

可搬型振動計測システムによる構造物 の振動特性推定

岡林隆敏¹・山森和博²・田丸康広³・吉村 徹⁴

¹正会員 工博 長崎大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒852 長崎市文教町1番14号)

²学生員 長崎大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (〒852 長崎市文教町1番14号)

³正会員 下関市役所市街地開発課 (〒750 下関市唐戸町4番1号)

⁴正会員 工修 オリエンタル建設(株)工務部 (〒810 福岡市中央区天神4丁目2番31号)

土木構造物の振動計測は、構造物の維持・管理のために利用されつつある。本論文では、振動計測現場において、高い精度での構造同定を可能にするために、構造物の振動特性の推定法を示し、かつ、仮想計測器ソフトウェアを用いた軽量で可搬型の計測システムの改善を行った。

多自由度系の構造同定の手法として、まず、バンドパスフィルタにより多自由度系を1自由度系に還元する処理を行い、次に、1自由度系の衝撃応答関数を非線形最小二乗法で曲線適合させる方法を提案した。5自由度系模型の数値シミュレーションデータと実測データから、本システムによる高精度の振動特性推定が可能であることを確認した。さらに、同時多点観測データから、実時間振動モードをモニターする手法を示した。

Key Words: vibration, structural identification, modal testing, virtual instrument, personal computer, vibration experiment

1. はじめに

土木構造物の中でも、橋梁は様々な目的のために振動計測が行われる。すなわち、振動特性確認のための試験^{1),2)}、減衰特性を把握するための試験³⁾、振動制御のための構造同定、交通荷重による振動測定、健全度評価への応用^{4),5)}、斜張橋ケーブルの張力管理⁶⁾などがある。特に近年、長大橋の振動制御、高速道路高架橋の振動、振動情報によるモニタリングなど、高い精度の振動計測の必要性が高まっている。

振動計測は歴史的に古く、様々な技術が蓄積されてきた。振動計測の技術革新は、FFTによる信号処理の普及とパソコンコンピュータの導入^{1),2)}により始まったと云える。その後、機械構造物の振動計測を中心に、モード解析法による構造同定理論^{8),9),10),11),12)}が飛躍的な進歩を遂げ、様々な手法が開発されて、高い精度の振動特性の推定が可能になった。しかし、より推定精度の高い手法を適用するためには、依然として実測データを持ち帰り処理する、オフラインの処理が必要である。一方、構造同定理論の視点から、拡張カルマシンフィルタ^{13),14)}やニューラルネットワーク¹⁵⁾を適用した研究が行われているが、橋梁の計測現場で適用でき

るまで高精度な推定が可能な状況はない。第1著者は、モード解析法による1自由度および多自由度推定法の誤差の評価を行い、供用中の高速道路の動特性推定の可能性^{10),11),12)}を示した。また、固有振動数の変化から損傷度を推定する実橋試験を行った。この10年間、特にパーソナルコンピュータの発達は目覚しく、計測現場において精度の高い構造同定が可能になってきた。近年、健全度評価のための橋梁振動計測、歩道橋などの小規模な橋梁、斜張橋のケーブル張力管理などでは、小規模な計測装置を用いて計測現場で高い精度の振動特性の推定値を得るための技術が必要になっている。

本研究では、現場計測において精度の高い構造同定を行うために、計測システムの改善と構造同定理論の提案を行ったものである。そこで、構造同定理論については、計測現場で、実時間で信頼性の高い高精度な構造同定を可能にするために、従来の確定している手法を採用した。しかし、現在のパーソナルコンピュータの高速演算能力を実現させるために、これらの理論を高速ディジタル処理可能な形式に組み替える工夫を行った。このような研究が可能になった背景には、振動計測における、A/D変換、データ処理、各種フィルタ処理、構造同定の一連の処理を実現するためのプロ

グラム開発環境が飛躍的に向上する仮想計測器ソフトウェアと呼ばれる一連のプログラムの開発^{16,17,18,19)}がある。

本論文で提案した手法では、多自由度系構造物の同定を2段階に分けて考える。第1の段階では、多自由度系の振動を1自由度系振動に還元するバンドパスフィルタの処理^{20,21)}を行う。このような方法として、フーリエ変換したデータを周波数領域で処理するフーリエ変換法と、フィルタ処理を実時間で実行させるためのデジタルフィルタによるデジタルフィルタ法を示した。第2段階の構造同定の部分では、1自由度系の衝撃応答関数を実測データに非線形最小二乗法で曲線適合^{22,23)}させる方法を採用した。

本研究では、これらの処理をデータ処理と計測に特化した仮想計測器ソフトウェアを用いてプログラミングし、視覚的な画面構成と高速な振動特性推定を実現した。このような手法により、数値シミュレーションデータと実測結果に基づいて5自由度系構造物の振動特性である、固有振動数、減衰定数および振動モードの推定の有効性を検討した。さらに、多点同時観測データにバンドパスフィルタを作用させて、振動モードの実時間モニターを実行する手法を示し、その有効性を検討した。

2. 構造物の振動の表現と構造同定のモデル

(1) 多自由度系の振動

ここでは、モード解析による多自由度系振動データから各次振動データへ変換するための手順と、1自由度系振動特性推定の基礎となる衝撃加振による応答の概要について述べる。

図-1のようないn自由度系の運動方程式は、次式で与えられる。

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (1)$$

各質点の変位の座標を $x(t)$ とする。 $f(t)$ は n 次元の外力ベクトルである。 m, c および k は、 $(n \times n)$ 行列であり、それぞれ、質量行列、減衰係数行列および剛性行列である。

振動モード行列 Φ を振動モード ϕ_k より構成される

$$\Phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \cdots \ \phi_n] \quad (2)$$

で定義する。ここで、 Φ は $(n \times n)$ 行列である。さらに振動モードを

$$\Phi^T m \Phi = I \quad (3)$$

となるように規準化する。この Φ を用いると、 c, k は、

$$\Phi^T c \Phi = [2h_k \omega_k], \Phi^T k \Phi = [\omega_k^2] \quad (4)$$

のように対角化できる。ここに、 ω_k と h_k は、それぞれ k 次の固有振動数と減衰定数である。

そこで、 ℓ 点の変位応答 $x_\ell(t)$ は、基準座標 $q_i(t)$ ($i = 1, \dots, n$) を用いて、次のように表すことができる。

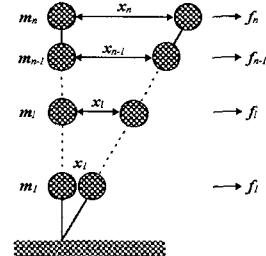


図-1 n 自由度系の振動

$$\ddot{q}_k(t) + 2h_k\omega_k\dot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = \phi_k^T f(t) \quad (k = 1, \dots, n) \quad (5)$$

$$x_\ell(t) = \sum_{k=1}^n \phi_{k\ell} q_k(t) \quad (6)$$

ここで、 $\phi_{k\ell}$ は k 次振動モードの ℓ 点の値である。

(2) 応答の時間領域における表現

p 点に単位衝撃荷重 $\delta(t)$ が作用するものとする。 $\delta(t)$ はディラックのデルタ関数である。このとき、外力ベクトル $f(t)$ は、次のように表される。

$$f_s(t) = \begin{cases} \delta(t) & s = p \\ 0 & s \neq p \end{cases} \quad (7)$$

