

試作無線センサノードの実橋振動モニタリングへの適用性検討

神戸大学大学院 フェロー 川谷 充郎
 神戸大学大学院 学生員 ○利波 立秋
 神戸大学大学院 学生員 尾崎 隆弥
 京都大学大学院 学生員 伊勢本 遼

京都大学大学院 正会員 金 哲佑
 神戸大学大学院 電気電子工学専攻 塚本 昌彦
 神戸大学大学院 電気電子工学専攻 藤田 直生
 神戸大学大学院 電気電子工学専攻 南 靖彦

1. はじめに

戦後から高度成長期にかけて整備された多くの土木構造物は、耐用年数を迎える時期に来ており、長期の供用による劣化・老朽化の進行が危惧されている。健全度評価のための様々な方法が提案されているが、通常、構造物においては、部材の損傷や劣化はその質量、減衰や剛性等の材料特性、固有振動数、減衰比や振動モード等の動特性の変動として現れることから、振動モニタリングによる構造物の健全度評価は有効であると報告されている¹⁾。従来の振動計測は有線計測システムを基盤にしているが、特に、橋梁の振動計測において、配線の煩雑さ回避と現地作業時間削減のため、ワイヤレス化の要望が高まっている。著書らは、廉価の振動計測およびモニタリング用の無線センサノードの実現を目的として開発中の無線センサノードの試作品に対する有用性検討を行ってきた。開発中の無線センサノードの問題点として、データ欠損が挙げられ、その対策が課題であった。本研究では、消費電力やメモリを抑えた小型で廉価な無線センサ開発を目指しているため、ある程度の欠損を許容し、カルマンフィルタを用いたデータ欠損補間手法の可能性を検討している。具体的に、実橋梁における有線・無線センサそれぞれの計測振動波形やフーリエ振幅スペクトルを比較・検討する。また、無線センサにおいて、データ欠損補間手法を用いて補間を行い、補間前後の振動波形やフーリエ振幅スペクトルを比較・検討することで、実橋梁への適用性を検討する。

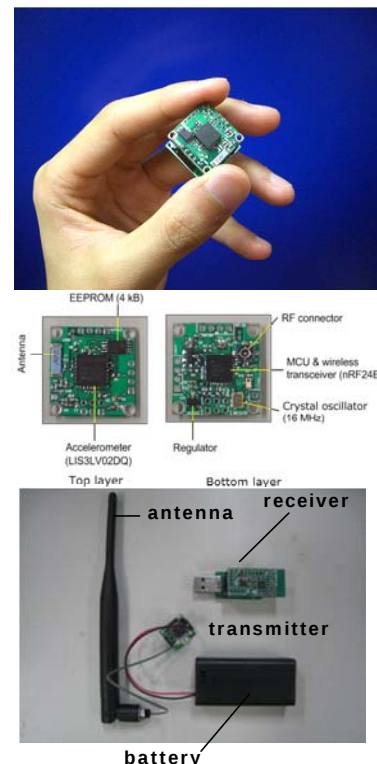


Fig. 1 Prototype wireless sensor node.

2. データ欠損補間

時系列データにおける離散状態方程式は

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}\mathbf{v}(k), \mathbf{y}(k) = \mathbf{H}\mathbf{x}(k) \quad (1)$$

と表される。ここで、 $\mathbf{x}$ はシステムにおける状態ベクトル、 $\mathbf{F}$ はシステムマトリックス、 $\mathbf{G}$ および $\mathbf{H}$ は入力、出力マトリックスを示し、また $\mathbf{y}$ は出力ベクトル、つまり観測値である。

欠損値補間においては、カルマンフィルタによる平滑化が有用な手法である。平滑化は逆方向の逐次式により実現でき、言い換えれば、過去の全ての観測データを用いることにより、次式より推定される。

$$\mathbf{A}(n) = \mathbf{V}(n|n)\mathbf{F}^T\mathbf{V}(n+1|n)^{-1}$$

$$\mathbf{x}(n|N) = \mathbf{x}(n|n) + \mathbf{A}(n)(\mathbf{x}(n+1|N) - \mathbf{x}(n+1|n)), (m < n \leq N) \quad (2)$$

$$\mathbf{V}(n|N) = \mathbf{V}(n|n) + \mathbf{A}(n)(\mathbf{V}(n+1|N) - \mathbf{V}(n+1|n))\mathbf{A}(n)^T$$

