

スマートセンサーの土木構造物への適用における一検討

A study on the application of smart sensors in civil structures

北見工業大学大学院社会環境工学専攻	○学生員	潘凱凱	(Kaikai Pan)
北見工業大学大学院社会環境工学専攻	学生員	綿崎良祐	(Ryosuke Watasaki)
北見工業大学社会環境工学科	正 員	宮森保紀	(Yasunori Miyamori)
北見工業大学社会環境工学科	正 員	三上修一	(Shuichi Mikami)

1. はじめに

近年、構造物の新しい健全度評価方法として、「構造ヘルスモニタリング(Structural Health Monitoring, SHM)」が注目されている。しかし、従来の有線型のセンサーシステムでは多点で長期間の測定を行うには経済性や効率性の面で導入は容易ではない。そこで、情報処理機能と無線通信機能を備えたスマートセンサーを用いて、経済的で効率的な振動測定を実現することが期待されている。

一方、SHM の対象となる土木構造物は、屋外の厳しい環境条件にさらされながら供用されている。土木構造物のモニタリングにスマートセンサーを利用するためには、その実用性の検討が必要である。著者らは長期間の振動測定を行うため、一定の電圧を供給することができる定電圧回路を製作し、耐低温性、防水性を備えた定電圧供給システムを開発した¹⁾。しかし、スマートセンサーを用いた実橋梁の振動測定実験においては、スマートセンサーの基本機能である無線通信は有線センサーより不安定な場合があったり、スマートセンサーで用いられる半導体型センサーは温度によりドリフト現象が発生する場合があるので、高品質な測定を行うには、検討すべき事項も残っている。また、スマートセンサーでは端末が独立しており、長期間の計測では、電源の確保も問題となる場合がある。

このような背景から、本研究では土木構造物への適用を想定して、スマートセンサーを用いた通信実験を行い、外部アンテナの通信距離の確認とアンテナの種類による比較をした。通信経路の違いについてはマルチホップ通信の5つの通信パターンによる電圧の消費を調べた。また、温度による測定結果への影響については、10回の加速度計測を行い、ドリフトとセンサーボックス内の温度変化を調べ、ドリフトと温度の関係を確認した。

2. スマートセンサー

本研究において使用するセンサーは図-1に示すMEMSIC社のImote2システムである。データを収集するセンサーボード、データを計算処理や無線通信を行うプロセッサボード、そしてバッテリーボードがそれぞれ別個に存在し、これらを接続して使用する。センサーボードはイリノイ大学において開発され、z軸方向に高感度の加速度計(Silicon Designs社SD1221)を搭載したSHM-H²⁾を使用している。プロセッサボードについては、CPUはMarvell PXA271を採用し、無線通信チップはTexas Instruments社CC2420 IEEE802.15.4を使用して



図-1 Imote2

いる。バッテリーボードは図-2に示す綿崎らが開発した定電圧供給システムを接続している¹⁾。Imote2はOSやアプリケーションプログラムをインストールして使用するが、本研究ではOSにTiny OS 1.xを使用し、アプリケーションプログラム群としては、JIPテクノサイエンス社の橋梁モニタリングシステムBHELMOを用いる。

3. 通信実験

3.1 実験目的

スマートセンサーの基本機能である無線通信はSHMを効率化することが期待されるが、無線通信の信頼性は、通信距離、通信経路、障害物、外部からの電波干渉などの特性によって影響され、そのすべてがデータの損失を起こす原因となっている。現在のスマートセンサーの無線通信システムは通信規格IEEE802.15.4である。現状としては、スマートセンサーは通信障害が発生し、経路探索やデータ転送ができなくなることがある。そこで、無線通信の安定性を向上するため、屋外環境において、外部アンテナの通信距離を確認した。

マルチホップ通信はスマートセンサーの無線ネットワークの通信方式として使われている。マルチホップ通信は各センサーノード間で通信を行い、任意のノードを経由して複数回の通信により、データを基地局へ転送する。しかし実際の橋梁振動計測において、通信経路によるノードの電波状況、電圧消費、通信時間などの変化は十分に明らかになっていない。また、長期間の計測を行うためにはより低い電圧消費が求められる。そこで、効率のよい計測を行うため、異なる通信経路の電力消費に着目し、調査実験を行った。

3.2 外部アンテナによる通信距離

3.2.1 実験概要

屋外環境で外部アンテナの通信距離を確認するため、図-3のような障害物無しのグラウンドで実験を行った。実験は経路探索、振動計測、データ回収までを1サイクルとし、経路探索後、振動計測後、データ回収後に受信