この場合、式(5)より、 k 次の基準座標は次式で与えられる。

$$q_k(t) = \frac{\phi_{pk}}{\omega_{dk}} \exp(-h_k\omega_k t) \sin(\omega_{dk} t) \quad (8)$$

ただし、 $\omega_{dk} = \omega_k \sqrt{1 - h_k^2}$ である。

また、基準座標の時間微分は、

$$\dot{q}_k(t) = \frac{\phi_{pk}}{\omega_{dk}} \exp(-h_k\omega_k t) (\omega_{dk} \cos(\omega_{dk} t) - h_k \omega_k \sin(\omega_{dk} t)) \quad (9)$$

となる。この式を変形すると、

$$\dot{q}_k(t) = \frac{\phi_{pk}}{\omega_{dk}} \omega_k \exp(-h_k\omega_k t) \sin(\omega_{dk} t + \theta_k) \quad (10)$$

$$\theta_k = -\tan^{-1}(\sqrt{1 - h_k^2}/h_k) \quad (11)$$

となる。これらの関係より、 ℓ 点の変位応答は、

$$x_\ell(t) = \sum_{k=1}^n g_k(t) \quad (12)$$

$$g_k(t) = \frac{\phi_{k\ell} \phi_{pk}}{\omega_{dk}} \exp(-h_k\omega_k t) \sin(\omega_{dk} t) \quad (13)$$

で与えられる。他方、速度応答は、

$$\dot{x}_\ell(t) = \sum_{k=1}^n \dot{g}_k(t) \quad (14)$$

で与えられる。 $g_k(t)$ および $\dot{g}_k(t)$ は、いずれの場合でも、

$$e_k(t) = A_k \exp(-h_k\omega_k t) \sin(\omega_{dk} t + \theta_k) \quad (15)$$

の型の関数として表すことができる。

(3) 応答の周波数領域における表現

ℓ 点の応答と p 点の外力のフーリエ変換を次式で表す。

$$X_\ell(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x_\ell(t) \exp(-i\omega t) dt \quad (16)$$

$$F_p(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_p(t) \exp(-i\omega t) dt \quad (17)$$

p 点のみに荷重 $f_p(t)$ が作用した場合の、 ℓ 点の変位応答の周波数応答関数は、

$$X_\ell(i\omega) = \sum_{k=1}^n H_k(i\omega) F_p(i\omega) \quad (18)$$

で与えられる。なお、各振動次数の構造物の周波数伝達関数は、

$$H_k(i\omega) = \frac{\phi_{kk}\phi_{pk}}{-\omega^2 + \omega_k^2 + 2ih_k\omega_k\omega} \quad (19)$$

である。

外力を単位衝撃関数 $\delta(t)$ とすると、そのフーリエ変換は、

$$F_p(i\omega) = 1 \quad (20)$$

で与えられる。この場合、フーリエ逆変換の関係より、

$$x_\ell(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_\ell(i\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad (21)$$

$x_\ell(t)$ は、式(13)の単位衝撃応答関数となる。

外力 $f_p(t)$ を定常確率過程と考え、そのパワースペクトル密度を $S_{fp}(\omega)$ で表し、同じく応答 $x_\ell(t)$ のパワースペクトル密度を $S_{x\ell}(\omega)$ とする。応答 $x_\ell(t)$ のパワースペクトル密度は、

$$S_{x\ell}(\omega) = \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n H_k(i\omega) H_s^*(i\omega) S_{fp}(\omega) \quad (22)$$

となる。ここで、* は共役複素数である。構造物の減衰定数 h_k が小さく、各振動次数の周波数伝達関数の周波数軸で重なる部分が少ない場合には、式(22)は近似的に、

$$S_{x\ell}(\omega) \approx \sum_{k=1}^n H_k(i\omega)^2 S_{fp}(\omega) \quad (23)$$

のようになり、各振動毎の応答のパワースペクトル密度の和として表すことができる。

構造物の減衰定数 h_k が小さい場合、周波数伝達関数 $H_k(i\omega)$ は、近似的に k 次振動の固有振動数 ω_k の近傍

$$|\omega - \omega_k| \leq \Delta \quad (24)$$

の周波数範囲の値により表すことができる。そこで、式(18)は、

$$X_\ell(i\omega) \approx \sum_{k=1}^n H_k(i\omega) \begin{cases} \omega = \omega_k + \Delta \\ \omega = \omega_k - \Delta \end{cases} F_p(i\omega) \quad (25)$$

のようになる。したがって、外力として単位衝撃関数が作用する場合、 $\omega_k - \Delta \leq \omega \leq \omega_k + \Delta$ の区間の伝達関数 $H_k(i\omega)$ の逆変換は、近似的に、 k 次振動の単位衝撃応答関数となる。

$$g_k(t) \approx \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_k - \Delta}^{\omega_k + \Delta} H_k(i\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad (26)$$

3. データ処理と曲線適合法

(1) データ処理の流れ

構造物の動的特性の推定は、経験的な工夫に頼っていた振動測定が、モード解析法による同定理論^{8,9,10,11,12)}の普及により、高い精度で実現できるよう

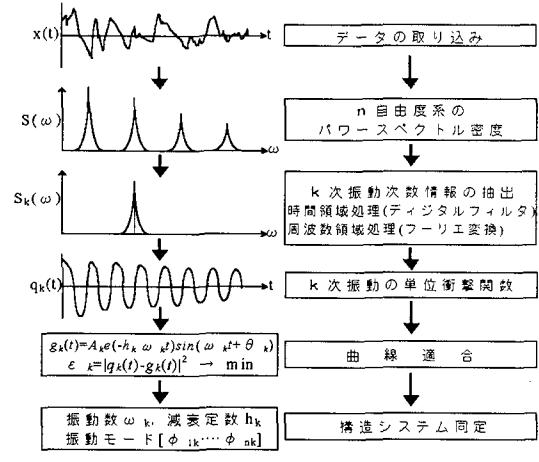


図-2 データ処理手順

になった。

その後、パーソナルコンピュータが飛躍的に高性能化し、さらに実験に特化した仮想計測器ソフトウェア分野のソフトウェア技術¹⁷⁾が開発された。そこで、効率的なプログラミングにより、様々な振動特性の推定の手法を実時間処理することが可能になってきた。

本論文の手法は、モード解析法による同定理論^{8,9)}の視点から見ると、偏分反復法やプローニーの方法などの多自由度法^{8,10,11,12)}ではなく、多自由度系の振動を1自由度系に還元する1自由度法を採用している。

