

氏 名	増 田 新
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 乙 第 77 号
学位授与の日付	平成 11 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学 位 論 文 題 目	機械・構造物のヘルスマニタリングに関する研究
審 査 委 員	(主査) 教 授 山 本 鎮 男 教 授 中 岡 明 教 授 吉 田 靖 夫 助教授 曾 根 彰 京都大学 教 授 松 久 寛

論 文 内 容 の 要 旨

供用中の機械・構造物には、経年変化に伴って生じる材の劣化と振動外乱によって生じる疲労によって、損傷が蓄積する。したがって、機械・構造物の供用中の状態量を観測して損傷の程度を常時監視することは、破壊事故の防止、経済的なメンテナンス計画の立案のために重要な課題であり、ヘルスマニタリングと呼ばれている。

ヘルスマニタリングを行うためには、大別して次の二通りの方法がある。(第 1 章)

- (1) 機械・構造物の構成材料中に存在する欠陥の進展や部材の突発的破壊によって生じる異常信号の検出による方法。
- (2) 機械・構造物システムに対する入出力波形の観測値より、損傷によるシステムの動特性変化を同定する方法。

本論文では、まず上述の(1)の異常信号を雑音中から検出する手法に、ウェーブレット解析を用いている。SN 比が 0.2 程度の劣悪な環境下でも、有意な信号が検出できることを示している。(第 2 章)

異常信号の検出においては、一般的に狭帯域の共振型センサで観測を行うので、実際に生じている現象を知るには、センサで観測された波形からセンサ特性の影響を受ける前の真の波形を知る必要がある。これをディコンボリューションと呼び、ウェーブレット解析 (第 3 章) およびウェーブレットパケット解析 (第 4 章) を用いて行う方法を提案している。

次に、(2)のシステムの動特性変化を知るためには、まず損傷のない初期のシステム特性を知る必要がある。本論文では平板と梁の連成したシステムのモード特性を、境界要素法を用いて求める方法を明らかにした。(第 5 章)

次に、非定常な入力を受けるシステムの時間的な特性変化を、システムの入出力観測値からノンパラメトリックに同定する手法を、非定常スペクトル解析に基づいて構築している。(第 6 章、第 7 章、第 8 章) 第 9 章で応用を示し、第 10 章で結論を述べている。

以下に各章ごとの要旨を述べる。

第 1 章「序論」は、ヘルスマニタリングと呼ばれる技術について、その意義や必要性と共に、本研究に取り組むに至った動機について述べたものである。さらにこれまでの研究について触れ、本研究の目的と意義を明らかにしている。

第 I 部では、損傷に伴って発生する異常な信号に注目した損傷監視の方法について論じている。ここでは損傷に伴って発生する特別な異常信号を、さまざまな信号処理手法を用いて検出することによって損傷を監視するという立場から研究を行うものである。

第2章「加速度観測信号のウェーブレット変換に基づく損傷監視」では、動的荷重を受ける機械や構造物に生じる損傷を、加速度観測信号に含まれる不連続性をウェーブレット変換を用いて抽出することによって検出する手法について考察した。剛性などのパラメータの急激な変化が、構造物の応答観測値の不連続として観測されることを示し、不連続をウェーブレット解析によって抽出することにより、損傷を受けた時刻を検出することを提案した。

第3章と第4章は、損傷に伴う異常信号を正しく評価するために必要な信号処理に関する研究である。信号本来の波形を正しく評価するためには、観測された波形からセンサ特性の影響を取り除き、センサの特性の影響を受けて歪む前の真の波形を復元（ディコンボリューション）する必要がある。

第3章「離散ウェーブレット変換を用いた観測信号のディコンボリューション」では、離散ウェーブレット変換を用いてシステムをマルチスケール分解することによって、雑音除去性能の高い安定なディコンボリューション手法を構築した。さらに、本手法への適用に適した直交ウェーブレットを新たに生成した。

第4章「ウェーブレットパケット変換を用いた観測信号のディコンボリューション」では、第3章の離散ウェーブレット変換の代わりにウェーブレットパケット変換を用いたディコンボリューションを提案した。

第Ⅱ部では、損傷によるシステム特性の変化に注目した損傷監視の方法について論じている。ここでは損傷によってシステムに生じた特性変化を、システム同定の手法を用いて検出することによって損傷を監視するという立場から研究を行うものである。

