各層を単位とするサブシステムの同定に基づく剛性のヘルスマニタリング

STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF STORY STIFFNESS BASED ON IDENTIFICATION OF SUBSYSTEM REPRESENTING SPECIFIC STORY OF A BUILDING

仁田佳宏*, 西谷 章**

Yoshihiro NITTA and Akira NISHITANI

This paper presents a unique methodology of monitoring the reduction in story stiffness of a building integrating a filtering technique. In the proposed methodology, identification is conducted based on the subsystem representing the behavior of specific story. The natural frequencies identified with respect to these subsystems give useful information for evaluating the story stiffness. In estimating such a natural frequency of the subsystem, the subspace identification technique is utilized along with the measurement of only the right upper and lower stories' absolute accelerations. The validity of the proposed methodology is demonstrated by conducting computer simulations and scale-model experiments.

Keywords : *Structural health monitoring, System identification, Story stiffness, Subspace identification, Acceleration measurement*
構造ヘルスマニタリング、システム同定、層剛性、部分空間同定法、加速度計測

1. はじめに

計測制御技術やコンピュータ技術の発展とともに、建築構造物におけるシステム同定は、建築構造物の動特性把握のみならず制震(振)構造物の性能評価や構造ヘルスマニタリングなどに用いられ、その応用範囲が広がっている。特にシステム同定の構造ヘルスマニタリングへの応用は、ノースリッジ地震や兵庫県南部地震を契機に、損傷した構造物の安全性評価や損傷箇所の特定、損傷程度の把握を行うための有効な手段として、重要性が増大している。

一般的に構造ヘルスマニタリングには、① 損傷有無の把握、② 損傷箇所の特定、③ 損傷程度の評価、④ 損傷した構造物の性能評価の4つの段階が存在する¹⁻⁴⁾。既往の手法は、損傷有無の把握、損傷箇所の特定に重点をおいたものが多く、定量的な建築構造物のヘルスマニタリングを行うためには、更なる研究が必要とされている。

構造ヘルスマニタリングの手法としては、加速度応答の共分散からモード特性を求めるもの^{5,6)}をはじめとする、モード特性を同定するもの⁷⁻⁹⁾と、層剛性などの物理特性を同定するもの¹⁰⁻¹²⁾の大きく2つがある。モード特性を同定して用いる手法は、必ずしも全層の応答計測を行わなくても、損傷の有無を把握できる。しかし、より詳細な構造ヘルスマニタリングである損傷箇所の特定や損傷程度の評価などを行うためには、全層の同期をかけた応答計測もしくは高次モードまでの同定が必要となる。さらに、層剛性などを評価す

るためには、同定したモード特性から最小2乗法などを用いて物理特性を求める必要があるものが多い。一方、物理特性を直接同定して用いる手法は、そのまま層ごとの損傷の評価に結びつけることができる。しかし、全層もしくは構造ヘルスマニタリングの対象層より上層の同期された応答計測を必要としたり、上層から順に構造ヘルスマニタリングする必要があるといった制約があり、利便性に欠ける手法も少なくない。全層の同期した応答を計測することなく、各層独立に、物理特性を直接同定し、構造ヘルスマニタリングを行うことができれば、より簡便に多くの構造物に構造ヘルスマニタリングを適用できるようになると考えられる。このような手法の一つとして、対象層と上下層の加速度応答をフーリエ変換し、周波数領域上で同定を行い、同定値の平均値もしくは振動数ゼロの極限值により構造ヘルスマニタリングを行う手法^{11,12)}が提案されている。ただし、これらの手法では、入力周波数特性が同定結果に影響する場合があるため、入力周波数特性を考慮して同定を行う必要がある。

そこで本研究では、対象層とその上下層の加速度応答計測のみを用いた、時間領域での層剛性の構造ヘルスマニタリング手法を提案する。ただし、本研究の構造ヘルスマニタリング対象は、多くの既往の研究と同様に、せん断型構造モデルとして表すことのできる構造物の柱損傷とする。提案手法は、既往の手法の多くと異なり、全

* 早稲田大学理工学部建築学科 専任助手・博士(工学)
** 早稲田大学理工学部建築学科 教授・Ph. D.・工博

Research Assoc., Dept. of Architecture, Waseda University, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Waseda University, Ph. D., Dr. Eng.