構造同定の手順として、次の2つの主要なデータ処理を行う。

- ①バンドパスフィルタにより多自由度系振動を1自由度系振動へ還元する。バンドパスフィルタ^{20,21)}の構成には、デジタルフィルタを用いる方法とフーリエ変換による方法を適用した。前者をデジタルフィルタ法、後者をフーリエ変換法と呼ぶ。デジタルフィルタ法では、リアルタイムのデータ処理が可能になる。
- ②自由振動波形より、時間領域における非線形最小二乗法による曲線適合理論を適用して、振動特性を求める。フィルタ処理した k 次振動のデータを \hat{x}_k ($i = 1, \dots, N$) として、式(15)を曲線適合させる。

$$\epsilon_k = \sum_{s=1}^N |\hat{x}_{ks} - A_k \exp(-h_k \omega_k t_s) \sin(\omega_k t_s + \theta_k)|^2 \quad (27)$$

これらのデータ処理の手順を図-2に示した。

(2) デジタルフィルタ法

デジタルフィルタでバンドパスフィルタを構成する。本論文では、少ない次数で急峻な遮断特性を構成することが可能な、IIR フィルタ（無限長インバ尔斯応答フィルタ）を採用する。IIR フィルタの主要なものに、バターワース(Butterworth)フィルタ、チェビシェフ(Chebyshev)フィルタ、逆チェビシェフ(Inverse chebyshev)

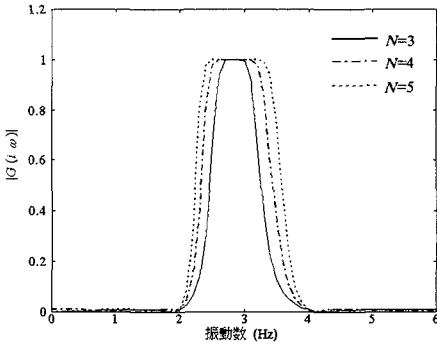


図-3 逆チエビシェフフィルタによるバンドパスフィルタの振幅特性

フィルタ、橿円(Elliptic)フィルタがある。チエビシェフ型フィルタは急峻な遮断周波数特性を有する反面、振幅特性がリップルと呼ばれる変動をする。逆チエビシェフフィルタは、阻止域にリップルを生じるが、通過域の振幅特性が平坦であるので、本研究では、逆チエビシェフフィルタを用いる。ローパスフィルタを逆チエビシェフフィルタで構成した場合、二乗振幅特性^{20),21)}は、

$$|G(i\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 [V_N(\omega)/V_N(\omega/\omega_c)]^2} \quad (28)$$

で表される。ここで、 $V_N(x)$ は N 次のチエビシェフ多項式

$$\begin{aligned} V_N(x) &= \cos(N \cos^{-1} x) \quad (|x| \leq 1) \\ &= \cosh(N \cosh^{-1} x) \quad (|x| > 1) \end{aligned} \quad (29)$$

である。 N はフィルタの次数を表し、 ε はリップルに関するパラメータである。 N および ε を大きくすると、急峻な遮断特性が得られる。しかし、 N を大きくすると、デジタルフィルタにおいて、フィルタの処理をする演算が長くなる。また、 ε を大きくすると、リップルが大きくなる。この相反する特性を勘案して、 N と ε のパラメータを決める。

このフィルタのパラメータとしては、サンプリング周波数 f_s 、高域と低域のカットオフ周波数 f_h と f_l 、フィルタの遮断特性 α (dB)、フィルタの次数 N である。図-3に逆チエビシェフフィルタによるバンドパスフィルタの振幅特性を示した。中心周波数を3 Hz、 $f_h = 2.5$ Hz、 $f_l = 3.5$ Hzとした場合である。次数を N を増加させると、遮断特性が急峻になる。

(3) フーリエ変換法

特定の振動次数の情報を抽出するために、急峻な周波数特性を有するバンドパスフィルタを構成する必要がある。この操作は、周波数領域で矩形のフィルタを構成することにより、理想的な形で実現することができる。

構造物 ℓ 点の応答 $x_\ell(t)$ をフーリエ変換すると、 $X_\ell(i\omega)$ となる。周波数領域において、 k 次振動の情報を抽出するためには、理想的なバンドパスフィルタで

ある

$$\begin{aligned} |G_k(i\omega)| &= 1 \quad (\omega_k - \Delta \leq |\omega| \leq \omega_k + \Delta) \\ &= 0 \quad (\text{それ以外の } \omega) \end{aligned} \quad (30)$$

のような矩形フィルタを考える。応答のフーリエ変換 $X_\ell(i\omega)$ に、バンドパスフィルタ $G_k(i\omega)$ を作用させて、それを逆変換することにより、 k 次振動の近似的な単位衝撃応答関数を得ることができる。

$$g_k(t) \approx \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_\ell(i\omega) G_k(i\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad (31)$$

この処理を離散フーリエ変換により実行する。

$\hat{x}_s(s=0 \dots N-1)$ の N 個のデータが得られているとする。この離散フーリエ変換は、

$$X_k = \sum_{s=0}^{N-1} \hat{x}_s \exp(-i2\pi ks/N) \quad (k=0 \dots N-1) \quad (32)$$

により実行される。周波数領域で、中心周波数 ω_k の矩形のフィルタの操作をすることは、阻止域の周波数領域の値を0とすることである。このような処理をした後、逆変換により、時間領域の値を得る。

$$\tilde{x}_s = \sum_{k=0}^{N-1} X_k G_k \exp(i2\pi ks/N) \quad (s=0 \dots N-1) \quad (33)$$

しかし、この操作は、デジタルフィルタの視点から見ると、FIR型(有限インパルス応答)フィルタを構成することになる。処理する信号のデータ数に制限がある場合には、デジタルフィルタが打ち切られるために、理想的なバンドパスフィルタを実現することはできない。

(4) 非線形最小二乗法による曲線適合

時刻 $(t_0 \dots t_{N-1})$ に対して、測定データ \tilde{x}_s が N 個得られたとする。これを、ベクトル表示する。

$$\tilde{x} = [\tilde{x}_0 \dots \tilde{x}_{N-1}]^T \quad (34)$$

このデータに、式(15)の $e_k(t)$ を曲線適合させて、最適なパラメータを決める。ここで、求めるパラメータをベクトル表示する。

$$\alpha = [\omega_k \ h_k \ A_k \ \theta_k]^T \quad (35)$$

推定する関数 $e_k(t)$ の時刻 $(t_0 \dots t_{N-1})$ の N 個の値を、パラメータ α の関数と考え、次のようにベクトル表示する。

$$e(\alpha) = [e_k(t_0, \alpha) \ \dots \ e_k(t_{N-1}, \alpha)]^T \quad (36)$$

非線形最小二乗法では、測定値と推定値の誤差ベクトル

$$E(\alpha) = \tilde{x} - e(\alpha) \quad (37)$$

を定義し、この二乗誤差

$$\varepsilon(\alpha) = E^T(\alpha) E(\alpha) \quad (38)$$

を最小にするように、 α を変化させてパラメータ α を探索する。この手順を数値計算により、効果的に実現する手法に Levenberg-Marquardt 法²³⁾がある。この手法では、次の方程式によりパラメータの増分 Δ_j を決める。

j 回目に求めた α を α_j とする。 α を α_j から $\alpha_j + \Delta_j$ だけ増加させた場合、 $\varepsilon(\alpha_j + \Delta_j)$ を最小にする Δ_j の値は、Newton-Gauss 法により求められる。

$$B^T(\alpha_j)B(\alpha_j)\Delta_j = -B^T(\alpha_j)E(\alpha_j) \quad (39)$$

ここに, $B(\alpha_j)$ は $E(\alpha)$ の α に関するヤコビアンである.

$$B(\alpha_j) = \left(\frac{\partial}{\partial \alpha} \right)^T E(\alpha) \Big|_{\alpha=\alpha_j} \quad (40)$$

この Δ_j から,

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j + \Delta_j \quad (41)$$

により α_j を改めて変更して, $\varepsilon(\alpha)$ の最小値を探索する.

