

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560586

研究課題名(和文) 精密小型加振機と無線センサネットワークを用いた構造センシングの高度化と実証実験

研究課題名(英文) Improvement of structural sensing method with accurate small vibrator and wireless sensor network

研究代表者

佐伯 昌之 (SAEKI, Masayuki)

東京理科大学・理工学部・准教授

研究者番号：70385516

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)：本研究では、精密小型加振機と加速度無線センサネットワークを結合した構造センシングシステムにおいて、対象構造物の周波数伝達関数を高精度に推定する手法を開発した。この手法は、計測された加速度波形から変位波形を求め、振源関数と一緒にARX法を用いて解析することで、対象構造物の周波数伝達関数を高精度に推定するものである。2m超の鋼製単純梁を用いた振動実験を行い、計測により得られた周波数伝達関数を誤差3%程度で表現できる有限要素モデルを同定できることを示した。さらに、道路標識を対象とした原位置試験を行い、周波数伝達関数を同定するとともに、錘による固有振動数変化を精度よく同定できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：We have been developing a new structural sensing method with the accurate small vibrator and wireless accelerometers. In this research, we develop an estimation method of frequency transfer function (FTF). In the estimation method, time series data of displacement is calculated from that of measured acceleration response. Since the sampling is accurately synchronized with the frequency modulation of vibrator, ARX method is applicable to the data of displacement and force function. Then the FTF is accurately estimated. A laboratory scale vibration test is conducted with a two-meter span steel simple beam to verify the prototype system. The FTF estimated by the present system is compared with the analytical result of finite element method. In this analysis, a finite element model, whose estimation error of FTF is about 3.5%, is determined. We also conduct in-site vibration test using a road sign. The temporal change of eigen frequency due to the addition of mass is accurately detected.

研究分野：構造センシング

キーワード：精密小型加振機 定量評価 無線センサネットワーク 構造センシング

1. 研究開始当初の背景

近年、建設投資額が減少する中、社会基盤構造物を効率的に維持管理することが重要となっている。効率的な維持管理を達成するためには、耐荷力などの保有性能を定量的に把握することが必要となる。そのため、著者等は、MEMS 加速度計を搭載した無線センサネットワークと精密小型加振機を結合した構造センシング手法の開発を進めてきた。

平成 22 ~ 23 年度に若手(B)で採択された研究課題において、上記構造センシングシステムのプロトタイプを開発し、室内における実証試験により、従来よりも高い精度で対象構造物の周波数伝達関数を推定できることを示している。

2. 研究の目的

本研究では、著者等が開発してきた精密小型加振機と加速度無線センサを結合した構造センシング手法において、システムのより一層の高度化を図り、より高精度に周波数伝達関数を推定できるようにすることを目的とした。さらに、室内実験のみならず、原位置試験により本システムの適用性を実証することを目的とした。より具体的には、以下の項目を目的として、研究を始めた。

- (1) 精密小型加振機の制御方法の確立
- (2) 加速度無線センサの自動キャリブレーション機能の構築
- (3) 振動モード同定手法の高度化
- (4) 鉄筋コンクリート梁模型を用いた損傷同定実験
- (5) 原位置における機動計測実験

3. 研究の方法

研究の目的で示した 5 つの項目に対して、それぞれ行った研究を以下に示す。

(1) 精密小型加振機の制御方法の確立

研究開始当初、制御方法を工夫することにより、ある狭い周波数帯域で均一な力を励起する方法を開発することを目的としていた。これは、従来は周波数領域で周波数伝達関数を推定する方法を考案しており、より高い精度で推定するためには、データの SN 比を均一化する方が望ましかったからである。

しかしながら、研究を進める中で、均一な力を励起するよりも、時刻同期精度を高め、時間領域で解析した方が推定精度を向上させることが見込めたことから、この研究を停止した。新しく開発した手法は、下記(3)にて詳述する。

