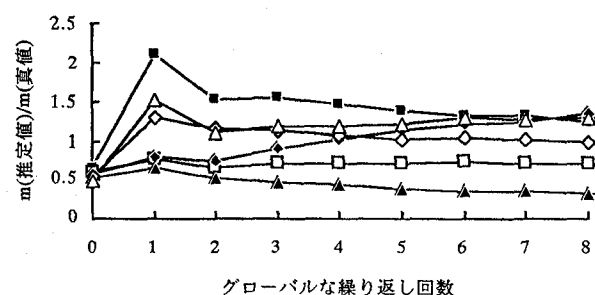


図-10 3質点観測（応答変位）（5%ノイズ）

ルによるモード解析結果など)をもとに、なるべく観測質点位置が各モードの節にならないように決定すべきであることはいうまでもない。

表-3には、上の各ケースについてグローバルな繰返しにおいて、最終的に同定された状態量から各物理特性値を計算し、それらの真値に対する比を示してある。同表中の $\hat{\cdot}$ は同定された推定値を示し、また $-$ は、解が発散したり、安定した解が得られなかったことを示している。また、図-8~図-10にはノイズが5%の場合の、各グローバルな繰返しにおいて同定された状態量から、各質点の質量($m_1 \sim m_6$)を求め、それらの真値に対する比の推移を示してある。同図より、一部の観測質点位置のみの情報からでも、変位と速度または速度のみが観測される場合には、収束に要するグローバルな繰返し回数は全質点観測の場合に比べ多くなるものの、精度の良い同定結果が得られることが分かる。一方、応答変位のみの観測情報からでは全く収束しないことがわかる。表-3からも、この場合にはノイズが1%の場合にも収束していないことがわかる。

図-11および図-12には、ノイズが10%の場合の、応答変位と応答速度が観測される場合および応答速度のみが観測される場合の収束状況を示している。両図とも、5%ノイズの場合に比べ、収束に要する繰返し回数は増加しているが、精度の良い同定結果が得られている。

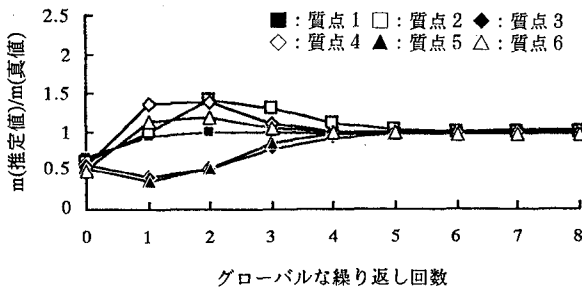


図-11 3質点観測(応答変位、応答速度)(10%ノイズ)

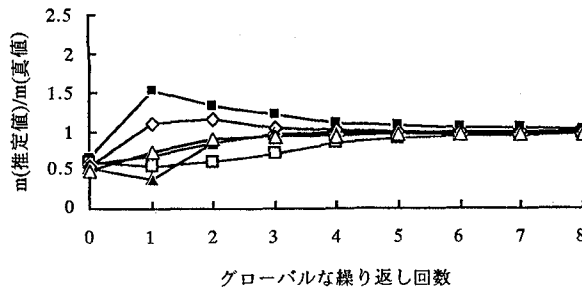


図-12 3質点観測(応答速度)(10%ノイズ)

4. 結論

制振装置を利用することで、強制振動外力を入力とする構造物の物理特性値の同定手法を提案し、その有用性と観測質点数および観測情報の種類(応答速度または応答変位)による各パラメータの同定精度について数値解析的に考察した。

以下に本研究の成果をまとめる。

- (1) 制振装置を利用した強制振動外力を入力として本手法を適用することで、制御力の作用する質点の質量が同定され、順次全物理特性値が同定される。従って、必要に応じていつでも構造物の物理特性値を推定することができ、対象構造物の診断や制御に必要なモデル化が可能となる。
- (2) 構造物の全質点で観測可能な場合には、観測量にノイズが含まれていても良い精度で同定することができる。ただし、応答変位のみの観測ではノイズの影響を大きく受け、同定精度は低下していく。
- (3) 一部の質点でしか観測できない場合でも、グローバルな繰返し回数は増すものの、良い精度で同定することができる。ただし、応答変位のみの観測では、ノイズのほとんど無い場合に対しても同定することはできない。