一方, $\varepsilon(\alpha)$ の $\alpha = \alpha_j$ における勾配は,

$$\nabla \varepsilon(\alpha_j) = 2B^T(\alpha_j)E(\alpha_j) \quad (42)$$

で与えられる. ここに, ∇ の記号は, パラメータ α に関する偏微分で, $\nabla = \partial/\partial \alpha$ で定義されるものである.

$\alpha_j + \Delta_j$ の変化に対して, $\varepsilon(\alpha)$ は最小に向かって変化するので, $\varepsilon(\alpha)$ の最急降下方向の Δ_j の変化は,

$$\Delta_j = \nabla \varepsilon(\alpha_j) \quad (43)$$

と考えることができる. これが最急降下法である.

Levenberg-Marquardt 法は, Newton-Gauss 法と最急降下法の欠点を補うために, 次のような手順で α_j を決める.

$$(B^T(\alpha_j)B(\alpha_j) + v^2 I) \Delta_j = -B^T(\alpha_j)E(\alpha_j) \quad (44)$$

ここで, v は Marquardt 数と呼ばれるパラメータである. v の値を, 途中の探索状況に対応して, 適応的に変化させる. $v=0$ の場合, Newton-Gauss 法を採用し, $v \rightarrow \infty$ の場合, 最急降下法を採用する.

非線形最小二乗法のプログラムでは, 求めるパラメータ $\alpha = (\omega_0, h_0, A_0, \theta_0)$ の初期条件, 最大繰り返し回数, および Jacobian の計算手順を設定する. 計算結果として, 最適パラメータ $\alpha = (\omega_k, h_k, A_k, \theta_k)$ が求められる.

4. 可搬型振動計測システムのソフトウェアとハードウェア

(1) 仮想計測器について

仮想計測器の考え方とは, 従来様々な装置で個別的に処理されてきた実験データ集録と分析を, 全てパソコンコンピュータ上で実現しようとするものである. このようなソフトウェアでは, 図面を描くように, 様々な部品を結線してプログラム化し, あたかも計測装置がモニター上にあるかのように配置することができる. 種々のスイッチやダイヤルが準備されており, マウスを用いて, これらが操作できるような優れた GUI(Graphical User Interface)を有している. このようなソフトウェアで, 主に日本で販売されているのは, LabVIEW (National Instruments), Super Scope II (GWI), DADiSP(DSP), Visual Designer(Intelligent Instrumentation)などがある.

(2) 可搬型振動計測システムのハードウェア

可搬型振動計測システムの構成概要を図-4 に, 実際

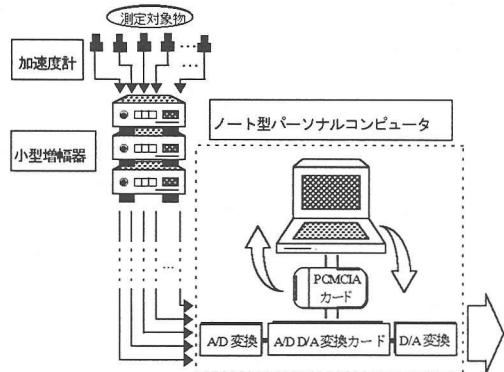


図-4 可搬型振動計測システムの概要

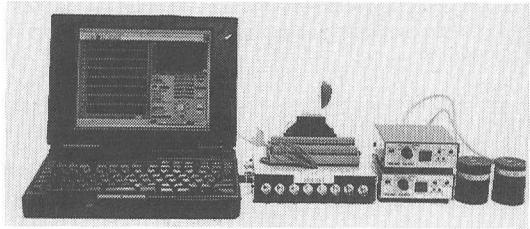


図-5 可搬型振動計測システム

表-1 システム構成装置とソフトウェア

	装置とソフトウェア	製品名
パソコン コンピュータ 関連	パソコン用コンピュータ	Think Pad 345C (IBM 製)
	A/D・D/A 変換用カード	DAQ Card-1200 (National Instruments 製)
	仮想計測器ソフトウェア	LabVIEW (National Instruments 製)
検出器	加速度計 加速度計増幅器	Model 710 (TEAC 製) SA-610/H (TEAC 製)

の構成システムを図-5 の写真に示した. システムは, 検出器 (加速度計) と増幅器, PCMCIA 用のカード型の A/D・D/A コンバータおよびノート型パソコンコンピュータで構成されている. パソコンコンピュータの中には仮想計測器ソフトウェアが組み込まれている. 表-1 にシステム構成の仕様を示す. 可搬型計測器にするために, ノート型パソコンコンピュータを採用した. 構造同定のためのプログラムを仮想計測器ソフトウェアを用いて作成した. 加速度計の増幅器は, 可搬型であることを考え, 単三電池 4 本で作動する小型で軽量ものを用いた. 加速度計は半導体型のものを用いている.

計測は次のような手法で行われる. 対象物に検出器 (加速度計等) を取り付け, 多チャンネルのアナログ信号を増幅器に取り入れ, パソコンコンピュータ本体に組み込まれたデータ集録用のカードにより A/D 変換する. LabVIEW は, A/D 変換された信号を読み取り, データ処理を視覚的にモニターに表示する. この信号

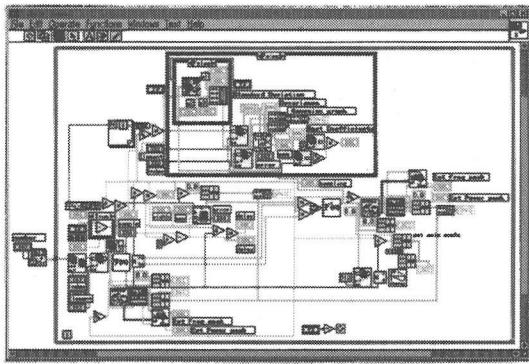


図-6 プログラム画面

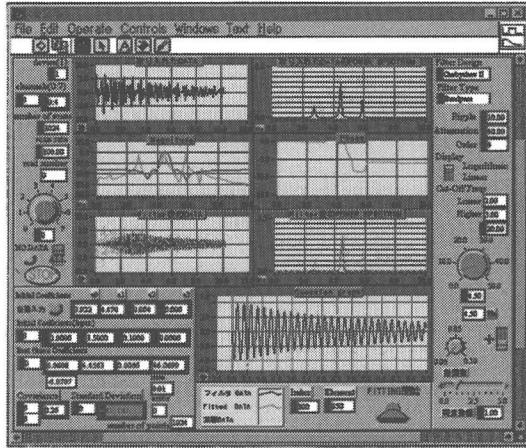


図-7 パネル画面

はさらに、D/A 変換することにより、アナログ信号として出力することも可能である。

A/D 変換されたデータは、構造同定のためのプログラムにより処理され、振動特性が推定される。従来の振動計測で用いられた装置が、全て仮想計測器としてソフトウェアで処理される。そのために、計測装置の軽量化、データ処理の高速化および統一した処理が可能になる。

