

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01226

研究課題名(和文) センサ・データフュージョンを利用した社会インフラ点検システムの高度化

研究課題名(英文) Development of vibration inspection technique for infrastructure using sensor data fusion

研究代表者

中畑 和之 (Nakahata, Kazuyuki)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・教授

研究者番号：20380256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：中小橋梁の維持管理のために、無線通信を利用した多点振動計測システムを開発中である。このシステムは、多点で加速度を同時に計測することで、振動による橋梁全体の動態を3次元的にリアルタイム可視化することができる。本研究では、この無線計測・可視化システムに、センサ・データフュージョンを導入した。カルマンフィルタを用いてMEMSセンサで得られる加速度データの信頼性を向上させ(データ校正)、ジャイロセンサ等の異種センサからのデータも加法的に結合することによって、動的挙動を高精度に3次元表示することができた(データ結合)。さらに、粒子フィルタを用いて、多点計測による構造部材の損傷同定を試みた(データ同化)。

研究成果の概要(英文)：A three-dimensional (3D) visualization system was developed to investigate the dynamic state of structural components using portable sensors located at multiple points. The system utilizes wireless data transfer and real-time signal processing for on-site inspection. In this study, the sensor data fusion was incorporated in the system. The noise elimination in acceleration data measured by MEMS sensor was proposed using a complementary filter technique based on the Kalman filter. In our system, an angular velocity sensor and an accelerometer were mounted within each sensor box, and the displacement was calculated numerically. In this time, both sensory data were combined to enhance the accuracy of 3D motion. Furthermore, a data assimilation method was applied into our measurement system to identify the damage. The location and size of the wall thinning part in a structural component were estimated with accuracy by the particle filter technique.

研究分野：非破壊検査

キーワード：センサフュージョン データフュージョン 振動 3次元可視化 カルマンフィルタ 粒子フィルタ 無線計測

1. 研究開始当初の背景

社会インフラの経年劣化が社会問題となっており、特に、我が国に70万以上あるといわれている橋梁の安全性をどのように担保するのかが喫緊の課題である。長大橋や課金制の道路橋等は常時設置型のセンサによるモニタリングを行い、状態を監視している事例があるが、地方の中小橋梁に十分な検査が行き渡っている状況にはない。国土交通省は平成26年6月に橋梁定期点検要領に基づいて5年に一度の検査の実施を指示した。定期検査は近接目視が基本であるが、必要に応じて触診や計測装置を用いた検査を併用して行うこととしている。その中に、異常な振動についても検査する項目があるが、実際に振動計測を定量的に行うとなれば、計測作業の簡素化・効率化が中小橋梁には必要となる。全橋梁にセンサを常時設置することはコスト的に不可能であるから、ポータブルな計測装置を用いて現場における可及的速やかな健全度判断が要求される。しかもその精度と信頼性は高いものでなければならない。

2. 研究の目的

申請者らは、中小橋梁の振動計測を効率的に行うために、無線センサネットワークを利用した多点振動計測システムの開発を行ってきた。このシステムでは、多点で振動を同時に計測することができ、その結果、振動の高次モードが同定できる。また、MEMS(Micro Electro Mechanical System)センサをマウントしているため軽量で安価にシステム構築できるのも特徴である。我々のシステムの特徴は振動による橋梁全体の動態を3次元的にリアルタイム可視化する点である。可視化は、橋梁の動態の即時把握が可能となるだけでなく、局所的な異常箇所を鳥瞰的に検出できる可能性を有する。

本研究では、この無線計測・可視化システムに、センサ・データフュージョンを導入する。この導入目的は、シグナルノイズ(S/N)比の低いMEMSセンサから信頼性のある加速度データを抽出すること(データ校正)、ジャイロセンサ等の異種センサからのデータも加法的に結合することによって多点間のデータを補間し、高精度な3次元動態可視化を行うことである(データ結合)。さらに、シミュレーションとの連携によって損傷同定へと本システムを発展させる(データ同化)。本システムは安価でかつポータブルであるため、現場への適用が容易である。損傷同定をも可能とする総合検査システムを開発できれば、手付かずの中小橋梁の効率的検査が可能となることが期待される。

