

無線センサによる多点同期振動計測と 詳細な有限要素モデルを利用した 構造性能評価法の開発

東京大学大学院工学系研究科 講師 長山智則

概要：

構造物の寿命・劣化度を推定し効率的に維持管理をするために、また、地震・台風などの大外力作用時の安全性を評価するために、現有性能把握が欠かせない。近年のセンシング技術の発展は目覚ましく、MEMS 技術を利用した無線センサにより構造物の挙動が詳細に把握できるようになりつつある。昨年度の研究では助成研究者らが開発している無線センサシステムを利用して橋梁の動的挙動を詳細に計測し、有限要素モデルと比較することで、構造特性を推定する方法を提案した。今年度の研究では、無線センサシステムの計測性能を、計測物理量、データ転送速度・信頼性の観点から向上するとともに、詳細な有限要素モデル上で複数の損傷・劣化パターンを再現し、これらの損傷・劣化パターンに対して敏感な計測物理量・動特性値を分析した。対象としたアーチ橋においては、水平方向のモード形において、構造特性の変化が激しく現れることが明らかになった。

キーワード：無線センサネットワーク、歪計測、データ転送、動特性感度

1. 背景

無線センサは、構造物の合理的な維持管理に不可欠な現況把握に有効と期待されている。MEMS 型センサを利用した端末は安価で、また無線通信機能を有するため配線の必要もない。多点同期振動計測が安価で簡単に実現する。牛田ら^{1,2)}は高速マルチホップデータ通信アルゴリズムを提案・実装し、長大橋の交通振動を簡単にかつ詳細に把握できることを示した。昨年度の研究において漆島らは無線同期振動計測システムのハードウェア、ソフトウェアにそれぞれ改良を加えた上で、耐震補強前後の橋梁で密に加速度計測し、動特性変化を明らかにし、さらに構造特性変化との対応を分析した³⁾。今年度の研究では、無線センサシステムによる計測性能の向上を図り、まず、ひずみ計測性能を実現した。これまで利用している無線センサノードに接続して利用する、ひずみ計測ボードを制作し、磁石による取り付けが可能な応力聴診器⁴⁾と組み合わせて利用することで、簡単に歪計測を実現するものである。次に、データ収集のアルゴリズムを改良することで、マルチホップ通信下であっても、最短の通信時間でデータ収集ができる仕組みを構築した。さらに、昨年度計測した橋梁の有限要素モデル上で、複数の損傷や劣化をモデル化し、動特性変化の感度を分析した。

2. 歪計測センサボードの制作

無線センサネットワークを利用した構造物の応答計測にはこれまで加速度計が広く用いられてきた。これは MEMS 型加速度計が安価で、消費電力が小さい、実装が容易である、といった特徴による。一方で、構造物の現況把握など構造上の判断を行う上では、歪や変位といった物理量の把握が有効であることが多い。特に歪は設計時に考慮する応力と容易に関連付ける事ができるため、無線センサと組み合わせて利用すれば、多点での応力を設計値などと比べて評価できる。

これまで、研究代表者は、異なる無線センサプラットフォーム上で、歪計測ボードを開発してきたが⁵⁾、これを応用して本研究で利用している無線センサ、Imote2 上で利用できる歪計測ボードを制作した（図 1 および図 2）。歪計測においては、歪計測感度を決定するシャントキャリブレーションやオフセット値補正といった機能が重要となるが、これらの機能はイリノイ大学と連携する中で実現している。基地局ノードからコマンドを送信することで自動的にキャリブレーションやオフセット値補正を行うことができる。