図-3 実験状況 図-5 2dBi(左)と 4dBi(右)アンテナ

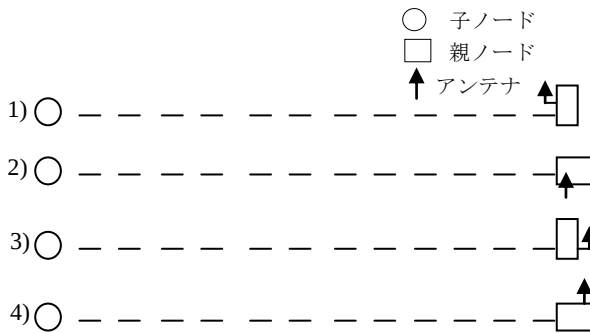


図-4 親ノードの向き

した電波強度 RSSI(Received Signal Strength Indicator)を記録した。図-4 のように、同じ距離で子ノードに対し親ノードの向きを回転して、各距離で4実験サイクルの実験を行った。通信距離は 1~45mで、1~10m は 2m 間隔、10~45m は 5m 間隔で実験を行った。図-5 は実験で用いた 2 種類アンテナの写真である。

3.2.2 実験結果と考察

実験で得られた通信距離と RSSI 値の関係を図-6 に示す。また、対数曲線で近似した結果も実線で示す。図-6 では、2dBi と 4dBi アンテナはともに通信距離が長いほど RSSI 値が小さくなる。また、同じ通信距離でも、10dB 程度のバラツキが現れた。同じ向きでも、バラツキがあった。屋外環境における、通信距離以外の要因も受信電波強度に影響すると考えられる。2dBi と 4dBi アンテナの RSSI 値の変化については、2dBi アンテナは 4dBi アンテナより利得は低い、高い受信強度を受けることが分かった。無指向性のアンテナでもすべての方向で利得は同じではなく³⁾、角度やアンテナの形により、実効面積も異なるため、2dBi アンテナが 4dBi アンテナより高い受信強度になったと考えられる。

以上の結果から、通信距離の影響が最も大きいものの、実環境ではその他の要因で受信強度が変動することがわかった。

3.3 マルチホップ通信における電力消費

3.3.1 実験概要

効率的な通信経路の作成には、様々な経路による電源の消費を調べる必要がある。そこで、親ノード 1 基と子ノード 5 基を図-7 のように 10m 間隔で直線上に設置し、5 つのマルチホップパターンで経路を作った。計測とデータ回収を交互に行い 5 回毎に電圧を記録し、計 50 回計測を行った。

