

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：34509

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420470

研究課題名(和文) 緩和型粒子フィルター理論を用いたカオス信号駆動型構造損傷検出装置の開発

研究課題名(英文) Development of a structural damage detection equipment using chaos attractor and relaxation particle filter

研究代表者

佐藤 忠信 (SATO, TADANOBU)

神戸学院大学・現代社会学部・研究員

研究者番号：00027294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：カオス応答アトラクタを損傷前後で比較することで損傷検出を行う方法論を開発した。構造物が非線形性を示しかつ構造パラメータの分布特性が正規分布で近似できない場合の構造同定を行うために、緩和型粒子フィルター(PF)の概念を提唱し、そのアルゴリズムを開発した。従来法に基づく結果を用いて行う信頼性解析結果と比較することにより、PF法による同定法の有効性を検証した。

媒体中の不規則性を同定するため、地震動のフーリエ位相を対象として、そのフラクタル特性を同定する方法論を開発した。地震動位相がフラクタル性を有し、その確率分布特性が正規分布でないこと、位相過程が中心極限定理の成立しない過程になることを発見した。

研究成果の概要(英文)：The four research purposes are: developing a new technique by which very minor damage to structure can be detected; developing a technique to determine its damage level precisely; comparing the results of reliability analyses using the identified data not only the developed method but also other common methods; developing an innovative method to detect the fractal nature of earthquake motion phase (EMP).

We propose a new attractor-based structural damage detection technique using chaotic excitation; the particle relaxation filter; a new type of stochastic process being able to represent the stochastic characteristics of EMP by the use of Lubesgue-Stieltjes type integral formula. We compared reliability analyses of two degree of freedom system using identified results by PF, and other six methods. We showed that the result obtained by PF is the most reliable. We identified the probability density function of the group delay time of earthquake motions.

研究分野：工学

キーワード：地震工学 構造ヘルスマニタリング カオス応答アトラクタ 緩和型粒子フィルター 模型実験 地震動位相 フラクタル 不規則性の同定

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onitoring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onitoringシステムに導入されている。

一般的な構造物のヘルスマonitoring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onitoring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る。

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できる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。そのために粒子フィルター理論を用いる。粒子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、緩和型粒子フィルターアルゴリズム、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(粒子と同義語)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、緩和型粒子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。緩和型粒子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。

開発したシステムを対象構造物に実装して、実時間で構造特性を同定することを考えると、地震時には実時間で構造物の損傷過程が同定されることになる。構造物が損傷を受けるときには、粒子の尤度が極端に小さくなって、同定過程が不安定になることがある。この場合には、粒子のリサンプリングが必要となるが、リサンプリングのために利用する確率密度関数は裾野の厚い分布特性を持つものでなければならない。この点に関して考察を加える。

開発する方法では大規模構造システムの動特性の期待値が同定されるだけでなく、動特性の確率分布特性も同時に同定することができるので、対象とする構造物の信頼性解析が可能になる。各種同定手法を用いた時に、信頼性解析がどの程度可能であるかを検証する。

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。こうした装置が開発されると、構造部材の内部欠陥の計測が可能になるだけでなく、地震波動が伝播する地殻を構成している岩盤内の岩石結晶や節理サイズ分布の不規則性などが計測可能になる。こうした不規則サイズの分布特性はサイズの大きさとその個数分布の間にはベキ則が成立すると言われている。こうした媒体中を伝播する波動には、不規則サイズの分布特性に関する情報が潜んでいることになる。ベキ則に従う物理現象は微視的な縮尺と巨視的な尺度で計測した時の物理特性には自己アフィン相似則が成立することが確認されており、それはフラクタルな物理特性と呼ばれている。こうした情報を抽出することを目的として、観測地震動時刻歴から計算されるフーリエ振幅と位相を対象として、そのフラクタル特性に関して考究する。

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で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鋭敏性が求められる。

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開発した。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ニタリングと呼ばれ、代表的なヘルスマニタリング手法としては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ニタリングを目的としており、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ニタリングする「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(粒子フィルターと同義語)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。

そこで本研究では、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、緩和型粒子フィルター(Relaxation Particle Filter : RPF)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RPF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 Particle Filter (GA-RPF)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-RPF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とし、構造モデルの挙動が非線形となる場合である。本研究では、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-RPF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。

(3) 観測更新アルゴリズムの信頼性評価への適用に関する成果

既存の観測更新アルゴリズムの信頼性評価への適用性について、事後確率分布の推定精度に着目し検討した。代表的な観測更新アルゴリズムとして Particle Filter (PF)、Ensemble Kalman Filter (EnKF)、Gaussian Mixture Filter (GMF)、Merging Particle Filter (MPF)、Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method、Iterative Particle Filter with Gaussian Mixture Model (IPFGMM) 等に着目し、各アルゴリズムを2自由度せん断モデルにおける層剛性の事後確率分布推定問題に適用した。事後確率分布が単峰性および多峰性を示す2ケースの条件を設定し、事後確率分布の理論解と各アルゴリズムによる推定結果を比較した。事後分布が単峰性の場合、ほとんどの観測更新アルゴリズムで事後確率分布を精度よく推定できることを確認した。一方、事後分布が多峰性の場合、EnKFやMPFでは推定することができないが、PF、GMF、MCMC、IPFGMMでは精度よく推定可能であり、その中でもIPFGMMが最も計算効率が高いことが明らかとなった。

(3) リサンプリング手法における適応度の改良

観測更新アルゴリズムでは、観測更新に用いる粒子タイプの総数が、更新が繰り返されるにつれて減少するという、粒子数の退化 (degeneracy) 現象として知られている問題が発生する。この問題を回避するためには、粒子タイプ数が閾値より減少した時に、リサンプリングを行うことが必要になる。また、適応型粒子フィルター理論を用いて、地震時に損傷を受ける構造動特性をリアルタイムで同定する場合には、経過時間とともに変化

する尤度の値が、前もって設定しておいた閾値を超えたら、粒子のリサンプリングを行うことが必要になり、その分布特性は裾野が広く、広範囲の領域からの粒子が生成されるものでなければならない。リサンプリングに用いる分布特性として、分散値の存在しないレヴィフライト分布を用いて、この問題を解決する方法を提案し、その有効性を確認した。

(4) 地震動特性に包含されているフラクタル特性の抽出と同定

地震動は、断層の破壊過程に基づいて生成される震源時間関数が、岩盤から構成される地殻内を透過した結果として観測される時間関数である。地震断層の破壊過程は、すでに破断された、せん断面の再固結した部分が再せん断破壊するものであるが、岩石材料のせん断破壊面はフラクタル特性を有しているため、震源関数には、断層破壊過程のフラクタル特性が包含されていると考えられる。また、地殻を構成している岩盤の結晶構造や節理の大きさの分布特性はベキ乗則に従う不規則性を有しており、ベキ乗則に従う物理現象はフラクタル性を示すので、そうした媒体中を透過・伝播する地震波動にも地殻の不規則性を反映したフラクタル特性が包含されることになる。フラクタル特性を有する事象には、必ず自己アフィン相似則に従う現象が出現する。自己アフィン相似性を有する確率過程は、不連続な特性を保持しているのが通常なので、そうした特性が地震動のどのような特性に反映されているかを明らかにする目的で、地震動位相のフラクタル特性を抽出するための研究を行った。結果として、地震動位相にフラクタル特性が存在すること、確率過程としてみたときの地震動位相は微分不可能な過程になること、その確率密度関数が正規分布では表現できないこと、円振動数に関して相関性の有ることなどを発見し、地震動位相を中心極限定理の成立しない確率過程として模擬するための方法論を確立した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者及び研究分担者には下線、研究代表者単著のときは下線なし)

[雑誌論文](計8件、全て査読有)