歪ゲージを利用した歪計測では一般に計測対象物の塗装を剥がすなどの前処理をした上で、接着剤を利用して

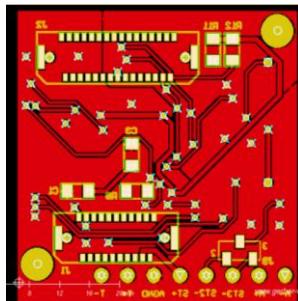


図 1 歪計測ボード

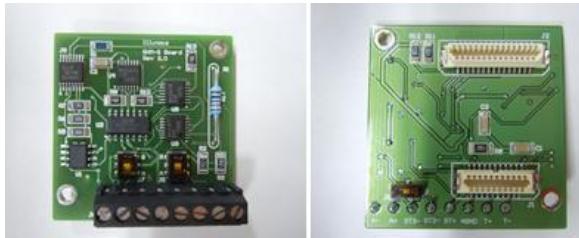


図 2 歪計測ボード外観

歪ゲージを対象物表面に固定する必要がある。時間と手間のかかる作業となり、多数の計測点で歪ゲージを利用した計測を実施は容易でない。無線センサネットワークを利用するメリットの一つは設置の時間・手間が小さく多点計測を簡単に実現することであるものの、歪ゲージと組み合わせることでこのメリットを相殺する恐れがある。

そこで、構造物にマグネットを利用して歪ゲージを押しあて、界面に発生する摩擦力によって、対象物の歪をゲージに伝え、測定する応力聴診器⁴⁾と組み合わせて利用することとした。応力聴診器のゲージ線を、歪計測ボードに接続し利用するものである(図3)。図4に、ある鉄道橋で行った無線歪計測の事例を示す。応力聴診器は摩擦力によって歪をゲージに伝える機構であるため、歪が大きな場合には、計測対象物と歪ゲージの間に滑りが生じることがある。本計測においても滑りが生じており、オフセットが大きく変化している。正確な応力推定にあたっては、滑りを防ぐ対策が必要となる。

応力聴診器には1軸タイプと3軸タイプの2種類があるが、開発した歪計測ボードは1チャンネル分のブリッジ回路を有している。そこで、3軸タイプの応力聴診器を利用する場合には、Imote2および歪計測ボードを軸ごとに用意し計3組のImote2、歪計測ボードで3軸歪を同期して計測する。計測データを互いに通信すればロゼット解析により主ひずみ、主応力を求めることも可能である。今後は3チャンネル分のブリッジ回路を有する、ロゼット解析用の歪計測ボードを開発する予定である。



図 3 応力聴診器と歪計測ボード

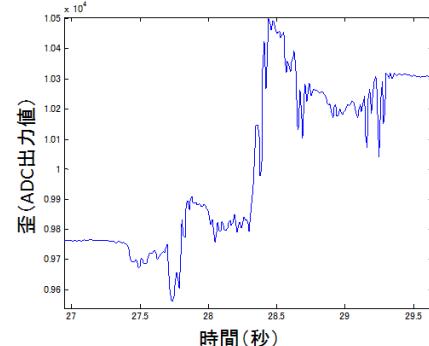


図 4 歪計測ボードによる歪計測例

3. マルチホップデータ転送アルゴリズムの最適化

無線センサを利用して中長スパンの橋梁振動計測を行う場合、基地局からのシングルホップ通信は通信半径が限られるため構造物全体を網羅することは難しく、多数ノードを中継して通信するマルチホップ通信が必要となる。利用する周波数帯域にも依存するものの、無線 LAN や ZIGBEE といった無線センサネットワークで利用される 2.4GHz 帯では通信距離はおよそ 10m から数十m である。アンテナの工夫や低い周波数帯域の利用等で通信距離を伸ばすことも可能であるが、橋梁上の手すり・高欄、照明柱や標識などの付帯構造物、車両、歩行者等により通信が妨げられることもあり、構造物全体を限なくカバーすることは現実的でない。

一方で、マルチホップ通信で振動計測データのような多量データを転送する場合には、近隣のノードが同時に通信を試みることでパケット衝突が生じる。通信速度が極度に低下し、データ収集に長時間を要する。そこで牛田ら¹⁾は複数の無線通信チャンネルを活用することでパケット衝突の頻度を抑え、高速でデータ転送する仕組みを提案し実装した。しかし、同じ無線通信チャンネルを用いるノード同士では依然としてパケット衝突が生じるため、データ転送速度が低下の恐れを排除できない。さらに、マルチホップ経路のトポロジーに、データ転送効率が依存する。そこで、パケット衝突の可能性を排除し、データ転送効率がトポロジーに依存しないアルゴリズムを新たに提案し、実装することとした。

