

常時微動から推定する建物の振動特性に関する研究

—最適化手法を用いた構造同定—

A Study on Structural Vibration Property Estimated from Microtremor

—Structural Identification by Optimization Method—

秋元 一成¹⁾ 吉田 長行²⁾

Kazunari Akimoto and Nagayuki Yoshida

¹⁾ 法政大学大学院デザイン工学研究科建築学専攻

²⁾ 法政大学デザイン工学部建築学科

This study proposes the identification method based on the dynamic characteristics of the structure, which is measured by the microtremor observational instrument. There are three advantages on this method: We will be able to make a structural model, 1) reducing cost and time to put the data picked up from a plan into the analytical model, 2) without drawings and specifications, and 3) considering the aging of the structure and the defects in construction. The observed structure is '58 building at Ichigaya campus of Hosei University. This paper develops a new process on structural identification.

Key Words: Microtremor, Identification Problem, Structural Dynamics, GA

1. はじめに

地盤や構造物は地震時でなくとも常に人間の感覚では感じ取れないほど微小に揺れている。これは「常時微動」と呼ばれ、風や火山活動などの自然現象や、車や電車、工場などの人間活動により生じるものである (Fig.1)。

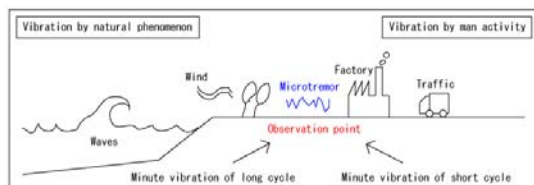


Fig.1 Hypocenter of microtremor

耐震診断では建物調査により、建物の劣化状態を目視調査、現地にて設計図書との整合性や修繕履歴等の有無を確認する現地調査と、診断レベル確認のため基礎、地盤、劣化状況、部位寸法や配筋状況、

コンクリート強度等の調査が必要かどうかを確認する診断レベル調査を行い、その後1次、2次、3次診断と建物の耐震性の検討へと続いていく。しかし、古い建物では、資料の老朽化や紛失がしばしば生じ、また、施工段階での変更やミスから実際には資料と異なる条件で竣工された可能性もある。そこで現場に赴き、建物を実測することにより実験的に耐震診断する手法の確立が求められており、その1つの手法として常時微動観測を利用するものがある。

本研究の目的は、常時微動観測機器を用いて常時微動下の対象建物を観測し、得られたデータのみから建物の振動特性等を探り、構造諸量を同定するプロセスを構築することにある (Fig.2)。本プロセスによれば、耐震診断業務において、図面からデータを拾い、計算用構造モデルにインプットするなどの作業を短縮し、また、図面等の資料が得られない場合でも既存建物の耐震性を診断できる利点がある。

原稿受付 2012年3月24日

発行 2012年7月26日

Copyright © 2012 Hosei University

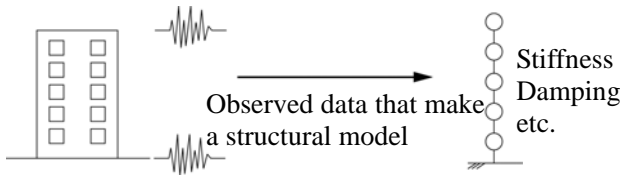


Fig.2 Identification method

2. 同定モデルの理論的考察

2.1 多質点せん断モデル

建物に地震動が加わる時の振動方程式は以下のよう
に表せる^{[1][2]}.

$$[M]\{\ddot{x}_j\} + [C]\{\dot{x}_j\} + [K]\{x_j\} = -[M]\{\ddot{x}_0\} \quad (1)$$

$[M], [C], [K]$: Mass, Damping, Stiffness matrices

$\{x_j\}$: Displacement vector in time(layer j)

$\{\ddot{x}_0\}$: Acceleration vector in time(ground)

ここで、地震動の変位が周期的に変化する時間 t
の関数であるとする以下のように表せる.

$$x_0 = x_0 e^{i\omega t}, \quad \dot{x}_0 = x_0 i\omega e^{i\omega t}, \quad \ddot{x}_0 = -x_0 \omega^2 e^{i\omega t} \quad (2)$$

同様に建物の変位は次のように表せる.

$$x_j = x_j e^{i\omega t}, \quad \dot{x}_j = x_j i\omega e^{i\omega t}, \quad \ddot{x}_j = -x_j \omega^2 e^{i\omega t} \quad (3)$$