(2) 加速度無線センサの自動キャリブレーション機能の構築

高精度のセンサノードを 10 個作成し、温度を変化させつつ、応答を計測した。レーザー変位計で取得したデータと比較することで、キャリブレーションを試みた。実験を行

ったところ、日常的な温度変化は 1Hz 以上の加速度応答にあまり影響を与えず、むしろ精度低下にはランダムノイズの寄与の方が大きいことが分かった。一方、センサの個体差は相当にあり、上記手法により振幅を補正できるようにした。また、時刻同期については、無線センサに書き込むプログラムを改良し、キャリブレーションをしなくても精度よく周波数伝達関数を推定できるように、システムを改良した。

(3) 振動特性同定手法の高度化

振動特性を同定するために、ARX法を導入した。上記(2)の通り、精密小型加振機と加速度無線センサの時刻同期精度が確保されたため、ARX法を適用することができた。実際にARX法を適用したところ、解析の途中で得られるAR方程式の計画行列の質が相当に悪いことが判明した。これは、観測データの処理方法に起因する。

本手法では、精密小型加振機から得られる加振力を一度離散フーリエ変換し、加振エネルギーが集中する周波数帯のみを取り出し、逆離散フーリエ変換して時系列波形に戻す。また、計測された加速度波形も同じ処理を行い、さらに周波数領域で ω^{-2} で除すことで変位の時系列波形を取得する。この処理フローを図 1 に示す。

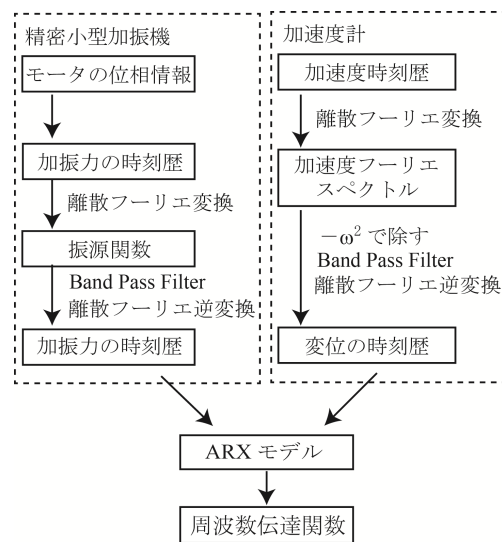


図 1 周波数伝達関数の推定方法

(研究成果：塚原 (2014) の図 1 を引用)

この処理方法は、精密小型加振機と無線センサネットワークが高精度に時刻同期できる本システムならではの処理方法であり、観測データに含まれるランダムノイズを大幅に低減することを可能にする。しかしながら、AR方程式では、計画行列の各成分は時系列波形の相関行列で構成されるため、ランダムノイズが少ないデータを用いた場合、かえって計画行列の性質(条件数)を悪化させてし

まう．そこで，本研究では，上記の様なノイズの少ないデータを使用しても，精度よく周波数伝達関数や固有振動数，減衰定数を推定するための実際的な手順を検討した．具体的には，係数行列の逆行列を求める際に，修正コレスキー分解を使用する．当初，ガウスの消去法や特異値分解など様々な方法を試してみたが，修正コレスキー分解を使用すれば，精度よくAR方程式を解けることを確認した．

(4) 鉄筋コンクリート梁模型を用いた損傷同定実験

当初は，鉄筋コンクリート梁を作製し，実際に振動実験を行っていたが，途中から研究対象をより実践的なものである道路標識に変更した．

対象構造物の周波数伝達関数を推定したり，固有振動数・減衰定数を推定したりすることはどちらも可能であるが，複雑なRC梁を用いた場合は推定結果の精度検証をする手段がなかった．一方で，鋼管でできている道路標識は有限要素法などにより精度よく計算できることから，精度検証がより容易である．さらに，小型のRC梁を実験室レベルで振動させるよりも，実際の道路に設置されている道路標識を用いる方が，より現実的である．以上の理由から，道路標識を用いた振動実験を行った．また一方で，従来から行っていた2m超の鋼製単純梁を用いた室内実験も継続し，精度改善や精度検証のための実験を行った．

