

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 18 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560259

研究課題名(和文)大規模複雑構造物に適用可能な外力同定を援用したモデルベース診断手法の開発

研究課題名(英文)Improvement of a model based diagnosis method using a force identification technique that can be applied for large structures

研究代表者

河村 庄造(KAWAMURA, Shozo)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00204777

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：機械・構造物の状態監視・診断は、持続可能な社会の構築のために非常に重要な技術である。異常診断においては、一般的には測定点数が多い方が診断精度は良いと考えられるが、センサー数を劇的に増加させることは現実的ではない。

本研究では、外力同定を援用したモデルベース診断手法において、モード解析を利用して仮想的に測定点を増やす方法を提案した。その方法は、実測された応答変化量を数学モデルに基づく応答変化量に変換してから、固有振動モードで展開する方法である。そして、単純なはり構造物に対し、提案手法が同定精度へ及ぼす影響を数値シミュレーションと実験で調査したところ、提案手法の有効性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：Machine condition monitoring and diagnosis have become increasingly important. It is generally considered that larger numbers of sensors will supply useful information for diagnosis, although the number of sensors is limited in actual applications. In this study, a method of virtual measurement at many points of the structure is proposed. Two methods are proposed. A method is based on the modal analysis using the measured displacements, in which the displacement of the overall structure is approximated using natural vibration modes whose number is the same as that of sensors. The other method is also based on the modal analysis, though the displacements used for the approximation are modified by the displacement ratio between the actual measurement and the simulated one. As the results, it was recognized that the proposed method based on the displacement ratio is useful for virtual measurements with small variance of identification result using the experimental data.

研究分野：工学

キーワード：異常診断 モード解析 逆問題 特異値分解 外力同定 モデル修正

### 1. 研究開始当初の背景

機械力学(振動工学)を援用する機械や構造物の異常診断は、学会、産業界において、また国際的にも国内的にも重要で注目されている分野である。

異常診断手法の一つの分野として、診断対象物の数学モデルに基づく「モデルベース診断」があり、研究代表者は既に独創的手法を提案している。

異常診断においては、一般的には測定点数が多い方が診断精度は良いが、センサー数を劇的に増加させることは現実的ではない。そのためセンサー数が比較的少ない場合でも、センサー数が多い場合の診断精度に近い診断結果が得られることが望まれている。

### 2. 研究の目的

- (1) センサー数が少ない場合に、仮想的に測定データを増加させるアイデアの構築
- (2) 提案した手法の妥当性を検証するため、単純なはり構造物を取り上げ、数値シミュレーションによって検討する。このとき、実験データを想定したノイズの混入方法に留意する。
- (3) 提案した手法の実機への適応性を検証するため、数値シミュレーションに相当する実験装置を構築し、実際に診断を行って検討する。
- (4) 研究の過程で必要な技術改良を行う。

### 3. 研究の方法

- (1) 仮想的に測定データを増加させるアイデアの構築

基本的にはモード解析をベースとするが、実際の異常診断を考えると、対象物の数学モデルが正確にわかっているわけではないので、注意が必要である。そのため、以下の項目を順に解決していく。

- ・正常状態における加振実験の結果から、最も妥当な数学モデルを構築すること。
- ・構築された数学モデルを固有値解析し、固有振動モードを導出すること。
- ・変位を少数のセンサーで測定することを想定し、そのデータを仮想的に増加させる方法を構築すること。

- (2) 数値シミュレーションによる検討

後の実験を想定し、両端自由支持はりの中央を加振することを考える。少数のセンサーを設置し、ランダム加振して正常状態の対象物の周波数応答関数を測定する。

次に、はりの一部に異常を発生させる。様々な異常が考えられるが、比較的簡単に実現できる局所的な質量付加を想定する。

数値シミュレーションでは、最初に設定した数学モデルに対して応答が正確に計算されるが、実際には数学モデルも実測データとのずれがあり、測定データにも誤差が入る。したがって数値シミュレーションの際に、計算で得られた正確な応答に混入させるノイズの設定が重要である。

### (3) 実験による検討

両端自由支持の均質一様はりを診断対象とする。導電型加振器とはりの間にロードセルを設置して加振力を測定し、はりに加速度計を貼付して加速度を測定する。

数値シミュレーションと同様、最初に正常状態での周波数応答関数を測定する。数学モデルを構築する際には、はりの材料特性や、加振器との接続部のモデル化が必要である。そのため、はりの質量を測定して密度を算出し、打撃試験による固有振動数に一致するようにヤング率を決める。その様にして数学モデルを構築した後で、実測データに一致するようにモデル修正を行う。具体的には加振器とはりの接合部の特性を修正する。

