

戦略的国際科学技術協力推進事業
日本－米国 研究交流
研究課題
「スマートセンサを利用した
実橋梁モニタリング」

研究終了報告書

研究交流期間 平成20年1月～平成23年3月

研究代表者：藤野 陽三
(東京大学工学系研究科、教授)

1. 研究・交流の目的

長年にわたる資本投下を経て形成されたインフラストラクチャは、建設からの歳月を重ね、場合によっては想定を超える荷重を受ける中で、老朽化が徐々に、着実に進行している。また、米国ミネアポリスで起きたような設計ミスや初期欠陥による事故も起こりうる。と危惧される。

社会基盤の機能不全、人命事故の防止に加えて地震などの自然外乱による災害を防ぐためには、構造物の現有性能や安全性を把握し、限られた予算の中で効率的かつ効果的に補強・維持管理をすることが求められる。これは日米に共通した課題である。

現在はおっぴら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たり、検査者の主観により結果が一貫しなかったりと問題点が指摘されている。ミネアポリスの橋では目視点検は行われていたものの落橋事故に至った。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の確立が強く要望される所以である。

このような手法の一つとして、振動に基づく構造ヘルスマモニタリングがあり、その有効性が指摘されている。構造振動には構造特性が反映されるので、この関係を逆に利用し、計測振動から構造健全性を評価する。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。

研究代表者らは、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インフラストラクチャの多点同期振動計測システムを開発中である。このシステムは膨大な社会基盤構造物の構造現有性能、安全性評価を大きく向上させるものである。本研究交流は、このシステムを用いた実橋梁の計測を米側研究者と共同で進めるものである。システムを実証し、その改良のためフィードバックを行う。

具体的には橋梁を対象としてワイヤレスセンシング技術、特に、マルチホップ通信技術を含むミドルウェア技術を、この分野で世界をリードするイリノイ大学スペンサー教授とともに共同して進展させる。そして、実際の橋梁をテストベッドとして、その有効性を実証し、インフラストラクチャの合理的ストックマネジメント、リスクマネジメントの革新的技術向上に貢献する。

2. 研究・交流の方法

本研究交流は、このシステムを用いた実橋梁の計測・解析とシステム開発へのフィードバックを米側研究者と共同で進めるものである。米国研究代表者と共同でハード・ソフトの開発およびそれを利用した実構造物の計測を行い、さらに双方で計測結果を解析する。そして、計測・解析結果は無線センサノードの改良にフィードバックする。計測に必要な要件、例えば、必要となる計測振動の解像度、データ長、同期精度を明らかにするとともに、多点同期計測によって得られるデータの有効な解析手法も開発する。スマートセンサノードの改良が完成した折には再度、同じ橋梁の計測を行い、システム改良の効果を検証する。

本研究協力により、スマートセンサネットワークによる実橋梁の超高密度多点同期モニタリングが初めて実現する。検証結果をシステム改良にフィードバックし、今後の日米両国での無線センサを用いたモニタリング、構造物の健全性評価の研究が大いに進展することが期待される。

3. 研究・交流実施体制

3. 1 日本側

氏名	所属	役職	学位	役割
(リーダー)	藤野 陽三	東京大学教授	Ph. D.	研究総括
(研究者)	長山 智則	東京大学講師	Ph. D.	Wireless sensor
(研究者)	森川 博之	東京大学教授	工学博士	Wireless sensor
(研究者)	倉田 成人	鹿島建設	博士 (工学)	利用技術
(研究者)	猿渡 俊介	東京大学助教	博士 (科学)	ネットワーク
(研究者)	鈴木 誠	東京大学助教	博士 (科学)	センサ同期

3. 2 相手国側

氏名	所属	役職	学位	役割
(リーダー)	B.F.Spencer	イリノイ大学教授	Ph. D.	研究総括
(研究者)	G. A. Agha	イリノイ大学教授	Ph. D.	Wireless sensor
(研究者)	J. A. Rice	テキサス工大講師	Ph. D.	Wireless sensor
(研究者)				
(研究者)				
(研究者)				