層の応答を同期して観測する必要も、上層から順番に同定する必要もない。本論文では、まず各層ごとにその層の特性を表すサブシステムを定義し、つぎにこのサブシステムの同定結果を用いた構造ヘルスモニタリング手法を示す。本手法は、各層ごとにその層の特性を表すサブシステムの固有振動数を同定し、損傷発生前後の同定した固有振動数を比較することで、層剛性の剛性低下率を把握するため、各層独立に層剛性の構造ヘルスモニタリングを行うことが可能である。提案手法の有効性は、数値解析と小型構造物模型を用いた実験により確認する。

2. 構造ヘルスモニタリングの基本概念

N 層せん断型構造物の i 層についての運動方程式を、 $(i-1)$ 層を仮想的に地表面とみなして、通常とは少し違った次のような方程式で表す。

$$m_i \ddot{d}_i + c_i \dot{d}_i + k_i d_i = -m_i (\ddot{x}_{i-1} + \ddot{x}_g) + c_{i+1} \dot{d}_{i+1} + k_{i+1} d_{i+1} \quad (1)$$

ただし、 m_i は i 層の質量、 c_i は i 層の減衰、 k_i は i 層の剛性、 d_i は i 層の層間変位、 x_i は i 層の構造物の地表面に対する相対変位、 $\ddot{x}_g$ は地表面加速度である。式 (1) において、 $\ddot{x}_{i-1} + \ddot{x}_g$ を地表面加速度、 $c_{i+1} \dot{d}_{i+1}$ と $k_{i+1} d_{i+1}$ を i 層を表す質点に加わる入力とみなせば、式 (1) は i 層のみを表すサブシステムの運動方程式となる。式 (1) の両辺にラプラス演算子 s を用いた $s^2/(s+\alpha)^2$ (α はある実数) を乗じ、ラプラス演算子 s が微分を表すことを考慮すると¹³⁻¹⁵⁾、

$$m_i \frac{s^2 \ddot{d}_i}{(s+\alpha)^2} + c_i \frac{s^2 \dot{d}_i}{(s+\alpha)^2} + k_i \frac{s^2 d_i}{(s+\alpha)^2} = -m_i \frac{s^2 (\ddot{x}_{i-1} + \ddot{x}_g)}{(s+\alpha)^2} + c_{i+1} \frac{s \dot{d}_{i+1}}{(s+\alpha)^2} + k_{i+1} \frac{\ddot{d}_{i+1}}{(s+\alpha)^2} \quad (2)$$

のようになり、質点に加わる入力をすべて加速度で表すことができる。式 (2) において、 $s^2/(s+\alpha)^2$ はハイパスフィルタを、 $s/(s+\alpha)^2$ は、ある一つの振動数にゲインのピークがある積分フィルタを、 $1/(s+\alpha)^2$ は 2 階の積分の効果を持つローパスフィルタを構成している^{14, 15)}。これら 3 種類のフィルタは、状態空間表現を用いることで、以下のように時間領域上で表される。

$s^2/(s+\alpha)^2$ を、状態空間表現で表すと、

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_{f1} \\ \dot{\xi}_{f2} \\ \dot{\xi}_{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha & 0 & 0 \\ 0 & -2\alpha & -\alpha^2 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_{f1} \\ \xi_{f2} \\ \xi_{f2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\alpha \\ \alpha^2 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (3)$$

$$x_f = u - \xi_{f1} + \xi_{f2} \quad (4)$$

ただし、 x_f はフィルタ出力を、 u はフィルタ入力を表す。同様にして、 $s/(s+\alpha)^2$ は

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_{f1} \\ \dot{\xi}_{f2} \\ \dot{\xi}_{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha & 0 & 0 \\ 0 & -2\alpha & -\alpha^2 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_{f1} \\ \xi_{f2} \\ \xi_{f2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (5)$$

$$x_f = \xi_{f1} - \xi_{f2} \quad (6)$$

$1/(s+\alpha)^2$ は、

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_f \\ \dot{x}_f \\ x_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\alpha & -\alpha^2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_f \\ x_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (7)$$

