

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：34509

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560581

研究課題名(和文)カオス応答アトラクタを用いた新しい構造物損傷検出法の開発

研究課題名(英文)Development of a new structural damage detection method using chaos attractor re-composition technique

研究代表者

佐藤 忠信 (Sato, Tadanobu)

神戸学院大学・経営学部・研究員

研究者番号：00027294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：カオス信号を外力として入力した構造物の応答からアトラクタを作成し、アトラクタの変化を損傷前後で比較することで損傷検出を行うという手法を提案した。カオス応答アトラクタからRecurrence Analysisを用いて定量的な情報を抽出し、これを損傷前後で比較することで微細な損傷(損傷程度が部材剛性の1%程度)の検出を可能にした。

大規模な構造システムに対してモンテカルロフィルタ(MCF)が適用できるように、効率的な構造同定法(緩和型MCFアルゴリズム)を開発し、さらに、遺伝的アルゴリズムと併用することにより、同定効率を向上した上で、数値シミュレーションと実験により提案手法の有用性を示した。

研究成果の概要(英文)：For the first purpose we propose a new attractor-based structural damage detection technique using chaotic excitation. We reconstruct attractors from responses and obtain quantitative features from the response attractors by using Recurrence Analysis. We use this feature as damage indicator. By comparing indicators between intact and damage structures, we detect and localize structural damage. The robustness against noise and sensitivity to minor damage of the proposed method are shown through numerical examples, in which we assume minor damage to a structure and high noises on input excitation and observed data.

For the second purpose we apply the Monte Carlo Filter technique to identify the level of structural damage. We develop the Relaxation MCF, by which we improve the deficit of the classical MCF. The efficiency of the proposed method is confirmed by identifying the dynamic parameters of a ten-story model building by using noise contaminated simulated structural response data.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：構造ヘルスマニタリング カオス応答アトラクタ 微細損傷の同定 モンテカルロフィルタ 緩和型粒子フィルタ 遺伝的アルゴリズム ベイズ理論 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

構造物は建設完了の時点から、各種の外乱にさらされ劣化が進行する。劣化過程は環境要因に基づく経年的なものや地震や台風などがもたらす突発的な損傷の蓄積に分けることができる。経年構造物の健全度を評価するための技術は構造ヘルスマニタリングと呼ばれ、様々な手法が提案されている。長期的な視野で効率的に構造物の維持管理を行うためには、直ちに修復しなければならない大きな劣化や損傷だけでなく、目視などでは簡単に検出できないような小さな劣化や損傷も的確に把握しておく必要がある。劣化や損傷を小さな状態から把握しておき、これらを重点的に監視することで、効率的な補修・補強戦略を立てることが可能となる。こうした観点から、申請者は、適応型カルマンフィルター、H無限大フィルター、モンテカルロフィルター、サポートベクトルマシンを用いた構造同定アルゴリズムの開発を行ってきた。得られた成果は国際的に高い評価を得るとともに、各種のヘルスマニタリングシステムに導入されている。

一般的な構造物のヘルスマニタリングでは、構造物にセンサーを設置し、センサーで観測される構造物の応答値を解析し、健全な状態の応答値と比較することで劣化や損傷の検出を行う。しかし、劣化や損傷のレベルが小さければ構造物応答の変化は観測ノイズに埋もれてしまうため、劣化や損傷の検出が困難になる。これまでの研究によれば、構造物の剛性が健全な場合に比べて10%程度以上減少するような場合には、その検出は容易であることが判明している。しかし、この比率が数%以下のオーダになると検出が困難であった。したがって、構造ヘルスマニタリングの研究では、構造物の微小な劣化や損傷を検出できる方法論を開発し、それを導入した構造物健全度計測システムを構築することが重要な課題となっている。このために観測ノイズに対してロバスト性を有しかつ検出度の高い構造同定アルゴリズムを開発することが必須であり、それを具体化するための装置を製作することが必要とされていた。

2. 研究の目的

カオス理論で用いられるアトラクタ解析の概念を利用して構造物の微小な劣化や損傷を精度よく検出できる方法論を展開する。まず、剛性低下の割合が1%以下の構造物部材の動特性を同定するために、カオス信号駆動型構造同定法と名付ける新しい方法論を開発する。そのため、微細な損傷の有無を検出するためのアルゴリズムの開発を行い、数値解析によりその有用性を検証する。さらに、微細な損傷が存在することが判明している構造物を対象として、精度よく損傷の

程度を同定するための方法論を開発する。そのためにモンテカルロフィルター理論を用いる。モンテカルロフィルターは非線形・非ガウス型確率分布特性を有する構造物の同定ができるので、近年注目されるようになったアルゴリズムである。しかし、これは構造物のサンプルを多数発生させ、観測値に対する、サンプルの適合度を評価することにより、構造物の動特性の確率分布特性を決定するものである。構造動特性の詳細な確率特性を把握するためには膨大なサンプル数が必要となる。したがって、構造物の自由度が大きくなると計算時間が指数的に増大し、実用性に乏しいアルゴリズムであった。そこで、少ないサンプル数で構造動特性を効率よく同定するアルゴリズムを開発する。