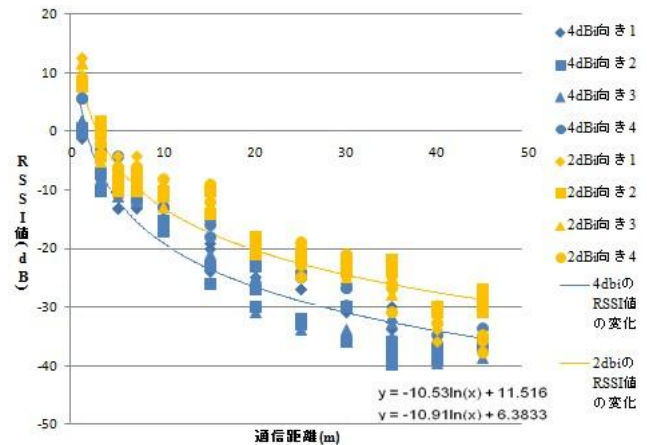


図-6 RSSI 値と距離の関係性

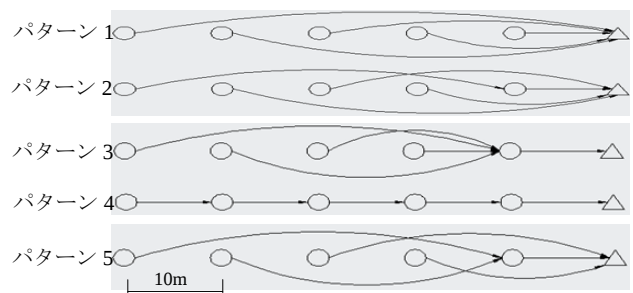


図-7 実験パターン

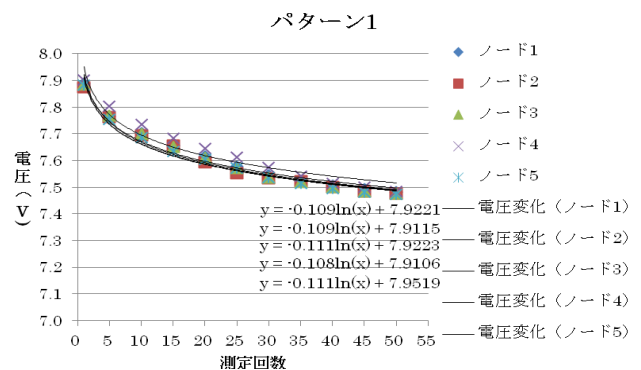


図-8 パターン 1 の電圧変化

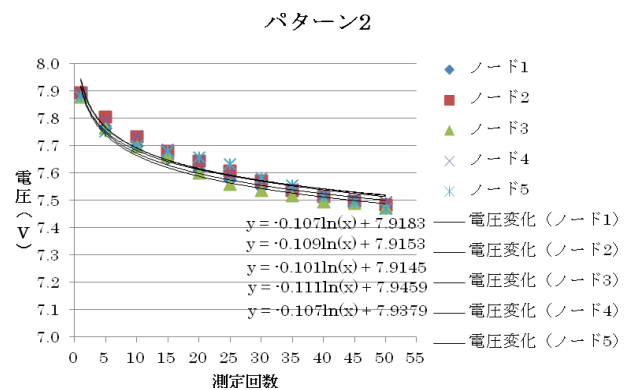


図-9 パターン 2 の電圧変化

3.3.2 実験結果と考察

実験結果を図-8～12 に示す。また、対数曲線で近似した結果も実線で示す。図に示したように、パターン1からパターン5において、電圧の変化量は最初が大きく、徐々に小さくなるのがわかった。各パターン内においては、ノード間はほぼ同様な消費曲線が得られた。表-1にもまとめたように、パターン2とパターン5、パターン3とパターン4を比較して見ると、ほぼ同じ気温で、データ転送の中継役になる子ノードもあるが、ホップ数による電圧の減少率はほぼ変わらなかった。そのため、通信経路による電圧消費量の変化はほとんどないといえる。パターン1、2、5の電圧の消費量とパターン3、4の電圧の消費量は数パーセントの差があるが、それは温度差によると考えられる。また、気温が低いほど減少率が高い傾向がある。これはシステムの電源である乾電池の特性によるものだと考えられる。

4. 温度変化に対するドリフトの影響

4.1 実験目的

スマートセンサーを用いた実橋梁の多点振動計測実験において得られた時刻歴波形を図-13 に示す。横軸は時刻歴、縦軸の単位は最下位ビット LSB (1LSB=0.014gal) である。このように、振動計測開始から終了まで、中心軸が約0.245gal変動するドリフト現象が見られた。自由振動計測などの振幅が大きい場合にはこの程度のドリフトは問題とならない場合が多いが、常時微動計測では、正確なデータ解析ができなくなることもある。一般的にドリフトの原因はいくつかあり、グラウンド電圧の変動が原因となる場合もある。そのため、図-2の定電圧供給システムにおいて、グラウンド線を太くする改良を行ったが、顕著な効果は得られなかった。一方、SHM-Hセンサーボードは半導体型センサーであるため、温度の影響に着目し、ドリフトの変化量とセンサーボックス内の温度差を調べ、考察を行った。

4.2 実験概要

本システムの熱源となるのはプロセッサボード (Imote2)、センサーボード (SHM-H) および定電圧回路のレギュレータである。そこで、Imote2 を用いて計測した時刻歴応答波形におけるドリフトとセンサーボックス内の温度変化の関係を調べた。温度測定にはそれぞれ室温を EL-USB-2 データロガー、センサーボックス内を AD-5612A 赤外線放射温度計で測定した。実験ではスマートセンサーを安定な場所に設置して、10 回連続で加速度を計測し、計測開始時と終了時のセンサーボックス内の温度を測定した。計測サンプリング数は 280Hz である。各計測の間で、データ回収と時刻同期のため、約2分の間隔がある。センサーボックスは密閉した状態で実験を行った。

4.3 実験結果と考察

Imote2 の連続計測によるセンサーボックス内の温度変化と測定値との関係を確認した。10 サンプルのセンサーボックス内の温度変化と加速度波形を計測時間だけで繋ぎ合わせ図-14 に示す。この図から温度が上昇するにつれて測定値が大きくなっていることが分かった。

