

平成 22年 6月 8日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760298  
 研究課題名 (和文) 多数の無線センサによる社会基盤構造物の自律的振動計測システムの開発  
 研究課題名 (英文) Development of autonomous vibration measurement systems for civil infrastructure using wireless sensors  
 研究代表者  
 長山 智則 (NAGAYAMA TOMONORI)  
 東京大学・大学院工学系研究科・講師  
 研究者番号：80451798

研究成果の概要 (和文) : 構造物の状態・挙動を詳細に把握するための振動計測システムとして、無線センサネットワークに着目し、その要素技術を開発した。具体的には、(1) 長大橋梁などの構造物を無線通信でカバーできるようにアンテナ部分を改良し通信距離を向上、(2) マルチホップ通信により遠隔ノードからデータ転送、(3) 実構造物の微小振動を計測可能な加速度センサーボードを利用、(4) マルチホップ同期振動計測プログラムの構築を行った。

研究成果の概要 (英文) : The PI has developed elementary technologies for wireless structural vibration measurement systems with the future target of comprehending structural condition and behavior in detail. The technologies include: 1) elongation of communication distance by improving the antenna part of wireless sensor nodes, 2) data transfer using multihop communication, 3) the use of high resolution acceleration sensor boards, and 4) integrated program to perform synchronized sensing over a multihop network.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成20年度	1,700,000	510,000	2,210,000
平成21年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：維持管理工学，構造ヘルスマニタリング，無線センサネットワーク，マルチホップ，振動計測

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 社会基盤構造物は、老朽化が徐々に、着実に進行している。社会基盤の機能不全や人命事故を防ぐため、限られた予算で効率的かつ効果的に、構造物の現有性能や安全性を

把握、維持管理をすることが求められる。現在は主に目視点検に基づく維持管理をしているが、構造劣化が見落とされるなど目視点検の問題点が指摘されている。客観的な計測データに基づく、信頼性の高い、新たな構造

物健全性評価手法が必要である。このような手法として、振動に基づく構造ヘルスマニタリングが有効である。しかし、構造物の振動を密なセンサー配置で詳細に計測することは困難であり、また、そのため詳細な計測振動を解析することもできないことから、信頼性の高い健全性評価手法として確立されるには至っていない。

(2) 近年の計測・通信技術の進歩により無線センサの利用が多く分野で研究されつつあり、構造振動計測に応用すれば、構造物の詳細な状態・挙動把握が可能になると期待されている。しかし、既往の無線センサに構造振動計測の要求性能を満たすものではなく本格的に利用される状況にはない。

## 2. 研究の目的

構造振動の詳細な計測を可能とする、多数の無線センサによる社会基盤構造物の多点同期振動計測システムを開発する。本システムは膨大な社会基盤構造物の振動状態の詳細な把握を可能とし、構造現有性能、安全性評価を大きく向上させるものである。具体的には(1)実構造物計測のための通信性能の実現、(2)実構造物計測のためのセンサーボードの実現を行う。

## 3. 研究の方法

市販の無線センサ Imote2 のハードウェア、ソフトウェアをカスタマイズおよび新規開発することにより多点同期振動計測システムを開発する。

(1) 各センサーノードの通信距離の向上  
Imote2 は通信モジュールを持っているがそのアンテナにはチップアンテナが利用されており、通信距離は極めて限られていると考えられる。屋内・屋外実験によりその通信距離を調査した上で、ダイポールアンテナを接続し通信距離の向上を図る。

(2) マルチホップ通信による、遠隔ノードからのデータ転送

個別ノードの通信距離が伸びたとしても橋梁や建物には、部材の影となり通信が困難となる箇所が多数存在する。センサーノードを中継して他ノードと交信するマルチホップ通信が不可欠である。そこで、マルチホップ経路作成・データ転送プロトコルを開発・実装する。

(3) 高精度加速度センサーボードの開発  
市販の無線センサ用加速度センサーボードの計測分解能は 1mg 程度と、極めて粗い。そこで、分解能の高いセンサーボードを開発する。なお、同時期に共同研究を行っている米国イリノイ大学で、同様のセンサーボードを開発したため、本研究ではこのセンサーボードを利用することとした。

(4) マルチホップ同期振動計測プログラム

の作成

マルチホップ通信・同期計測・データ転送の各プログラムを組み合わせ、構造物の振動計測を行うプログラムを作成する。

## 4. 研究成果

市販の無線センサをカスタマイズし、ソフトウェア開発を行うことで、多点同期振動計測システムを開発した。

(1) ダイポールアンテナを、1m の同軸ケーブルを利用して無線センサに接続した。センサ設置箇所近くの、通信状況の良い場所にアンテナを設置することで、数十 m から 100m 程度の通信距離を実現することができた。