第5章「境界要素法による構造物の初期動特性の解析」では、構造物の建設時における初期動特性を求めるための方法について論じた。構造物の建設時の振動モード特性を、構造物の形状や材質に関するデータから解析するための手段の一つとして、境界要素法を用いたモード解析手法について検討した。

第6章「時変伝達関数の同定によるシステムの動特性変化の監視」では、損傷によって動特性が変化するシステムを線形時変システムとしてモデル化し、同定問題の設定を行った。

第7章「時変伝達関数の同定手法：非定常スペクトル解析に基づく同定手法の基礎的検討」では、非定常確率過程を入力とする線形時変システムの時変伝達関数の同定手法について基礎的な検討を行い、システムの時変伝達関数を、入力の非定常スペクトルの推定、入力の非相関化前処理、前処理を施した入力と出力との相互非定常スペクトルの推定、の三段階を経て同定することを提案した。

第8章「時変伝達関数の同定手法：単一の試行データを用いた同定手法の構築」では、非定常確率過程を入力とする線形時変システムの時変伝達関数を、観測された一組の入出力データから同定するための手法について検討を行った。時変伝達関数の同定に必要な二種類の非定常スペクトルを推定するために、各時刻における局所的な非定常性の激しさに応じて決まる時変核関数を用いた時間周波数平滑化推定器を提案した。

第9章「時変伝達関数の同定手法の構造物損傷解析への応用」では、提案した時変伝達関数の同定法を、地震による構造物の損傷の解析に応用した。地震を受けた構造物の応答から構造物の周波数特性の推移を同定することを試み、シミュレーションおよび実構造物の応答データを用いた例により、損傷の進行する様子を抽出できることを示した。

第10章「結論」は本論文全体の結論であり、各章で得られた成果の総括を行った。

論文審査の結果の要旨

機械・構造物のヘルスマニタリングを実現するために、異常信号の検出にウェーブレット解析を用いたこと、センサ出力より入力を逆解析するのにウェーブレットおよびウェーブレットパケット解析を用いたことは、ウェーブレット解析の新しい活用の分野を開拓したことで、数理・工学上で意義がある。

板と梁からなる複雑な構造システムの初期動特性を解析する手法として、境界要素法を用いた解析を行ったことは、数理・工学上の価値がある。

また、地震時の機械・構造物の損傷を評価するために、非定常な入出力データからシステムの時変特性

を同定する手法を提案したことは、数理・工学上での貢献が大きい。

尚、本論文の内容は、以下に示す10編の論文として掲載（印刷中も含む）され、その内4編は申請者が筆頭著者である。

I. 本学位論文作成の基礎となった学術論文

[発表論文]

1. 増田 新、山本鎮男、曾根 彰、境界要素法による多スパン平板と曲げーねじりはりとの連成系固有振動解析、日本機械学会論文集（C編）、61巻590号、pp.3812-3819、1995.
2. 増田 新、山本鎮男、曾根 彰、離散ウェーブレット変換を用いた時系列信号のディコンボリューション手法、日本機械学会論文集（C編）、63巻605号、pp.105-112、1997.
3. 増田 新、山本鎮男、曾根 彰、ウェーブレット変換を用いた時系列信号のディコンボリューション（ウェーブレットパケットおよびしきい値処理の導入と最適化ウェーブレットの生成）、日本機械学会論文集（C編）、64巻621号、pp.1580-1587、1998.
4. 増田 新、山本鎮男、曾根 彰、線形時変システムのノンパラメトリック同定（第1報、非定常スペクトル解析に基づく同定手法の基礎的検討）、日本機械学会論文集（C編）、掲載決定.
5. 曾根 彰、山本鎮男、有馬幸蔵、増田 新、中岡 明、ウェーブレット変換を用いた機械・構造物のヘルスマonitoringシステム（正規直交ウェーブレットの生成と断続的異常信号の検出）、日本機械学会論文集（C編）、61巻586号、pp.2340-2346、1995.
6. Akira Sone, Shizuo Yamamoto, Akira Nakaoka and Arata Masuda, Health Monitoring System of Structures Based on Orthonormal Wavelet Transform, Proceedings of the ASME PV & P Conf., PVP-Vol.312, pp.161-167, 1995.
7. 曾根 彰、山本鎮男、増田 新、中岡 明、芦野隆一、出力のウェーブレット変換と印加入力および物理系の間の正則性（Daubechiesの正規直交ウェーブレットについて）、日本機械学会論文集（C編）、61巻589号、pp.3552-3558、1995.
8. 曾根 彰、山本鎮男、増田 新、中岡 明、芦野隆一、強震記録のウェーブレット解析による履歴復元力特性を有する建築物の累積損傷の推定、日本建築学会構造系論文集、第476号、pp.67-74、1995.
9. 曾根 彰、山本鎮男、増田 新、常時微動と強震記録のウェーブレット解析による構造物の動特性推定とその変化の推定、日本建築学会構造系論文集、第490号、pp.65-72、1996.
10. A. Al-khalidy, M. Noori, Z. Hou, R. Carmona, S. Yamamoto, A. Masuda and A. Sone, A Study of Health Monitoring Systems of Linear Structures Using Wavelet Analysis, Proceedings of the ASME PV & P Conf., PVP-Vol.347, pp.49-58, 1997.