これらを式(1)に代入し、整理すると

$$(-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K])\{x_j\} e^{i\omega t} = \omega^2 [M]\{x_0\} e^{i\omega t} \quad (4)$$

$$\{x_j\} = [-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]]^{-1} [M]\{1\} x_0 (\omega^2) \quad (5)$$

$$\left\{ \frac{x_j}{x_0} \right\} = [-\omega^2 [M] + i\omega [C] + [K]]^{-1} [M]\{1\} \omega^2 \quad (6)$$

上式で各要素の絶対値を取ったものを下式とする.

$$\left\{ \left| \frac{x_j}{x_0} \right| \right\} = \{h(\omega)\} \quad (7)$$

式(6)は各階の相対応答倍率を表す. 本研究では各階
での絶対変位を扱うこととし、次のように書き換え
る.

$$\left\{ \frac{X_j}{x_0} \right\} = \left\{ \left| \frac{x_j + x_0}{x_0} \right| \right\} = \{h(\omega) + 1\} = \{H(\omega)\} \quad (8)$$

X_j : Absolute displacement

$\{H(\omega)\}$: Amplification ratio

本研究では、式(8)を多質点せん断モデルの同定に用

いる目標関数とする.

2.2 3自由度1軸モデル

定式化は多質点せん断モデルと同様に行う.

$$[\bar{M}]\{\ddot{\bar{X}}\} + [\bar{C}]\{\dot{\bar{X}}\} + [\bar{K}]\{\bar{X}\} = -[\bar{M}]\{\ddot{\bar{X}}_0\} \quad (9)$$

$$\{\bar{X}\} = \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ \Theta \end{Bmatrix}, \quad \{\bar{X}_0\} = \begin{Bmatrix} \{\ddot{x}_0\} \\ \{\ddot{y}_0\} \\ \{0\} \end{Bmatrix}, \quad [\bar{M}] = \begin{bmatrix} [M_x] & 0 & 0 \\ 0 & [M_y] & 0 \\ 0 & 0 & [I] \end{bmatrix}$$

$$, [\bar{C}] = \begin{bmatrix} [C_x] & 0 & 0 \\ 0 & [C_y] & 0 \\ 0 & 0 & [C_\theta] \end{bmatrix}, \quad [\bar{K}] = \begin{bmatrix} [K_x] & 0 & 0 \\ 0 & [K_y] & 0 \\ 0 & 0 & [K_\theta] \end{bmatrix}$$

ここで、 $X Y \Theta$ は X 方向、 Y 方向変位とねじれ角
である.

$$\left\{ \frac{\bar{X}}{\bar{X}_0} \right\} = [-\omega^2 [\bar{M}] + i\omega [\bar{C}] + [\bar{K}]]^{-1} [\bar{M}]\{1\} \omega^2 \quad (10)$$

この各要素の絶対値をとり

$$\left\{ \left| \frac{x_j}{x_0} \right| \right\} = \{h(\omega)\} \quad (11)$$

式(11)は各階の相対応答倍率を表す. 本研究では各
階での絶対変位を扱うこととし、次のように書き換
える.

$$\left\{ \frac{X_j}{x_0} \right\} = \left\{ \left| \frac{x_j + x_0}{x_0} \right| \right\} = \{h(\omega) + 1\} = \{H(\omega)\} \quad (12)$$

式(12)は各層の絶対増幅率応答倍率を表し、これ
を本研究では3自由度1軸モデルの同定に用いる目
標関数とする.

3. 遺伝的アルゴリズムによる推定

本論文は推定法として遺伝的アルゴリズムを採用
する.