(3) 仮想計測器ソフトウェア

本研究では、仮想計測器ソフトウェアにナショナルインスツルメンツ社製の LabVIEW¹⁶⁾を用いた。LabVIEW は、2つの画面ウィンドウから構成されている。一般的に仮想計測器ソフトウェアは、プログラミングを行うプログラムウィンドウとデータ集録および解析処理を視覚的に表示できるパネルウィンドウを持っている。C 言語や BASIC 言語などのテキスト形式のプログラミングとは異なり、様々な処理を示すアイコンをフローチャート形式で接続するグラフィカルプログラミング言語を採用しているものが多い。これらのソフトウェアには、通常、各種解析ツールがパッケージ化されている。

各種解析ツールとして、基本的な関数や解析用の関数が準備されている。解析用の関数には、信号の発生、信号処理、フィルタ、ウィンドウ、確率・統計、最小二乗法、線形代数、計測に関するものがある。また、コンピュータのモニターの中に設計する計測器の画面と各種のスイッチ等、画面を構成する各種ツールが準備されている。パネルウィンドウの具体的な事例を図-7 に示したが、画面上にダイアルやスイッチが配置されている。これらのものを、実際の計測器を操作するかのように、マウスで仮想的に動かし、コンピュータ画面をインターフェースにして、仮想的な計測器を操作する構成となっている。

現在販売されている仮想計測器ソフトウェアは、ほぼ同じ構成となっている。

5. 仮想計測器ソフトウェアによるプログラミング

(1) ディジタルフィルタ法

仮想計測器ソフトウェアで作成したディジタルフィルタ法による振動特性推定のプログラム画面とパネル画面を図-6、図-7 に示した。

データ処理法としては、図-8 a)に示したような計測データを取り込み、パワースペクトル密度を表示させる。この情報に基づいて、測定データにバンドパスフィルタを作用させることにより、必要な周波数成分を抽出する。図-8 b)に、周波数領域におけるフィルタ処理の画面を示す。点線は、計測データのパワースペクトル密度、実線は、バンドパスフィルタの形である。バンドパスフィルタを通過した信号は、図-8 c)に示すように、減衰自由振動波形になる。さらに初期条件の影響する部分を切り捨て、この波形に対して、非線形最小二乗法により曲線適合を行い、振動特性(固有振動数、減衰定数、振動モード)を決定する。図-8 d)に曲線適合の結果を示した。実線は実測による減衰自由振動波形、点線は曲線適合させた結果である。

データ処理の方法として、計測されたスペクトル図-8 b)に対して、画面図-7 のダイアルを回すことにより、図-8 b)のフィルタの中心振動数が変化し、その結果図-8 c)の波形が変化する。このように画面上で視覚的にフィルタ操作ができる。さらに、画面図-7 に推定するパラメータの初期値を設定しておき、最終的な処理波形図-8 d)に対して、非線形最小二乗法による曲線適合を実施して、各パラメータを推定する。この操作は、画面図-7 のスイッチを下げるこにより実行させるようにした。

(2) フーリエ変換法

フーリエ変換法では、図-9 a)のように、計測デー

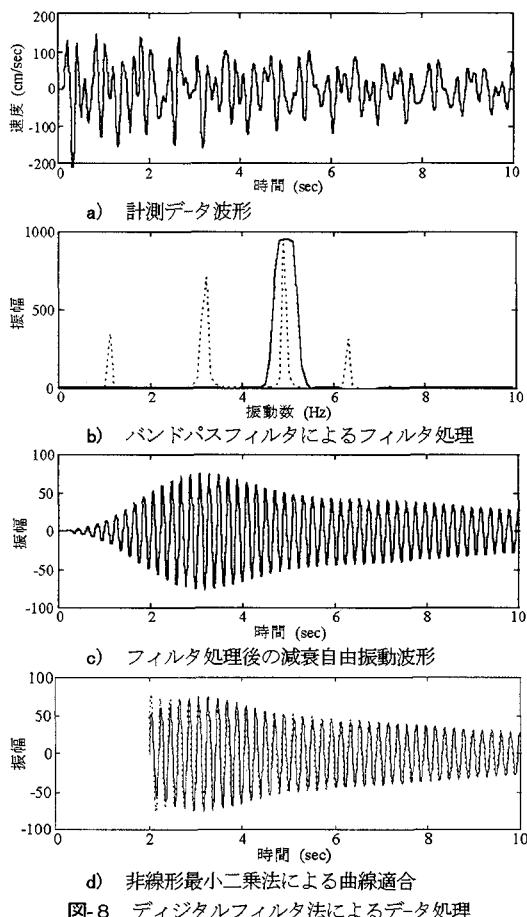


図-8 ディジタルフィルタ法によるデータ処理

タのパワースペクトル密度を点線で、矩形のバンドパスフィルタを実線で示した。このようなフィルタの操作により、必要な周波数成分だけを抽出する。このような処理をしたデータを逆フーリエ変換すると、図-9 b) に示すような時間領域の減衰自由振動波形が得られる。次に、初期の乱れを切り捨て、非線形最小二乗法によりこの波形に曲線適合すると、振動特性（固有振動数、減衰定数、振動モード）を得ることができる。図-9 c) に曲線適合の結果を示した。実線は実測による減衰自由振動波形、点線は曲線適合の結果である。

6. 衝撃加振による構造物の構造同定への適用

(1) 対象構造物

仮想計測器ソフトウェアを用いた計測システムによる構造同定手法の有効性を確認するために、図-10 に示すような5層構造物模型を用いて、衝撃加振シミュレーションと、衝撃加振試験を行った。その結果に基づいて、振動特性（固有振動数、減衰定数、振動モード）の推定精度の検討を行った。この模型構造物の諸元を表-2 に示す。

