

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14821

研究課題名(和文) データ同化と境界追跡法による複雑形状・複数個の空洞探査法の開発と機能診断への応用

研究課題名(英文) Detection of cavities with complicated shape in the ground based on data assimilation, elastic wave simulation and parametric level set and its application to functional diagnosis

研究代表者

村上 章 (MURAKAMI, Akira)

京都大学・農学研究科・教授

研究者番号：80157742

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：システムモデルを表現するために、動弾性有限積分法(EFIT)による波動解析を用いた。地盤構造物内部に発生した空洞の個数やそれらの位置、形状を推定するために、粒子フィルタとEFITによる弾性波探査解析を組み合わせ、さらにParametric Level Set法(PaLS)を適用することで、既往の方法とは異なる推定を行った。ゼロ等位面の境界を表すために、次元の一つ高いLevel set 関数の導入するにあたり、PaLSを用いてより複雑な形状を表現した。パラメータによって重み付けされた複数個の放射基底関数を組み合わせると、推定精度が従来法より向上することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：When there are one cavity or two cavities in the ground, the number of cavities can be determined from the number of modes and the position and radius are estimated well with assumption of a single circular cavity by PF and Elastic Wave Simulation. PaLS can describe the complex shape of cavity and identification of PaLS parameters by PF make it possible to estimation of complex shape of the cavity. When the number of cavities is three or higher, the accuracy of estimation of position is very low. This is because the number of simulation data is less. Hence, it may be possible to improve the accuracy by increasing the number of particles and receivers for PF, which is our goal for next step.

研究分野：農業土木学

キーワード：データ同化 境界追跡法 機能診断 逆解析 土構造物

1. 研究開始当初の背景

本研究では、非線形カルマンフィルタとフェーズフィールド法/レベルセット法によるコンビネーションを、従来とは異なる観点から地盤工学の問題に適用し、弾性/弾塑性体中における複雑形状・複数空洞の位置と形状を推定する。まず、初年度において「アンサンブルカルマンフィルタ/粒子フィルタ」と「フェーズフィールド法/レベルセット法」の連携による既往の文献について、画像処理・機械工学分野を中心に収集し、それぞれの得失を調査するとともに、地盤を対象に問題設定と定式化を施す。次年度以降において模型実験の観測値を用いた解析を行い、得られる同定精度を検証する。さらに、地盤や土構造物に関する実施工観測や各種構造物の機能診断事例を収集し、実問題に対する新しい解析法の適用性を明らかにする。

2. 研究の目的

研究の主眼：非線形カルマンフィルタ「アンサンブルカルマンフィルタ/粒子フィルタ」および境界追跡法「フェーズフィールド法/レベルセット法」を用いて、構造物中にある複雑形状・複数空洞(欠陥)の位置と形状を同定する画期的な逆解析手法を開発する。

目的と波及効果：本手法の開発に成功すれば、堤防など土構造物中の空洞を調査する機能診断手法として応用可能となる。地中空洞を調査する試験法として電磁波レーダ法があるが、地表面から2~3mの深度を越えると信頼性が急速に低下する。一方、学術的観点から従来の逆解析法では困難のあった「複数の空洞推定」をも容易とする。さらに、地盤に限らず機械要素の非破壊検査(欠陥同定)など適用対象は工学他分野を問わないため、波及効果はきわめて大きい。

3. 研究の方法

1) レベルセット/フェーズフィールド法の応用、ことにトポロジー最適化や移動物体追跡を中心に、機械工学・画像処理など関連分野の文献を調査し、非線形カルマンフィルタとの適合性とその得失を調査し、問題設定と定式化を行う(H27); 2) 非線形カルマンフィルタとレベルセット/フェーズフィールド法とで適合性の良い組み合わせを見出し、既存の弾性波動解析プログラムと連携したプログラムを開発する(H28); 3) 模型実験の観測値による検証を行い、地盤工学における事例と実観測値を収集し、提案法の適用性を検討する(H29); 4) 土構造物の機能診断へ利用する場合の事例解析を行って問題点を検討し、プログラムや解析システムを修正する(H29)。それぞれの詳細は以下のとおりである。

レベルセット/フェーズフィールド法の数理と非線形カルマンフィルタとの適合性(H27年度): 機械工学・画像処理など分野

を限定せずに、レベルセット/フェーズフィールド法の応用に関する文献調査を行う。同時に非線形カルマンフィルタとの整合性、得失を理論的に検討する。粒子フィルタとレベルセット法による移動物体追跡を例にとり、構造物に関する有限要素/有限積分シミュレーションを援用した場合の適用性や適用限界を事前に検討する。これらの理論的整合性に関する検討は、連携研究者の協力を得る。さらに、問題設定と定式化も検討する。

プログラムの開発と既存の有限要素解析プログラムとの連携解析および既存の有限積分法コードとの連携解析(平成28年度): 多数想定されたシナリオに沿って弾性波動解析を事前に準備しておく。波動解析法は有限積分法をベースとしており、GPU計算を導入することで超並列計算が可能となる。さらに、あらかじめ想定したパラメータを用いて観測値を発生させ、非線形カルマンフィルタと境界追跡法により単純な空洞の再構成を行う。

