

多点配置した MEMS 加速度センサによる橋梁の 3 次元動態可視化に関する研究

愛媛大学大学院 学生員 ○川原正人, 高本龍直
愛媛大学大学院 正 員 中畑和之, 大賀水田生

1. はじめに

橋梁の維持管理技術として、遠隔モニタリングを適用する取り組みが近年盛んに行われている¹⁾。遠隔モニタリング技術を用いれば、計測データの一元処理が可能となると期待できる。動態を詳細に把握するためには多点同時計測が理想であり、これらを安価に実現する可能性を持っているのが、ナノ・マイクロテクノロジーを利用した MEMS(Micro Electro Mechanical System) 加速度センサと、無線通信・演算処理機能を組み合わせたスマートセンサシステムである²⁾。本研究では、橋梁上の多点に MEMS 加速度センサを配置し、無線センサノードから無線通信技術を用いて転送される大量の時間域データを高速に演算処理するシステムを開発した。また、本システムを用いて多点で計測された振動データを基に橋梁の 3 次元可視化を行い、可視化結果に対して注目すべき振動数の前後にバンドパスフィルタを作用させることで、固有振動モードの抽出を行う。

2. 計測システムの構成

図-1 に示すように、計測システムはセンサモジュールと無線モジュールからなる無線センサノードと、モバイル PC と無線ルーターからなる基地局に分けられる。センサモジュールには x, y, z 軸の計測が可能な MEMS 加速度センサ(カイオニクス社製, KXM52-1050, 大きさ $5.0\text{mm} \times 5.0\text{mm} \times 1.8\text{mm}$, 計測レンジ $\pm 2.0\text{G}$, 感度 1.0V/G)が搭載されており、006P 型(9V)乾電池を用いて駆動する。センサモジュールの重量は 230g であり、プラスチック箱で梱包し防塵対策を施

した。箱側面には BNC ケーブル出力端子が 4 つあり、これらの出力端子から電圧信号が無線モジュール内のデータ集録・A/D 変換ボードに送られる。無線モジュールは、ナショナルインスツルメンツ(NI)社の NI WLS-9215 を使用する。NI WLS-9215 は、分解能が 16 ビット、電圧入力レンジは $\pm 10\text{V}$, 計測チャンネル数は 4 チャンネルあり、1 チャンネル当たりの最大サンプリング周波数は 100kHz である。

基地局のモバイル PC では、NI 社の開発環境である LabVIEW を用いて無線センサノードを制御する。ここでは、電圧信号から物理量への変換、物理量データのグラフ化、データの記録、可視化が実行できる。電圧信号から変換された加速度は数値積分を行うことにより、変位に変換するが、ノイズやドリフトを除去するためにデジタルフィルタを適用する。

変位の算出方法を以下に示す。サンプリング周期を Δt とし、時刻 $t = n\Delta t$ における加速度 $\mathbf{a}^n$ と時刻 $t = (n-1)\Delta t$ における加速度 $\mathbf{a}^{n-1}$ から、速度 $\mathbf{v}^n$ は次式のように求まる。

$$\mathbf{v}_i^n = \mathbf{v}_i^{n-1} + \Delta t \left(\frac{\mathbf{a}_i^{n-1}}{2} + \frac{\mathbf{a}_i^n}{2} \right), \quad (i = x, y, z) \quad (1)$$

また、変位 $\mathbf{u}^n$ は次式のように求まる。

$$\mathbf{u}_i^n = \mathbf{u}_i^{n-1} + \Delta t \mathbf{v}_i^{n-1} + \Delta t^2 \left(\frac{\mathbf{a}_i^{n-1}}{3} + \frac{\mathbf{a}_i^n}{6} \right), \quad (i = x, y, z) \quad (2)$$

なお、静止状態における初期値は $\mathbf{v}^0 = \mathbf{0}$ と $\mathbf{u}^0 = \mathbf{0}$ であり、この初期値を用いて式 (1) と (2) より、変位が求まる。これらの変位を基に橋梁の 3 次元可視化を行う。

3. 計測実験

本計測システムを用いて松山市にある歩道橋で振動実験を行った。振動実験の概略を図-2 に示す。無線センサノードを歩道橋床版に 16 基設置し、基地局では LabVIEW で無線センサノードを制御することにより、床版中央で跳躍した時の x, y, z 方向の加速度の計測を行う。サンプリング周波数は 1kHz , デジタルフィルタは 400Hz のローパスフィルタ, 2Hz のハイパスフィルタを用いて 47.5 秒間の計測を行った。図-3 は計測した加速度から算出した変位を 3 次元可視化した場合の 6 秒間のスナップショットである。跳躍から着地による衝撃、それ以降の減衰自由振動が分かる。

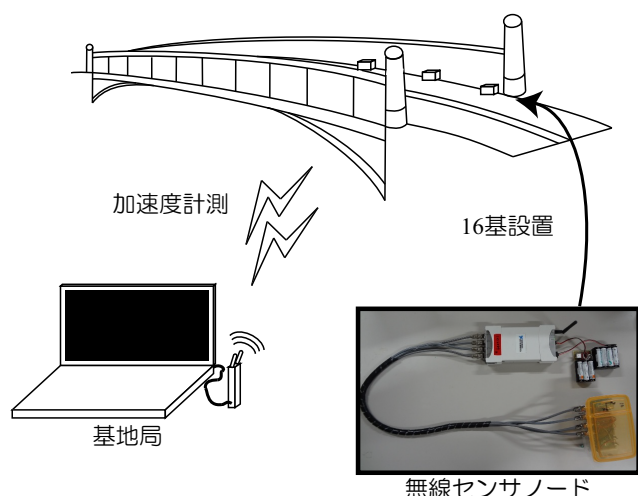


図-1 計測システムの概略

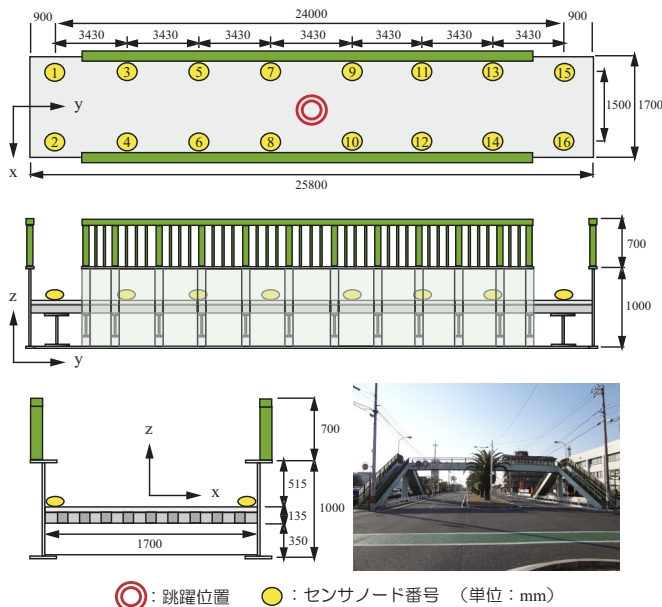


図-2 歩道橋計測実験の概略

向の曲げ振動の1次モードは3.6Hz、曲げ振動の3次モードは24.8Hzであった。今回の計測実験から求めた固有振動数と数値計算は良好に一致し、本手法による振動モードの同定は妥当であることを示した。

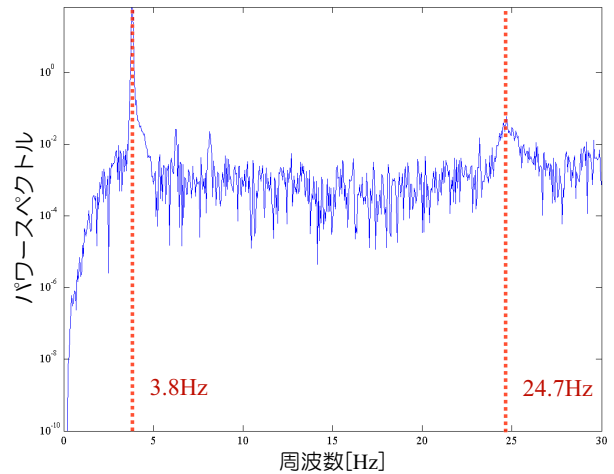


図-4 センサノード No.10 の周波数特性

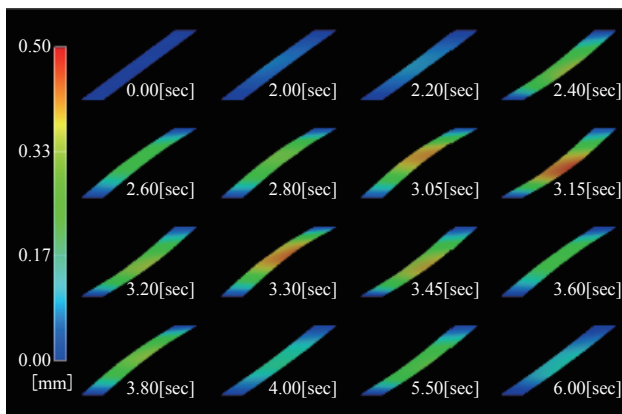


図-3 3次元可視化のスナップショット(0~6sec)

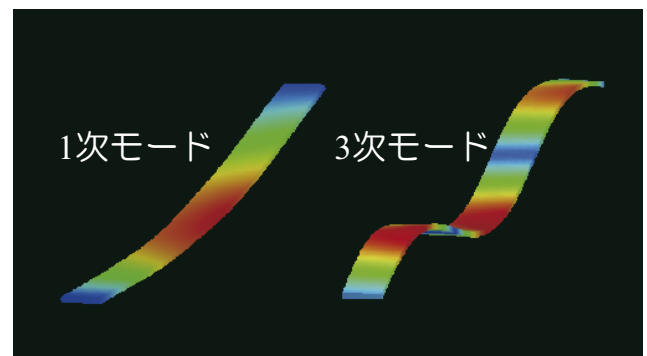


図-5 固有振動モードの抽出 (左：3.75~3.90Hz、右：24.05~25.43Hz のバンドパスフィルタを適用)

4. 固有振動モードの同定

図-4 に、無線センサノード No.10 における加速度の周波数特性を示す。図-4 では 3.8Hz と 24.7Hz に振動数のピークが見られる。ここでは、この2つのピークに対して狭帯域のバンドパスフィルタを適用する。図-3 の可視化結果にバンドパスフィルタを作用させた結果を図-5 に示す。図-5 の左図は 3.75~3.90Hz のバンドパスフィルタを、右図は 24.05~25.43Hz のものを作用させた場合の橋梁の3次元可視化結果である。この結果から、3.8Hz の卓越振動は橋軸方向の曲げ振動の1次モード、24.7Hz は3次モードであることが分かる。少数点の計測では振動モードの同定は難しいが、上記のように多点で計測を行うことで可視化結果から振動モードが抽出できることが分かる。

次に、計測結果から求めた固有振動モードの妥当性を調べるために、Lanczos 法³⁾ による固有値解析を行った。解析では、設計図より数値モデルを作成し、ソリッド要素を用いて行った。解析結果より、橋軸方

5. 結論

本研究では、MEMS センサを多点に配置し、加速度データを無線技術によって収集するモニタリングシステムの開発を行った。16 基の無線センサノードから得られるデータを効率よく収集・制御し、橋梁の振動の3次元可視化を行うことにより、振動モードの同定が可能であると示した。また、計測結果と数値解析による固有振動モードは良好な一致を示し、本システムの妥当性を示した。今後は、実際の道路橋に本システムを適用するために、センサ感度の改良やノード数の増設を行いたい。

参考文献

- 1) Boller, C., Chang, F.K. and Fujino, Y. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, Wiley, 2009.
- 2) 川谷充郎, 金哲佑, 尾崎隆弥, 利波立秋, 塚本昌彦, 藤田直生, 南靖彦: 橋梁振動モニタリングのための MEMS 無線センサノード開発と実橋適用性検討, 応用力学論文集, Vol.13, pp.1009-1016, 2010.
- 3) 矢川元基, 青山裕司著: 有限要素固有値解析, 森北出版, 2001.