[投稿中論文]

1. 増田新、山本鎮男、曾根彰、線形時変システムのノンパラメトリック同定（第2報、単一の試行データを用いた同定手法の構築）、日本機械学会論文集（C編）、投稿中.

II. その他の学術論文

1. 田中章三、山本鎮男、曾根 彰、増田 新、境界要素法によるガスー固体多層媒質を伝ばする音波解析（精度の検討）、日本機械学会論文集（C編）、59巻568号、pp.3852-3859、1993.
2. 田中章三、山本鎮男、曾根 彰、増田 新、境界要素法によるガスー固体多層媒質を伝ばする音波解析（エンクロージャによる制音効果に関する基礎的研究）、日本機械学会論文集（C編）、60巻576号、pp.2797-2804、1994.
3. 田中章三、山本鎮男、曾根 彰、増田 新、エンクロージャ開口部に装着する制音装置の効果に関する基礎的研究、日本機械学会論文集（C編）、60巻578号、pp.3364-3371、1994.

4. 夏 放鳴、山本鎮男、曾根 彰、増田 新、田中章三、境界要素法を用いたエンクロージャの内部-外部空間連成系の三次元音場解析、日本機械学会論文集 (C 編)、64 巻 621 号、pp.1634-1641、1998.
5. 田村雅巳、山本鎮男、曾根 彰、増田 新、一対の振動ジャイロスコープを用いた振動外力を受ける構造物の動曲げ歪み計測法の研究、日本建築学会構造系論文集、509 号、pp.61-68、1998.
6. 曾根 彰、山本鎮男、増田 新、入出力のウェーブレット変換を用いた多自由度系のパラメトリックなシステム同定、日本建築学会構造系論文集、512 号、pp.61-66、1998.
7. 田村雅巳、山本鎮男、曾根 彰、増田 新、振動ジャイロと片持ちばりを組合せたジャークセンサの開発とこれをもちいた不連続信号の検出、日本機械学会論文集 (C 編)、65 巻 629 号、pp.122-129、1999.
8. 田村雅巳、山本鎮男、曾根 彰、増田 新、振動ジャイロと片持ち梁を組み合わせたジャークセンサによる建築構造物の地震応答に含まれる不連続点の検出、日本建築学会構造系論文集、第 517 号、pp.53-60、1999.
9. 瀬川柳太郎、山本鎮男、曾根 彰、増田 新、畑 宏明、常時微動加速度観測波形のウェーブレット変換によるシステムパラメータの同定、日本建築学会構造系論文集、第 519 号、pp.41-46、1999.

他 6 編

Ⅲ. 参考論文

1. Arata Masuda, Shizuo Yamamoto and Akira Sone, New Deconvolution Method for a Time Series Using the Discrete Wavelet Transform, JSME International Journal Series C, Vol.40, No.4, pp.630-636, 1997.
2. Arata Masuda, Shizuo Yamamoto and Akira Sone, Adaptive Identification of Time-varying Systems with Application to the Structural Health Monitoring, Proceedings of the Second World Conference on Structural Control, Kyoto, Japan, pp.2203-2211, 1998.
3. Arata Masuda, Shizuo Yamamoto and Akira Sone, Deconvolution of Time Series Using Wavelet Transform (Introduction of Wavelet Packets with Soft-Tresholding and Generation of Optimized Wavelets), JSME International Journal Series C, Vol.42, No.1, pp.188-194, 1999.