1. 地震動位相の差分の特異な確率特性と確率過程 分散の定義できない群遅延次 k ジャンのモデル化, 佐藤忠信, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.73, No.2, pp.343-363, 2017.
2. 確率過程として見る地震動位相の不可解性, 佐藤忠信, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.72, No.4(地震工学論文集第35巻), I_831-I_841, 2016.
3. 各種観測更新アルゴリズムによる事後確率分布の推定, 珠玖隆行, 吉田 郁政, 山

- 本 真哉, 田中 耕司, 藤澤 和謙, 野村 泰稔, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.71, No.2, I_59-I_70, 2016.2.
4. キーポイント信頼性工学, 4. データ同化: 粒子フィルターと融合粒子フィルターについて, 野村泰稔, 吉田行政, 珠玖隆行, 佐藤忠信, 材料, Vol.65, No.5, pp.403-408, 2016.
 5. 非線形応答スペクトル群に適合した設計用地震動波形の作成法, 室野剛隆, 佐藤忠信, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.70, No.2, 161-175, 2014.
 6. 位相のモデル化について, 佐藤忠信, 吉田行政, 大島義信, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.70, No.4(地震工学論文集第33巻), I_273-I_284, 2014.
 7. 地震動位相差分の確率特性とその数理的解釈, 佐藤忠信, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.70, No.2, 295-305, 2014.
 8. 自己相似仮説から導出される地震動位相の確率特性と地震動振幅の減衰, 佐藤忠信, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.70, No.3, 463-473, 2014.

[国際会議発表論文] (計7件)

9. T. Sato, C.F. Wan, Y. Nomura, L.Y. Xie, R. Song and X.J. Guo: Early-stage Damage Identification Subjected to Chaotic Excitation, Proceedings of 6WCSCM, pp.1991-2000, Barcelona, Spain, 2014.
10. T. Sato: Stochastic characteristics of earthquake motion phase difference and its mathematical interpretations, Proceedings of the 5th Asia Conference on Earthquake Engineering, paper No.00176, October 16-18, Taipei, Taiwan, 2014.
11. Y. Nomura, T. Sato and C.F. Wan: Early-stage damage identification using recursive quantification analysis and merging particle filter, Proceedings of the 10th International Workshop on Advanced Smart Materials and Structures Technology, 29-30, Taipei, Taiwan, 2014.
12. K. Tanaka, T. Sato and Y. Muroto: A study to evaluate inhomogeneous structure of seismic propagation path based on Hurst index, Proceedings of the 14th Japan Earthquake engineering, 3035-3044, Chiba, Japan, 2014.
13. Yasutoshi Nomura, Tadanobu Sato and Hitoshi Furuta: Structural damage quantification based of recurrence plot and relaxation method of particle filter, Proceedings of the 7th ECOMAS thematic Conference of Smart Structures and Materials, paper No. ID-104, SMART2015, Ponta Delgada Portugal, 3-6 June, 2015.
14. Tadanobu Sato and Yasutoshi Nomura: Particle relaxation method of Monte Carlo filter to vibration -based structural system

- identification, Proceedings of the IV International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications, Session of Damage, paper No.514, Fracture & fatigue II, 29/09/2015, Barcelona Spain, 28-30 September, 2015.
15. Chunfeng Wan and Tadanobu Sato: Damage identification using particle filters, 6th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, speaker, December 7-9, Hobart, Australia, (10pages), 2016.

[学会発表](計2件)

1. Tadanobu Sato: Mystery of earthquake motion phase featured as stochastic process, Proceedings of 34th Earthquake engineering research conference, Paper No.B21-789, Tokyo Japan, 6-7 October, 2015.
2. Tadanobu Sato: Stochastic characteristics of the group delay time in observed earthquake motions, Proceedings of the annual conference, Japan Society of Earthquake Engineering, Takamatsu, September 25-28, Japan, Paper No.P4-38(9pages), 2016.

[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

野村 泰稔 (Yasutoshi Nomura)

立命館大学・理工学部・講師

研究者番号：20372667

(3)連携研究者 なし