

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23686066

研究課題名(和文)ハイブリッド同期無線センサネットワークと非接触計測による統合橋梁モニタリング

研究課題名(英文)bridge monitoring system development integrating hybrid synchronized wireless sensor networks and non-contact sensors

研究代表者

長山 智則(NAGAYAMA, TOMONORI)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：80451798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,100,000円、(間接経費) 6,330,000円

研究成果の概要(和文)：構造物の性能を適切に把握することは、設計・管理における不確定性を低減し、効率的な建設・運用によるコスト削減や安全性向上をもたらす。振動計測を利用すると、FEMの精緻化などを通して性能評価が可能となると期待されるが、橋梁詳細モデルは全体挙動・部材挙動が複雑に連成しその双方の把握が不可欠である。そこで、無線センサを利用した全体挙動の密な計測技術と、レーザードップラー速度計による非接触遠隔計測技術を組み合わせ、簡易かつ詳細に構造物の全体挙動・部材ローカル振動を同期計測する統合モニタリング法を構築した。特に複数種類のセンサをGPS信号を利用して同期計測できる仕組みとした。

研究成果の概要(英文)：Appropriate evaluation of structural performance reduces the uncertainty in design and maintenance of structures and leads to cost reduction and improved safety. Vibration measurement is expected to clarify the validity of FEM. The modeling of bridges needs to be validated based on the global and local scale behaviors. In this research, a measurement system to capture both the global and local vibration modes are developed using the wireless sensor network and non-contact laser doppler vibrometer. The two sensor systems are synchronized using the GPS signals.

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 無線センサ 振動モニタリング 同期計測 非接触計測

1. 研究開始当初の背景

橋梁などのインフラ系構造物は多数の部材からなる複雑な系であり、設計通りの振舞や時間・荷重履歴に対する変化をしているか推定は容易でない。実構造物の挙動・状態を適切に評価する手法が確立すれば、新しい形式や材料の導入・応用にあたり不確定性が小さくなり、効率や景観、環境などを考慮した新しい設計の採用も容易になる。構造物の劣化診断にも有効で、建設・運用コストを縮減し安全性向上をもたらす。信頼性の高い構造性能評価手法が必要であるが、複雑な系を数個のセンサや目視で捉えようとしたり、簡易モデルのみに基づいて分析したりする従来の方法には限界がある。詳細 FEM から分かるように構造物は全体挙動と部材ローカル挙動およびその連成をもつ複雑系で双方の把握が欠かせない、簡易・安価でかつ詳細把握が可能な新計測技術に基づいたモニタリングへのシフトは必須である。

2. 研究の目的

複雑な構造系の状態把握では詳細 FEM は強力ツールとなるが、モデルの精緻化には部材・全体挙動双方の理解が不可欠である。3 次元的全体挙動を密に把握する無線センサ技術を拡張し、また遠方より各部材の詳細な動きまで計測可能な新型 LDV と組み合わせ、状態・挙動を簡易に詳細に把握する統合モニタリングを開発し、実構造系への適用を通して実証することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) GPS・無線ハイブリッド同期の開発

研究代表者は無線通信を利用して多数センサノード間の高精度同期加速度計測を実現している。シングルホップ内では数 $10\mu\text{s}$ 程度、マルチホップ環境下でも同期精度は高い。しかし、主塔頂部などは、桁上などに設置される多くのセンサから懸隔たっており、相互無線通信は困難である。このように、中、長スパンの橋梁では互いに交信不可能なサブネットワーク (SN) が複数生じる。そこで GPS と無線のハイブリッド同期により、そのような状況下でも同期計測を実現する。具体的には、各 SN 内で 1 つ以上のノードに GPS を搭載し、その絶対時刻を取得する。このノードが SN 内の他ノードと無線通信同期を行うことで、全ノードを絶対時刻同期する。GPS 時刻によるタイムスタンプでデータ取得が可能となるシステムを構築した。この GPS 同期システムは後述の新型 LDV にも接続し、同期計測に用いることも可能である。

システム安定性の向上、歪計測ボードとマグネット型簡易歪計測機器 (応力聴診器) の組み合わせによる歪計測の実現など現状の無線計測の課題解決も行う。

(2) 新型レーザー速度計を利用した効率

的な部材挙動把握

構造部材の劣化、例えばボルトの緩み・脱落、亀裂の進展などは、特にその初期において部材のローカル振動の変化として現れることが報告されている。本研究においても構造物の詳細 FEM 解析を通して、部材劣化によるローカル振動変化を明らかにした上で、これを遠方より効率的に捉える。高反射率ターゲットが不要で遠方観測が可能な新型 LDV の計測特性を明らかにし、効率的に多数の部材挙動を把握する。