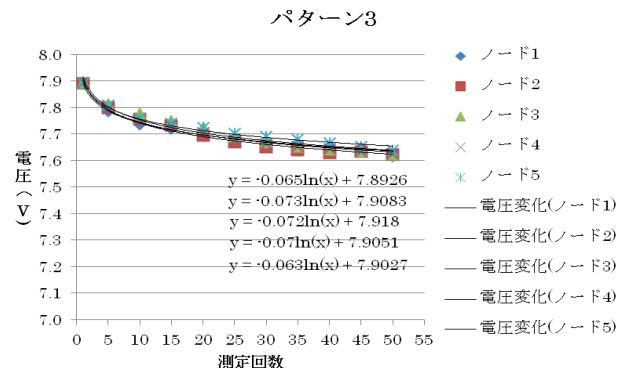


図-10 パターン3の電圧変化

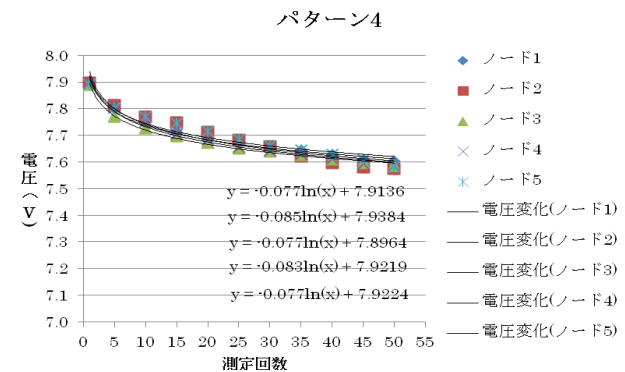


図-11 パターン4の電圧変化

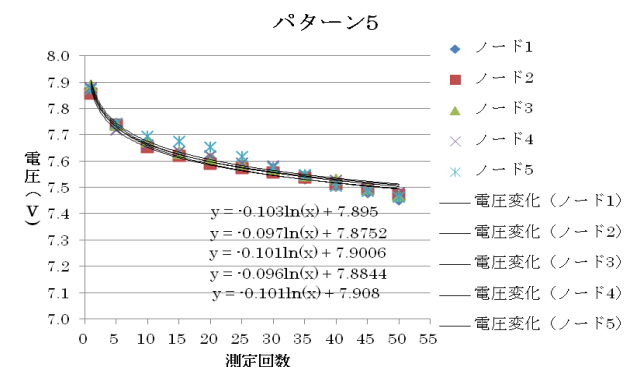


図-12 パターン5の電圧変化

表-1 各パターンの比較

	最終平均 電圧(v)	平均減 少率(%)	総ホッ プ数	平均気 温(℃)
パターン 1	7.478	5.176	0	9.6
パターン 2	7.481	5.134	1	10.1
パターン 3	7.626	3.368	2	27.2
パターン 4	7.585	3.926	3	31.2
パターン 5	7.467	5.159	4	14.0

1回の計測で発生した温度差と測定値の変化量の関係を図-15に示す。また、線形で近似した結果も実線で示す。加速度計測の開始時と終了時1秒間の測定値の二乗平均平方根(RMS)を式(1)で求める。開始時と終了時のRMSの差をドリフト変化量とする。 g は1秒間の測定値、 n は1秒間データ数、 F は1秒間の測定の平均値である。

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n g_i^2}{n}} \quad (1)$$

図-15に示しているように、10サンプルの振動データから、温度が上昇するとドリフト変化量が大きくなることが確認できた。しかし、線形近似の結果によると、温度差0でもドリフトが発生することになる。これは実験ではセンサーボックス内の温度を測定しており、センサー素子そのものの温度ではなく、より正確な温度変化が得られていないと考えられる。そのため、センサーボックス内の温度でなく、センサーボード自体の温度を測定することでより正確にドリフトと温度の関係を示すことができると考えられる。

5. まとめ

本研究では現状におけるスマートセンサーの土木構造物における実用化に関して、無線通信状況と加速度データにおけるドリフト要因の検討を行った。外部アンテナの性能調査実験では規格2dBiと4dBiの外部アンテナを用いて、通信距離による受信電波状況を調べ、通信距離が長いほど小さくなる傾向を確認できた。2dBiアンテナは4dBiアンテナより、高い受信強度を受けることが分かった。実環境での受信強度は距離の影響が最も大きい、アンテナの形状や角度など他の要因により変化する。今後の橋梁振動計測実験においてはアンテナを適切な距離や角度で設置し、実効面積を大きくすることでより安定した受信強度が得られると考えられる。