4. 研究成果

4. 1 研究成果の自己評価

- 計画以上の成果がでた 計画通りの成果がでた
 計画とは異なるが有益な成果がでた 計画ほどの成果はでなかった
 いずれでもない

4. 2 研究成果の自己評価の根拠

- 1)無線センサネットワークを利用した橋梁モニタリング実現には多岐に渡る研究が必要である。例えば、センサボードやバッテリーなどハードウェアの開発、アンテナ試験、通信アルゴリズム開発・実装、長期安定性向上、電源制御アルゴリズム開発などが挙げられる。一大学では各要素技術の開発にとどまり、橋梁モニタリングの実現にはなかなか結びつかない。そういう意味で共同研究の形態をとったことが、全体としての成果につながった。
- 2)本共同研究では、日本側は主にマルチホップ通信プログラムの構築に注力し、ハードウェア開発やアンテナ試験などは主にイリノイ側で行うというように、役割分担ができたため、3年という限られた時間の中で橋梁モニタリングの実証実験に至った。
- 3)同じ無線センサを利用して日米双方で開発したことから、利用機会が多く、ソフトやハードの不具合発見の確率が高く、開発にフィードバックできたことも大きい。

また、具体的な技術に関しても

- 1) 確認応答の少ないパケット欠損補償通信、最短通信経路の探索、複数無線通信チャンネルの動的切替えを利用して、マルチホップデータ転送の高速化を図り、既存の方法と比較して10倍以上の速度向上を実現した。
- 2) 無線マルチホップ通信アルゴリズムを改良した上で、平成22年1月にレインボーブリッジにおいて無線センサー49個を利用して振動計測を行い、安定性と通信速度が飛躍的に向上していることを確認できた。1割弱程度のセンサーノードが応答しないことがある、という問題は残っているものの、ほとんどのセンサーノードが計測・データ回収をし、通信速度は米国カリフォルニア大学バークレー校の研究グループがゴールデンゲート橋で行った無線振動計測の10倍以上という結果を得た。
- 3) 韓国 JINDO 橋におけるワイヤレスセンサーを使った高密度振動計測を、事前には、インターネット会議を3つのグループ(東大, イリノイ, KAIST)の間で数回にわたってもち、様々な工学的問題を協力した形として解決する中で、共同研究のあるべき姿の一つを示した。なお、この実測は注目を集め、アメリカではNSFのホームページにも掲載され、また、テレビ局においても報道された。

等の成果を挙げ、インフラモニタリングの基盤技術の整備、普及という面で大きな貢献を果たしたと言える。

なお、このような成果に対し、研究代表者 藤野陽三にはアメリカ土木学会から2011 R. H. Scanlan Medal が、研究者 長山智則には、平成22年度土木学会論文奨励賞が授与された。対象論文は、

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** で、相手側との共著論文となっている。

4. 3 研究成果の補足

以下に具体的な活動状況を補足として記す。

平成20年度成果

2008年9月14日にイリノイ大学において、構造ヘルスマニタリングに関するワークショップを開催した。日本側からは藤野(研究代表者)、長山、倉田、鈴木(森川研) Dion 客員研究員、Dihn(博士課程)と同じくイリノイ大学とJST日米協力研究を行っている北見工大の宮森準教授の計7名が参加した。アメリカ側はスペンサー教授、コンピュータサイエンス専攻のAgha教授ならびに大学院生10数名ほどであった。まず、藤野がオープニング講演を行い、そのあと日本側から6つ、アメリカ側から4つの発表を行い、最後に1時間ほど、今後の研究と共同研究の方法について議論を行い、有益な時間を共有した。

翌9月15日から3日間、日米共同で、イリノイ大学に近いところにある古いトラス橋梁を対象にして、Imote2からなるモニタリングシステムを設置し、振動計測を行いシステムの検証を行った。計測対象の橋梁は、現在は歩道橋として用いられているが、歩行者の数は非常に少ない。そのため、常時微動計測に加え、衝撃応答試験の計測を行った。個々のセンサーノードの通信距離が短く、限られた通信半径内での計測のみを行い、トラス橋全体の振動計測を捉えるには至らなかった。

平成21年度成果

広域の振動計測に向けて、マルチホップ通信を利用した振動計測プログラムの開発を行った。マルチホップ通信を利用したセンサネットワークは以前から研究されているものの

橋梁振動計測のように多量のデータ転送が必要となるアプリケーションへの適用例は極めて少ない。これはマルチホップ通信では近隣ノードとの干渉を防ぐため、通信速度が極端に低下し、多量データ転送に不向きであることに依る。そこで、マルチホップ通信でかつ迅速なデータ転送を実現するための、基礎的な通信アルゴリズム開発と実装を行った。具体的には確認応答の少ないパケット欠損補償通信、最短通信経路の探索、複数無線通信チャンネルの動的切替えを利用して、マルチホップデータ転送の高速化を図り、既存の方法と比較して10倍以上の速度向上を実現した。

朝鮮半島南西にある Jindo と半島を結ぶ大型斜張橋の Jindo 橋において、6月および8月の2回に渡り、韓国の KAIST（韓国先端科学技術 大学）チームのアレンジのもとで、イリノイ大学チームと協力し、スマートセンサにより振動その他のモニタリングを行った。

