

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22560482

 研究課題名（和文） 多地点に設置されたマルチフィジックスセンサによる
 橋梁の次世代モニタリング技術

 研究課題名（英文） A next-generation monitoring technique for bridges using
 multi-physical sensors at multi-points

研究代表者

大賀 水田生 (OHGA MITAO)

愛媛大学・理工学研究科・教授

研究者番号：80116912

研究成果の概要（和文）：

Wi-Fi と呼ばれる無線 LAN で相互接続性を認証された機器は、小規模なネットワーク環境が手軽に構築できる。本研究では、研究代表者らがこれまでに構築した橋梁用 MEMS センサ計測装置にワイヤレス通信機器を組み合わせることによって、多地点に配置されたセンサノードによる橋梁の高度モニタリング技術を開発した。ここでは、大量の計測データを一元処理して構造物全体の動的挙動を表示するシステムの開発を目指し、その一つの応用例として、橋梁の動的応答を 3 次元的に可視化するシステムを検証した。各点で得られた加速度情報を数値積分して変位を求め、これを橋梁 CAD 上にマッピングすることで、動的挙動の 3 次元可視化を行った。また、3 次元可視化結果に狭帯域の周波数フィルタを作用させることで、振動モードの抽出に成功した。これらは、大規模固有値解析による数値解析からも検証され、本手法の有用性が示された。

研究成果の概要（英文）：

For the safety management of small and medium bridges, structural health diagnostics need to be carried out with efficiency and precision. In this study, a three-dimensional (3D) visualization system of a bridge's condition was developed using multi physical sensors located at multiple points on the bridge. Our system is portable and inexpensive because it involves the use of data connection by a Wi-Fi device and the microelectromechanical system (MEMS) technology. As an application, the 3D dynamic behavior of the bridge were visualized with the vibration data obtained from the acceleration MEMS sensor. The natural vibration modes, including the bending and torsional higher-order modes, can be identified by applying digital narrow-band filters to the visualization results of the bridge. A vibration experiment was performed on a pedestrian bridge in Japan. The vibration modes obtained from the experiment showed good agreement with the numerical results obtained by a finite element method.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2010 年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 2011 年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2012 年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,000,000 | 900,000 | 3,900,000 |

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：無線ネットワーク，構造ヘルスマニタリング，3次元可視化，MEMS センサ，振動計測，多点計測，振動モード同定

1. 研究開始当初の背景

年数を経た社会基盤構造物が急増する中，特に橋梁の安全性や機能の確保が重大な課題になりつつある。現在の橋梁検査は，多くの場合，一定の期間ごとに定期的に行われているが，その基準も技術的に明確なものではなく，現在の維持管理は対症療法と言わざるを得ない。特に疲労き裂などの割れ損傷は伸展が速く，突然の破断に至る可能性も少なくないため，構成要素の損傷を知らせる何らかのシグナルを如何に検知できるかが重要である。従って，橋梁の維持管理では，健全な状態にある橋梁についてモニタリングを行いつつ，異常部には精密な検査を実施し，損傷の程度や原因を踏まえた迅速かつ適切な処置を施すのが理想的であると考えられる。

近年，ハードウェアの分野では，ナノテクノロジーを応用した MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) の次世代型センサ（加速度，GPS，温度，音響等）が市販されており，専門技術職でなくとも容易に組み立てることができるようなプラットフォームも整備されつつある。研究代表者らは H19～20 年度にかけて，科学研究費補助金（基盤研究 (C) 19560479）のサポートのもとに，MEMS 加速度センサを振動計測に適用する研究を遂行し，その有用性を示した。MEMS センサは安価であり，大量生産が可能であること，小型であるために 1 つのモジュールの中にセンサを幾つも搭載できる。また，膨大なデータの伝送・処理が可能になった現在では，多地点に配置されたセンサをネットワークにつなぐことで，各点の情報を一元管理できるようになりつつある。