3. 研究の方法

カオス性を有する外力を入力とした構造物の応答時系列からアトラクタを再構成し、リカレンス解析で用いる指標により、損傷前後でのアトラクタを定量的に評価し、指標の変化を損傷前後で比較することで微小な損傷を検出する新しい損傷検出手法を提案する。このため、入力と出力の再構成アトラクタを利用した、新しい構造同定アルゴリズムを開発する。

損傷が検出された構造物動特性の同定には既に発表済みのモンテカルロフィルターの概念を利用し、理論展開を行う。その過程で大規模構造物の構造動特性ならびにその確率特性の同定に利用できる、緩和型モンテカルロフィルターと名付けた新しい構造同定アルゴリズムを導出する。数値シミュレーションにより、提案する手法の有用性を検証する。緩和型モンテカルロフィルターの効率をさらに向上させるため、遺伝的アルゴリズムを併用した構造同定法を開発する。理論の有用性は、数値シミュレーションによるだけでなく、実験データに基づいて検証する。

提案する手法を更に発展させ、カオス波動を利用した構造部材の内部欠陥検出法を模索する。その上で、カオス型の起振器を用いた構造物の健全度監視システムの必要性を啓発する。

4. 研究成果

(1)カオス応答アトラクタを用いた微細損傷検出法の開発

構造ヘルスマニタリングにはノイズに対するロバスト性と小さな損傷を検出できる敏感性が求められる。

申請した研究では、カオス外力信号を入力とした構造物の応答からアトラクタを作成し、アトラクタの変化を損傷前後で比較することで損傷検出を行うという新しい手法を提案した。一般的にアトラクタに基づく解析

手法の一部は、ノイズに対してロバストであり、比較的S/N比の小さなデータに対しても適用できるという利点を有している。また、アトラクタを解析する手法の1つとして、Recurrence Analysis (RA)がある。この手法は、2つのアトラクタ軌道の幾何学的な接近を定量的に評価する手法である。

本研究では、カオス性を有する外力を入力とした構造物の応答から得られるアトラクタを、RAにおける指標を用いて定量化し、これを損傷前後で比較することで微細な損傷検出を可能にした。まず、応答時刻歴からアトラクタを作成する方法を示した。次に、カオス性を持つ外力を入力とすることで構造物の応答をアトラクタに基づいて解析することが可能となることを示し、RAを用いた損傷検出アルゴリズムを展開した。数値解析例では、構造物の小さな損傷(構造部材の剛性の減少が1%以下の損傷)を設定し、入力と観測値に高レベルのノイズを付加した条件のもとで損傷検出を行い、提案手法の有用性を示した。数値解析を通して、単純な構造系だけでなく、フレーム構造の微細な傷検出も可能であることが明らかにした。

(2) 緩和型モンテカルロフィルターを用いた構造同定法の開発

構造物の健全度を調査するための技術はヘルスマonitoringと呼ばれ、代表的なヘルスマonitoring手法としてはAE法、超音波法などの非破壊検査が挙げられる。しかし、これらの手法は構造物の部材内部の欠陥検出と言う、ミクロなレベルでのヘルスマonitoringを目的としており、大規模な構造物への適用には問題が残されていた。これらの手法に対し、構造物全体を1つのシステムとして捉え、マクロなレベルでヘルスマonitoringする「システム同定」という手法がある。この手法は、構造物の応答観測結果からシステムの損傷箇所や程度を把握できることから、時間・コストの両面から注目されている。

システム同定の代表的な手法としては、カルマンフィルターが挙げられる。この手法は、系の不確実性がガウス分布に従うとして展開されたフィルター理論である。しかし、カルマンフィルターは線形モデルを対象とするフィルターであり、非線形モデルへ適用する際、非線形モデルをいかに線形化するかが課題であった。この方法として、拡張カルマンフィルターを用いた研究があるが、その適用には限界があった。このような課題を解決するフィルターとして、モンテカルロフィルターが1993年に北川によって開発された。モンテカルロフィルターは確率分布を多数の粒子を用いて近似し、それぞれの粒子の適応度を観測値に基づいて評価することで、状態量の分布特性の変化を表現する手法であり、より一般的なモデルへの適用が可能となった。

モンテカルロフィルターを構造同定に適用した初期の研究としては申請者らの行った研究が挙げられる。この研究によって、モンテカルロフィルターを用いた構造同定の実構造物への適用の可能性が示され、非定常、非線形なモデルを対象とした構造同定が可能となった。しかし、これらの研究成果を自由度の高い構造物へ適用すると、計算時間が極端に増加するために実用的でなかった。これは、モンテカルロフィルターでは、状態量を多数の粒子を用いて表現するため、自由度が増加するにつれ、状態量の要素の組み合わせの数が指数的に増加するので、状態量に十分な多様性を与えるために粒子数を指数的に増加させなければならなかったためである。