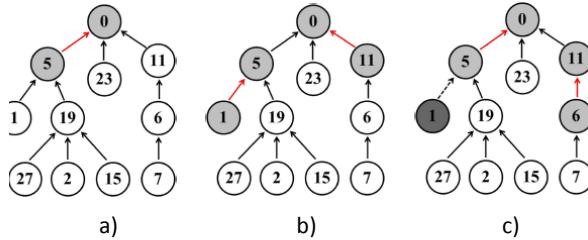


図 5 マルチホップ経路とデータ集約順序



図 6 無線センサノード用ケーシングと通信アンテナ

牛田らにより提案されたデータ転送アルゴリズムは、基地局からのホップ数によって異なる周波数チャンネルを割り当て、それぞれのノードが基地局に向けてデータを送出する、プッシュ型のデータ転送である。この方法では、基地局からのホップ数が同じノードには互いに優先順位がなく、同時にデータ転送を行う場合にはパケット衝突が生じる。そこで、基地局ノードが最も大きなサブツリーからデータを収集するプル型のデータ集約法、Maximum-Sub-Tree 法を提案した。これは、基地局がその子ノード群の中から、サブツリーを構成するノード数の大きなものから順番にデータを収集する、という仕組みである。例えば図 5 のようなマルチホップ経路を考えると、基地局ノード 0 はまず、計 6 ノードから構成されるサブツリーからデータを収集する。つまりノード 5 からデータを受け取る (a)。次に、ノード 11 は計 3 ノードから構成されるサブツリーの最上位に位置するため、基地局はノード 11 からデータを収集する (b)。ノード 5 は自らのデータを送信し、メモリ領域に空きが生じたため、子ノードの 1 つからデータを収集する。次ステップでは、計 5 ノード分のデータを持つサブツリーの最上位に位置するノード 5 からデータを収集する。メモリ領域に空きが生じたノード 11 はノード 6 からデータを収集する (c)。引き続き同様にデータ収集を行う。基地局からのホップ数が等しいノードは同じタイミングで通信を行うことはなく、パケット衝突を回避できる。

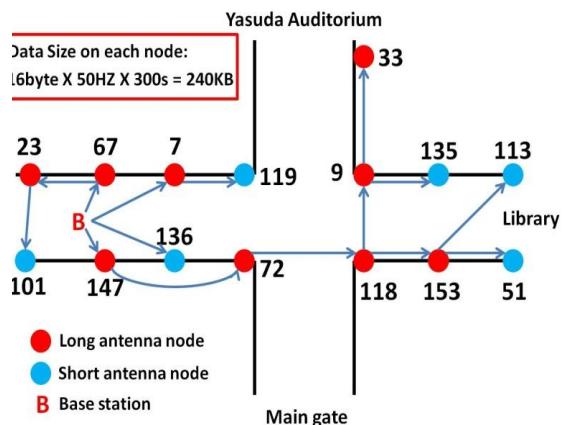


図 7 大学構内におけるマルチホップ通信実験時のデータ転送経路

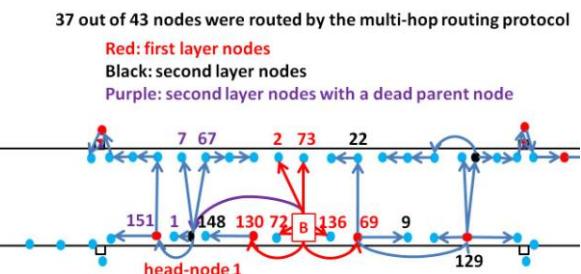


図 8 吊り橋桁上におけるマルチホップ通信実験時のデータ転送経路

更に、各通信リンクの通信所要時間が一定であると仮定すれば、上述の Max-Sub-Tree 法はいかなるトポロジーにおいても、最短時間でデータ収集ができるこことを数学的に定式化、証明している。

次に本アルゴリズムを Imote2 無線センサノードに実装し、通信時間の評価を行った。図 6 に示すような、屋外計測用のプラスチックケース、充電池式バッテリパック、外付けアンテナを制作し、本郷キャンパス内にノードを設置しデータ収集実験を行った。図 7 に示すように、マルチホップ経路は複雑なものとなった。Maximum Sub-Tree 法を利用すれば、最短データ転送時間は 408 秒と推定されたが、実測では 480 秒でデータ収集を終えている。理論値との違いは、各通信リンクの所要時間が一定であるとの仮定が必ずしも成立しないことがあげられる。