室内模型実験計測値を用いた地盤内空洞の同定: 空洞・欠陥を有するモデル地盤を小型模型実験装置(既設設備備品: 右上図)に供し、表面のある点で加振する。内部を伝搬した波動が空洞で散乱し、地盤表面において散乱波を計測する。計測値と数値シミュレーションによる計算値とのデータ同化を用い、提案手法によって地盤内空洞の位置とその形状が同定可能かを検証する。さらに、空洞の形状や大きさ、数を変えた実験を多数実施し、提案手法の適用範囲や得失を明らかにする。またモデル地盤の材料として、実験で一般的に用いられている粘性土や砂質土のみならず、実際の盛土材料や中間土を用い、実務への適用を見据えた実験・解析を実施する。

さらに、構造物内空洞・欠陥の同定精度は、観測データの種類や空間的・時間的な密度に大きく影響することが予想されるため、観測データの種類・量に関する感度解析を実施し、最適な観測点配置計画に関する検討を行う。検討結果は、実構造物への適用の際に有効な情報となりうる。

提案手法の実構造物への適用性検証/効果的な機能診断手法の提案: 提案手法を実際の地盤および土構造物へ適用し、その空洞調査手法としての実用性について検証する。まず、改修工事前の土構造物(ため池・河川堤防)を対象に地盤調査を実施する。具体的には、ハンマーにより土構造物に振動を与え、天端に配置した受信機によって弾性波を受信する。補助データとして、サウンディング試験を実施する。得られた地盤調査データを地質統計学的手法(クリギング、インディケータシミュレーション)により加工し、そのデータを用いて提案手法により、実構造物内の空洞や緩み域を同定する。その後、構造物改修時に実際の構造物断面を観察し、解析によって同定された緩み域の分布が実際の構造物の状態を再現できているかどうか

を検証する。

複数の実構造物に対して同様の検証作業を実施し、提案手法の有効性を確認した後、緩み域が同定できた場合の構造物の補修方法について検討する。既存の空洞・欠陥同定手法では、空洞の形状や位置に関して精度よく同定できなかったため、経済的で効率的な補修が実施できなかった。提案手法により複雑形状・複数個数の空洞・緩み域の位置や形状が同定できる可能性があり、そのような情報が得られた場合の効率的な土構造物の機能診断方法について提案する。

4. 研究成果

弾性波動解析とレベルセット法・粒子フィルタの組み合わせにより、複数個数・複雑形状の空洞を推定する手法を提案し、成果を地盤工学研究発表会にて公表したほか、国際ジャーナルに投稿を準備している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 34 件)

Sharma, V., Fujisawa, K., Murakami, A., Velocity based time-discontinuous Galerkin space-time finite element method for elastodynamics, Soils and Foundations, 査読有, Vol.58, 2018

辻田 篤史, 中畑 和之, 村上 章, 粒子フィルタを用いた散乱振幅からの欠陥形状の推定に関する研究, 第 25 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, 査読無, 2018, 35-36

中畑 和之, 辻田 篤史, 藤澤 和謙, 村上 章, 粒子フィルタによる欠陥の位置と大きさの推定のための弾性散乱振幅の導入, 第 21 回応用力学シンポジウム, 査読無, 2018

Murakami, A., Shinmura, H., Ohno, S., Fujisawa, K., Model identification and parameter estimation of elastoplastic constitutive model by data assimilation using the particle filter, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 査読有, 2017
DOI:10.1002/nag.2717

Sharma, V., Fujisawa, K., Murakami, A., A new velocity based time discontinuous Space-Time finite element method for vibration analysis of elastic and hypoelastic material, The 15th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, 査読無, 2017

Koch, M.C., Murakami, A., Fujisawa, K., Elastic modulus estimation using a scaled state parameter in the extended kalman filter, The 3rd Indo-Japan Workshop on Geotechnics for Natural Disaster Mitigation and Management, 査読無, 2017

Matsumoto, A., Saito, N., Takamoto, T., Nakahata, K., Three-dimensional visualization of dynamic oscillation of structural components using inhomogeneous wireless sensors, Procedia Engineering, 査読有, PROENG394752, 2017
DOI:10.1016/j.proeng.2017.04.462

Fujisawa, K., Murakami, A., Nishimura, S., Estimation of hydraulic conductivity in an embankment using particle filter, Proceedings of 6th Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications, 査読無, 2016, 618-623

Shuku, T., Yoshida, I., Yamamoto, S., Tanaka, K., Fujisawa, K., Nomura, Y., Comparison of filtering algorithms for estimating posterior probability distributions: A case study, Proceedings of 6th Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications, 査読無, 2016, 636-641

Ongpeng, J. M., Oreta, A. W., Hirose, S., Nakahata, K., Nonlinear ultrasonic investigation of concrete with varying aggregate size under uniaxial compression loading and unloading, Journal of Materials in Civil Engineering, 査読有, Vol.29, Issue 2, 2016
DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001726.