2. 研究の目的

Wi-Fi と呼ばれる無線 LAN で相互接続性を認証された機器は，ノートパソコンなどのモバイルコンピューティング以外にも，家庭用ゲーム機や，デジカメや音楽プレイヤー等の家電にも普及しており，小規模なネットワーク環境が手軽に構築できる。しかも転送レートが他のセンサネットワークシステム (ZigBEE 等) に比べて格段に高く，振動計測等の高サンプリング数を必要とする計測に適用できると予想される。本研究では，研究代表者らがこれまでに構築した橋梁用 MEMS センサ計測装置にワイヤレス通信機器を組み合わせることによって，多地点に配置されたセンサを用いて，橋梁の高度モニタリング技

術の構築を目的とする。数多くのモニタリングに関する研究が報告されているが，多点で計測されたデータを一元処理して構造物全体の特性を表示するシステムの構築までは至っていない。そこで，橋梁の状態を視覚的にわかりやすく表示するために，物理情報を橋梁の CAD 上にマッピングし，モニタリング情報の 3 次元 (3D) 可視化を行う。

3. 研究の方法

以下の 5 つの主要プロセスによって，本研究を遂行した。

- (1) 有線マルチフィジックスセンサノードの製作と検証
- (2) Wi-Fi を搭載した無線センサノードの製作と検証
- (3) 大量データを処理するプラットフォームの開発
- (4) モニタリング情報の 3D 表示
- (5) 実橋梁によるシステムの検証

4. 研究成果

- (1) 有線マルチフィジックスセンサノードの製作と検証

MEMS センサは非常に安価であるため，大量に作成することが可能である。しかも小型であるために，1 つの基盤 (モジュール) に様々な物理量を測定するセンサが設置できる。ここでは，加速度，音響 (騒音)，温度センサを搭載可能なセンサノードを作成した。まず，有線で接続し，各センサが良好に機能していることを確かめた。図 1 は加速度センサを実装した場合の基盤の写真である。

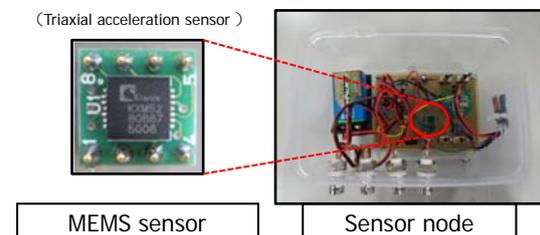


図 1：加速度センサと基盤への実装

- (2) Wi-Fi を搭載した無線センサノードの製作と検証

上記 (1) で作成したセンサノードに Wi-Fi 機器を組み合わせることによって，無線型のノードを作成する。本研究では，物理量のうち「振動」に着目して研究を進めた。図 2 に示すようにセンサノードで得られた加速度

情報は、無線ノードに転送され、A/D 変換の後に基地局へ転送される。ここで、橋梁における交通振動のような低い加速度領域 (100Gal 以下) でも、市販の MEMS センサを用いて正確な測定ができるようにアナログフィルタをセンサノード内に組み込み、ノイズの軽減を試みた。計 16 基の無線センサノードを作成した。

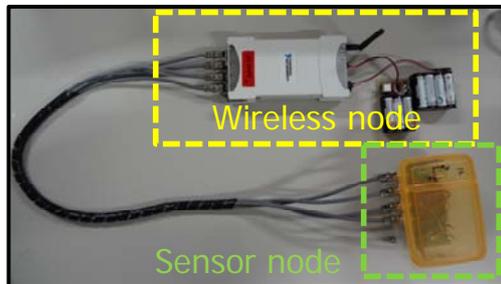


図 2 : センサノードから得られた情報を A/D 変換し、転送するための無線ノード

(3) 大量データを処理するプラットフォームの開発

1 つの無線センサノードから転送されるデータ (加速度の時間域データ) は、波形を表現し得るだけのサンプリングレートを有していなければならない。従って、高サンプルの多点データを同時に処理・表示するソフトウェア (プラットフォーム) の開発を行った。このソフトウェアは図 3 に示すように基地局のノート PC にインストールされる。ここでは、開発環境としてナショナルインストルメンツ者の LabVIEW を用いた。16 基の無線センサノードの同期をとるために GPS 信号を用いた。これによって、高サンプル点のデータを精度良く同期できた。