(1)BIT・・・初期設定

世代数, 個体数, ビット数の設定

(2)INIT・・・初期集団の発生

パラメータの乱数を発生させる

(3)PTYPE・・・パラメータの設定

2進コードから10進数への変更

(7)PURPO・・・適応度の評価

各個体に適応度を与える

(9)ROUL・・・ルーレット戦略

適応度に比例した割合で個体を選択

(10)CROS・・・交叉, エリート戦略

染色体を組み替えて子を作る

(11)MUT・・・突然変異

遺伝子を一定の確率で変化させる

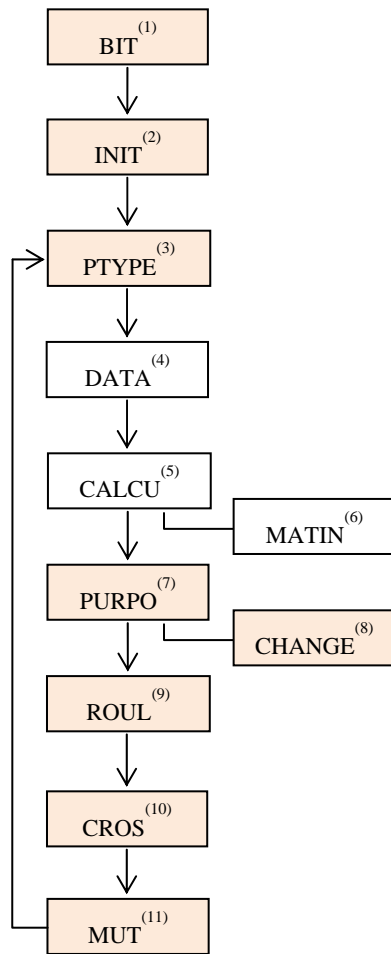


Fig. 3 Identification process by GA

本論文では、同定に用いる最適化手法として遺伝的アルゴリズム (GA) を採用する. フローチャートを Fig.3 に示す.

4. 模擬モデル同定解析

実際に扱う建物の観測データには様々な雑音が含まれており、複雑な波形を示している. そこで、直接実際の建物を解析する前に単純な模擬観測モデルを用いて同定手法を検討する.

4.1 評価関数

同定は、目標関数とモデル応答関数の差を評価関数として、これを最小化することによってなされる^[3].

$$\varepsilon_{ji} = \tilde{h}_j(\omega_i) - h_j(\omega_i) \tag{13}$$

$$\Pi_j = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ji} = \sum_{i=1}^n |\tilde{h}_j(\omega_i) - h_j(\omega_i)| \tag{14}$$

(j = 1, 2, ..., m)

$h_j(\omega_i)$: Amplification ratio(observation)

$\tilde{h}_j(\omega_i)$: Amplification ratio(analysis)

Π_j : Discriminant

ここで、式(14)は同定に用いる評価関数である.

4.2 模擬解析モデルに対する雑音

実際の応答倍率は様々な雑音が入っており、滑らかなグラフにならない. そこで、模擬観測モデルの応答倍率に雑音(振幅をランダムに-30%~+30%変化)を入れ、同定を行った.

$$\{H(\omega)\}^* = N \cdot \{H(\omega)\} \tag{15}$$

$\{H(\omega)\}^*$: noise included function

$\{H(\omega)\}$: function without noise

N : noise's coefficient (-30%~+30%)

4.3 模擬モデル解析結果

解析モデルを Fig.4 に示す. 遺伝的アルゴリズムに用いる諸量は Table 1 に記載する.

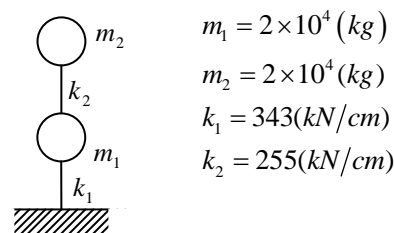


Fig.4 Model 2 mass points

Table 1 Analytical data

Number of generation	1000
Number of individual	10
Number of bit	16
Matrix size	2
Each mass(kg)	2×10^4
Damping factor	0.05
Number of frequency	200
Step size of frequency	0.1

4.3.1 剛性パラメータ型

式(16)のように、剛性値を個体数分ランダムに発生させることにより、各質点の剛性値を追い込む。図面のない建物でも適用できるが探索範囲が大きい為、解が収束しづらいという欠点がある。結果を Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7, Table 2 に示す。

$$parameter: k_{xi}, k_{yi}, k_{\theta i} \quad (i = 1, n) \quad (16)$$

a) 応答倍率グラフ

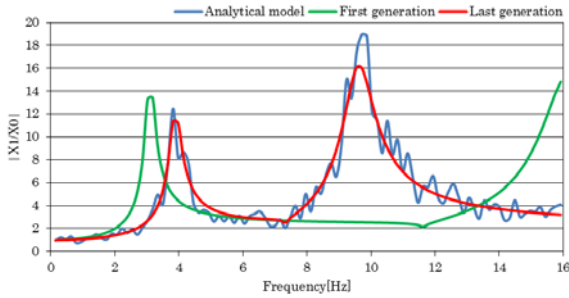


Fig.5 Comparison of spectra (1000th generation X_1/X_0)