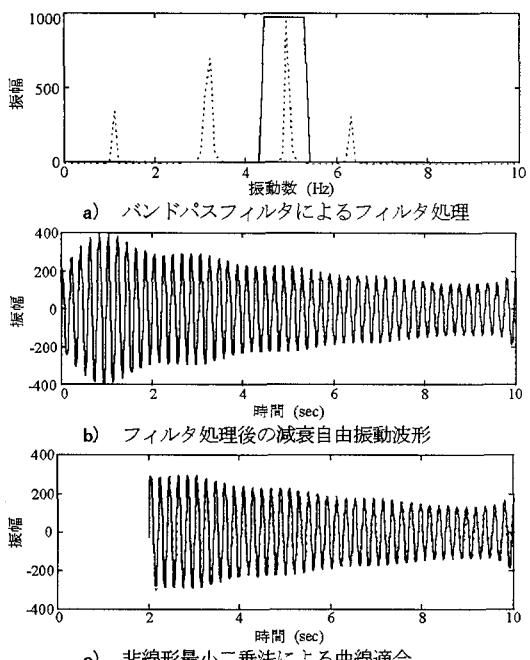


図-9 フーリエ変換法によるデータ処理

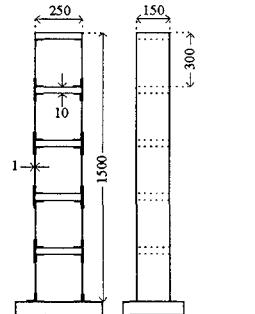


図-10 模型構造物

表-2 模型構造物の諸元

構材	5層ラーメン
材質	アルミニウム
密度	0.0028 kg/cm ³
弾性係数	7.0×10 ⁵ kg/cm ²

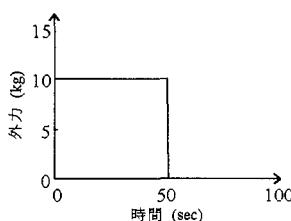


図-11 外力波形

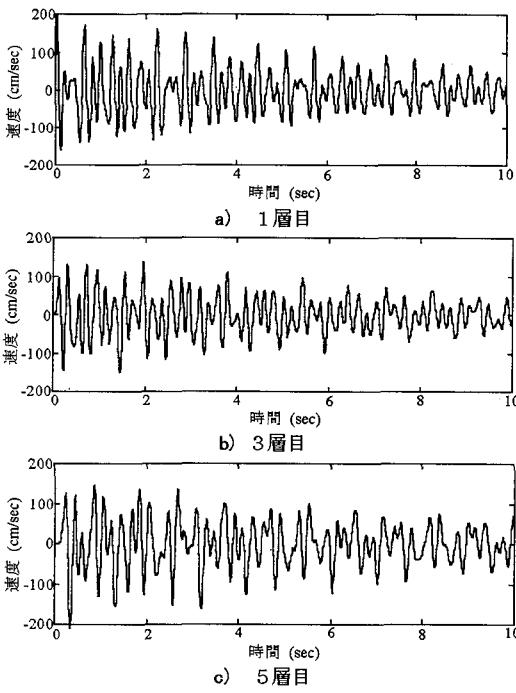


図-12 数値シミュレーションによる速度応答波形

(2) 衝撃加振シミュレーションによる同定精度の検討

a) 衝撃加振シミュレーションの概要

図-10 に示す模型構造物を 5 質点系にモデル化し、固有値解析により固有振動数、振動モードを求めた。各次減衰定数を 0.004 と仮定し、図-11 のような衝撃力を 1 層目に加えた数値シミュレーションを行い、各層の速度応答を求めた。この応答波形データを取り込み、ディジタルフィルタ法とフーリエ変換法を用いて、それぞれの振動特性（固有振動数、減衰定数、振動モード）の推定精度の比較検討を行った。衝撃加振シミュレーションの計算時間を 10 秒、時間刻み $\Delta t = 0.01$ とした。図-12a), 図 b), 図 c) に 1, 3, 5 層目の速度応答を示す。なお、対象とする速度応答のデータに対して、サンプリング処理の設定として、サンプリング周波数 $\Delta t = 100 \text{ Hz}$ 、データ数 $N = 1024$ 、データ時間 $T = N \times 1/\Delta t = 10$ 、周波数分解能 $\Delta f = 1/T = 0.1$ とした。

b) 動特性推定結果

表-3 に振動解析による結果と衝撃加振シミュレーションの応答波形から、本システムで推定した固有振動数、減衰定数を示す。得られた結果は、各層の応答波形から各次固有振動数、減衰定数は 5 つずつ値が求められるので、これを平均化したものを示している。なお、フィルタ設計におけるパラメータとして、ディジタルフィルタ法では、次数 $N = 4$ 、バンドパス周波数を $f = 1.0 \text{ Hz}$ としている。他方、フーリエ変換法でもバンドパス周波数は $f = 1.0 \text{ Hz}$ と設定した。この条件で、

表-3 推定結果

次数	振動解析による特徴		曲線適合による推定		
			デジタルフィルタ法		フーリエ変換法
	固有振動数(Hz)	減衰定数	固有振動数(Hz)	減衰定数	固有振動数(Hz)
1	1.0938	0.0040	1.0933	0.0041	1.0934
2	3.1555	0.0040	3.1566	0.0039	3.1555
3	4.9173	0.0040	4.9217	0.0041	4.9171
4	6.3041	0.0040	6.3097	0.0040	6.3039
5	7.2116	0.0040	7.2145	0.0041	7.2117

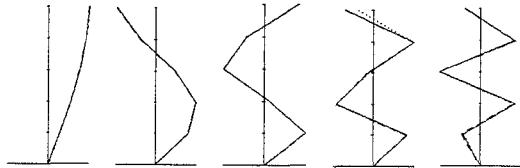


図-13 振動モード（衝撃加振シミュレーション）

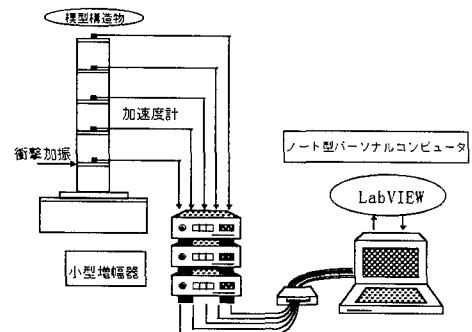


図-14 実験概要図

シミュレーションと実験による動特性の推定を行った。

ディジタルフィルタ法の場合、各次固有振動数は、振動解析の結果と比較すると、少数点以下第 2 位までの高い精度で推定している。減衰定数においても、1% 程度の誤差で推定している。フーリエ変換法の場合でも、同様に固有振動数、減衰定数ともに高い精度で推定している。ディジタルフィルタ法とフーリエ変換法による推定値を比べると、ほぼ同程度の高い推定精度が得られている。また、図-13 に振動モードを示した。実線は振動解析、破線はディジタルフィルタ法、点線はフーリエ変換法による振動モードである。ディジタルフィルタ法、フーリエ変換法とともに、振動解析の結果に対して、良い一致を示しており、高い推定精度になっている。したがって、衝撃加振シミュレーションの応答波形から、振動特性が高い精度で推定でき、本システムによる構造同定の有効性を確認することができた。