マルチホップ通信における電力消費は5つのマルチホップ通信経路で調査を行った。各パターンではノード間の電圧消費の差は小さいことが分かった。通信による電源の消費は計測による電圧の消費より遥かに小さいことも分かった。スマートセンサーのマルチホップ通信は、電源消費への影響が小さいため、計測現場の状況によって、通信強度の良い経路を選択することが重要である。しかし、通信時間が短く、障害物等の影響が少ない効率の良いルートの設定方法も課題である。

実橋梁の振動測定で振動データにドリフトが生じたため、その原因の検討を行った。10サンプルの加速度データから、温度が上昇するとドリフトの変化量が大きくなることが確認できた。より正確な振動解析を行うためには、ドリフトと温度の関係を把握し、修正係数を算出することが今後の課題となっている。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(若手研究(B)、課題番号:25870025)ならびに、北海道土木技術会鋼道

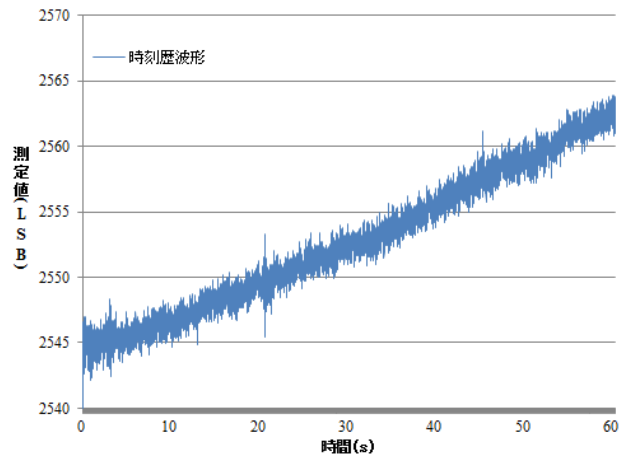


図-13 ドリフト現象の例

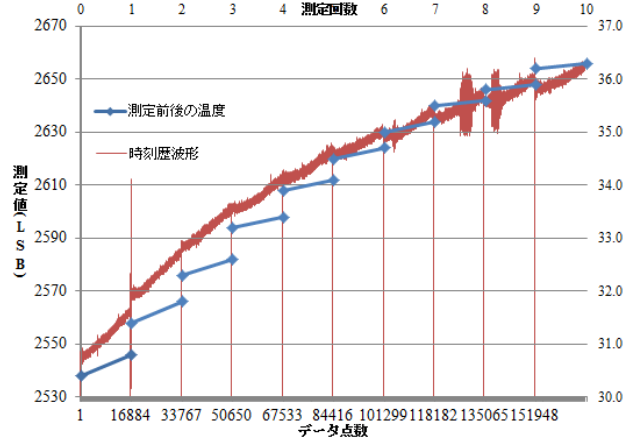


図-14 温度変化と測定値の関係

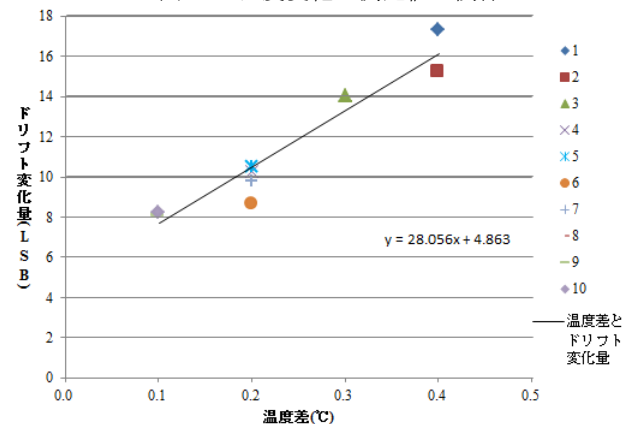


図-15 各回のドリフトと温度変化

路橋研究委員会の研究助成による支援を得ました。実験の実施に際しては北見工業大学社会環境工学専攻の岡本覚人氏、社会環境工学科の西山勝隆氏の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 綿崎、岡本、宮森、三上、山崎：橋梁振動測定のための Imote2 スマートセンサーにおける定電圧供給システムの改良，平成 25 年全国大会第 68 回年次学術講演会 CS6-008，2013。
- 2) ISHMP: SHM- Sensor Board High-Sensitivity Accelerometer Sensor Board Datasheet and User's Guide, 2009.
- 3) 電子情報通信学会編：アンテナ工学ハンドブック，オーム社，1980。