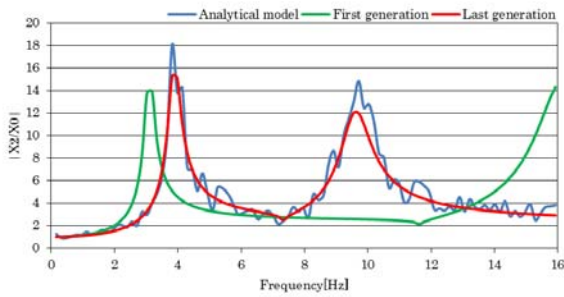


Fig.6 Comparison of spectra (1000th generation X_2/X_0)

b) 適合率

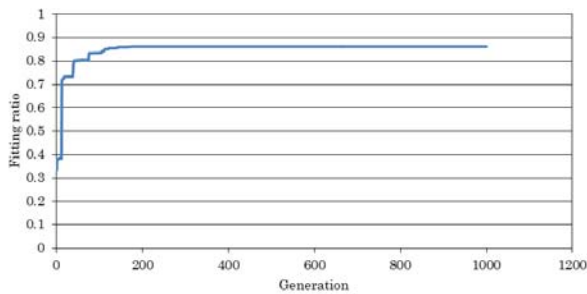


Fig.7 Changes of fitting ratio (1000th generation)

c) 剛性の比較

Table 2 Rigidity of each story

	k_1	k_2
Analytical model(kN/cm)	343.0	255.0
Identification value(kN/cm)	344.8	249.9

4.3.2 係数つきパラメータ型

剛性値が既知の場合、式(17)のように係数 α, β, γ を個体数分ランダムに発生させ、剛性に掛け合わせるにより、各質点の係数と実際の剛性値を追い込む。図面が存在することが前提となるが、解が収束しやすく、建物が劣化状況を知ることができる。結果を Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Table 3 に示す。

$$Parameter: \alpha_i, \beta_i, \gamma_i \quad (i = 1, n) \quad \alpha_i k_{xi}, \beta_i k_{yi}, \gamma_i k_{\theta i} \quad (17)$$

a) 応答倍率グラフ

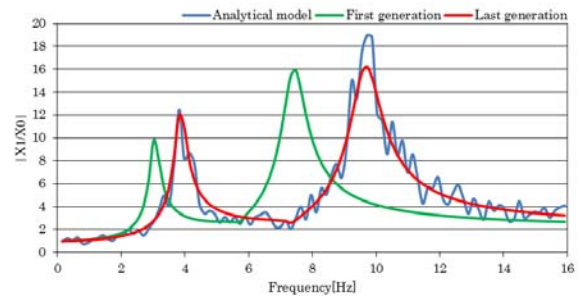


Fig.8 Comparison of spectra (1000th generation X_1/X_0)

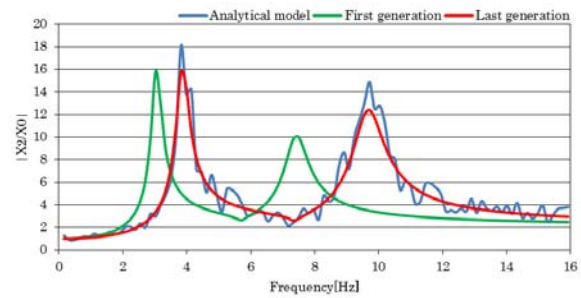


Fig.9 Comparison of spectra (1000th generation X_2/X_0)

b) 適合率

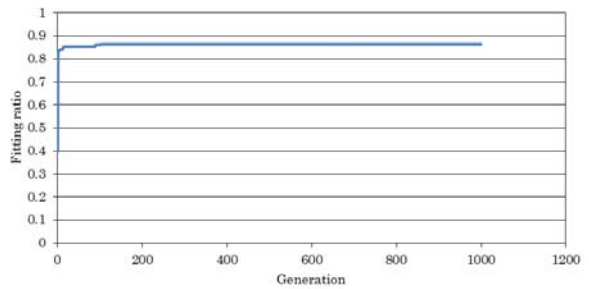


Fig.10 Changes of fitting ratio (1000th generation)

c) 剛性の比較

Table 3 Rigidity of each story

	k_1	k_2
Analytical model(kN/cm)	343.0	255.0
Identification value(kN/cm)	331.3	261.1
coefficient	0.96	1.02