なお、本データ収集プログラムは吊り橋桁上でも試験している。図 8 に示すように実橋梁においても複雑な経路が形成されている。センサ配置が直列、直線状であっても形成される経路は直線状になるとは限らない。特にセンサ間距離が大きくなるとその影響が顕著である。そのため、トポロジーに依存せずに短時間でデータ収集できるアルゴリズムが必要である。

4. 構造変化に対する動特性感度の分析

昨年度の研究で計測と有限要素解析を行った、岩手県内国道 45 号線に架かる逆ランガー橋の楳木沢橋を対象に、損傷、構造劣化に対する動特性の感度解析を行った（図 9）。既往の研究において、一般には振動数などの動特性変化は、損傷などによる構造変化に対して感度が低いと言われている。ここでは、特に、無線センサシステムを利用することで可能となる空間的に密な動特性情報、モード形に着目して感度の高い動特性が存在するか調べることとした。特定の損傷に感度の高いモード形が見つかれば、それをモニタリングする事により損傷を効果的に検知できるものと考えられる。

ここでは支承の機能不全として支承の移動を固定、アーチクラウン部の疲労による破断、アーチリブの腐食による断面欠損を考慮してモード振動数、モード形の変化を調べることとした。

まず、支承を固定したところ、桁端部の支承水平方向移動を固定すると鉛直モードの振動数が 1 次モードで 14%、2 次モードで 7% 増加するなど明らかな変化が見られた。また鉛直方向モード形にも明らかな変化が確認された（図 10）。桁端部の回転を固定した場合には振動数変化はそれぞれ 6%、1% であったが、モード形には同様に大きな変化が確認された。

次に、アーチクラウン部が疲労破壊したことを想定し、1 部材を削除して解析を行い、振動数とモード形の変化を確認した。振動数は橋軸直角方向モードでは変化は 0%，鉛直 1 次モードで 1%，鉛直 2 次モードで 2% と小さなものとなった。一方でモード形の変化を確認すると、鉛直 1 次モードで図 11 のように大きな変化が確認された。鉛直 2 次モードについても同様の変化が見られた。少数のノードでの計測から得られた粗いモード形や振動数からは、それらの小さな変化を検知することは難しいが、多数ノードで密に計測を行えばモード形の変化を捉えられると言える。

アーチリブの腐食を想定して、アーチ基部のピン支承近傍の断面を 25% 減厚させ、質量も 25% 減らしてモデル化を行い動特性変化を分析した。振動数変化は橋軸直角方向モードで 4-12%，鉛直モードで 3-5% と大きなものであった。一方でモード形の変化は図 10 や図 11 と比べて小さなものとなった。（図 12）

構造物に生じる変状の種類に依存するが、それらによる動特性変化は必ずしも小さくなく、仮に振動数変化が小さな場合であっても、密に計測されたモード形には明らかな変化が確認されることもあった。