今後は、実構造物の強制振動試験データを用いて、本手法を適用していく予定である。

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。なお、本論文中的数値計算にあたっては、武蔵工業大学大学院生・林 継恩、瀧本 幸さんの協力を得ている。

APPENDIX (I) 式(10)中の $\dot{Z}_2$ の状態変数による表現

$$\dot{Z}_2 = [-M^{-1}C\dot{X} - M^{-1}KX + M^{-1}f]_Z$$

$$= \begin{bmatrix} -(z_{4N} + z_{4N+1}z_{2N+1})z_{N+1} + z_{4N+1}z_{2N+1}z_{N+2} - z_{2N+1}z_1 + z_{2N+1}z_2 + z_{4N+2}f_1 \\ z_{4N+1}z_{2N+2}z_{N+1} - [z_{4N} + z_{4N+1}(z_{2N+2} + z_{2N+3})]z_{N+2} + z_{4N+1}z_{2N+3}z_{N+3} + z_{2N+2}z_1 - (z_{2N+2} + z_{2N+3})z_2 + z_{2N+3}z_3 \\ z_{4N+1}z_{2N+4}z_{N+2} - [z_{4N} + z_{4N+1}(z_{2N+4} + z_{2N+5})]z_{N+3} + z_{4N+1}z_{2N+5}z_{N+4} + z_{2N+4}z_2 - (z_{2N+4} + z_{2N+5})z_3 + z_{2N+5}z_4 \\ \vdots \\ z_{4N+1}z_{4N-4}z_{2N-2} - [z_{4N} + z_{4N+1}(z_{4N-4} + z_{4N-3})]z_{2N-1} + z_{4N+1}z_{4N-3}z_{2N} + z_{4N-4}z_{2N-2} - (z_{4N-4} + z_{4N-3})z_{N-1} + z_{4N-3}z_N \\ z_{4N+1}z_{4N-2}z_{2N-1} - [z_{4N} + z_{4N+1}(z_{4N-2} + z_{4N-1})]z_{2N} + z_{4N-2}z_{2N-1} - (z_{4N-2} + z_{4N-1})z_N \end{bmatrix}$$

APPENDIX (II) 式(10)に対する遷移行列

$$\Phi = \begin{bmatrix} I & \phi_{12} & O & O & O \\ \phi_{21} & \phi_{22} + I & \phi_{23} & \phi_{24} & \phi_{25} \\ O & O & I & O & O \\ O & O & O & I & O \\ O & O & O & O & I \end{bmatrix}$$

ここに、

$$\phi_{12}[N^*N] = \begin{bmatrix} \Delta & O \\ O & \Delta \end{bmatrix}$$

$$\phi_{21}[N^*N] = \Delta \begin{bmatrix} -z_{2N+1} & z_{2N+1} & & & O \\ z_{2N+2} & -z_{2N+2} - z_{2N+3} & z_{2N+3} & & \\ & z_{2N+4} & -z_{2N+4} - z_{2N+5} & z_{2N+5} & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & z_{4N-4} & -z_{4N-4} - z_{4N-3} & z_{4N-3} \\ O & & & & z_{4N-2} & -z_{4N-2} - z_{4N-1} \end{bmatrix}$$

$$\phi_{22}[N^*N] = \Delta \begin{bmatrix} -z_{4N} - z_{4N+1}z_{2N+1} & z_{4N+1}z_{2N+1} & & & O \\ z_{4N+1}z_{2N+2} & -z_{4N} - z_{4N+1}(z_{2N+2} + z_{2N+3}) & z_{4N+1}z_{2N+3} & & \\ & z_{4N+1}z_{2N+4} & -z_{4N} - z_{4N+1}(z_{2N+4} + z_{2N+5}) & z_{4N+1}z_{2N+5} & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & z_{4N+1}z_{4N-4} & -z_{4N} - z_{4N+1}(z_{4N-4} + z_{4N-3}) & z_{4N+1}z_{4N-3} \\ O & & & & z_{4N+1}z_{4N-2} & -z_{4N} - z_{4N+1}(z_{4N-2} + z_{4N-1}) \end{bmatrix}$$