(2) マルチホップ経路探索のプロトコルとして AODV を選定し、Imote2 に実装した。さらに、多数のセンサーノードから 1 つの基地局に効率的に経路探索をするために、AODV プロトコルを拡張し、効率的な多対一マルチホップ経路探索プロトコルを提案・実装した。作成した経路に沿って多量データを転送するためのプロトコルも提案し、Imote2 に実装した。

(3) イリノイ大学との共同研究の中で開発された高精度加速度センサーボードを Imote2 に接続して利用することで、0.2mg 程度の加速度計測分解能を実現した。本センサーボードは低周波数領域でも良好な特性を持ち(直流成分も計測可能)、橋梁や建物など低周波振動の計測が重要となるケースにおいて有用である。

(4) マルチホップ通信・同期計測・データ転送の各プログラムを組み合わせ、統合的な振動計測プログラムを作成した。無線センサネットワークは要素技術が出来ている場合でも、統合する段階においてバグが判明したり、統合した後の試験を通して問題が判明することが多い。本研究でも室内実験、屋外実験を通して統合プログラムを作成した。

(1) から (4) の成果を利用して、長大吊橋の振動計測を行い、無線センサのメリットでもある迅速で安価な設置、計測、撤去ができることを示した。また、計測したデータを分析し対象橋梁の動特性を詳細に把握できることを示した。多数のセンサーノードを利用して長大橋梁の振動を簡易に同期計測した例は、世界的に例を見ない。例えば、米国カリフォルニア大学のグループでは、センサーノードをゴールデンゲート橋に設置し計測を行っているが、設置、計測、撤去に極めて長時間を要しており、無線センサネットワークのメリットを活かせていない。他の研究グループはその殆どが、同期が取れない、計測分解能が粗い、マルチホップ通信ができない、不安定といった問題をかかえている。橋梁振動計測を簡易に実現するシステムとして本研究の成果は極めて大きい。

今後はシステムの長期安定性の向上や、計測により集まるデータを活用して橋梁の挙動・状態評価の研究が進捗することが期待される。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

① Nagayama, T., Moinzadeh, P., Mechitov, K., Ushita, M., Makihata, N., Ieiri, M., Agha, G., Spencer, Jr., B. F., Fujino, Y., and Seo, J.-W.: Reliable multi-hop communication for structural health monitoring. Smart Structures and Systems, Int'l Journal Vol. 6 No. 5, 2010

② Nagayama, T., Spencer, Jr., B. F., Mechitov, K. A., and Agha, G. A.: Middleware services for structural health monitoring using smart sensors. Smart Structures and Systems, 5(2), pp.119-137, 2009.

③ 長山智則, Spencer, Jr., B. F., 藤野陽三: スマートセンサを用いた多点構造振動計測のためのミドルウェア開発, 土木学会論文集, 65(2) pp.523-535, 2009

④ Nagayama, T., Spencer, Jr., B. F., Rice, J. A.: Autonomous decentralized structural health monitoring using smart sensors, Structural Control and Health Monitoring, 16, pp.842-859, 2009.

[学会発表] (計 13 件)

① Nagayama, T., Ushita, M., Fujino, Y., Ieiri, M. and Makihata, N. (2010) "The combined use of low-cost smart sensors and high accuracy sensors to apprehend structural dynamic behavior," Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010, Proc. of SPIE volume 7647, San Diego, USA, 2010. 3.

Nagayama, T., Ushita, M., Dinh, H. M., Fujino, Y., Spencer, Jr. B. F., Rice, J. A., Jang, S.-A. Mechitov, K. A., and Agha, G. A. "Structural health monitoring system development and full-scale bridge vibration measurement using smart sensors," Proc. 10th International Conference on Structural Safety and Reliability, Osaka, Japan, 2009. 9.

Nagayama, T., Spencer, Jr., B. F., and Fujino, Y.: Structural health monitoring using smart sensors, Proc., 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, Taiwan, 2008.11.

Ushita, M., Nagayama, T., and Fujino, Y. (2008) "A distributed autonomous active-sensing approach for structural health monitoring using smart sensors." Proc., 11th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Taipei, Taiwan, 2008.11.

Nagayama, T., Spencer, Jr., B. F. Ushita, M., and Fujino, Y.: Structural health monitoring systems using smart sensors, Proc., 4th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technologies, Waseda University, Tokyo, Japan, 2008, 6

長山智則, 藤野陽三, Spencer, Jr. B. F.: スマートセンサを用いた構造ヘルスマニタリングへ向けた効率的なデータ集約, 第 63 回土木学会年次学術講演会概要集, I-318, 2008. 9.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長山 智則 (NAGAYAMA TOMONORI)  
東京大学・大学院工学系研究科・講師  
研究者番号：80451798

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：