5. 観測値同定解析

5.1 対象建物

本論で同定対象とする建物は法政大学市ヶ谷キャンパス 58 年館である。58 年館は竣工から半世紀以上経過し、近年建替えの計画も出ている。その理由の一つは、耐震診断により指摘された強度不足である。しかしながら、階により天井高（階高）や壁の配置が異なり、一概に建物全体の強度不足とは言えず、各階に於いて強度判定を行い、それに基づいて的確に補強することも一つの解決策といえる。本研究では、その足がかりを得るため、中庭側に隣接した低層棟（Photo 1）を対象に検討を試みる。



Photo 1 The exterior of the building for observation

5.2 常時微動観測

常時微動は 19 世紀末頃にはすでに知られていたが、当時は地震観測時に測定されるノイズに過ぎなかった。しかし、後の研究で常時微動から地盤や建物の振動特性（剛性、減衰特性など）を抽出することができるようになった^[4]。



Photo 2 Three Axis Vibrograph

実測は建物の変位・速度・加速度が時間軸により観測される（Photo 2）。観測波は、様々な周期をも

った調和波の重合である。これを高速フーリエ変換 (FFT) によって周波数領域の情報に変換し、各階の周波数変位応答関数を得る。本論で同定に用いる目標関数はこの各階変位を地動で割った変位応答倍率である。

5.3 スペクトルの平滑化

スペクトルの平滑化にはパルゼンウィンドウ（バンド幅 0.4Hz）を採用した^[5]。平滑化は観測データから一般的な特性を把握するのに有効である。Fig.11 は式(18)で平滑化処理を行ったスペクトルである。

$$W(f) = cu \left(\frac{\sin \frac{2\pi uf}{n}}{\frac{2\pi uf}{n}} \right)^n \quad n = 1, 2, 4 \quad (18)$$

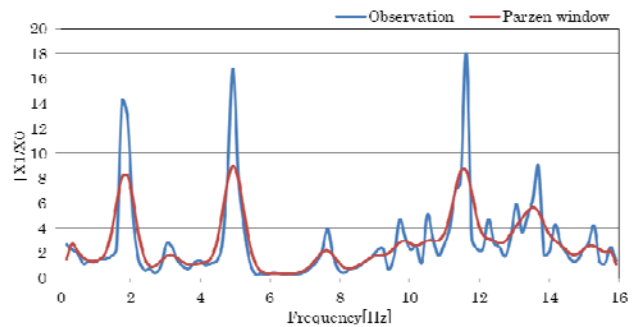


Fig.11 The effect of spectral smoothing (parzen window)

5.4 観測値解析結果

本解析では多質点せん断モデルの他に 3 自由度 1 軸モデルを使用した。解析前、既知の建物データは Fig.12 に示す通りである。遺伝的アルゴリズムに用いる諸量は Table 4 に記載する。

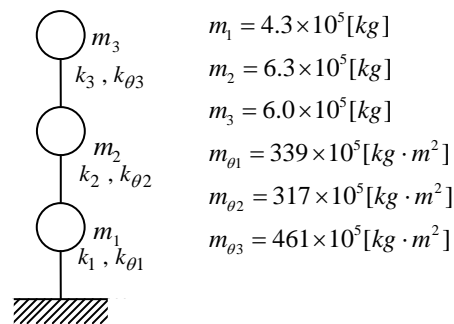


Fig.12 Model 3 mass point

Table 4 Analytical data

Number of generation	1000
Number of individual	10
Number of bit	16
Matrix size	3
Each mass(kg)	4.3×10^5 6.3×10^5 6.0×10^5
Damping factor	0.05
Number of frequency	200
Step size of frequency	0.1

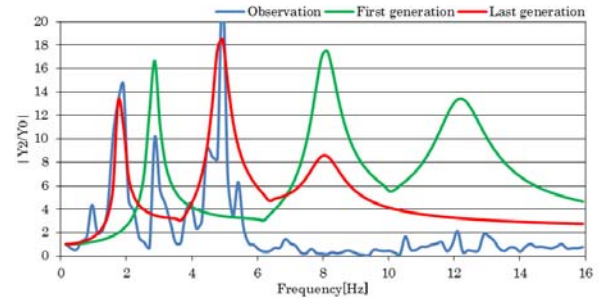


Fig.16 Comparison of spectra(1000th generation Y_2/Y_0)