(3) 模型構造物の動特性推定

a) 実験の概要

現場計測では、周辺機器や外乱等により、計測データ

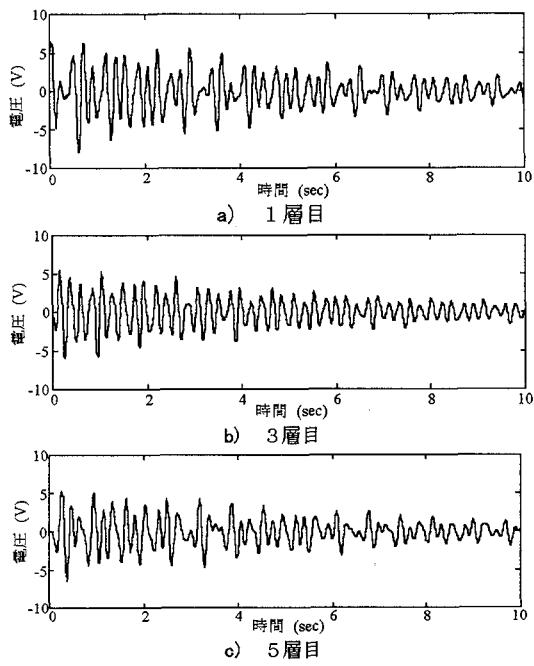


図-15 実験による加速度波形

タ中にノイズの混入が考えられる。そこで、計測データにノイズが混入した場合の推定精度を検証するために、模型実験を行った。

模型構造物に対して、1層目を衝撃ハンマーで加振させる。各層に取り付けた加速度計で検出された信号を増幅器に取り込み、その信号をA/D変換し、本システムで計測を行う。図-14に、実験概要図を示す。そこで、実測波形に対して、デジタルフィルタ法とフーリエ変換法を用いて、周波数領域でフィルタ処理をし、それぞれの振動特性（固有振動数、減衰定数、振動モード）の推定を行った。なお、振動解析では、加速度計の質量を考慮した解析を行った。1, 3, 5層目の加速度波形を図-15a), 図 b), 図 c)に示す。

b) 動特性推定結果

表-4に、振動解析による結果と実測波形から振動特性を推定した結果を示した。なお、実測では、加速度波形を用いて処理を行っている。また、フィルタ設計におけるパラメータは、衝撃加振シミュレーションと同様の設定としている。

デジタルフィルタ法とフーリエ変換法を用いた場合、固有振動数の推定結果においては、ほぼ同じ値が得られている。振動解析による結果と比較すると、1次振動は低い値であり、それ以外の振動では、高い推定値を示している。減衰定数に関しては、デジタルフィルタ法とフーリエ変換法の値比較をすると、若干の誤差は生じているが、ほぼ近い推定値となっている。図-16に振動モードを示した。実線は振動解析、破線

表-4 推定結果

次数	振動解析による 特 性	曲 線 適 合 による 推 定 (実 測)				
		デジタルフィルタ 法	フーリエ 変 換 法	減衰定数	固有振動数(hz)	減衰定数
1	0.9505	0.8887	0.0080	0.8867	0.0069	
2	2.7499	2.7668	0.0068	2.7684	0.0068	
3	4.2960	4.4545	0.0055	4.4594	0.0055	
4	5.5085	5.8477	0.0045	5.8505	0.0043	
5	6.2986	6.9035	0.0044	6.9012	0.0057	

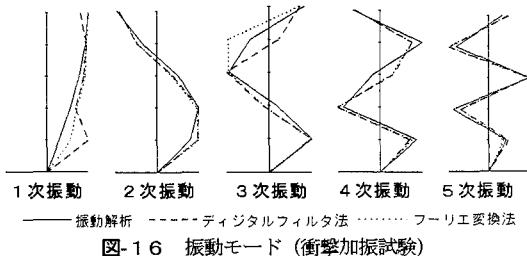


図-16 振動モード (衝撃加振試験)

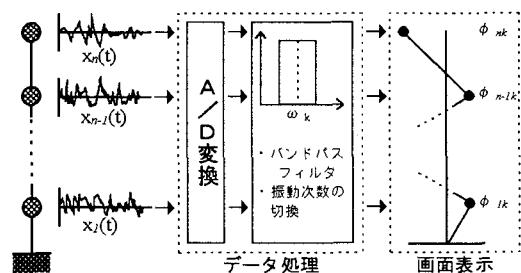


図-17 リアルタイム振動モードアニメーションの手順

はデジタルフィルタ法、点線はフーリエ変換法による振動モードである。3次振動において、推定値の誤差が大きくなっている。若干の変動はあるが、実測波形からの高い精度の振動特性の推定が可能であることが確認できた。

7. 実時間振動モード検出法

(1) データ処理手順

振動計測の現場では、構造物の振動の全体の挙動をモニターするために、振動モードを計測することが必要になる。バンドパスフィルタの処理が実時間で可能であれば、多点測定した信号をデジタルフィルタ処理することにより、振動モードを実時間で観測することが可能になる。本研究では、デジタルフィルタ処理を適用して、実時間振動モード検出のシステムを構成した。

任意の外力が作用する n 質点系の各質点の変位を $x_1(t) \dots x_n(t)$ として、これを

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ \dots \ x_n(t)]^T \quad (45)$$

のようにベクトル表示すると、 n 質点の変位は

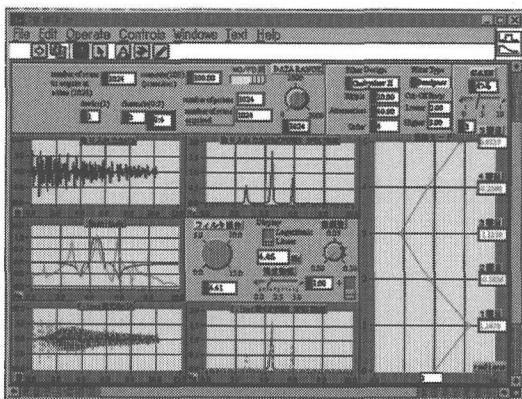


図-18 実時間振動モードモニターパネル画面

$$x(t) = \sum_{s=1}^n \phi_s q_s(t) \quad (46)$$

で表すことができる。ここに、 ϕ_s : s 次の振動モード、 $q_s(t)$: s 次の基準座標である。

固有振動数が $f_k(\text{Hz})$ である k 次振動に着目する。 f_k を中心周波数とするバンドパスフィルタに、同時に各点の応答 $x_1(t) \dots x_n(t)$ を通過させると、中心周波数 f_k 周辺の振動成分のみが抽出されることになる。 k 次振動に関するフィルタを通過した、各質点の応答を $x_k(t)$ とすると、

$$x_k(t) = \phi_k q_k(t) \quad (47)$$

となる。このような処理が実時間で可能であれば、振動モードの実時間の検出が実現できることになる。

このデータ処理の手順を図-17 に示した。1 から n 質点の加速度波形を A/D 変換をして、パーソナルコンピュータに時間刻み Δt で取り込む。 k 次振動次数のバンドパスフィルタを設定する。取り込まれた信号に、リアルタイムでデジタルフィルタによるバンドパスフィルタの処理を実行する。フィルタ処理された信号を、画面表示させて実時間の振動モードの検出を行う。測定中に、バンドパスフィルタの中心周波数を変化させれば、振動次数の違う振動モードを見ることができる。

(2) パネル画面と測定結果

図-17 の手順に従い、LabVIEW によるリアルタイムに振動モードをモニターするプログラミングを、5 自由度系構造物を対象として行った。図-18 に、パネル画面を示す。ここでは、取り込むデータのサンプリング周波数、データ数、フィルタ処理における設定、振動次数の切換などをパネル画面上で行うことができる。また、振動モードの振幅の大きさを変化できるように、ゲイン設定を設けている。