3. 研究の方法

以下(1)~(3)の3つを大きな柱として、研究を行った。これらは無線計測・可視化システムを高度化するためのものであり、そのイメージを図1に示す。

- (1) 補助センサによるMEMSセンサのS/N比の改善(データ校正)
- (2) 3次元可視化の高精度化のためのセンサデータの加法的処理(データ結合)
- (3) 粒子フィルタを用いた損傷位置の同定(データ同化)

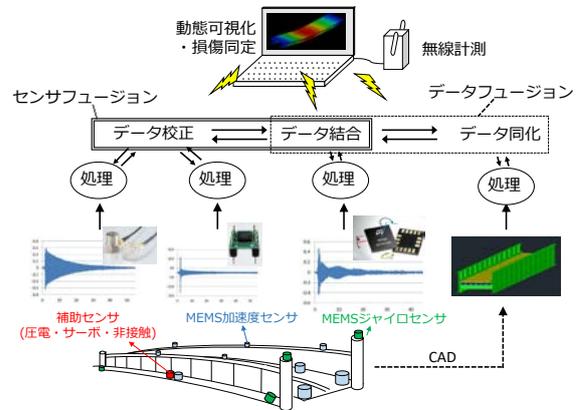


図1:橋梁振動検査におけるセンサ・データフュージョンの概念図

4. 研究成果

- (1)補助センサによるMEMSセンサのS/N比の改善(データ校正)

圧電型のセンサに比べて、MEMS加速度センサはS/N比が劣ることが問題である。通常バンドパスフィルタでMEMSセンサのノイズを除去する場合、信号が歪んだり、位相が遅れたりする。ここでは、異なる2つのセンサから計測されたデータを統合し、カルマンフィルタを用いてデータフュージョンを行った。これを相補フィルタという。

16m程度の建物間の連絡通路にMEMSセンサを設置し、連絡通路中央に約12kgのおもりを落下させ、振動試験を行った。データフュージョンに用いた圧電型センサは、アンブ内蔵型の3軸加速度センサである。図2は、連絡通路の上のある点の加速度波形のフーリエスペクトルである。相補フィルタ適用前ではノイズに埋もれて確認することができなかった固有振動モードが、フィルタ適用後は鮮明に現れることが分かる。

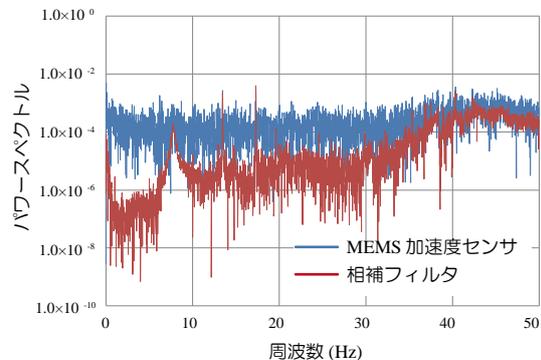


図2:データフュージョンによる振動モードの抽出

- (2) 3次元可視化の高精度化のためのセンサデータの加法的処理(データ結合)
- 本研究では、加速度センサで得られる変形

量を、ジャイロセンサから得られる回転量で補正し、センサノード数を少なくしつつ、高精度な動態可視化を行うことを試みた。図3に示すような木製机を、振動試験装置で揺らしたときの天板の挙動を可視化する。図3の右図は、加速度センサのみを搭載したセンサノードを9個配置して可視化したときの振動のナップを表している。この加速度センサは、3軸方向の加速度を同時に取得できる。一方、図3の左図は、ジャイロセンサと加速度センサを同時に搭載したセンサノードを4個配置して、これらのセンサをセンサフュージョンさせたときの結果である。両者の可視化結果はよく一致しており、センサフュージョンさせたものはセンサノード数が少ないが、天板の振動が精度良く把握できることを実証できた。