5. まとめ

昨年度の研究では無線センサを利用して、実橋梁の耐震補強前後に振動計測し、振動挙動を詳細に把握した。さらに、計測値と FEM と比較することで違いを明らかに

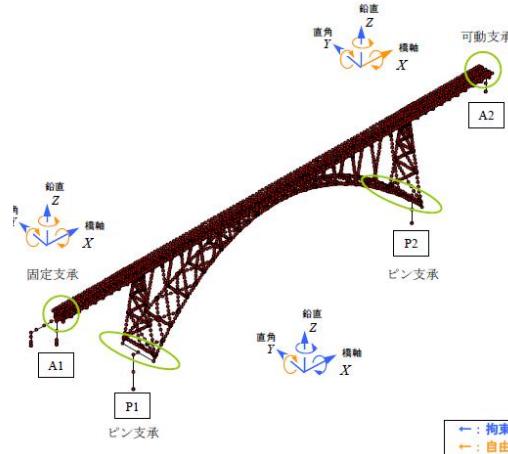


図 9 楠木沢橋の有限要素モデル

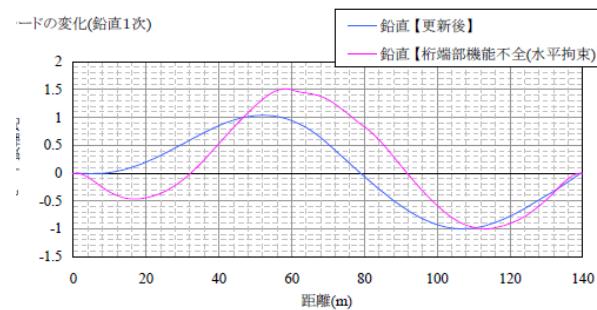


図 10 支承水平方向を固定の場合のアーチリブ鉛直 1 次モードの変化

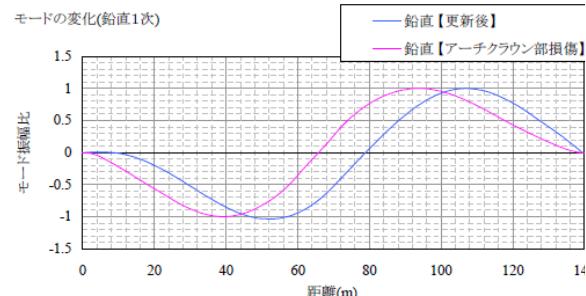


図 11 アーチクラウン部破断の場合のアーチリブ鉛直 1 次モードの変化

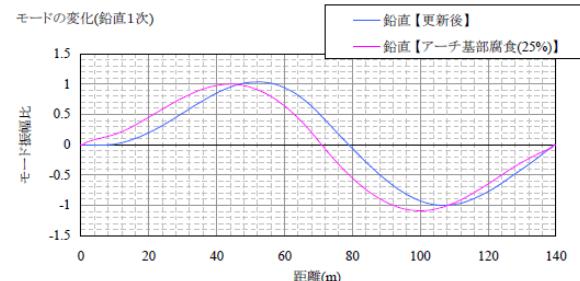


図 12 アーチリブ腐食の場合のアーチリブ鉛直 1 次モードの変化

し、振動数に加えて詳細モード形も基準としてモデルアップデートを試みた。今年度は、まず計測性能の向上を図り、歪計測ボードを制作した。摩擦力をを利用して歪ゲージを構造物に取り付ける応力聴診器と組み合わせることで、歪の多点計測を簡易に実現するものである。次いで、マルチホップデータ転送を高速に実現するため、最短時間でデータ転送を行うアルゴリズムを提案、実装した。屋外でのデータ転送実験では複雑なマルチホップ経路が構築された場合でも高速にデータ収集できることを示した。更に、FEM 上で損傷・構造劣化に対する動特性の感度解析を行った。動特性は損傷などによる構造変化に対して感度が低いと言われることもあるが、アーチリブのモード形に着目すると、アーチクラウン部の疲労亀裂など変状の有無で大きな変化が見られることが明らかになった。無線センサネットワークを利用して、変状に対して感度の高い動特性をモニタリングすれば、それらの変状を効果的に検知できる可能性があると期待される。

参考文献

- 1) 牛田満士, 長山智則, 藤野陽三: スマートセンサを用いた多点同期振動計測のためのマルチホップ通信システムの開発 , 第 65 回土木学会年次学術講演会概要集, I-425, 2010.9.
- 2) Nagayama, T. and Spencer, Jr., B. F.: Structural health monitoring using smart sensors. Newmark Structural Engineering Laboratory Report Series 001 <http://hdl.handle.net/2142/3521>, 2007
- 3) 漆島亮彦, 長山智則, 藤野陽三, 宮下剛, 吉岡勉, 家入正隆 : スマートセンサによる橋梁振動の多点計測と詳細分析～耐震補強前後の比較を通して～, 第 66 回土木学会年次学術講演会講演集, 2011
- 4) 東京測器研究所
http://www.tml.jp/product/strain_gauge/option/fgmh-1.html
- 5) Nagayama, T., Ruiz-Sandoval, M., Spencer, Jr., B. F., Mechitov, K. A., and Agha, G. A.: Wireless strain sensor development for civil infrastructure. Proc., 1st International Workshop on Networked Sensing Systems, Tokyo, Japan, pp.97-100, 2004.