5.4.1 観測値スペクトルによる解析

結果を Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15, Table 5 に示す。

a)応答倍率グラフ

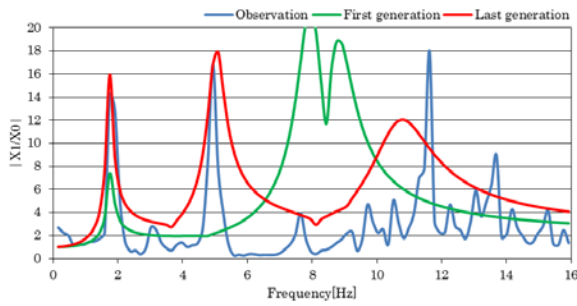


Fig.13 Comparison of spectra(1000th generation X_1/X_0)

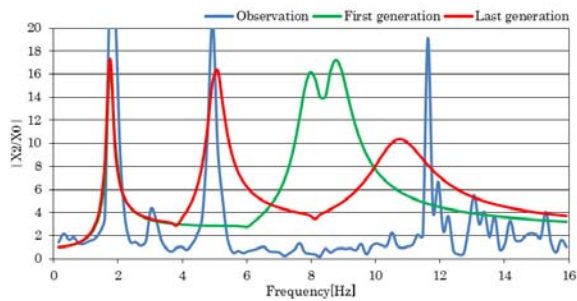


Fig.14 Comparison of spectra(1000th generation X_2/X_0)

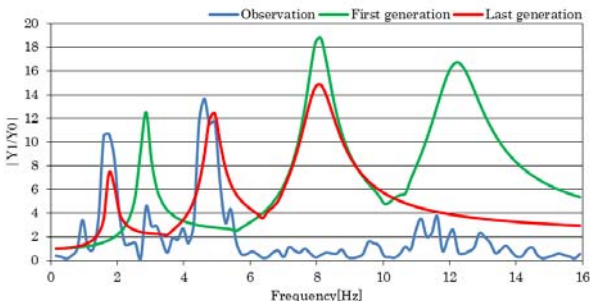


Fig.15 Comparison of spectra(1000th generation Y_1/Y_0)

b)適合率

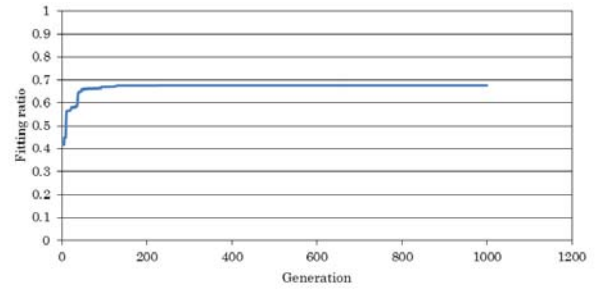


Fig.17 Changes of fitting ratio (1000th generation)

c)剛性の比較

Table 5 Comparison of Identification and theoretical result

		k_1	k_2	k_3
Theoretical result(kN/cm)	X	4913.0	4006.0	1055.0
	Y	4814.0	3107.0	879.0
Identification value(kN/cm)	X	2499.8	9999.5	3508.3
	Y	7614.5	2659.6	2446.3

6. 結論

- 1) 模擬モデル同定解析では大変良好な結果が得られるため、本研究で示したモデル化、評価関数、最適化手法は妥当であると判断できる。
- 2) 観測値同定解析については誤差もあり現段階では完全な同定プロセスの構築ができていないとは言えない。しかし、スペクトルの平滑化やアンサンブル平均など、観測値の加工処理を併用することで改良は可能である。

参考文献

- [1] 戸川隼人著：有限要素法による振動解析，サイエンス社，1981.
- [2] 柴田明德著：最新耐震構造解析 第2版，森北出版株式会社，1981.
- [3] 秋元一成，吉田長行：最適化手法を用いた建物の同定問題，法政大学情報メディア教育研究センター研究報告，Vol.24，2011.
- [4] 大崎順彦著：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版社，1994.
- [5] 高橋健太郎：遺伝的アルゴリズムによる地盤の同定，広島大学大学院工学研究科修士論文，1999.