(5) 原位置における機動計測実験

実際に供用中の道路標識を用いて振動実験を行い，より簡易なシステムを開発するためのノウハウを蓄積した．また，供用中の道路標識のため損傷を与えることができなかったため，代わりに錘を固定して振動特性を変化させ，その応答の変化を精度よく推定できるかを検証した．

4. 研究成果

本研究により，精密小型加振機を用いた構造センシング手法の開発を進め，対象構造物の周波数伝達関数を高精度に同定できることを確認した．その一例として，原位置で行

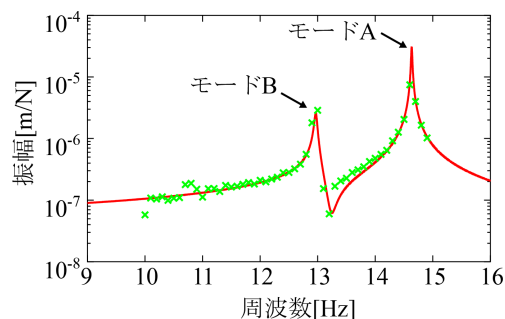


図2 周波数伝達関数の推定方法

(研究成果:塚原(2014)の図9aを引用)

った道路標識振動実験の結果を示す．

図2は，原位置の道路標識を精密小型加振機で加振し，その応答をARX法で解析して求めた周波数伝達関数の振幅分布である．赤線がARX法の解であり，緑点は時系列波形のフーリエスペクトルを振源関数のフーリエスペクトルで除して求めた周波数伝達関数である．両者はよく一致している．

原位置試験の場合は，周波数伝達関数の正解を知ることができないため，精度検証が不可能となる．そこで，対象構造物に1.5kgの錘を2段階に分けて固定し，それによる固有振動数の変化を推定することを試みた．図3に，本手法で推定された固有振動数の時間変化を示す．

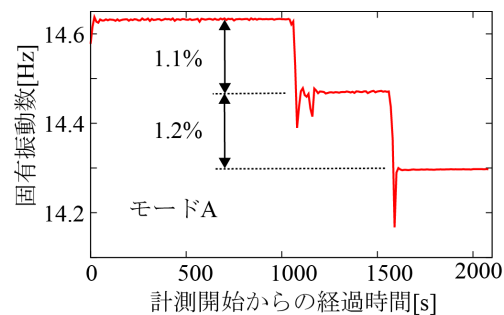


図3 固有振動数の時間変化

(研究成果:塚原(2014)の図10を引用)

図から明らかな通り，錘を固定したタイミングで固有振動数が1.1%程度変化の様子が綺麗に同定できている．この結果は振幅が最大のモードに関するものであるが，振幅がより小さい2番目および3番目のモードについても，図3よりは精度が劣るものの，精度よく変化を追う事ができることが分かった．

また，鋼製単純梁を用いた室内実験では，本システムにより推定された周波数伝達関

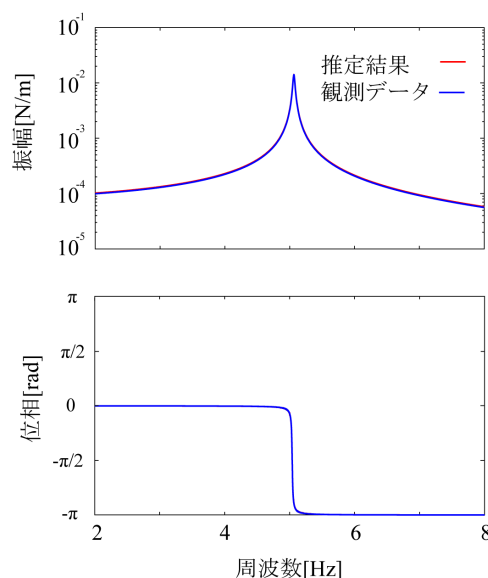


図4 計測された周波数伝達関数とFEM解析の比較

(研究成果:栗原(2014)の図4を引用)

数と有限要素法による解析結果を比較し、3.5%程度の誤差で有限要素モデルを同定できることを示した。この実験で得られた解析結果を図4に示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

M. Saeki, T. Kurihara, M. Tsukahara, T. Ohtani, Laboratory experiment of the structural sensing method using the accurate artificial vibrator, Advanced engineering informatics, 2015, 査読有

DOI: 10.1016/j.aei.2015.03.008

塚原美佳・奥村昂史・渡邊和樹・大谷隆浩・石井克哉・佐伯昌之・藤原鉄朗, 精密小型加振機を用いた振動特性同定手法の開発, 土木学会論文集 A2 (応用力学) (特集号), Vol.70, No.2, 1_921-1_928, 2014, 査読有

http://doi.org/10.2208/jscejam.70.1_921

栗原幸也・塚原美佳・渡邊和樹・佐伯昌之, 精密小型加振機を用いた単純梁振動実験における周波数伝達関数の推定, 土木学会論文集 A2 (応用力学) 特集号, Vol.69, No.2, 1_625-1_632, 2013, 査読有

http://doi.org/10.2208/jscejam.69.1_625

斎藤拓馬・渡邊和樹・佐伯昌之, 精密小型加振機と無線センサネットワークを結合した構造センシング手法の精度検証, 土木学会論文集 A2 分冊(応用力学)特集号, Vol.68, No.2, 1_761-1_769, 2012, 査読有

http://doi.org/10.2208/jscejam.68.1_761

〔学会発表〕(計 7 件)

奥村昂史・佐伯昌之, 精密小型加振機と無線加速度センサノードを用いた振動計測における時刻同期精度の検証, 第69回年土木学会次学術講演会, 2014年9月10-12日, 大阪大学豊中キャンパス

栗原幸也・森木美沙樹・佐伯昌之, 精密小型加振機を用いた鋼製単純梁振動実験のモデル化, 第69回年土木学会次学術講演会, 2014年9月10-12日, 大阪大学豊中キャンパス

塚原美佳・佐伯昌之, ARX モデルを用いた単純梁振動実験における振動特性変化の検出, 第69回年土木学会次学術講演会, 2014年9月10-12日, 大阪大学豊中キャンパス

T. Kurihara, M. Tsukahara, T. Saitou, K. Watanabe, M. Saeki, Structural sensing method using the accurate

artificial vibrator and wireless sensor network, First international conference on civil and building engineering informatics, Nov. 2013, Tokyo.

栗原幸也・塚原美佳・佐伯昌之, 単純梁の振動実験における周波数伝達関数の推定, 第68回年土木学会次学術講演会, 2013年9月4-6日, 千葉県日本大学津田沼キャンパス

栗原幸也・林徳俊・佐伯昌之, 単純梁の振動実験に基づく減衰パラメータの推定, 第67回年土木学会次学術講演会, 2012年9月5-7日, 名古屋大学東山キャンパス

斎藤拓馬・佐伯昌之, 精密小型加振機と加速度無線センサによる周波数応答関数の計測精度の実験的検討, 第67回年土木学会次学術講演会, 2012年9月5-7日, 名古屋大学東山キャンパス

〔図書〕(計 0 件)

〔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

東京理科大学 理工学部 土木工学科 佐伯研究室 HP

http://www.rs.noda.tus.ac.jp/~saeki/research.htm#research_2

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐伯昌之 (SAEKI, Masayuki)

東京理科大学・理工学部・准教授

研究者番号: 70385516

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

本学大学院生