と表せる。

i 層の絶対加速度応答を出力 y_i として、式 (2) を状態空間表現で表すと

$$\dot{X}_i = A_i X_i + B_i U_i \quad (8)$$

$$y_i = C_i X_i + D_i U_i \quad (9)$$

ただし、

$$A_i = \begin{bmatrix} -\frac{c_i}{m_i} & -\frac{k_i}{m_i} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} -1 & \frac{c_{i+1}}{m_i} & \frac{k_{i+1}}{m_i} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C_i = \begin{bmatrix} -\frac{c_i}{m_i} & -\frac{k_i}{m_i} \end{bmatrix}, \quad D_i = \begin{bmatrix} 0 & \frac{c_{i+1}}{m_i} & \frac{k_{i+1}}{m_i} \end{bmatrix},$$

$$X_i = \begin{bmatrix} \dot{x}_{fi} & x_{fi} \end{bmatrix}^T, \quad U_i = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{gi} & u_{vi} & u_{di} \end{bmatrix}^T,$$

$$y_i = \frac{s^2 \ddot{d}_i}{(s+\alpha)^2}, \quad \dot{x}_{fi} = \frac{s^2 \dot{d}_i}{(s+\alpha)^2}, \quad x_{fi} = \frac{s^2 d_i}{(s+\alpha)^2},$$

$$\ddot{x}_{gi} = \frac{s^2 (\ddot{x}_{i-1} + \ddot{x}_g)}{(s+\alpha)^2}, \quad u_{vi} = \frac{s \ddot{d}_{i+1}}{(s+\alpha)^2}, \quad u_{di} = \frac{\ddot{d}_{i+1}}{(s+\alpha)^2}$$

ここで、式 (8) で表されるサブシステムの固有振動数 ω_i と i 層の層剛性 k_i 、 i 層の質量 m_i の間には、次の関係が成り立つ。

$$\omega_i^2 = \frac{k_i}{m_i} \quad (10)$$

損傷発生前後の質量の変動は微小と仮定すると、式 (10) より損傷発生前後のサブシステムの ω_i^2 を比較することで、層剛性の構造ヘルスモニタリングが可能となる。以後、本論文では、式 (10) のサブシステムの ω_i^2 を「層剛性の評価値」と呼ぶこととする。サブシステムの固有振動数 ω_i は、構造ヘルスモニタリング対象層とその上下層の絶対加速度応答を計測して、部分空間同定法の一つである MOESP 法 (MIMO Output-Error State Space Model Identification) を用いて同定する¹⁶⁻²⁰⁾。以下に、MOESP 法による同定のアルゴリズムを示す。アルゴリズムは、次の①-⑤からなる。

- ① MOESP 法では、まず入力と出力についての、ブロック行 p 、ブロック列 q のブロックハンケル行列^{21, 22)}からなる次のような行列 H を作成する。

$$H = \begin{bmatrix} U_i(0) & U_i(1) & \cdots & U_i(q-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ U_i(p-1) & U_i(p) & \cdots & U_i(q+p-2) \\ y_i(0) & y_i(1) & \cdots & y_i(q-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_i(p-1) & y_i(p) & \cdots & y_i(q+p-2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで、 $U_i(j)$ は時刻 $j \times \Delta t$ における入力、 $y_i(j)$ は時刻 $j \times \Delta t$ における出力である。ただし、 Δt はサンプリング時間間隔を表す。

- ② 式 (11) の行列 H を RQ 分解²³⁾する。

$$H = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \end{bmatrix} \quad (12)$$

ただし、 R_{11} は $3p$ 行 $3p$ 列の下三角行列を、 R_{22} は p 行 p 列の下三角行列を表す。

- ③ 式 (12) の下三角行列 R_{22} を特異値分解²⁴⁾する。

$$R_{22} = [S_1 \quad S_2] \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} \quad (13)$$

ただし、 Σ_1 は n 個の特異値が、 Σ_2 は $(p-n)$ 個の固有値がそれぞれ値の大きなものから順に対角にならんだ行列であり、次数 n は特異値の大きさにより、各同定対象ごとに決定する。

- ④ 行列 S_1 から、連続系システム行列 A_i が離散化された行列 A_{di} を下式により求める。

$$A_{di} = S_1(1:(p-1), 1:n)^+ S_1(2:p, 1:n) \quad (14)$$

ただし、 $S_1(1:(p-1), 1:n)$ は S_1 の最初の $(p-1)$ 行より構成される行列、 $S_1(2:p, 1:n)$ は S_1 の最後の $(p-1)$ 行から構成される行列であり、 $^+$ は擬似逆行列を表す。

