

無線センサネットワークを用いた周波数応答関数の高精度計測

東京理科大学 学正員 ○日高 ちはる
東京理科大学 正会員 佐伯 昌之

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期に建設された橋梁が数多く存在し、それらの老朽化の問題が深刻になってきている。効率的にそれらの橋梁を長寿命化するためには、より定量的に健全性を把握することが必要であると考えられる。そのため、橋梁の健全性を数値化する方法の一つとして、橋梁の振動特性の変化に着目して損傷を同定する構造センシング手法の研究が進められている¹⁾。そして、近年では、構造センシングに無線センサネットワークを適用する研究がなされている²⁾³⁾。無線センサネットワークは、対象とする構造物に多点・高密度で自由度をもってセンサを配置できるので、より高次モードの形状を高精度に捉えることができると考えられる。また、他の高精度化の試みとして、振動源を既知とする研究がなされている。例えば、偏心した錘を数 Hz 程度で回転させることで遠心力を発生させ、それを構造物に伝達することで構造物を振動させるマイクロ起振機と呼ばれる振動源が開発されている⁴⁾。本研究では、上記無線センサネットワークとマイクロ起振機を併用し、さらにそれ等を高精度に時刻同期することで構造物の伝達関数を高精度に取得する構造センシング手法を開発することを最終目的とし、本論文では、実際に無線センサネットワークに時刻同期、スタッキング、離散フーリエ変換の機能を実装し、実証試験により振動源の振動成分を精密に推定できることを明らかにする。

2. 本研究で検討するセンシング手法の概要

本手法では、まず精密小型加振機で橋梁を振動させ、多点に配置したセンサノードで加速度応答を測定する。そして、センサノードはその情報をサーバに無線で送信し、サーバで解析することにより、構造物の固有振動数やモードを同定するものである。

精密小型加振機は、先に述べたマイクロ起振機と同様の原理で構造物を振動させる。起振力として遠心力を用いているため、錘の回転周波数を高精度に制御しさえすれば、起振力を既知とすることができる。本研究では、偏心錘の回転はサーボモータで高精度に制御し、加振力は構造物に

損傷を与えないよう、十分小さいものとする。

センサノードは、精密小型加振機と時刻同期して加速度データをサンプリングする。そして、観測した加速度応答をセンサノード上でスタッキングすることでシグナル／ノイズ比を改善することが可能となる。さらに、観測波形をスタッキングすることから、センサノード上のメモリを節約することができる。また、センサノードでは、離散フーリエ変換も行う。本手法では、精密小型加振機のモータの位置制御とセンサノードの加速度サンプリングが時刻同期されているため、精密小型加振機により励起された加速度波形はその周波数が既知の定常振動としてモデル化することができる。そのため、その振動成分の位相と振幅の値を離散フーリエ変換により高精度に同定することができる。このように、本手法では本来必要な情報である振動源により励起された振動成分の情報を一切失うことなく、観測データ量を大幅に削減することが可能であり、これは無線センサネットワークの課題の 1 つである膨大なデータ量の確実な回収の問題を解決する。

3. 時刻同期手法の実装と実証試験

本研究では、精密小型加振機と無線センサノード間の時刻同期手法を実装し、正常にスタッキングおよび離散フーリエ変換を行うことができることを確認するための実証試験を行った。

3. 1 時刻同期手法の実装

本研究で実装した時刻同期手法は、精密小型加振機が 1 秒毎に計測のトリガ信号を無線でブロードキャストし、信号を受信した無線センサノードはサンプリング周波数 100Hz で 100 回計測を行うというものである。計測終了後は次のトリガ信号を受信するまで待機する。この手法を用いると、1 秒間の中ではクロック誤差が生じるものの、そのクロック誤差が累積することはない。

上記の時刻同期手法を実装して実験したところ、時刻同期なしの場合は 30 分で 714 μ 秒のずれが生じたのに対し、時刻同期ありの場合はわずか 2 μ 秒のずれであったため、時刻同期が達成できたと判断した。

キーワード：時刻同期、無線センサネットワーク、精密小型加振機、シグナル／ノイズ比

連絡先：〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641 東京理科大学理工学部土木工学科 TEL：04-7124-1501

3. 2 模型を用いたスタッキングの実証試験概要

次に、精密小型加振機と無線センサを時刻同期した状態でスタッキングを行うことにより、正常にシグナル／ノイズ比が改善されることを検証する。橋梁の振動計測では、16bitかそれ以上のADコンバータを使用する必要があるが、本研究ではスタッキングの確認ができればよいので、内蔵のADコンバータを用いることとした。また、同じ理由で振動は鉛直1成分のみを計測することとする。12bitのADコンバータでも加速度を計測できるように剛性の低い橋梁模型をスチレンボードにより作成し、室内実験を行った。その様子を図-1に示す。

