

スマートセンサを用いた構造ヘルスマニタリング

東京大学 正会員 ○長山 智則
 東京大学 フェロー会員 藤野 陽三
 イリノイ大学 B.F. Spencer, Jr.

1. はじめに

構造物の効率的な維持管理のため、その健全性を評価する必要がある。目視検査などで損傷が検出されなかった橋の落橋も報告されており、信頼性の高い健全性評価手法が必要である。振動計測を用いた構造ヘルスマニタリングは、構造特性やその変化を計測振動情報から推定しようとするもので、健全性評価手法として期待されている。しかしながら、橋梁を始めとする実構造物は多数の部材からなる大規模なシステムで、その振動状態を多数のセンサを用いて詳細に調べることは困難であった。近年の著しい無線、センサ、計算機技術の発展とともにこれらの基礎技術を基にしたスマートセンサが提案され、構造ヘルスマニタリングへの応用の可能性が指摘されている。ここでは多数のスマートセンサを用いた構造ヘルスマニタリングを提案し、実験により実証する。

2. スマートセンサ

Intel Corporation の Imote2 は XscalePXA271 プロセッサ、IEEE802.15.4 対応無線 CC2420 を搭載したスマートセンサプラットフォームで、256KB という大きな RAM を有すること (32MB まで拡張可能)、13MHz から 416MHz まで使用状況に合わせてクロック周波数を変更できることなどを主な特徴とする。他に提案されているスマートセンサノードと比較して、計算能力の高さは特筆すべきである。膨大な計測データに対して種々のデータ処理がなされる構造振動解析には、Imote2 が適していると考えられ、ここでは Imote2 をセンサノードとして採用する。なお、電源として単 4 型乾電池 3 本を利用し、センサボードには MEMS 型の 3 軸加速度計を使用している。

3. ネットワークアーキテクチャ

無線センサネットワークから振動情報を解析するには主に次の 2 つのアプローチが考えられる。一つは図 1 (a) に示す集中型データ集約解析システムで、計測データを全てベースステーションに集め一括処理するシステムである。ベースステーションにおいては、従来の有線センサのヘルスマニタリングで使われていたデータ解析手法を適用できるという利点である。しかしながら、センサ数が増えると、膨大なデータを無線通信経由でベースステーションに集約することが非現実的となる。電池駆動という制約下では無線通信の速度は限られている。二つ目のアプローチは図 2 (b) の各ノードが各々得られた振動情報を元に振動解析、損傷検出を行い、解析結果のみをベースステーションに送るものである。このアプローチは通信量が少なく、多数のノードからなるネットワークにも適用可能である。しかしながら、各ノードは近隣ノードからの情報を利用できず、損傷同定のために使える情報が限られてしまう。例えばモード形などの空間情報は利用できない。そこで、図 1 (c) に示すような階層的なアプローチが多数のノードで計測された情報を利用して損傷同定するシステムとして有効であると考えられる。

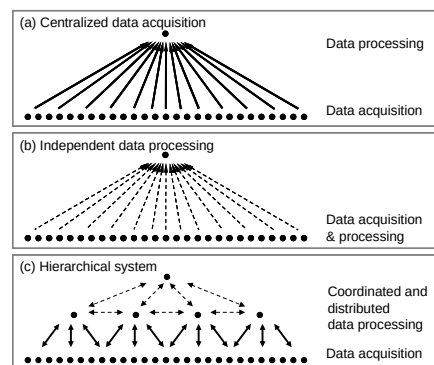


図1: ネットワークアーキテクチャ

図 2 (b) の各ノードが各々得られた振動情報を元に振動解析、損傷検出を行い、解析結果のみをベースステーションに送るものである。このアプローチは通信量が少なく、多数のノードからなるネットワークにも適用可能である。しかしながら、各ノードは近隣ノードからの情報を利用できず、損傷同定のために使える情報が限られてしまう。例えばモード形などの空間情報は利用できない。そこで、図 1 (c) に示すような階層的なアプローチが多数のノードで計測された情報を利用して損傷同定するシステムとして有効であると考えられる。

4. ミドルウェア

Imote2 は TinyOS をオペレーティングシステムとして使用するが、構造ヘルスマニタリングに必要なキーワード スマートセンサ、構造ヘルスマニタリング、損傷同定、分散コンピューティング