衝撃加振試験における加速度波形に対して、デジタルフィルタ法とフーリエ変換法のそれぞれについて、振動モード検出を行った。各次振動モードが、ほぼ実

時間で検出できることが確認できた。このような処理を行うことにより、現場実験において、実時間で各振動次数が観測可能である。しかし、振動モードモニターのような実時間処理が必要な場合では、デジタルフィルタ法が適している。このような処理は、振動実験において、構造物の振動特性を把握するための重要な技術である。

8.まとめ

近年、土木構造物の振動計測が構造物の維持・管理のために利用されつつある。このような振動計測を可能にするためには、高い精度の構造物の動特性の推定法を確立することと、軽量で可搬型の計測システムを開発することにある。この研究では、ノート型パソコンに仮想計測器ソフトウェアを組み込み、さらに、カード型 A/D コンバータ、小型加速度計増幅器等を組み合わせて、可搬型振動計測システムを構成した。5 自由度系模型の数値シミュレーションデータと実測データより、本システムによる精度の高い振動特性推定が可能であることを確認したものである。得られた結果を要約すると、次のようになる。

(1) ノート型パソコンに仮想計測器ソフトウェアにより、軽量で可搬型の振動計測システムを構成した。

(2) 多自由度系振動データを 1 自由度系としたデータへ還元するためのバンドパスフィルタを、デジタルフィルタ法とフーリエ変換法により提案し、それらの有効性を確認した。

(3) 1 自由度系衝撃応答に基づく構造同定を、非線形最小二乗法を用いて時間領域で行い、固有振動数、減衰定数、振動モードが高速に推定可能であることを確認した。

(4) 5 自由度系模型構造物の数値シミュレーションデータと実測データに基づいて、振動特性推定を行った。固有振動数、減衰定数、振動モードについて、高精度の推定が実現でき、現場計測への有効性を確認した。

(5) 同時多点計測データを、実時間でバンドパス処理することにより、振動計測現場において、各振動モードを実時間でモニターすることができ可能であることが確認できた。

本論文では、各次振動モードの分離方法として、デジタルフィルタ法とフーリエ変換法を提案し、それぞれの精度には大きな誤差はないことを確認した。しかし、デジタルフィルタ法は、フィルタの設計のためのパラメータや初期条件など、条件設定に経験が必要になる。従って、動特性推定法では、設定条件が少

ないフーリエ変換法が有利となる。しかし、振動モードモニターのように、リアルタイムの処理が必要な場合には、ディジタルフィルタ法が適している。

また、本論文では、比較的モード分離されている構造物の動特性の推定を問題にしている。しかし、アーチ構造や吊橋構の構造物のように、固有振動数が接近する場合、2自由度の単位衝撃関数をモデル化した関数に、曲線適合させることにより、動特性の推定が可能になる。このような選択肢を持たせたシステムの構成は土木構造物の計測において重要であるので、今後の課題にしたい。

参考文献

- 1) 橋梁振動と計測と解析,橋梁振動研究会編,技報堂,1993.1
- 2) 梶川康男:衝撃加振による斜張橋形式歩道橋「雪吊橋」の振動測定,土木学会第42回年次学術講演会講演概要集, I -352,pp.738-739,1987.9.
- 3) 山口宏樹,高野晴夫,小笠原政文,下里哲弘,加藤真志,加藤久人:斜張橋振動減衰のエネルギー的評価法と鶴見づばさ橋への適用,土木学会論文集,No.543/I -36,pp.217-227,1996.7.
- 4) 松本正信,島田静雄,加藤雅史,福島公:振動特性によるアーチ橋の損傷要因分析と補強構造の検討,土木学会論文集,No.432/I -16,pp.127-135,1991.7.
- 5) 烏野清,麻生稔彦,松田泰治,龍谷幸二,仲間高人:洗掘を受けた橋脚を有する橋梁の振動特性,構造工学論文集,Vol.42A,pp.715-721,1996.3.
- 6) 新家徹,広中邦汎,頭井洋,西村春久:振動法によるケーブル張力の実用算定式について,土木学会論文報告集, No.294,pp.25-32,1980.2.
- 7) 中溝高好:信号処理とシステム同定,コロナ社,1988.3.
- 8) 長松昭男:モード解析,培風館,1985.7.
- 9) Ewins,D.J.:*Modal Testing : Theory and Practice, Research Studies Press,1984.*
- 10) 岡林隆敏,原忠彦:道路橋振動特性測定における衝撃加振法の適用,構造工学論文集,Vol.34A,pp.731-738,1988.3.
- 11) 岡林隆敏,沖野真,原忠彦,川村昭宣:衝撃加振試験法による道路橋の振動計測,橋梁と基礎,Vol.22,No.11,pp.39-43,1988.11.
- 12) 岡林隆敏,原忠彦,龍博志:周波数領域多自由度曲線適合法による道路橋の振動特性同定,構造工学における数値解法シンポジウム論文集,第19巻,pp.43-48,1995.7.
- 13) 星谷勝,斎藤悦郎:線形多自由度系の動特性の推定,土木学会論文集, No.344/ I -1,pp.289-298,1984.4.
- 14) 龍本幸,星谷勝:カルマンフィルタを用いた非線形構造物の同定,土木学会論文集, No.556/ I -38,pp.179-187,1997.1.
- 15) Sato, T. and Sato, M. : Structural Identification Using Neural Network and Kalman Filter Algorithms, J. Struct. Mech. Earthquake Eng., JSCE, No.563/ I -39,pp.1-10, 1997.4.
- 16) Johnson, G. W. : *LabVIEW Graphical Programming*, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- 17) トライコンピュータ:特集・Windows時代のデータ計測と解析入門,CQ出版社, 1995.9.
- 18) 臼井重徳:Visual Designer:減衰率測定装置への応用,トライコンピュータ,CQ出版社, pp.76-78,1995.9.
- 19) 臼田昭司:PC98用計測・解析ソフトを使ったFFT解析の方法,トライコンピュータ,CQ出版社,pp.18-21, 1995.9.
- 20) 今井 聰:ディジタル信号処理,秋葉出版,1988.12.
- 21) 武部 幹:ディジタルフィルタの設計,東海大学出版,1986.1.
- 22) 辻井重男編著:適応信号処理,昭晃堂,1995.5.
- 23) Lawson,C.L. and Hanson,R.J. : *Solving Least Squares Problem*, Prentice-Hall, Inc.,1974.

(1997.5.19受付)

ESTIMATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS FOR STRUCTURES BY THE MOBILE VIBRATION MEASUREMENT SYSTEM

Takatoshi OKABAYASHI, Kazuhiro YAMAMORI, Yasuhiro TAMARU
and Toru YOSHIMURA

This paper is concerned with the system identification method of vibrating structures by the virtual instrument software. The proposed identification method have two stages. The first stage is the signals processing by bandpass filter. In this stage, the signals of the multi-degree of freedom system reduce to the signals of the single-degree of freedom system. The second stage is the curve fitting by the nonlinear least square method. The dynamic characteristics of structure are estimated by the impulse response function of the single-degree of freedom system. For the bandpass filter process, the digital filter method and Fourier transform method are examined. As numerical simulations and experiments, it is shown that the proposed identification method enable to estimate highly degree of accuracy the dynamic characteristics for structures.