- ⑤ 離散系システム行列 A_{di} の固有値 $\hat{\lambda}$ を、 $j = \sqrt{-1}$ として、

$$\hat{\lambda} = a + jb \quad (15)$$

とおくと、次式のように固有振動数 ω_i が求まる²⁰⁾。

$$\omega_i = \sqrt{\left\{ \frac{1}{2\Delta t} \ln(a^2 + b^2) \right\}^2 + \left\{ \frac{1}{\Delta t} \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \right\}^2} \quad (16)$$

3. 数値解析による検討

提案する手法の妥当性を検討するために、多層構造物モデルを対象とした数値解析を行う。多層構造物モデルは、表 1 に示す 10 層事務所ビルを想定した、10 自由度のせん断型構造物モデルとする。構造物の総重量は約 10,000 t とし、1 次固有振動数を 0.83 Hz、2 次固有振動数を 2.08 Hz、3 次固有振動数を 3.31 Hz とする。減衰は、構造ヘルスモニタリングに用いる入出力データが加速度であることから、高次モードの影響も含むように、全てのモードについて、減衰比が一律 0.02 となるように設定する。損傷した構造物モデルとして、10 層と 1 層の剛性を 0.9 倍にしたモデル（以後、モデル D1 と表記）と 6 層、4 層の剛性を 0.8 倍に、5 層の剛性を 0.9 倍にしたモデル（以後、モデル D2 と表記）の 2 種類を想定する。入力波はバンドリミテッドホワイトノイズとし、無損傷構造物モデル（以後、モデル ND と表記）と損傷構造物モデルで異なる波形を用いる。入出力データは、常に構造物は振動していることから、サンプリング時間間隔 $\Delta t = 0.005$ 秒で、加振 5 秒後以降の 25 秒間の各層絶対加速度応答および地表面加速度とする。またフィルタの状態量の初期値はゼロに、係数 α は 0.1 に設定した。

本手法により同定した無損傷構造物モデル ND と損傷構造物モデル D1、D2 それぞれの式 (10) で表される層剛性の評価値を表 2 に

表 1 対象構造物モデル

層	質量 [t]	剛性 [kN/m]
1	1000	1.60×10^6
2	1000	1.51×10^6
3	1000	1.42×10^6
4	1000	1.30×10^6
5	1000	1.18×10^6
6	1000	1.04×10^6
7	1000	8.90×10^5
8	1000	7.20×10^5
9	1000	5.40×10^5
10	1000	3.20×10^5

表 2 推定した層剛性の評価値

層	層剛性の評価値 [1/s ²]		
	モデル ND	モデル D1	モデル D2
1	1599 (0.999*)	1439 (0.999*)	1599 (0.999*)
2	1522 (1.008*)	1526 (1.011*)	1523 (1.009*)
3	1418 (0.999*)	1419 (0.999*)	1418 (0.999*)
4	1301 (1.001*)	1303 (1.003*)	1041 (1.001*)
5	1180 (1.000*)	1181 (1.001*)	1064 (1.002*)
6	1039 (0.999*)	1040 (1.000*)	832 (1.000*)
7	890 (1.000*)	890 (1.000*)	891 (1.001*)
8	720 (1.000*)	720 (1.000*)	720 (1.000*)
9	540 (1.000*)	541 (1.001*)	540 (1.001*)
10	320 (1.001*)	288 (1.002*)	321 (1.002*)

* 推定値の真値に対する比

示す。また表中の括弧の値は、推定値の真値に対する比を表す。表 2 より、ほぼ正確に層剛性を評価できることが確認できる。モデル D1、D2 それぞれの層剛性の評価値をモデル ND の層剛性の評価値で割った層剛性の剛性低下率を表 3 に示す。表 3 より、損傷箇所および層剛性の剛性低下率が本手法により正確に評価できることが確認できる。

以上の数値解析より、本研究の手法により、加速度応答のみを用いて層剛性の構造ヘルスマonitoringが可能となることを確認した。

4. 実験による検証

提案する層剛性の構造ヘルスマonitoring手法の有効性を検証する目的で、図 1 に示すような 8 層の小型構造物模型を用いた振動台実験を行う。損傷後の剛性低下を表現するために、図 2 に示すような 2 層および 3 層の柱の総柱幅を 0.8 倍とする。そのため、理論的