4. 研究成果

(1) GPS 同期システムの開発

GPS から高精度な PPS 信号を取得しこれにより計測をトリガーする仕組みを構築するとともに、UART 経由で得られる UTC 時刻を取得し PPS 信号と UTC 時刻の対応付けをした。これにより、正確に UTC タイムスタンプが付与されるデータ収録システムを構築した。本システムはアナログインターフェースを持つため、レーザードップラー速度計 (LDV) の信号を入力した場合には、複数の LDV や他種類のセンサと動機して動的現象の計測が可能である (図 1)。



図 1 簡易同期計測システム

(高精度 MEMS 型加速度計, GPS,

データ収録装置, PC より構成)

一方で、無線センサネットワークにおいても GPS 同期の仕組みを検討した。同様に、PPS 信号および UTC 時刻を取得することで、絶対時刻に同期した加速度信号が得られた。

(2) 無線センサネットワーク改良・最適化

無線センサシステムではその安定性の向上を測り、特にマルチホップ通信におけるデータ転送アルゴリズムを新たに開発し、データ転送速度の最適化を測った。本アルゴリズムが最速のデータ転送アルゴリズムであることの証明を与え、実装の上、キャンパス内および長大吊り橋において検証実験をした。

キャンパス内実験ではデータ転送速度の実測値が理論値に近いことを示した(図2)。実橋梁における通信環境は極めて複雑で、理論的に求められる最短データ転送時間は実現できなかったものの、振動データをマルチホップ通信により収集する事ができた。従来の計測システムでは設置・撤去の費用および時間の観点から実現が困難な全体振動挙動の把握を1日の計測により簡易に実現できることを示した。

加えて、首都高速道路高架橋において、局部応力の計測・解析を行うなかで、無線センサネットワークを利用して対象高架橋の全体振動モードを明らかにしている。ねじれ、を含む複雑な面的な振動モードであるため、無線センサネットワークによる面的な密な計測により全体モードが明らかとなった。

Time-consumption in seconds

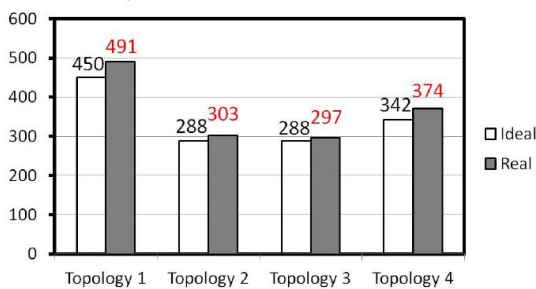


図2 無線センサネットワーク通信アルゴリズムの最適化

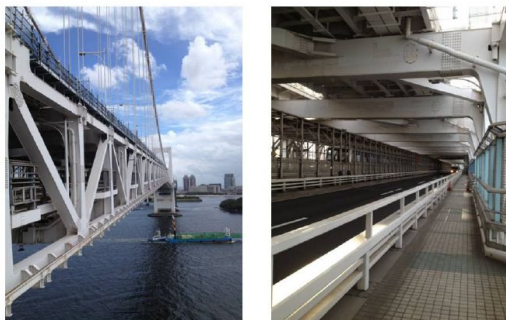
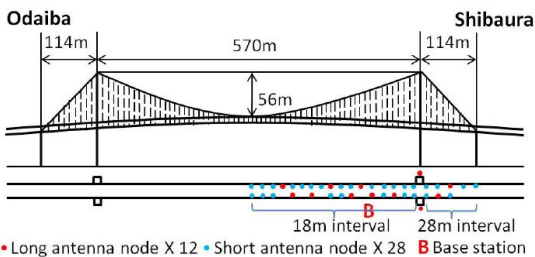


