スマートセンサを用いた自律分散型の構造物アクティブセンシングシステムの開発

東京大学 学生会員 ○牛田 満士
東京大学 正会員 長山 智則
東京大学 フェロー 藤野 陽三

１．研究目的と背景

近年構造物の老朽化が社会問題となっている．現在は主に目視点検に基づいて補修などの対策が講じられているが，コストの問題，頻度の問題，安全性の問題，信頼性の問題などが生じている．このような現状を受け，センサによる定量的な検査手法として構造健全性モニタリング(SHM)の研究がなされてきた．しかし有線センサによる計測システムはコストが高く，計測点数は自ずと限られることもあり，汎用的な健全性評価システムには至っていない．これに対し，スマートセンサと呼ばれるデータ処理能力を持つ無線センサを用いた SHM システムが提案されている [1]．配線が不要で，計測チャンネル当たりの導入コストを抑えられるため，多点計測を可能にすると期待されている．本研究では，市販されているスマートセンサの中で最も高い情報処理能力を有した Imote2(写真 1)を用いて SHM システムを開発することとした．

２．Imote2 の特性の把握と適したシステムの形態

スマートセンサに利用される MEMS 型の加速度計は安価であるが，分解能が限られており微振動の計測に向かない．また，スマートセンサの通信速度も限られており，多量の計測データを１つのノードに集めるためには長時間を要し，消費電力も大きいため，実用的でない．常時微動を計測し基地局で中央集権的に処理するシステムの実現は困難である．本研究では外部入力に対する応答計測を利用するアクティブセンシングの考えを用いて，列車通過時，地震時の橋梁など構造物の加速度応答を計測し，各ノードで処理を行う自律分散型のシステムを提案する．

３．自律分散型データ処理手法

ここでは列車通過時の応答計測を利用したデータ処理について説明する．通過時を含む数分間の応答を計測した Imote2 は，計測データから信号解析に用いる部分を抽出する(図 1)．計測データは，①通過列車の加重が作用している時間帯，②列車通過後の，構造物が自由振動している時間帯，③その他の時間帯に分けられる．①，②を抽出し，それぞれから健全性評価指標をもとめる．①からは非線形損傷検出を想定してコヒーレンス関数を求める．これは 2 つの定常信号間の線形性を表す周波数の関数である.②からは線形損傷検出を想定して，ERA(Eigensystem Realization Algorithm)を利用して固有振動数を推定する．

４．実橋梁振動計測データを用いた損傷検出指標の評価

4 チャンネルのレーザドップラ速度計を用いて計測した新幹線高架橋の交通振動速度データ [2]に上述のデータ処理を適用した．その結果，コヒーレンス関数は近接する計測チャンネル１と２の間ではコヒーレンス関数は 0.91 であり，線形であることを示す１に近いことが確認された．また ERA によって求めた固有振動数とパワースペクトル密度関数のピークが一致しており，ERA によって適切に固有振動数を推定できることが示された(図 2)．

５．数値シミュレーション

コヒーレンス関数を利用した非線形損傷の検出可否を調べるため 6 自由度モデルを用いて数値シミュレーションを行った．健全な橋脚と非線形損傷を有する橋脚を想定してこれらのコヒーレンス関数を求め，比較する．非線形損傷を有するモデルは 3 層と 4 層の間にバイリニアモデルによる非線形損傷をもたせた．表 1 に示すように，非線形損傷を有する位置より上の領域で，平均コヒーレンス関数値が低下した．

キーワード Imote2，自律分散型，アクティブセンシング，コヒーレンス関数
連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 ＴＥＬ03-5841-6097

６．模型実験

写真 2 に示した構造模型の振動を本研究で構築した自律分散型アクティブセンシングシステムを用いて計測，解析する実験を行った．列車の通過を模して振動台を数秒間振動させ，Imote2 はその振動を抽出し，健全性評価を行う．健全な状態，非線形損傷を有する状態，線形損傷を有する状態の 3 つを想定して構造模型を構築した．非線形損傷のモデルは 2，3 階間の 4 本の柱のうち 1 本の柱の上側のねじを緩めて非線形損傷を表現した．線形損傷のモデルは 2-3 階間の柱のうち 1 本の柱を細くし，剛性を下げて線形損傷を模した．これらを健全な状態と比較した．表 2 に示すように，非線形損傷を有する状態では，健全な状態と比較して平均コヒーレンス関数値が下がることが確認された．また表 3 に示すように，線形損傷を有する状態では二つの卓越振動数が健全な状態に対して低下した．

７．まとめ

本研究では自律分散型のアクティブセンシングシステムを構築した．さらに，本システムのコヒーレンス関数，卓越振動数に焦点をあてた構造健全性評価の有用性を実橋梁データの解析，数値シミュレーション，構造模型実験を通して確認した．今後実構造物への適用に向けて，マルチホップ通信の実現，システムのロバスト化など，更なる検討を行う必要がある．

表１　シミュレーションの平均コヒーレンス関数値

	健全	非線形
5-6間	0.8938	0.8208
4-5間	0.8929	0.7894
3-4間	0.8993	0.8131
2-3間	0.9253	0.9272
1-2間	0.9735	0.9738

表２　構造模型実験の平均コヒーレンス関数値

	健全	非線形
3-4	0.9088	0.8528
3-2	0.9370	0.8284
3-1	0.8827	0.8168

表３　構造模型実験の卓越振動数

健全	線形損傷
17.56	17.30
21.25	19.94

(Hz)

参考文献

1) T. Nagayama, B. F. Spencer, Jr., Jennifer. A. Rice: Structural health monitoring utilizing Intel's Imote2 wireless sensor platform, Proceedings of the SPIE 6529, 2007

2) D. Su, J. Hernandez Jr., Y. Fujino, E. Ollinger, T. Miyashita : Local Dynamic Vibration Prediction of Interaction between High-Speed Train and Railway Bridge, Proceedings of Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures 2007, Porto, Portugal, 2007. 10.

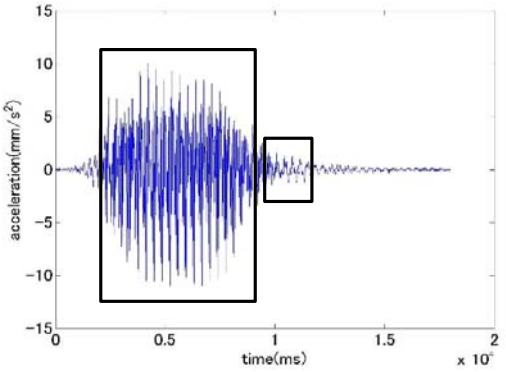

図１　列車通過時と通過後の振動データの抽出

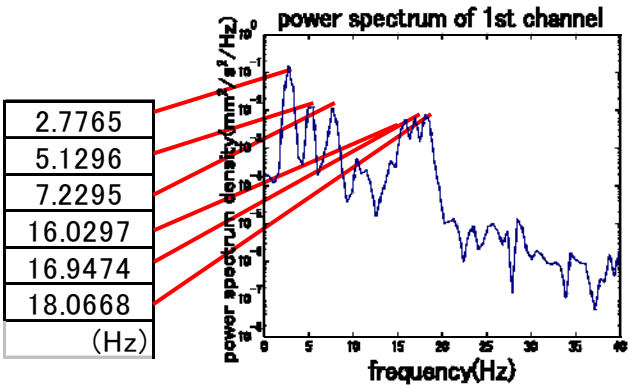

図２　卓越振動数推定とパワースペクトル密度関数

写真１　Imote2

写真２　構造模型と Imote2