$$\phi_{23}[N^*(2N-1)] = \Delta \begin{bmatrix} z_{4N+1}(z_{N+2} - z_{N+1}) - z_1 + z_2 & & & & O \\ & z_{4N+1}(z_{N+1} - z_{N+2}) + z_1 - z_2 & z_{4N+1}(z_{N+3} - z_{N+2}) - z_2 + z_3 & & \\ & & & z_{4N+1}(z_{N+2} - z_{N+3}) + z_2 - z_3 & z_{4N+1}(z_{N+4} - z_{N+3}) - z_3 + z_4 \\ & & & \ddots & \vdots \\ & & z_{4N+1}(z_{2N-2} - z_{2N-1}) + z_{N-2} - z_{N-1} & z_{4N+1}(z_{2N-1} - z_{2N-2}) - z_{N-1} + z_N & \\ O & & & & z_{4N+1}(z_{2N-1} - z_{2N}) + z_{N-1} - z_N & -z_{4N+1}z_{2N} - z_N \end{bmatrix}$$

$$\phi_{24}[N^*2] = \Delta \begin{bmatrix} -z_{N+1} & -z_{2N+1}z_{N+1} + z_{2N+1}z_{N+2} \\ -z_{N+2} & z_{2N+2}z_{N+1} - (z_{2N+2} + z_{2N+3})z_{N+2} + z_{2N+3}z_{N+3} \\ -z_{N+3} & z_{2N+4}z_{N+2} - (z_{2N+4} + z_{2N+5})z_{N+3} + z_{2N+5}z_{N+4} \\ \vdots & \vdots \\ -z_{2N-1} & z_{4N-4}z_{2N-2} - (z_{4N-4} + z_{4N-3})z_{2N-1} + z_{4N-3}z_{2N} \\ -z_{2N} & z_{4N-2}z_{2N-1} - (z_{4N-2} + z_{4N-1})z_{2N} \end{bmatrix}$$

$$\phi_{25}[N^*1] = \Delta \begin{bmatrix} f_1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

参考文献

- 1) 星谷勝、斉藤悦郎：常時微動記録を用いたE K - W G I 法による建物の動特性の推定、土木学会論文集、第350号 / I -2、PP.263~270、1984年10月
- 2) 星谷勝、斉藤悦郎：拡張カルマンフィルタを用いた同定問題の各種振動系への応用、土木学会論文集、第339号、pp.59~67、1983年11月
- 3) 星谷勝、斉藤悦郎：線形多自由度系の動特性の推定、土木学会論文集、第344号 / I -1、PP.289~298、1984年4月
- 4) 土岐、佐藤、生木：自己回帰、移動平均法による構造物の動的パラメータの推定、京都防災研年報、第21号B-2、PP.1~12、1978年
- 5) 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.
- 6) 丸山収、相沢旬、星谷勝：A R M A 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年4月
- 7) T.Kobori: Technology Development and Forcast of Dynamical Intelligent Building (D.I.B), Intelligent Structures, pp.42-59, Elsevier Applied Science, 1990.
- 8) 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489号 / I -27、pp.91~100、1994年4月
- 9) 有本卓：カルマンフィルタ、産業図書、1979年
- 10) 片山徹：応用カルマンフィルタ、朝倉書店、1983.
- 11) 星谷勝、斉藤悦郎：建設技術者のためのデータ解析と応用（カルマンフィルタを中心として）、鹿島出版、1991年
- 12) 林継恩、星谷勝、斉藤芳人：“力”を入力とする構造物の動特性の同定、土木学会第49回年次学術講演会、I -624、1994年

(1994年09月14日受付)