また、変形状態を 3 次元的に可視化するために 3 軸の変位が必要であるので、基地局で加速度を変位に変換するための数値積分の計算モジュールと、ドリフトを抑制するデジタルフィルタを設計した。

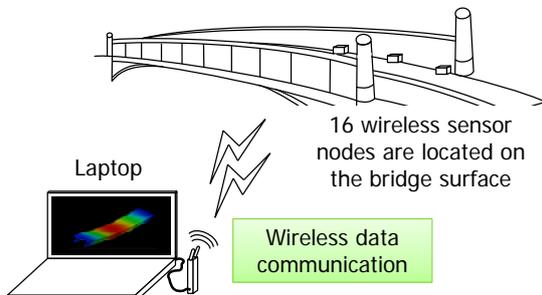


図 3 : 16 基の無線ノードからデータを転送し、基地局 PC に集約するシステム

(4) モニタリング情報の 3D 表示

橋梁の複数の計測点のデータを元に、橋梁全体の変形を 3 次元可視化するツールを開発した。ここでは、橋梁の CAD データ等からポリゴンを作成し、これに多点計測データをマッピングさせて、橋梁の状態を 3 次元的に可視化した。

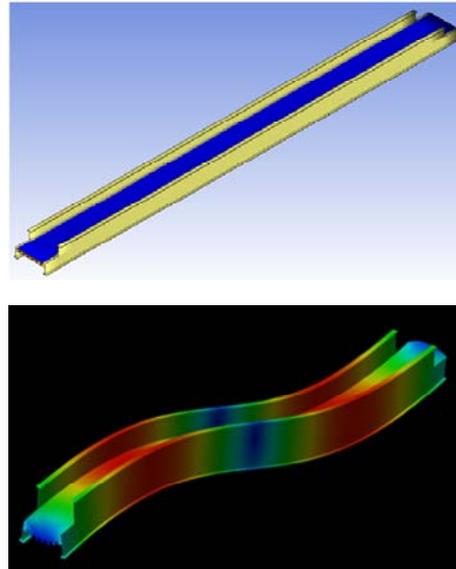


図 4 : 橋梁の変形状態を 16 基の無線ノードのデータを CAD 図面 (上図) にマッピングし、3 次元表示 (下図) する技術

(5) 実橋梁によるシステムの検証

図 5 に示すような歩道橋の振動の計測から、本システムの検証を始めた。愛媛県松山市の歩道橋で、人の跳躍・着地によって振動を発生させ、それを 16 基のノードで加速度を同時に計測した。変位データに換算後、歩道橋の変形挙動を 3 次元的に可視化した。

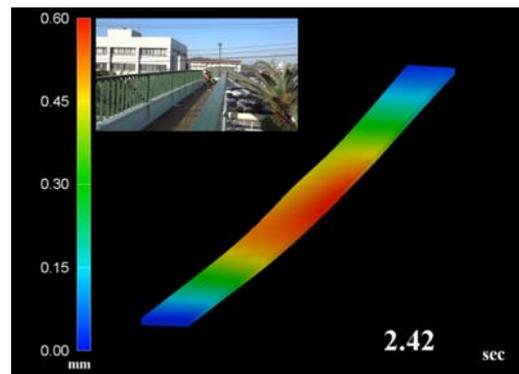


図 5 : 人の跳躍による橋梁の変形の可視化。最大変位は 0.6mm 程度得られている。

また、狭帯域のバンドフィルタを作用させることで、固有振動モードを抽出することができた。図 6 の左図は、歩道橋の真ん中のセンサで計測された鉛直方向の加速度のフーリエスペクトルである。ここで、2 つの周波