図3 長大吊り橋における無線振動計測実験

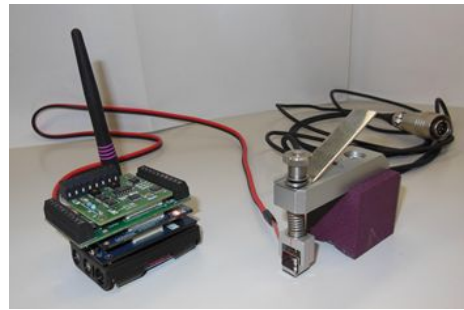
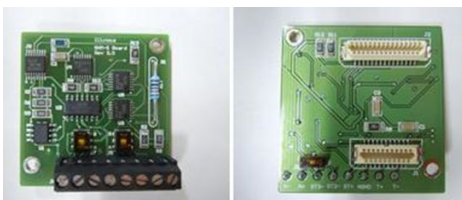


図4 ひずみ計測センサボードと応力聴診器

更に、無線センサネットワークをひずみ計測に拡張するため、ひずみ計測センサボードを開発した。これは磁石により簡易に鋼構造物表面に設置可能な応力聴診器という市販歪センサを無線センサボードに接続するものである。設置の容易さに優れる無線センサ、応力聴診器を組み合わせることで簡易ひずみ計測を実現するものである。図5に示す通り、室内試験では 1μ 程度の分解能を示した一方で、鋼鉄道橋における実証実験では応力聴診器が塗装表面において滑り、正確な歪み値を計測することができなかった。図6は列車通過時の応力応答であるが、列車走行前後で明らかにひずみレベルが異なる。応力聴診器側の改善が期待される。

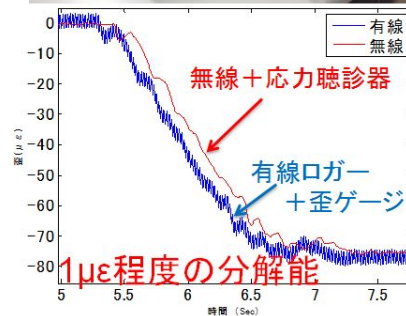
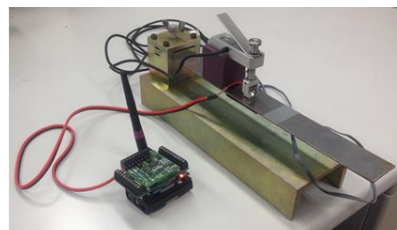


図5 ひずみセンサボードの室内試験

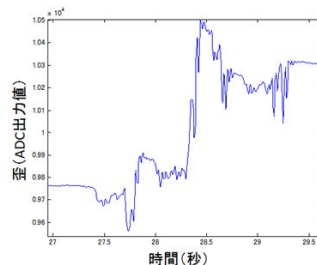


図6 鋼鉄道橋におけるひずみセンサボード試験

(3) 新型レーザードップラー速度計を利用した局部振動の把握

まず、新型レーザードップラー速度計(LDV)の計測性能を検討した。室内計測に置いて、サーボ型加速度計、速度計、変位計と、本LDVにより同一のターゲットを計測し、その出力が等しいことを確認した。LDVにおいては実環境における反射率が計測ノイズレベルを大きく左右することから、実環境での性能評価も欠かせない。そこで、実構造物における遠隔計測性能を複数の橋梁において確認した。高速道路高架橋において桁下から鉛直上向きにLDVを設置し変位応答を計測した(図7)。旧来のLDVと異なり、コンクリート表面の計測であっても反射ターゲットを必要とせず計測できることを確認した。図7にレファレンスとして利用したレーダー型変位計との比較も合わせて示す。荷重車が対象橋梁を通過し、路面上に設置したランプを乗り越える折の応答を捉えられている。動的成分、静的成分ともにレファレンスに近い計測値を示すことが確認された。この他、別の高速道路斜張橋において、そのケーブル振動を遠隔で計測可能なこと、計測された速度スペクトルからもとめられるケーブル張力がレファレンスセンサとして用いたサーボ型加速度計により算出された張力推定値と一致することも確認している。100m程度までの距離においては顕著なノイズレベルの増加なく、速度応答を計測できることが分かった。