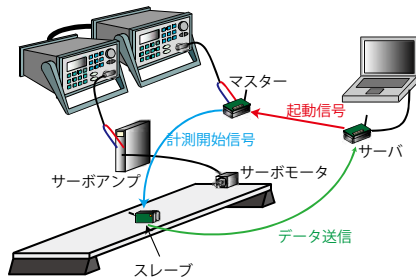
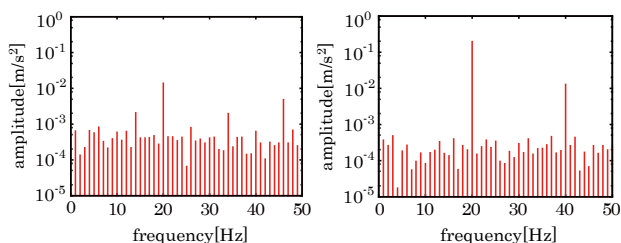


図-1 模型を用いたスタッキングの実証試験

本試験では、ファンクションジェネレータによりサーボモータを2048パルスで1回転するように制御している。そして、サーボモータが起振する振動をスレーブ側センサノードに搭載した加速度計で計測する。スレーブ側のセンサノードが計測するデータ長を10秒とし、180回のスタッキングを行った。これは、30分間の計測に相当する。

3. 3 模型を用いたスタッキングの実証試験の結果

図-2に時刻同期ありとなしの場合の周波数応答関数を示す。横軸が周波数、縦軸は周波数ごとの加速度応答の振幅を表している。



時刻同期なし

時刻同期あり

図-2 スタッキングを行った場合

時刻同期なしでスタッキングを行った場合は、精密小型加振機のシグナルである20Hzの部分の振幅までも低減し、正常にスタッキングを行えていない。

一方、時刻同期ありの場合は20Hzの部分の応答が卓越し

ており、振幅が低減していないことがわかる。このことから、時刻同期及びスタッキングが正常に行われていることが確認でき、シグナル／ノイズ比が改善できたと言える。

4. 実橋梁における振動計測

本手法では、交通荷重や風荷重などの外力による振動をノイズとして扱う。しかし、常時微動のフーリエスペクトルを見ても、構造物の固有振動数付近においては応答が卓越しており、スタッキングによりノイズレベルを低減できるランダムノイズとは言い難い。そこで、実橋梁にて加速度計により振動を計測し、応答波形をスタッキングすることで、そのフーリエスペクトルの値が低減されることを確認した。図-3にスタッキング前とスタッキング後の10秒間の加速度応答のフーリエスペクトルを示す。

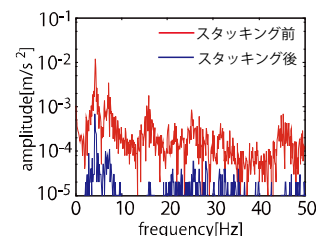


図-3 周波数スペクトル

図-3は、10秒、1000個のデータを1つと見なし、スタッキング前と60分スタッキングした後の結果を比較したものである。4.2Hz付近のピーク値に注目すると、スタッキング前のフーリエスペクトルに対し、スタッキング後のフーリエスペクトルは5.6%程度に低下した。

5. まとめ

本研究で明らかとなった点を以下にまとめる。

- ・精密小型加振機と無線センサ間を高精度に時刻同期することで、正常にスタッキングができ、シグナル／ノイズ比が改善した。
- ・実橋梁での振動計測値を1つのデータ長を10秒とし、スタッキングを行ったところ、60分のスタッキングで十分にノイズを除去できることが明らかとなった。

参考文献

- [1]山本鎮男, ヘルスマニタリング, 共立出版株式会社, 2008
- [2] Xu, N. et al., A Wireless Sensor Network for Structural Monitoring, SenSys'04, November 3-5, 2004
- [3] J. P. Lynch et al.: Power-efficient wireless structural monitoring with local data processing, Proceedings of the International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Tokyo, Nov., Vol. 1, 331-338, 2003
- [4] 古川愛子: 未知の加振力によるフーリエ振幅比を利用した損傷同定手法の実橋梁による検証, 構造工学論文集, vol.53A, p258-267, 2007
- [5]日高ちはる, 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モニタリング手法の基礎的検討, 土木学会第64回年次学術講演会, p855-856, 2009