ここで、 $\mathbf{x}(n|n-1)$ および $\mathbf{V}(n|n-1)$ は時間 $n-1$ の状態に基づき予測された時間 n における条件付き平均ベクトルおよび、分散マトリックスである。

Table 1 Properties of wireless sensor node

基本仕様	外形寸法	20(W)×20(D)×4.2(H)mm(突起部含まず)
	質量	約1g(電池を含む)
マイコン仕様	MPU	Intel 8051 互換マイクロコントローラ
	動作クロック	16MHz
	プログラムメモリ	4KByte
	データメモリ	256Byte
	外部EEPROM	4KByte
無線仕様	通信モジュール	nRF2401
	通信周波数	2404~2479MHz
	通信方式	Shock Burst (Nordic社独自方式)
	通信速度	1MHz / 250kbps
	無線チャンネル数	76チャンネル
	送信出力	0.3mW
	通信距離	15m程度
電源仕様	アンテナ	内蔵型(チップアンテナ)
	電源電圧	DC 3~9V
	動作電圧	DC 2.2~3.6V
	動作時間	72時間
	最大消費電流	未測定
	モード別消費電流	通常: 5mA程度 通信時: 30mA程度 スリープ時: 5μA程度
インタフェース仕様	プログラム用	SPI
	通信用	UART
	その他	Digital I/O 2ポート(PWM出力1ポート)

キーワード ヘルスモニタリング, 振動モニタリング, 無線センサノード, データ欠損補間

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学工学研究科 市民工学専攻 Phone 078-803-6383

特に、以下に示す式(3)の推定パラメータが欠損部分に用いられる.

$$\begin{cases} \mathbf{x}(n|n) = \mathbf{x}(n|n-1) \\ \mathbf{V}(n|n) = \mathbf{V}(n|n-1) \end{cases}, (m < n \leq N) \quad (3)$$

最後に、 $y(n|N) = \mathbf{H}\mathbf{x}(n|N)$ により欠損値 $y(n)$ が与えられる.

3. 実験概要

3.1 デバイス 本研究で用いる無線センサノードを Fig. 1 に示す. ハードウェアの主な仕様を Table 1 に示す. 本ノードの外形寸法はバッテリーを除き $20 \times 20 \times 4.2\text{mm}$ であり, 質量は約 1g である. 加速度分解能が 12bit の 3 軸加速度センサ(LIS3LV02DQ)を搭載している.

3.2 対象橋梁 対象橋梁は, 橋長 32.4m, 支間長 31.8m, 有効幅員 3.75m の単純鋼床版 I 桁橋である (Fig. 2 参照). Fig. 2 に示すように, No.1 に中継器, No.2 と No.3 に有線加速度計と無線センサを設置し, それぞれ 5 分間を 3 回同時計測を行う. サンプル周波数は, 有線加速度計, 無線センサ共に 100Hz である.

4. 実験結果

測点 No.2 における有線・無線センサそれぞれから得られた加速度応答を Fig. 3 に示す. 無線加速度センサノードの場合, 解像度の制限による微小振動の計測ができないものの, 加速度応答がほぼ一致することから本無線センサの有用性は確認できたと言える. 紙面の制約で省略しているが, 振動特性も一致していることを確認している. ただし, 無線センサでは 10% 程度のデータ欠損が生じており, データ欠損補間手法を用いて補間を行う. 補間前後の加速度応答の一部を Fig. 4 に示す. また, 有線加速度計・無線センサ補間前後におけるフーリエ振幅スペクトルを Fig. 5 に示す. 有線, 無線補間前, 無線補間後の全てのケースについて振動特性が一致することが分かる.