中畑 和之, 高本 龍直, 松本 愛, 齊藤 中, 森 伸一郎, 多点振動計測による RC 部材の動態可視化と損傷評価への応用, 構造工学論文集, 査読有, Vol.63A, 2016, 219-227

Ibrahim, A., Zabri, A., Nakahata, K., Identification of elastic parameters of an inclusion by a particle filter using ultrasonic wave, International Journal of Mechanical and Material Engineering, 査読有, Vol.10, Issue 1, Article 23, 2015
DOI:10.1186/s40712-015-0050-y

珠玖 隆行, 吉田 郁政, 山本 真哉, 田中 耕司, 藤澤 和謙, 野村 泰稔, 各種観測更新アルゴリズムによる事後確率分布の推定, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, Vol.71, 2015, I_59-I_70

佐藤 真理, 藤澤 和謙, 村上 章, 空洞領域を有する多孔質中の動的浸透流の周波数特性, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, Vol.71, 2015, 1_521-1_532

〔学会発表〕(計 46 件)

古川 智大, 高松 亮佑, 村上 章, 中畑 和之, 藤澤 和謙, 粒子フィルタと弾性波探査シミュレーションによる地盤パラメータの推定, 平成 29 年度農業農村工学会大会講演会, 2017

古川 智大, 高松 亮佑, 村上 章, 中畑 和之, 藤澤 和謙, 粒子フィルタと弾性波探査シミュレーションによる地中の欠陥部パラメータの推定, 第 74 回農業農村工学会京都支部研究発表会, 2017

中畑 和之, Zabri, A., 齊藤 中, 振動データを用いたフィルタアルゴリズムに基づく構造部材の損傷推定, 土木学会四国支部技術研究発表会, 2017

Shuku, T., Yoshida, I., Yamamoto, S., Tanaka, K., Fujisawa, K., Nomura, Y., Comparison of filtering algorithms for estimating posterior probability distributions: A case study, 6th Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications (国際学会), 2016

今出 和成, 西村 伸一, 珠玖 隆行, 柴田 俊文, 村上 章, 藤澤 和謙, CPT によるため池堤体内部 N 値の空間分布推定, 平成 28 年度農業農村工学会大会講演会, 2016

山下 伸幸, 村上 章, 中畑 和之, 高松 亮佑, 弾性波伝播解析に粒子フィルタを適用した土構造物内の空洞同定, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016

今出 和成, 西村 伸一, 柴田 俊文, 珠玖 隆行, 村上 章, 藤澤 和謙, CPT によるため池堤体の液状化確率評価, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016

佐藤 真理, 藤澤 和謙, 外部応力による地中空洞崩落・道路陥没発生メカニズムの解明, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016

高松 亮佑, 村上 章, 中畑 和之, 粒子フィルタと弾性波探査シミュレーションによる土構造物内の劣化箇所同定, 第 73 回農業農村工学会京都支部研究発表会, 2016

Zabri, A., Kamida, S., Nakahata, K., Study on identification of wave velocity and density of defect using particle filter, 土木学会 第 70 回年次学術講演会,

2015

Zabri, A., Asriana, I., Nakahata, K., Application of particle filter for identification of structural parameters in elastic solid using reflected signal, Malaysia International NDT Conference and Exhibition (国際学会), 2015

Fujisawa, K., Murakami, A., Numerical analysis of preferential flows in soils by the Darcy-Brinkman equations, The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (国際学会), 2015

福元 豊, 村上 章, 土粒子と間隙流を効率よく直接解くための PS-MRT Lattice Boltzmann モデル, 第 50 回地盤工学研究発表会, 2015

菅野 高弘, 轟井 翔平, 小林 晃, 村上 章, パラペット構造を持つアースダム天端の地震時発生亀裂の原因, 第 50 回地盤工学研究発表会, 2015

山下 伸幸, 中畑 和之, 村上 章, 動弾性有限積分法を用いたダムの地震時応答解析, 平成 27 年度農業農村工学会大会講演会, 2015

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.agrifacility.kais.kyoto-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 章 (MURAKAMI, Akira)
京都大学・大学院農学研究科・教授
研究者番号: 8 0 1 5 7 7 4 2

(2) 研究分担者

中畑 和之 (NAKAHATA, Kazuyuki)
愛媛大学・大学院
理工学研究科 (工学系)・教授
研究者番号: 2 0 3 8 0 2 5 6

藤澤 和謙 (FUJISAWA, Kazunori)
京都大学・大学院農学研究科・准教授
研究者番号: 3 0 5 1 0 2 1 8

(3) 連携研究者

中村 和幸 (NAKAMURA, Kazuyuki)
明治大学・総号数理学部・准教授
研究者番号: 4 0 4 6 2 1 7 1

高木 知弘 (TAKAGI, Tomohiro)
京都工芸繊維大学・大学院
工芸科学研究科・准教授

研究者番号：50294260