そこで本論文では、従来のモンテカルロフィルターが有している、この本質的な問題点を改良し、自由度の大きな構造システムへ適用可能な効率的な構造同定法、Relaxation Monte Carlo Filter (緩和型モンテカルロフィルター:RMCF)を提案した。また、最適化問題でよく用いられる遺伝的アルゴリズム(GA)をRMCFに組み込むことによって、より高い追従能力を有する同定手法、Genetic Algorithm Relaxation Monte Carlo Filter (GA-RMCF)を提案した。まず、数値シミュレーションにより、提案した手法の有用性を検証した。

次に、構造物の動特性を推定する目的で実施される観測データへの開発手法の適用性を検証する目的で、5層構造モデルの振動台実験から得られた観測結果に対してGA-RMCFを適用することにより、構造モデルの動特性の同定を行った。5層構造モデルは5層のフレームから成り、各層間の4隅に柱が設置されている。ここでは、2ケースの振動台実験を行った。一方は各層間の柱を積層ゴムとし、構造モデルの挙動が線形となる場合であり、もう一方は柱を鉛入り積層ゴム(LRB)とし、構造モデルの挙動が非線形となる場合である。本論文では、開発した手法の有用性を線形モデルに対して検証するのが目的であるので、線形の場合の実験データのみに対して、GA-RMCFを用いた構造同定を行った。この結果、提案する手法がこれまでの方法論より優れていることが明らかにされた。

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13件)

1. T. Sato: Particle relaxation method of Monte Carlo filter for structural system identification, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, Volume 3, Issue 4, 325-334, 2013, DOI: 10.1007/s13349-013-0050-7
2. T. Sato: General concept of adaptive particle filters technique, *Proceeding of the 11th*

- International Conference on Structural Safety and Reliability, CD-ROM, 2013, New York, 6.2013.
3. T. Sato, Y. Nomura and C-F. Wan: Detection of structural parameter detection using chaotic excitation technique, Proceeding of the 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, CD-ROM, 2013, New York, 6.2013.
 4. T. Sato: Fractal characteristics of phase spectrum of earthquake motion, *Journal of Earthquake and Tsunami*, .7(2), 1350010-1-17, 2013.
 5. T. Sato, I. Yoshida and Y. Adachi: Optimization of seismic sensor locations along highway links, *Journal of Earthquake and Tsunami*, .7(2), 1300511-1-11, 2013.
 6. T. Sato and Y. Tanaka: Particle relaxation method for structural parameters identification based on Monte Carlo Filter, *Smart Structures and Systems, An Int'l Journal*, 11(1), 53-67, 2013.
 7. C-F. Wan, T. Sato, Z-S. Wu and J. Zhang: Damage identification using chaotic excitation., *Smart Structures and Systems, An Int'l Journal* Vol. 11 No. 1, 87-102, 2013
 8. T. Sato: Particle relaxation method on Monte Carlo Filter for structural system identification, Proceedings of Civil Structural Health monitoring Workshop (CSHM-4), November 608, 2012 Berlin, Germany CD-Rom
 9. C. Zhang Cong, T. Sato and L-Y. Lu: Response of SDOF system based on earthquake phase spectrum uncertainty model, *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, Vol.42, No.1, 131-136,2012. (in Chinese)
 10. T. Sato: Minor damage detection using chaotic excitation and recurrence analysis, *Journal of Earthquake and Tsunami*, 5(3):, 259-270, 2011.
 11. J. Zhang, T. Sato and C-F. Wan: Investigation of the MCMC method for structural uncertainty determination, Proceedings of the 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, at Seoul 2011.9
 12. M-J. Chung, C-B. Yun, T. Sato: Adaptability of Monte Carlo filter for estimation of abruptly changing parameters using acceleration measurements: Proceedings of the 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, at Seoul 2011.9
 13. C-F. Wan, T. Sato, Z-S. Wu, J. Zhang: Damage detection using chaotic excitation: Proceedings of the 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, at Seoul 2011.9

〔学会発表〕(計 1 件)

1. T. Sato Y. Nomura and C-F.f Wan: Minor Structural Damage Detection Using Chaotic Excitation Technique, Proceedings of the International Workshop on Structural Health Monitoring and Maintenance of Short & Medium Span Bridges (CSHM-5), CD-ROM, Yamaguchi, Japan, 2013.10.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

〔その他〕

ホームページ(作成中)

<http://satotadanobu.info/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤忠信 (Tadanobu Sato)
 神戸学院大学・経営学部・研究員
 研究者番号：00027294

(2)研究分担者

葛 漢彬 (Ge Hanbing)
 名城大学・理工学部・教授
 研究者番号：90262873

(3)連携研究者

なし