Jindo 橋はスパン 484m の鋼箱桁斜張橋であり、風に対する応答の解明や、過去に生じた船舶の橋脚への衝突の影響の解明などのため、モニタリングへの期待が大きい。本 Jindo 橋において、開発中の通信アルゴリズムの評価、振動計測性能の評価などとともに、得られた振動データの分析を行い、Jindo 橋の動特性を明らかにした。なお、通信プログラムを主に東京大学側で作成し、振動計測プログラム、ハードウェアの開発はイリノイ大学側が行った。マルチホップ通信を利用した試験的な計測も試みたが、計測時間が長くかかること、必ずしも全てのノードが応答しないことなど、課題が明らかになった。

11月には香港のストーンカッターズ橋の開通前に、桁上に無線スマートセンサを設置し振動計測を行った。開発中の無線マルチホップ通信の評価を主目的として、50個のセンサを設置し、振動計測、データ回収を行った。システムの安定性が不十分で動作しない場合もある、通信時間が依然として長い、といった課題が残ったものの、桁の振動挙動は捉えることができた。

更に無線マルチホップ通信アルゴリズムを改良した上で、平成22年1月にレインボーブリッジにおいて無線センサー49個を利用して振動計測を行った。安定性と通信速度が飛躍的に向上していることを確認できた。1割弱程度のセンサーノードが応答しないことがある、という問題は残っているものの、ほとんどのセンサーノードが計測・データ回収をし、通信速度は米国カリフォルニア大学バークレー校の研究グループがゴールデンゲート橋で行った無線振動計測の10倍以上という結果となった。

平成22年度成果

韓国 JINDO 橋におけるワイヤレスセンサーを使った高密度振動計測を、システムを改良して本年度も実施した。イリノイ大学が開発しているプログラムを利用し、JINDO 橋へのセンサーの配置、計測を8月22日～25日まで現地に赴き実施し、有用なデータをうることができた。事前には、インターネット会議を3つのグループの間で数回にわたってもち、様々な工学的問題を協力した形として解決してきた。なお、この実測は注目を集め、アメリカでは NSF のホームページにも掲載され、テレビ局においても報道されている。

岩手県横沢橋の耐震補強工事の実施の前と後における振動特性の違いを高密度計測から明らかにする目的で、ワイヤレスセンサーを使った振動計測を2010年3月14日、15日と耐震補強後の9月5日、6日に行った。常時微動による振動計測は、振幅レベルが小さいために行えず、走行車両による振動計測を行った。高精度振動計もあわせて設置し、精度の比較も行なった。固有振動特性としては、耐震補強前後では大きな違いはないものの、モード形状には優位な差があり、高密度計測の意義を実測データの上から明らかにすることができた。

平成22年12月14日の日米ワークショップにおいて3年間の研究成果発表をし、意見交換を行った。

顕著なものをまとめると、以下のようになります。

ー平成20年、9月の共同ワークショップ、無線センサを利用したトラス橋の試験計測（マルチホップ通信の必要性が明瞭になった）

ー平成 21 年, マルチホップ通信アルゴリズムの提案・実装, JINDO 橋での 2 回の共同計測とストーンカッター橋での計測を通じたプログラム改良, レインボーブリッジでの実証試験

ー平成 22 年, JINDO 橋での共同計測, 高密度計測の意義を榎木沢橋実測データから示した.