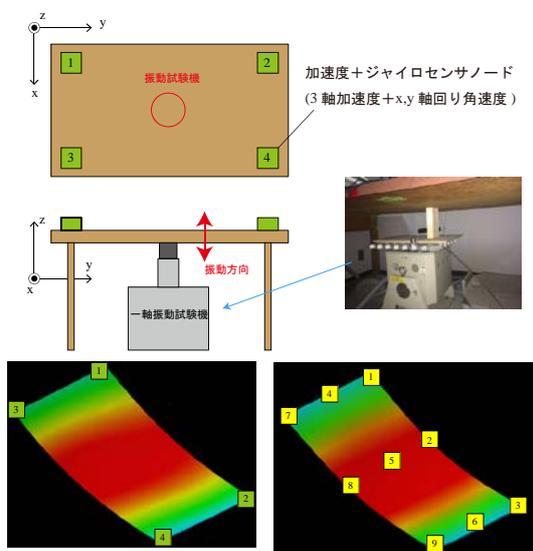


図3 (上) 天板の振動実験の様子. (左) センサフュージョンによる振動可視化, (右) 加速度センサのみによる振動可視化

### (3) 粒子フィルタを用いた損傷位置の同定 (データ同化)

コンピュータによる大規模な数値計算が高速に実施できるようになり、数値シミュレーションを実験データで更新しながら精度を高めていくデータ同化が、近年盛んに研究されている。粒子フィルタはデータ同化の一手法であり、確率分布を近似する粒子群を生成し、計測値との尤度に基づいて粒子の生成・消滅を行う。ここでは、粒子フィルタを用いて、構造部材中の減肉部の位置と大きさを複数の固有振動数から推定することを試みた。これまで、振動データを用いた構造ヘルスマニタリングにおいて粒子フィルタの適用例が報告されているが、そのほとんどが多質点系のモデルを用いたものである。ここでは、有限要素で分割した数値モデルを採用し、有限要素法によるモーダル解析で得られた結果と計測値をデータ同化することを試みた。図4に示すようなアルミニウム部材中の減肉の位置と幅を推定してみた。減肉の位

置を横軸、幅を縦軸として、ステップ毎に粒子をプロットしたものである。10ステップ目で、ほとんどの粒子が真値の周りに集中しているのがわかる。その後、100ステップまで継続して真値の周りに粒子が集まっていることがわかる。以上の結果、粒子フィルタを用いて減肉位置と幅が同定できた。

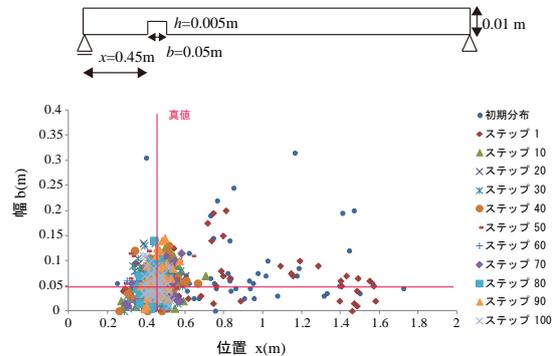


図4 (上) アルミニウム部材中の減肉. (下) 粒子フィルタによる減肉の同定過程.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 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, Vol.63A, (2017) pp.216-227, 査読有り
- ② Kazuyuki Nakahata, Tatsunao Takamoto, Naka Saitoh, Guided wave testing of a structural component by multipoint sensing with wireless accelerometers, Insight, Vol.59, No.2, (2017) pp.77-80, Refereed paper.
- ③ Ai Matsumoto, Naka Saito, Tatsunao Takamoto, Kazuyuki Nakahata, Three Dimensional Visualization of Dynamic Oscillation of Structural Components using Inhomogeneous Wireless Sensors, Procedia Engineering, Vol.188, (2017), pp.102-109, 査読なし
- ④ 高本龍直, 大谷憂馬, 齊藤 中, 中畑和之, 衝撃加振法によるガイド波検査のための数値解析とその実験的検証, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.71, No.2, (2015), pp.1813-1822, 査読有り
- ⑤ Asriana Ibrahim, Aisyah Zabri, Kazuyuki Nakahata, Identification of elastic parameters of an inclusion by a particle filter using ultrasonic waves, International Journal of Mechanical and Materials Engineering, Vol.10, No.1, (2015) Article 23, Referred paper.