ついで、本LDVを用いてベルトコンベアトラス構造の全体振動および局部振動の把握を行った。ベルトコンベアトラス構造は粉塵の多い劣悪な使用環境のため、腐食など構造上の損傷の程度が大きい。腐食による構造上の変化をLDVにより、各構成部材を密に計測し、局部振動を把握することで、腐食状態を同定しようとするものである。腐食レベルによって、局部振動モードの振動数が大きく異なることを有限要素解析により示し、これを実ベルトコンベアトラス構造物において計測、実証した。トラス構造の局部振動は極めて多数存在し、また全体系の振動も重畳していることから、特定の局部振動モードを抽出することが難しい。レーザードップラー速度計により遠隔から多数点の振動を把握し、互いに比較することで、周期的局部振動モードおよび孤立振動モードという特定の局部振動モードを抽出し、腐食レベルを推定できることを示した。特に、腐食の激しい2次部材は、質量の小さな場合はセンサ設置によっても局部振動が変化し得る、アクセスが容易でない部材が多い、と言った理由からLDVを利用した遠隔計測によるメリットが大きい。

本計測結果を詳細FEMと比較、更新することで、トラス構造上の腐食状態を推定することができた。同様のアプローチを鋼トラス橋などの橋梁に適用できるか検討を進めてい

るところである。

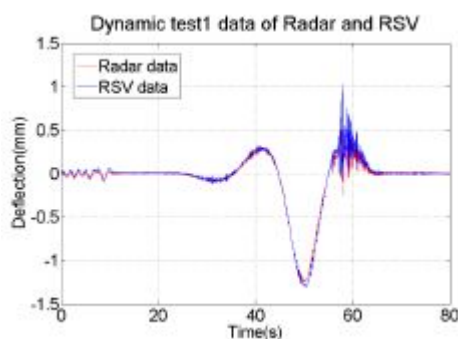


図7 新型レーザードップラー速度計を利用した高速道路高架橋の振動計測とその計測データ

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)

・Zou, Z., Nagayama, T., and Fujino, Y.: Efficient multi-hop communication for static wireless sensor networks in the application to civil infrastructure monitoring. Structural Control and Health Monitoring, DOI: 10.1002/stc.1588, 2014.

・黒岩 拓人, 鈴木 誠, 猿渡 俊介, 長山 智則, 森川 博之: “無線センサネットワークを用いた構造モニタリングのためのマルチチャネル利用型並列一括収集機構” 電子情報通信学会論文誌, vol. J96-B, no. 2, pp. 114-123, 2013

・Jo, H., Sim, S.-H., Nagayama, T., and Spencer, Jr., B. F.: “Development and application of high sensitivity wireless smart sensors for decentralized stochastic modal identification”, Journal of Engineering Mechanics, 138(6), 683-694, 2012.

〔学会発表〕(計 8 件)

・宮下剛, 吉岡勉, 羽倉守人, 長山智則, 田代大樹: 不可視レーザー光を用いた新しい LDV による斜張橋ケーブルの振動計測-幸魂大橋での計測事例- 第 66 回土木学会年次学術講演会概要集, -324,2011.9.

・Li, J., Nagayama, T., Mechitov, K. A., and Spencer, Jr., B. F. (2012) “Efficient campaign-type structural health monitoring system using wireless smart sensors.” Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012, Proc. of SPIE volume 8345, San Diego, USA.

・Kim, R. E., Nagayama, T., Jo, H., and Spencer, Jr., B. F. (2012) “Preliminary study of low-cost GPS receivers for time synchronization of wireless sensors.” Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012, Proc. of SPIE volume 8345, San Diego, USA.

・Nagayama, T., Urushima, A., Fujino, Y., Miyashita, T., Yoshioka, T., Ieiri, M. (2012) “Dense vibration measurement of an arch bridge before and after its seismic retrofit using wireless smart sensors.” Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012, Proc. of SPIE volume 8345, San Diego, USA.

・Honarbakhsh, A., Nagayama, T., and Fujino, Y. (2012) “Damage identification of belt-conveyor support structure using global and local vibration modes.” Proc. of 5th European Conference on Structural Control, Genoa, Italy.

・蘇迪, 三輪陽彦, 藤野陽三, 長山智則: 首都高速道路高架橋における走行車両による交通振動計測とその解析, 第 59 回構造工学シンポジウム

・蘇迪, 嶋田優樹, 三輪陽彦, 藤野陽三, 長山智則, 水谷司: 交通荷重下の鋼桁橋の応答計測と局部応力の評価, 第 60 回構造工学シンポジウム

・長山智則, アミンホナルバクシュ, 藤野陽三, 富永知徳, 久積和正 菅野良一: 局部振動に着目したベルトコンベアトラス構造の部材剛性評価手法の開発, 第 68 回土木学会年次学術講演会概要集, 1-052, 2013.9.

〔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)

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: