

橋梁振動モニタリングのための MEMS 要素技術を利用したセンサノード開発

長岡技術科学大学 学生会員 ○白田 幸忠 佐藤 悠樹
長岡技術科学大学 正会員 宮下 剛 長井 正嗣

1. はじめに

計測・解析技術の急速な進展を背景として、構造物をセンサによりモニタリングし、その健全性を客観的かつ定量的に評価する構造ヘルスマニタリングの既設橋梁への適用が注目されている。しかし、計測機器の価格が、依然と高価であるため、既設橋梁において空間的に高密度なモニタリングを実施することが困難な状況にある。これまで、筆者らは、MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems)要素技術を利用し、既設橋梁において空間的に高密度な構造ヘルスマニタリングを実現するための安価なセンサノード開発を進めてきた¹⁾。本論文では、MEMS 三軸加速度計のデータをロギングするセンサノードのプロトタイプを既設橋梁へ適用し、評価した事例について報告する。

2. センサノード

作成したプロトタイプは、MASTER ノード(図 1)と SLAVE ノード(図 2)に分かれる。MASTER ノードの構成は、マイコン：PIC18F2620, FT232RL・USB シリアル変換モジュール、無線モジュール：TS24(野村エンジニアリング)からなる。MASTER ノードには、ノート PC と USB により接続して、5V 電圧を給電することが可能である。次に、SLAVE ノードの構成を以下に示す。

- ・ 電源 回路のノイズを低減させるために、アナログ回路とデジタル回路を分離しており、デジタル回路には 3 端子レギュレータ TA48M033F を用いて、9V006P 電池から 3.3V を供給している。アナログ回路には下記の基準電圧 IC を用いて、9V006P 電池から 5.0V を供給している。
- ・ 基準電圧 IC ADC は基準電圧をもとに量子化を行う。そのため、バッテリーの電圧変動に対して、基準電圧を安定化させるために、基準電圧 IC REF195(アナログデバイセズ、5.0V 基準電圧 IC)を使用している。
- ・ 信号調整 これまで、サンプリング周波数を 100Hz とし、エイリアスによるノイズ混入を避けるために、1 段の RC ローパスフィルタ(R:金属皮膜抵抗 1kΩ, C:ポリプロピレンコンデンサー1μF, カットオフ周波数：159Hz)を挿入していた。しかし、フィルタの周波数特性により、高周波数になるにつれて、振幅の減少ならびに位相の遅れが問題となったため、ローパスフィルタは挿入しないこととした。これにより、ノイズは増加することとなったが、サンプリング周波数を 200Hz とし、オーバーサンプリングを行い、移動化平均により 100Hz にして、ノイズの低減を図っている。また、低周波数のドリフト成分を除去するために、ソフトウェア上で 0.1Hz 以下の周波数成分を除去するハイパスフィルタを適用している。
- ・ MCU プログラムメモリ：64Kbyte, SRAM：3936byte の PIC18F26K20(マイクロチップテクノロジー)を利用している。動作周波数は 40MHz (10MHz 水晶振動子を PLL 動作)である。プログラミングは CCS 社 C コンパイラを利用し、プログラム構成は USART・タイマ割込みを許可するイベントドリブン型としている。時刻・加速度 3CH 分を MMC カードへ SPI モードによりバイナリ形式で書き込む。
- ・ その他 ADC：AD7798×3 (アナログデバイセズ、16 ビット、 $\Sigma \Delta$ 型)、メモリ：128MB MMC カード(Transcend, <2GB)、加速度センサ：KXM52-1050 (Kionix, 3 軸, 感度：1000mV/G @5.0V 動作時)、無線モジュール：TS24(野村エンジニアリング, 2.4G ワイヤレスモデム, 技適取得済み, 通信距離は見通し良好時 50m)、クロック：リアルタイムクロックモジュール (RTC-8564NB, 周波数精度 5±23ppm)

3. 既設橋梁への適用事例

既設鋼トラス橋の垂直材に、MEMS 加速度計とサーボ型加速度計を設置し、振動計測を実施した。図 3 に、センサの設置状況を示す。図 4 に、センサノードによる計測結果を示す。また、図 5、図 6 に、両者の時刻暦波形およ

びフーリエ振幅スペクトルの比較結果(鉛直方向)を示す。両者の時刻は、相互相関を計算し、その最大値に基づいて合わせている。図7に、図5において車両が1台走行したときの拡大図を示す。両者は、良好に一致しているものの、加速度振幅ではMEMS加速度センサの方が、値が多少小さくなっており、キャリブレーションが必要であることがわかる。図8に、常時微動の計測結果例を示す。デジタル・アナログ回路の分離ならびに16ビットADCの使用、オーバーサンプリングによる平均化を実施していることから、±1gal以下の加速度も計測されている。

4. まとめ

本研究では、MEMS要素技術を利用し、既設橋梁において空間的に高密度な構造ヘルスマニタリングを可能とする安価なセンサノード開発において作成したプロトタイプを、既設橋梁へ適用して、評価した事例について報告した。今後の課題として、複数台のプロトタイプによる振動モード形の同定、ノード間の時刻同期、基板化による耐久性の向上が挙げられる。

参考文献

- 1) 佐藤悠樹, 宮下剛, 長井正嗣: 構造ヘルスマニタリングのためのスマートセンサノードの既設橋梁への適用, 第26回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会講演概要集, pp. 2-5, 2008.11.



図1 MASTER ノード

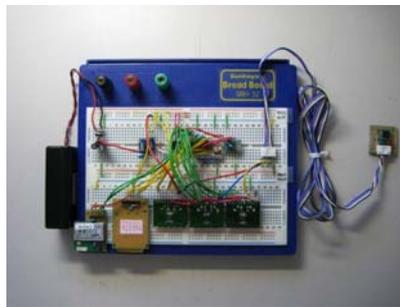


図2 SLAVE ノード

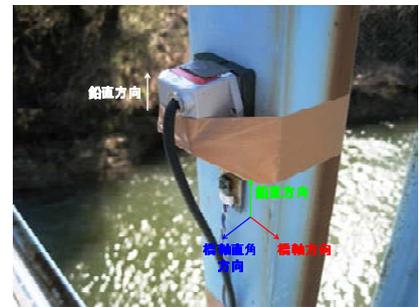
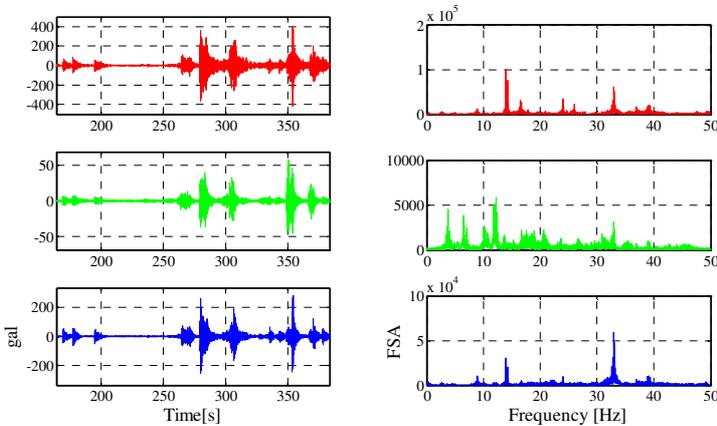


図3 センサの設置状況



(a) 時刻暦波形 (b) フーリエ振幅スペクトル

図4 センサノードの計測結果(上から橋軸, 鉛直, 橋軸直角方向)

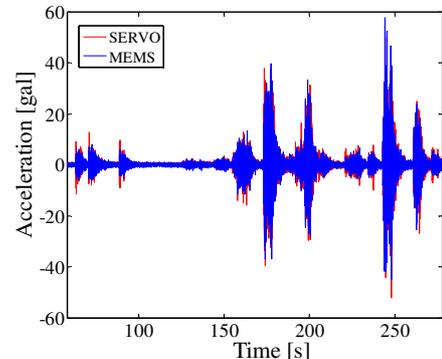


図5 時刻暦波形の比較

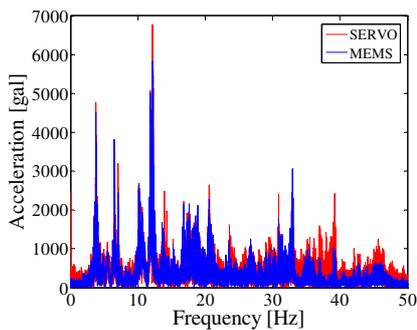


図6 周波数成分の比較

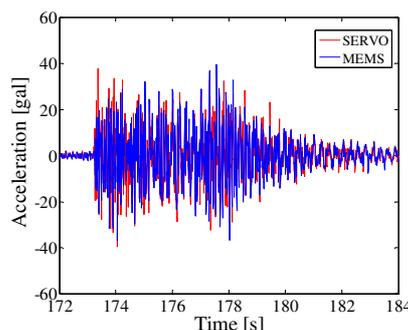


図7 図5の拡大図

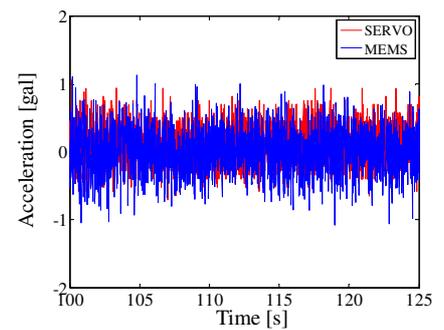


図8 常時微動波形