5. まとめ

橋梁振動モニタリングを可能にする無線センサノードの実橋梁適用性検討を行った. 有線加速度計による加速度波形・フーリエ振幅結果がほぼ同じであることから, 無線センサノードによる振動計測は可能であると考えられる. また, ある程度のデータ欠損を許容した上での, データ欠損補間を行うことにより, モニタリングにおいて有効なデータとして扱うことが可能と考える. ただし, 欠損率が高い場合の対策として限界があり, センサノードの改良と併用する必要があると考える.

【参考文献】

- 1) W. Doebling, et.al.: Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review, Los Alamos National Laboratory report LA-13070-MS, 1996.
- 2) C.W. Kim, M. Kawatani, et.al.: Wireless sensor node development for bridge condition assessment, Advances in Science and Technology, Vol.56, pp.573-578, 2008.

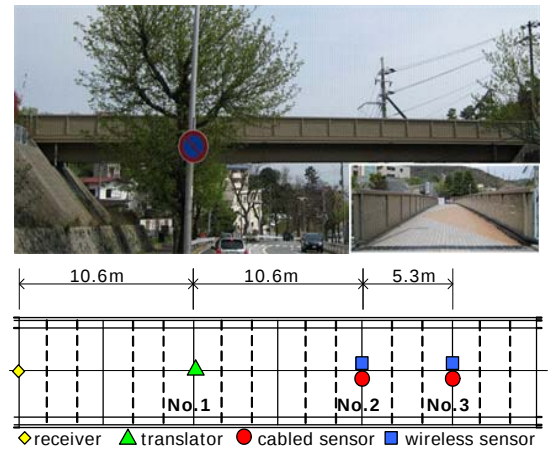
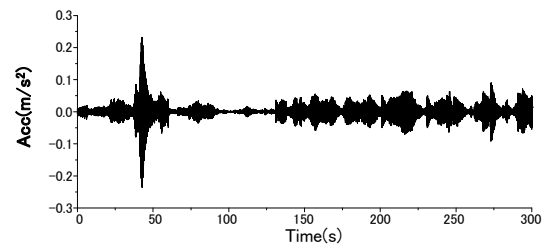
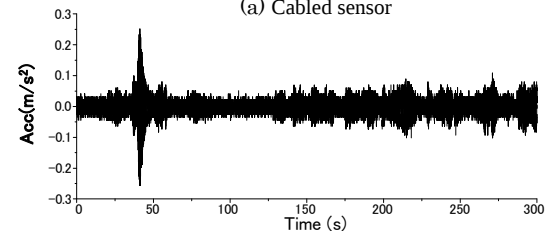


Fig. 2 Observation bridge and observation point.

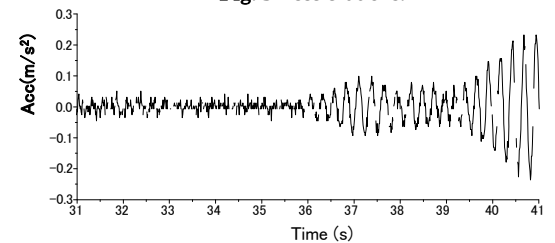


(a) Cabled sensor

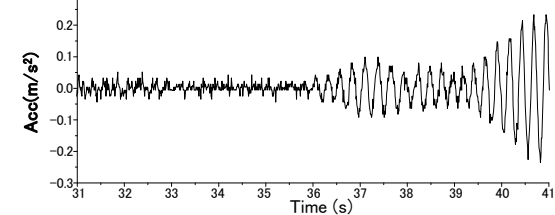


(b) Wireless sensor

Fig. 3 Accelerations.

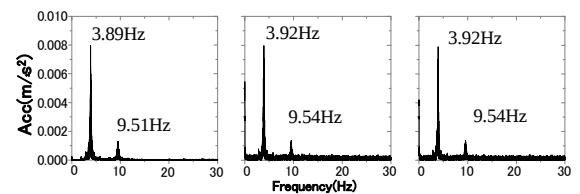


(a) Before recovering of data.



(b) After recovering of data.

Fig. 4 Accelerations.



(a) Cabled

(b) Before

(c) After

Fig. 5 Fourier spectra.