[学会発表] (計 13 件)

- ① 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, 2018.1.25

- ② 高橋栞太, 松本愛, 中畑和之, 相反性を利用した多点加振による構造部材の振動の3次元可視化, 土木学会第72回年次学術講演会, 福岡, 2017.9.11
- ③ 松本愛, 齊藤中, 森伸一郎, 中畑和之, 多点振動計測を用いた構造部材の振動可視化による割れ検出の試み, 土木学会第72回年次学術講演会, 福岡, 2017.9.11
- ④ 中畑和之, アイシャ ザブリ, 齊藤中, 村上章, 粒子フィルタによる振動データからの構造部材の損傷推定, 土木学会第72回年次学術講演会, 福岡, 2017.9.11
- ⑤ 高橋栞太, 唐川和輝, 松本愛, 中畑和之, 相反性を利用した多点衝撃加振によるガイド波の可視化と精度検証, 第64回理論応用力学講演会, 東京, 2017.8.22
- ⑥ 中畑和之, 革新的な非破壊検査技術開発への取り組み, 日本保全学会 第14回学術講演会, 松山, 2017.8.3
- ⑦ 中畑和之, アイシャ ザブリ, 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, 土木学会四国支部第23回技術研究発表会, 松山, 2017.5.20
- ⑧ 松本愛, 齊藤 中, 高本龍直, 中畑和之, 無線 MEMS センサを利用した多点振動計測システムの RC 部材への適用実験, 土木学会第71回年次学術講演会, 仙台, 2016.9.9
- ⑨ Aisyah ZABRI, Ibrahim ASRIANA, Kazuyuki NAKAHATA, Application of Particle Filter for Identification of Structural Parameters in Elastic Solid Using Reflected Signal, Proceedings of Malaysia International NDT Conference & Exhibition 2015, マレーシア, 2015.11.22
- ⑩ 齊藤中, 高本龍直, 中畑和之, カルマンフィルタを用いた MEMS センサ計測システムの高度化に関する検討, 土木学会第70回年次学術講演会, 岡山, 2015.9.16
- ⑪ Aisyah Binti Zabri, Seiya Kamida, Kazuyuki Nakahata, 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, 岡山, 2015.9.16
- ⑫ 齊藤中, 高本龍直, 中畑和之, MEMS センサを用いた無線振動計測へのカルマンフィルタの適用に関する研究, 土木学会四国支部第21回技術研究発表会, 高松, 2015.5.23
- ⑬ アイシャ ザブリ, 紙田聖也, 中畑和之, 粒子フィルタを用いた介在物の音速と密度の同定に関する研究, 土木学会四国支部第21回技術研究発表会, 高松, 2015.5.23

[図書] (計 2 件)

- ① 中畑和之他, 社会インフラ メンテナンス学, 分担執筆 (II 工学編, 第6章, 10担当), (公社) 土木学会, (2017)

- ② 中畑和之他, 巨大構造物ヘルスマモニタリング, 分担執筆(第3編, 第2章, 第4節担当), エヌ・ティー・エス, (2015)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.cee.ehime-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

中畑 和之 (NAKAHATA KAZUYUKI)

愛媛大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20380256

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

中村 和幸 (NAKAMURA KAZUYUKI)

明治大学・総合数理学部・准教授

研究者番号：40462171

### (4)研究協力者

なし