5. 交流成果

5. 1 交流成果の自己評価

- 計画以上の交流成果がでた 計画通りの交流成果がでた
- 計画ほどの交流が行われなかったが成果はでた
- 計画ほど交流成果がでなかった
- いずれでもない

5. 2 交流成果の自己評価の根拠

- 1) 初年度には, イリノイ大学において, 構造ヘルスマモニタリングに関するワークショップ, 日米共同で, 実トラス橋梁を対象にした, Imote2 モニタリングシステムによる振動計測を行いシステムの検証, 問題点, 課題の再確認を行った.
- 2) 翌年には, マルチホップ高速データ転送技術を開発し, それを使って朝鮮半島南西部の大型斜張橋 Jindo 橋において 2 回に亘り, 相手チーム, KAIST チームと協働して, 振動モニタリングを行った. 通信プログラムを東京大学側で, 振動計測プログラム, ハードウェアの開発はイリノイ大学側が行った.
- 3) 東大チームとして, 11 月には香港のストーンカッターズ橋において, 平成 22 年 1 月にはレインボーブリッジにおいて無線センサー 49 個を利用して振動計測を行った. 米国カリフォルニア大学バークレー校の研究グループがゴールデンゲート橋で行った無線振動計測速さの 10 倍以上という結果となった.
- 4) 平成 22 年度には, 再度, アメリカチームと協働して JINDO 橋におけるワイヤレスセンサーを使った高密度振動計測を, システムを改良し, 入念な準備のもとで実施した. なお, この実測は注目を集め, アメリカ NSF のホームページにも掲載され, テレビ局においても報道されている.
- 5) この他にも, 本研究グループ独自に, 岩手県榎沢橋のワイヤレスセンサを使った振動計測を実施し, 耐震補強前後ではモード形状には優位な差があり, 高密度計測の意義を実測データの上から明らかにした.
- 6) 平成 22 年 12 月 14 日の日米ワークショップにおいて 3 年間の研究成果発表をし, 意見交換を行った.
- 7) また, 第五回世界構造制御モニタリング会議を日本で 7 月 12-14 日の 3 日間に亘り実施し (実行委員長: 藤野陽三), その中で, 本研究成果を発表した
- 8) さらに, 7 月 15 日から 3 週間にわたり, 先端構造技術に関するサマースクールをアメリカ, 韓国, 中国, 日本からの学生 45 名を集め, 実施し, 本研究の成果の一部はここにおいても, 発表された.

5. 3 交流成果の補足

このような各チームの明確な役割分担と活発な研究交流活動を通じ、多くの成果を論文の形でまとめることができた。主なものを以下に記す。

・査読ジャーナル論文

Cho, S., Yun, C.-B., Lynch, J. P., Zimmerman, A.T., Spencer, B. F., and Nagayama, T.: Smart wireless sensor technology for structural health monitoring of civil structures. *International Journal of Steel Structures*, 8(3), pp.267-275, 2008.

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

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

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.

Nagayama, T., Moizadeh, 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

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.

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.

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

Spencer, Jr. B. F., Nagayama, T., and Rice, J. A.: Decentralized structural health monitoring using smart sensors, *Proc., Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2008*, SPIE 6932, pp693202, San Diego, CA, USA, 2008.

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.

Jo, H., Rice, J.A. Spencer Jr., B.F., and Nagayama, T. (2010) "Development of a high-sensitivity accelerometer board for structural health monitoring," *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010*, Proc. of SPIE volume 7647, San Diego, USA.

Cho, S., Jang, S.A., Jo, H., Mechitov, K.A. Rice, J.A., Jung, H.-J., Yun, C.-B., Spencer Jr., B.F., Nagayama, T., and Seo, J. (2010) "Structural health monitoring system of a cable-stayed bridge using a dense array of scalable smart sensor network." Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010, Proc. of SPIE volume 7647, San Diego, USA.

Jo, H., Sim, S., Nagayama, T., and Spencer, Jr. B.F. (2010) "Decentralized stochastic modal identification using high sensitivity wireless smart sensors." Proc. of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, Japan.

Park, J.W., Cho, S., Jung, H.-J., Yun, C.-B., Jang, S. A., Jo, H., Spencer, Jr., B. F., Nagayama, T., and Seo, J.-W. (2010) "Long-term structural health monitoring system of a cable-stayed bridge based on wireless smart sensor networks and energy harvesting techniques.", Proc. of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, Japan.

Nagayama, T., Jung, H.-J., Spencer, Jr., B. F., Jang, S.A., Mechitov, K. A., Cho, S., Ushita, M., Yun, C.-B., Agha, G. A., Fujino, Y. (2010) "International collaboration to develop a structural health monitoring system utilizing wireless smart sensor network and its development on a cable-stayed bridge." Proc. of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, Japan.

6. 主な論文発表・特許出願

論文 or 特許	・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、 出願番号、出願人、発明者等	特記 事項
論文	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	東大側 が作った マルチホッ プ通信の 論文
論文	Rice, J., Mechitov, K., Sim, S.-H., Nagayama, T., Jang, S., Kim, R., Spencer, Jr., B. F., Agha, G., and Fujino, Y.: Flexible smart sensor framework for autonomous structural health monitoring. Smart Structures and Systems, Int'l Journal Vol. 6, No. 5, 2010	イリノ イ側の 無線セン サソフ トウェア 群のフレ ームワ ーク
論文	Nagayama, T., Jung, H.-J., Spencer, Jr., B. F., Jang, S.A., Mechitov, K. A., Cho, S., Ushita, M., Yun, C.-B., Agha, G. A., Fujino, Y. (2010) "International collaboration to develop a structural health monitoring system utilizing wireless smart sensor network and its development on a cable-stayed bridge." Proc. of 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Tokyo, Japan.	Jindo 橋での 共同計 測をま とめた もの