数ピークが見られる。3.9Hz は曲げ 1 次モードであるが、24.7Hz については未知であった。そこで、24.07~25.43Hz の狭帯域のバンドパスフィルタを作用させて可視化した結果が図 6 の右図である。このとき、曲げの 3 次モードが現れているのがわかる。従って、卓越する振動数がどのモードに対応するか不明なときに、本技術は非常に有用である。なお、このときの振動モードについては、Lanczos 法による大規模固有値解析によって、数値的基も検証済みである。数値解と計測結果は頗る良好に一致した。

今後は道路橋へ適用すること、他の物理センサとの併用を模索しながら、次世代維持管理システムの構築へとつなげて行きたい。

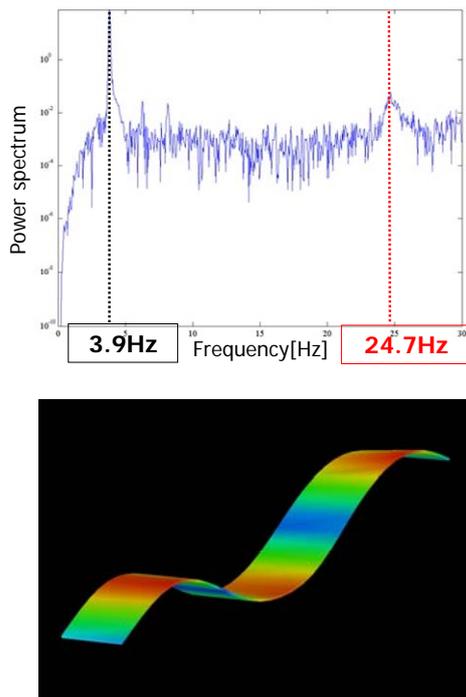


図 6 : 24.7Hz の卓越振動数に対応する振動モードの同定。狭帯域のバンドパスフィルタを作用させることで、視覚的に同定が可能。

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 3 件)

- (1) 多点同時計測による橋梁床板の動的挙動の 3 次元可視化と歩道橋における実験的検証, 川原正人, 中畑和之, 大賀水田生, 構造工学論文集, Vol. 59A, pp. 1170-1178, 2013. 査読あり
- (2) Development of 3D visualization system of structural health condition using wireless sensor system, M. Kawahara, T. Takamoto, K. Nakahata and M. Ohga, Proceedings of First International

Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering, pp. 2012-2030, 2012. 査読あり

- (3) 多点配置された無線センサノードを用いた土木建造物の振動の 3 次元可視化, 高本龍直, 山口政義, 中畑和之, 大賀水田生, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 67, No. 2, pp. I885-I893, 2011. 査読あり

[学会発表] (計 5 件)

- (1) 無線加速度センサを用いた橋梁の 3 次元可視化と振動モードの抽出に関する研究, 川原正人, 高本龍直, 中畑和之, 大賀水田生, 土木学会 第 67 回年次学術講演会, 名古屋, 2012. 9. 5.
- (2) 多点配置した MEMS 加速度センサによる橋梁の 3 次元動態可視化に関する研究. 川原正人, 高本龍直, 中畑和之, 大賀水田生, 土木学会四国支部技術研究発表会, 高知, 2012. 5. 19.
- (3) 無線加速度センサによる建造物の多点同時計測と振動の 3 次元可視化, 中畑和之, 高本龍直, 岡村未対, 大賀水田生, 土木学会 第 66 回年次学術講演会, 松山, 2011. 9. 7.
- (4) 多地点に設置された無線センサによる振動の計測とその 3 次元可視化, 高本龍直, 中畑和之, 岡村未対, 大賀水田生, 土木学会四国支部技術研究発表会, 高松, 2011. 5. 14.
- (5) 構造モニタリングのための異種センサを搭載した計測システムの試作, 高本龍直, 山口政義, 中畑和之, 大賀水田生, 土木学会 第 65 回年次学術講演会, 札幌, 2010. 9. 1.

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.cee.ehime-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大賀 水田生 (OHGA MITAO)
愛媛大学・理工学研究科・教授
研究者番号 : 80116912

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

中畑 和之 (NAKAHATA KAZUYUKI)
愛媛大学・理工学研究科・准教授
研究者番号 : 20380256