な剛性低下率は 0.8 となる。入力波として、無損傷時に対して 5 波、損傷時に対して 5 波の合計 10 波の 60 cm/s^2 に基準化したバンドリミテッドホワイトノイズを用いる。入出力データは、数値解析と同様に、サンプリング時間間隔 $\Delta t = 0.005$ 秒で加振 5 秒後から 25 秒間計測した各層の絶対加速度応答と地表面加速度とし、フィルタの状態量の初期値はゼロ、係数 α は 0.1 とする。また実験では、観測ノイズの混入がさけられないことから、無損傷時、損傷時それぞれに対し 5 回ずつ層剛性の推定を行い、5 回の推定値の平均値を層剛性の構造ヘルスマonitoringに用いることとした。

本手法により同定した無損傷時と損傷時それぞれについての式 (10) の層剛性の評価値を表 4、5 に示す。表 4、5 より、入力によらず、多少の相違はあるものの、層剛性をほぼ一定の値に評価できていることが確認できる。また無損傷時と損傷時の層剛性の評価値の平均値より求めた各層の剛性低下率を、表 6 に示す。表 6 から、

表 3 層剛性の剛性低下率

層	モデル D1	モデル D2
1	0.900	1.000
2	1.003	1.001
3	1.000	1.000
4	1.002	0.801
5	1.001	0.902
6	1.000	0.800
7	1.000	1.001
8	1.000	1.001
9	1.001	1.000
10	0.900	1.001

図 1 小型構造物模型

図 2 柱の剛性低減部分

表 4 推定した層剛性の評価値 (無損傷時)

層	層剛性の評価値 $[1/s^2]$					平均値
	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	
1	1933	1942	1944	1932	1954	1941
2	1837	1773	1777	1758	1802	1789
3	2123	2070	2091	2069	2051	2081
4	2456	2476	2482	2472	2442	2466
5	1303	1221	1217	1212	1257	1242
6	1507	1560	1549	1758	1637	1602
7	1565	1737	1713	1634	1826	1695
8	1729	1729	1716	17331	1736	1728

表5 推定した層剛性の評価値(損傷時)

層	層剛性の評価値 $[1/s^2]$					平均値
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	
1	1986	2002	2023	2011	2007	2006
2	1500	1504	1501	1496	1539	1508
3	1755	1718	1694	1714	1697	1715
4	2450	2465	2494	2492	2497	2480
5	1198	1278	1204	1198	1260	1228
6	1542	1526	1783	1495	1514	1572
7	1634	1726	1816	1757	1540	1695
8	1728	1707	1737	1747	1744	1733

表6 層剛性の剛性低下率

層	損傷時
1	1.034
2	0.843
3	0.824
4	1.006
5	0.988
6	0.981
7	0.999
8	1.003

2層および3層が損傷層となり、本手法により正確な損傷層の特定が可能となることが確認できる。また、2層の層剛性の低下率が0.843、3層の層剛性の低下率が0.824となっており、2層および3層の層剛性がほぼ想定した剛性低下率と等しくなっており、本手法により層剛性の損傷度が把握できることが確認できる。

以上、観測ノイズの混入をさせられない実験においても、提案手法により、加速度応答のみを用いて層剛性の構造ヘルスマニタリングが可能となることを確認し、本手法の有効性を検証した。

5. まとめ

本研究では、簡便で精度の高い、加速度計測による層剛性の構造ヘルスマニタリング手法を提案し、その有効性を数値解析および小型構造物模型による振動台実験により示した。

提案手法は、対象層とその上下層の絶対加速度計測のみで、層剛性の剛性低下率を把握できるため、全層もしくは対象層より上部の全層の同期した応答計測を必要としない。また、各層独立に構造ヘルスマニタリングを行うため、対象層のみの構造ヘルスマニタリングが可能となる。そのため提案手法は、構造物全体を一括して構造ヘルスマニタリングする必要性も、上層から順に構造ヘルスマニタリングする必要性もなく、実用的な手法になりえる。

参考文献

1. 中村充, 安井謙: 微動測定に基づく地震被災鉄骨建物の損傷評価, 日本建築学会構造系論文集, No.517, pp.61-68, 1999.3

2. 篠崎祐三: 「微動測定に基づく地震被災鉄骨建物の損傷評価」に対する討論, 日本建築学会構造系論文集, No.535, pp.179-180, 2000.9
3. 中村充, 安井謙: 篠崎祐三氏の討論に対する回答, 日本建築学会構造系論文集, No.535, pp.180-181, 2000.9
4. S.W.Doebling, C.R.Farrar, M.B.Prime, D.W.Shevitz: Damage identification and health monitoring of structural and mechanical system from changes in their vibration characteristics: A literature review, *Los Alamos Report*, LA-13070-MS, 1996.5
5. 滝澤春男, 関弘義: 架構の塑性履歴応答結果に対するモード分解手法とその意義, 構造工学論文集, 日本建築学会, Vol.32B, pp.89-100, 1986.3
6. 滝澤春男: 梁崩壊型剛性架構の動的機構形成における定モード成分の抽出, 構造工学論文集, 日本建築学会, Vol.36B, pp.245-258, 1990.3
7. 濱本卓司, 近藤一平: 鉛直・水平方向探索を用いた偏心を有する多層建築物の二段階損傷検出, 日本建築学会構造系論文集, No.519, pp.21-28, 1999.5
8. 濱本卓司, 森田高市, 勅使川原正臣: 複数モードの固有振動数変化を用いた多層建築物の損傷検出, 日本建築学会構造系論文集, No.560, pp.93-100, 2002.10
9. 斉藤知生: システム同定による建築物の確率的損傷評価, 日本建築学会構造系論文集, No.557, pp.93-100, 2002.7
10. 吉本怜毅, 三田彰, 森田高市: 振動モードとセンサー特性を考慮した構造物の並列処理型損傷同定, 構造工学論文集, 日本建築学会, Vol.48B, pp.487-492, 2002.3
11. 中村充, 竹脇出, 安井謙, 上谷宏二: 限定された地震観測記録を用いた建築物の剛性と減衰の同時同定, 日本建築学会構造系論文集, No.528, pp.75-82, 2000.2
12. I.Takewaki, M.Nakamura: Stiffness-damping simultaneous identification using limited earthquake records, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.29, No.8, pp.1219-1238, 2000.8
13. 池田芳樹, 仁田佳宏: 一般化 Maxwell モデルの時間領域におけるシステム同定, 構造工学論文集, 日本建築学会, Vol.47B, pp.97-103, 2001.3
14. 仁田佳宏, 池田芳樹, 西谷章: Maxwell 要素が組み込まれた質点系モデルのオンライン同定, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東京), 構造I, pp.293-294, 2001.9
15. 仁田佳宏, 西谷章: Maxwell ダンパが組み込まれた質点系モデルのオンライン同定, 第2回ダンピングシンポジウム「ダンピング技術の新しい展開」講演論文集, 日本機械学会, pp.350-353, 2002.1
16. M.Verhaegen, P.Dewilde: Subspace model identification Part I. The output-error state-space model identification algorithm, *International Journal of Control*, Vol.56, No.5, pp.1187-1210, 1992.5
17. 片山徹: 部分空間法によるシステム同定—実現理論からの接近, システム制御情報, Vol.41, No.9, pp.380-387, 1997.9
18. 足立修一, 永田寛, 山口功, 木田隆, 関口毅: ETS-VI 軌道上同定実験データによる予測誤差法と部分空間法の比較, 計測自動制御学会論文誌, Vol.33, No.8, pp.805-811, 1997.8
19. 上林雅子, 三田彰: 部分空間法による制振構造物のシステム同定, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), B-2, pp.983-984, 2002.8
20. C.S.Huang, H.L.Lin: Modal identification of structures from ambient vibration, free vibration, and seismic response data via a subspace approach, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.30, No.12, pp.1857-1878, 2001.12
21. 片山徹: システム同定入門, 朝倉書店, 1994
22. L.Ljung: *System Identification: Theory for User, Second Edition*, Prentice Hall, 1999
23. 伊理正夫: 岩波講座 応用数学 線形代数I, 岩波書店, 1993

(2003年4月9日原稿受理, 2003年8月20日採用決定)