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 TEL 03-5841-6144

能の全てを TinyOS が提供しているわけではない．例えばノード間の同期，同期をした計測，データロスのない通信，効率的なデータ集約法などである．これらをミドルウェア・サービスとして開発し，その性能を調べた¹⁾．ここではノード間の同期についてのみ述べる．同期アルゴリズムは FTSP 法を用いた．センサ間の同期を繰り返し，同期後にパケットを受信した折のグローバルタイムの違い調べたところ，ノード間のグローバルタイムの差は図 2 に示すようにほぼ 20 μ s 以下，最大でも 160 μ s 以下であることが確認された．

5. 実装

構造ヘルスモニタリングのための分散コンピューティング

Gao²⁾はスマートセンサネットワークを利用したモニタリングを想定し，構造ヘルスモニタリングのための分散コンピューティング法（DCS）を提案している．これは近隣のスマートセンサがクラスタを構成し，クラスタ内でモード解析，損傷同定を行うものである．このアルゴリズムを Imote2 に実装することとした．

実験

図 3 に示すトラス橋モデルに計 10 個の Imote2 を設置し，ランダムホワイトノイズでの加振下で加速度応答を計測した．10 個の Imote2 は重複を許して 3 つのクラスターを形成し，モニタリングをする．各クラスターのメンバーノードは例えばそれぞれノード 2, 3, 4, 5, 6, 7, ノード 4, 5, 6, 7, 8, 9, ノード 6, 7, 8, 9, 10, 11 である．図 4 はトラス橋のノード番号とエレメント番号を示す．トラス部材の一つを断面積の小さい部材と取替え同様に振動計測をした．これらの振動計測結果を Imote2 がクラスタ内で自立的に分散処理し，損傷同定を行った．中間結果として Imote2 上での ERA によるモード解析から得られたトラスの固有振動数を表 1 に示す．エレメント 8 の断面積が 53% 減少した場合の損傷同定結果を図 5 に示す．損傷同定に用いた SDLV 法では損傷部材は小さな正規化応力をもつ部材として同定されるが，図 5 から明らかなように Imote2 のネットワークは損傷部材を正しく検出している．なおここでは，閾値として 0.3 を用いている．

6. 結論

スマートセンサを用いた構造ヘルスモニタリングを提案し，Imote2 上にミドルウェアサービスと損傷同定アルゴリズムを実装し，トラス橋のスケールモデルを用いてその有効性を実証した．実構造物への適用に向けてマルチホップ通信の実装や効率的な電力管理などが今後の課題である．

参考文献

1) Nagayama, T. Structural health monitoring using smart sensors, Ph.D. Dissertation, イリノイ大学アーバナシャンペーン校(2007)
2) Gao, Y. Structural health monitoring strategies for smart sensor networks, Ph.D. Dissertation, イリノイ大学アーバナシャンペーン校(2005)

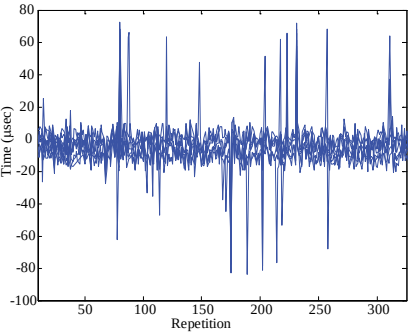


図 2:同期精度

表1: 固有振動数同定結果

モード	固有振動数 (Hz)
1 st	19.638
2 nd	40.846
3 rd	61.888
4 th	66.714
5 th	70.344
6 th	93.606



図3: トラス橋モデル.

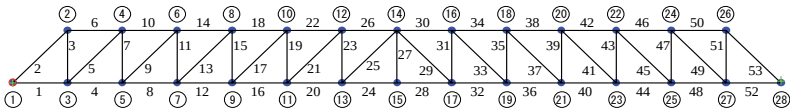


図 5: トラス橋のノード番号とエレメント番号

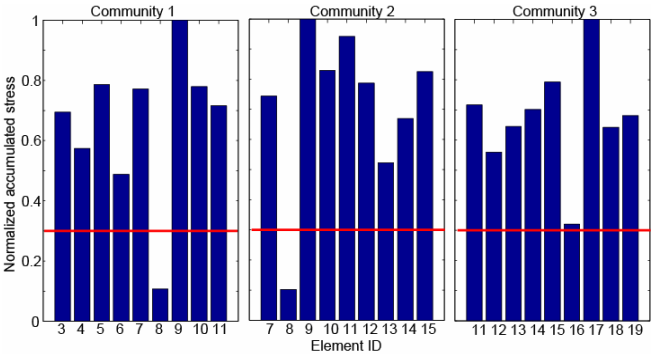


図4: SDLV法による正規化応力