構築された数学モデルに基づき、提案した手法の検証を行う。初めに数学モデルから固有振動モードを計算する。次に、局所的に重りを取り付けた異常状態を意図的に作り出す。測定データを仮想的に増加させるために以下の二通りの方法を採用する。測定データを固有振動モードの重ね合わせで近似的に表現し、固有振動モードの重みを算出してはり全体の応答を再現する方法と、正常時の測定データと数学モデルから得られるデータの比率を計算し、その比率で異常時の測定データを修正した後で、はり全体の応答を再現する方法である。

診断結果は、異常発生位置の同定精度で評価する。

以上のようにして、提案手法の有効性を検証する。

### 4. 研究成果

- (1) 二種類の方法を提案する。このとき、数学モデルの固有値解析結果から、対象物の固有振動モードが得られているとする。

方法1：センサー数と同数の固有振動モードで、応答を近似的に表現する。変数は固有振動モードの重み係数であり、センサー数と同じなので、最小自乗法を用いて固有振動モードにかかる重み係数を同定できる。そして対象物全体の応答を少数の固有振動モードの重ね合わせで表現する。

方法2：正常時の実測データと数学モデルから計算できる応答データには差異があるので、両者の比率を求めておく。異常状態でもその比率は変わらないと仮定し、異常状態で実測された応答データに、あらかじめ求めておいた比率を乗じ、数学モデルに準拠した値に修正する。その後の扱いは方法1と同様である。

- (2) 数値シミュレーションにおいては、計算で求めた応答に、平均値が1.0で、適当な標準偏差を有する乱数を乗じた値を測定データとした。応答は4つのセンサーで測定することを想定し、4つの応答をそのまま用いて異常発生位置の診断を行った場合、提案手法を用いて仮想的に測定点数を増やして診断を行った場合の診断精度を比較した。

その結果，方法1，方法2とも，推定された異常発生位置の平均値はほとんど正解であったが，そのばらつきは方法1が大きく，方法2では，仮想的に測定点数を増やしてもばらつきは比較的小さいことがわかった．

以上の結果から，方法2で仮想的に測定点数を増やすことで，診断精度が向上する可能性があることがわかった．

(3) 実験においては，初めに実験装置を構築した．モデル図を図1に示す．正常状態で実測された4ヶ所の周波数応答関数を図2に示す．この周波数応答関数を基にして数学モデルを構築した．異常は，要素番号100の位置に重りを付加することで実現した．

最初に，実際にセンサーが配置されている4ヶ所の応答データから異常発生位置を同定した結果を図3に示す．ほぼ100番の位置に同定結果が集まっていることがわかる．付加重りの質量を変えた場合の平均値と標準偏差を表1に示す．この結果が，提案手法の診断精度を評価する場合の基準となる．

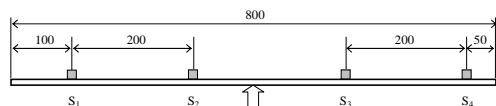


図1 診断対象の自由支持はり

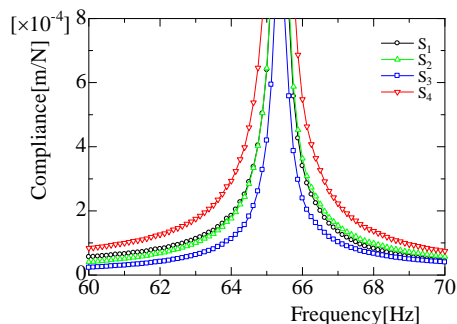


図2 正常時の周波数応答関数(実測)

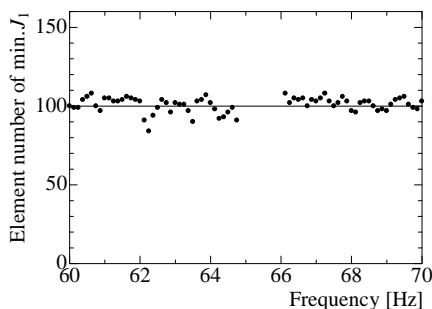
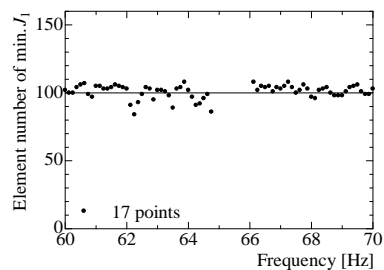


図3 異常発生位置の同定結果

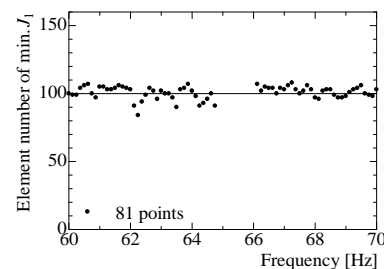
表1 同定結果の平均値と標準偏差

Additional mass	1.92 g	3.14 g	5.95 g
Mean value	98.42	100.92	101.27
Standard deviation	9.75	4.67	3.09

方法1と方法2を用いて仮想的に測定データを増加させて診断を行った結果を図4，5に示す．図4は方法1による結果，図5は方法2による結果であり，測定点数を4点から17点，81点に増加させている．

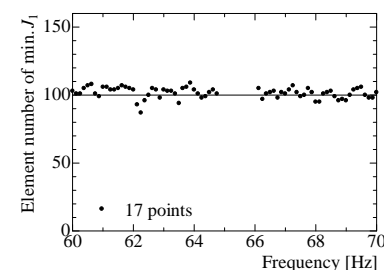


(a) 仮想的に17点で測定

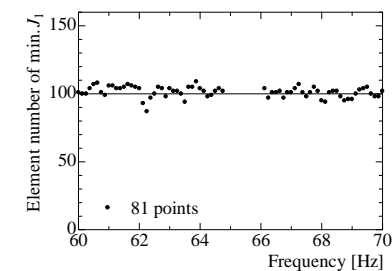


(b) 仮想的に81点で測定

図4 方法1による同定結果



(a) 仮想的に17点で測定



(b) 仮想的に81点で測定

図5 方法2による同定結果

これらの結果から，同定された異常発生位置の平均値と標準偏差を求めた結果を表2，3に示す．いずれの場合も，平均値はほぼ100番を示しており，平均値は正しく同定されることがわかる．しかし標準偏差を見ると，方法1の結果は，表1の，4つのセンサーのデータのみを用いる場合よりも大きく，実際に適用する際には，データのノイズの影響を大きく受ける可能性が示唆される．一方，方法

2の結果は、いずれの場合も標準偏差が小さくなっており、ノイズの影響を受けにくいことがわかる。

以上のことから、本研究で確立した手法を用いれば、少ない測定データから仮想的に測定データを増加させても、診断精度が向上することがわかった。なお本研究の手法は、正常状態の特性が、異常状態でも維持されることが前提であり、影響の大きな異常や、非線形性を生じる異常には適用できないと考えられる。しかし初期の異常には適用可能であり、実機に適用可能な有効な手法であると考えられる。

表2 同定結果の平均値と標準偏差(方法1)  
(a) 仮想的に17点で測定

Additional mass	1.92 g	3.14 g	5.95 g
Mean value	96.92	100.93	101.56
Standard deviation	12.01	4.96	3.16

(b) 仮想的に81点で測定

Additional mass	1.92 g	3.14 g	5.95 g
Mean value	97.38	100.80	101.24
Standard deviation	11.98	4.64	3.02

表3 同定結果の平均値と標準偏差(方法2)  
(a) 仮想的に17点で測定

Additional mass	1.92 g	3.14 g	5.95 g
Mean value	99.54	101.61	102.00
Standard deviation	6.74	3.98	2.18

(b) 仮想的に81点で測定

Additional mass	1.92 g	3.14 g	5.95 g
Mean value	100.27	101.32	101.70
Standard deviation	6.32	3.98	2.21

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

Shozo KAWAMURA, Yuki TATE, Hirofumi MINAMOTO, Improvement of a stepwise primary diagnosis method of a beam structure using a force identification technique (Proposition of virtual measurement), Bulletin of the JSME, Mechanical Engineering Journal, Vol.1, No.2, 2014.

[DOI: 10.1299/mej.2014dr0007]

〔学会発表〕(計2件)

河村庄造, 舘祐貴, 感本広文, 外力同定を援用したモデルベース診断手法の改良について(近似的に測定データを増加させた場合の診断精度への影響), 日本機械学会第11回評価・診断シンポジウム講演論文集(No.12-70), pp.26-30. 2012.12, 川崎.

河村庄造, 舘祐貴, 感本広文, 外力同定を援用したモデルベース診断手法の改良について(近似的に測定データを増加させる手法の提案), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2014 USB 論文集(No.14-17), 2014.8, 東京.

〔図書〕(計0件)

該当なし

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

該当なし

取得状況(計0件)

該当なし

〔その他〕

該当なし

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

河村庄造 (KAWAMURA SHOZO)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・

教授

研究者番号: 00204777

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし