

令和元年6月24日現在

機関番号：30107

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26420472

研究課題名(和文) 構造物のヘルスマonitoringにおけるデータのクラウド化による集中管理に関する研究

研究課題名(英文) Study on centralized management by data clouding in health monitoring of structures

研究代表者

小幡 卓司 (OBATA, TAKASHI)

北海学園大学・工学部・教授

研究者番号：20214215

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本システムは、親機となるサーバーから、複数の子機にデータ取得のシグナルを送り、子機に接続された4個程度の圧電素子から振動データを計測するため、子機の同期精度が問題となる。この同期精度について実験を行ったところ、同一のネットワーク内であれば10機程度の子機の同期精度は十分であり、理論的にはさらに子機を増やしても大きな問題は生じないことが判明した。なお、子機から親機へのデータの転送は、振動波形を直接転送すると非常にデータ数が多くなり時間を要するため、子機内で高速フーリエ変換を行い、ある程度データを圧縮する形で親機に送ると転送時間も非常に短縮できることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国における社会基盤構造物の建設は、1970年代にピークを迎え、また1986年から90年代頃のバブル期にも、過去に凍結されていたプロジェクトが実行に移され、多くの構造物が竣工し、現在に至っている。今後、供用後30年から50年を超える基盤施設は爆発的に増加することは自明であり、耐荷力や耐震性能の全般的な向上や、維持管理の強化による長寿命化への対応が必要であるため、様々な報道メディアでも取り上げられるようになり、補修・補強工事や予防保全が行われるようになりつつある。橋梁点検をシステム化することにより、安価で集中管理することが出来れば、安全で強靱な交通システム造りが可能になる。

研究成果の概要(英文)：Since this system sends signals for data acquisition to multiple slaves from the parent server and measures vibration data from about 4 piezoelectric elements connected to the slaves, synchronization accuracy of slaves is a problem. It becomes. An experiment was conducted on this synchronization accuracy, and it was found that the synchronization accuracy of about 10 slaves is sufficient within the same network, and that theoretically no major problems occur even if the number of slaves is increased further. In addition, since transfer of data from the slave unit to the master unit requires a large number of data and time required when the vibration waveform is directly transferred, the master unit performs high-speed Fourier transformation in the slave unit and compresses the data to some extent. It has been confirmed that the transfer time can be greatly shortened by sending the system.

研究分野：橋梁工学

キーワード：橋梁点検 ヘルスマonitoring 長寿命化 予防保全

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我が国における社会基盤構造物の建設は、1970年代にピークを迎え、また1986年から90年代頃のいわゆるバブル期にも、過去に凍結されていた大規模なプロジェクトが実行に移され、多くの構造物が竣工し、現在に至っている。近年では、経済状況の低迷、環境への配慮、市民の様々な価値観の変化などの要因が重なって、従来は再開あるいは新設の対象となっていたような基盤施設も補修・補強を施し、長寿命化が図られている。また、1995年以降、被害規模の大きい地震災害が頻発し、道路橋示方書などの設計仕様書・指針類も、交通量の増大と車両の大型化、解析・施工技術の進歩を踏まえて、主に耐震性能の向上と100年程度の耐久性の要求、維持管理の性能要求に至るまで様々な改訂が行われてきた。今後、供用後30年から50年を超える基盤施設は爆発的に増加することは自明であり、耐荷力や耐震性能の全般的な向上や、維持管理の強化による長寿命化への対応が必要であるため、様々な報道メディアでも取り上げられるようになり、補修・補強工事や予防保全が国民の同意の上で行われるようになりつつある。さらに、現在の道路交通ネットワークの充実により、宅配便などのトラックによる輸送が非常に多くなっているが、我が国が地震国であるという条件から、災害に強い交通ネットワーク造りが必要である。そのため、既存の社会基盤構造物においては、維持管理の強化と予防的補強で、全般的な性能向上が図られている。

### 2. 研究の目的

構造物の長寿命化のための予防的保全・補強を効果的に行うためには、日々の点検や維持管理が極めて重要であることは言うまでもない。しかしながら、現状における点検手法の主流は熟練技術者による目視や打音による点検が大半であり、80年代頃から提唱され始めた、いわゆる構造物のスマート化、インテリジェント化は、ほとんど進んでいないのが現状である。また、構造物の振動を測定して損傷同定を行う研究も多数行われており、相応の研究成果も上げられているが、その内容は非常に難解なものも多く、専門家が複数のパラメータやモード形状の変化を総合的に検討して判定を下すものが大半であり、中には実験室内の環境でのみ再現可能なものもある。著者の知る限り、多少の専門知識で損傷の程度や位置を同定できるシステムは、現状ではまだ存在しておらず、誰でも簡単に診断可能なシステムの開発は、これからの需要の急増や専門技術者の減少を考慮すると、このようなシステムの開発は急務であると判断できる。以上を踏まえて、本研究では力を加えると電圧を発生する圧電素子に着目し、これをセンサとして直接使用することにより、圧電素子による損傷同定の可能性について基礎的検討を加えることとした。圧電素子で構造物のひずみを測定しようとする試みは、以前から行われている。その結果、圧電素子の固有振動特性によって発電量が変化し、実際のひずみと電圧が一致しないケースや、帯電によるチャージアップによって測定困難に陥る欠点も指摘されているが、圧電素子は一般に安価で、アンプなどによって荷電する必要がなく、ノイズ耐性もひずみゲージに比して高いことから、新たなセンサとしての利用、あるいは圧電効果と逆圧電効果の双方を利用したセルフセンシング・アクチュエーション機能を有する制御装置の開発まで、様々な用途への応用が期待されている。

また、PICなどのマイコンとデータ通信を一体化し、データ集積・診断システムを構築する、汎用部品で構成されたPCクラスタシステムに注目し、このシステムの研究開発を中心に研究を実施することにより、実際に複数の実験供試体から、それぞれ同期が取れた圧電素子の信号をサーバーまで送ることに成功し、少なくとも同一のLAN回線内のワークグループの中では確実にデータを集積し、ビッグデータとして取り扱うことが可能とすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 実験供試体

本研究では、実験供試体を作成し損傷同定実験を行った。この供試体の諸元は、主にアルミの棒部材を使用しており、合計12か所の添接部を設けて、その状態を、健全、亀裂(添接部の片側のボルトを抜いた状態。添接板の摩擦で半剛結のような状態、ボルトは抜いてあるが、非常に摩擦は大きい)、破断の3状態に、位置や損傷個所の個数を変えることで応答の変化を測定した。アルミ供試体の諸元は、桁長1600mm、全幅300mmの格子桁で、主桁には20mm×10mmの角パイプを弱軸方向に使用した。境界条件は、一方がベアリングを用いたヒンジ、他方は鋼棒の上に供試体を載せる形とした単純支持である。圧電素子の位置は主桁と横桁の格間18か所に貼付し、損傷の与え方に応じてその中の3点を測定対象とした。固有振動特性の確認に加速度の測定も同時に行っている。また、供試体自身が軽量であるため、振動数の調整のために、0.5kgの重錘を3個載せた状態で実験を行った。加振方法は、質量3kgの重錘を中央に載荷し、これを急速解放することで減衰自由振動を発生させた。

#### 3.2 測定方法

まず、圧電素子の測定方法は、NATIONAL INSTRUMENTS 社の A/D 変換機、USB-6009 を用いて行った。本機は、PC に USB 接続することで非常に簡単に A/D 変換データを記録することが可能である。ただし、精度を向上するため、差動モードでデータを取得する場合、最大 4 チャンネルまでしか測定できないことが欠点である。今回の実験では、より確実に圧電素子のデータを得るため、1 度の実験での測定は 3 チャンネルまでとし、実験条件に合わせて何度か盛り替えをして所定のデータを得た。今回用いた圧電素子は、京セラ製モノモルフ型で、直径 27mm、衝突エネルギー 250J で 25V 程度の電圧が得られる性能を有している。用途としては、圧電ブザーとして用いるもので、本来は 1000Hz 程度の音を発する製品である。本研究の供試体の 1 次固有振動数を比較すれば、製品規格の 1/100 程度の振動応答を測定することになるので、供試体の振動に追従可能であるか確認する必要があると考えられる。一般に、モノモルフ型は円形または方形の、1mm 程度の金属板の上にロッシェル塩などの圧電材料が溶着されている。この金属面に曲げ変形を与えると、変形量に応じた電圧が発生するため、曲げ振動を発生する部材に貼付することで、交流電圧の周波数と発電量を観測することが可能である。圧電素子そのものは、曲げ変形などを受けない限り発電量は 0 となるので、理論的にはノイズが発生せず、A/D 変換機のノイズのみとなる。また種類としては、シート型などの様々な形状のものが市販されているが、モノモルフ型は 1 個 30~50 円程度と非常に安価であり、金属面の面積も相応に広いため発電量が比較的大きく、動ひずみ計などを使用せずに直接 A/D 変換機に接続するだけでデータの取得が可能である。供試体への圧電素子の添付は、ひずみゲージの添付方法とほぼ同様であるが、供試体の素材がアルミ角パイプで肉厚が小さいため、グラインダーでの表面加工は行わず、供試体と圧電素子の金属面をアセトンで清掃し、供試体と圧電素子を瞬間接着剤で接着した。主桁の幅は 20mm であるが、確実に電圧測定を行うために大きめの圧電素子を用いていることから、圧電素子が少し張り出す形となっている。この供試体と圧電素子の張り出し部には再度接着剤を流し込み、圧電素子と供試体の挙動が同様になるよう配慮した。これらの特性から、PC をバッテリー駆動にし、USB-6009 を介して曲げひずみによる電圧変化を測定した場合、ノイズの発生源としては前述のように A/D 変換機だけになり、S/N 比が高い良好なデータを得ることが可能になる。測定条件としては、サンプリング周波数 200Hz、データ点数 2048 個で測定を行った。

また、データ集積の方法に関しては、WiMAX2 などの一般の通信回線を利用して、安価にデータ集積を行うことを検討した。従来でも、長大橋においては、加速度計の設置と専用回線により、地震時などの加速度観測や GPS を利用した位置観測が行われているが、計測機器そのものが非常に高価であり、一般的な生活道路の橋には設置が困難であった。本研究では、汎用部品で構成された PC クラスタシステムを使用するため、測定システム自体が安価であり、前述の WiMAX2 を使えば、ランニングコストも抑えることが可能である。さらに、複数の橋梁で収集され、解析されたビッグデータを、分かりやすく表示する方法についても検討を行った。これは、表示が必要なデータを選択して WEB 上で表示し、異常時には携帯に連絡するなどのシステムを追加する必要がある。

#### 4. 研究成果

最終年度までに、圧電素子を用いた多点同時測定ヘルスマonitoringシステムの完成と、同期・測定精度の向上および損傷同定の実用化の可能性に関して検討を行った。

次に本システムの損傷同定に関する性能について述べる。上記の通りデータはフーリエスペクトルで送られて来るため、健全時と損傷時のスペクトルを比較することにより損傷の有無を判定することを試みた。なお、実験は橋梁を模した 3 主桁の実験供試体を用いている、実験結果からは、損傷位置の近傍でのデータでは健全時では 1 次モードと 2 次モードのピークが明確に確認されたが、損傷時では 1 次、2 次モードともピークが大きく減少し、2 次モードでは振動数の低下も確認することが可能であった。損傷位置から離れた位置での測定データでは、健全時、損傷時ともそれほど明確な差異は認められなかった。このことから、本システムは、少なくとも損傷位置の同定は可能であることが判明した。

さらに、クラウドでのデータの「見せかた」についても検討を行った。クラウドでは、集積されたデータを 1 橋ずつの測定データ毎にブラウザに表示することで、データを確認できるような方法を検討した。

さらに、AI を用いて損傷写真データを学習させ、損傷程度の把握を行うシステムの研究にまで踏み込み、非常に多岐にわたる研究を実施することが出来た。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

2) 菊谷雄真, 山野龍佑, 高前田伸也, 梅本敏孝, 小幡卓司, 早川潔:モンテカルロシミュレーションにおける乱数発生システムの開発, 数理学会論文集, Vol.17, No1, pp15-20, 2016.

- 1) 小幡卓司: 圧電素子を用いた損傷同定モニタリングシステムの実験的研究, 構造工学論文集, Vol.60A, pp165-174, 2014.

[学会発表] (計 9 件)

- 1) Eri Fujiura, Kouhei Katagiri, Takeshi Wada, Kazuhiro Aoki, Masanari Kubota, Takushi Obata, Kiyoshi Hayakawa A decision system of crack damage rank on infrastructures using Deep Learning, 6th IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing, pp.76-82, 2018.
- 2) Tomoki Mino, Hiroshi Enokura, Takeshi Wada, Kazuhiro Aoki, Takushi Obata, Kiyoshi Hayakawa: Development of Wireless Networking and Synchronization in a Health Monitoring System, Proceedings of the 5th IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing, pp284-290, 2017.
- 3) 三野智貴, 和田健, 梅本敏孝, 小幡卓司, 青木一弘, 早川潔: 構造物のための損傷センサシステムの開発にける同期精度の改善, 第 36 回数理学講演会, 2017.
- 4) Kiyoshi Hayakawa, Tomoki Mino, Eri Fujiura, Kazuhiro Aoki, Takeshi Wada, and Takashi Otoba Development of a Structural Health Monitoring, 2017 Joint Academic Forum in Danang The University of Danang-University of Science and Technology-DUT with Japan University & Company Research Group, 2017.
- 5) Tomoki Mino, Hiroshi Enokura, Takeshi Wada, Kazuhiro Aoki, Takushi Obata, Kiyoshi Hayakawa: Development of a damage identification monitoring system for building structures, 4th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering, Beppu, Japan 2016.
- 6) 小林亮太, 中尾亮太, 早川 潔, 和田健, 梅本敏孝, 小幡卓司: スマート ARM+FPGA ヘテロクラスタにおける電力制御機構の開発, 第 34 回数理学講演会概要集, 2015.
- 7) 山中祐紀, 吉田晃基, 早川潔, 梅本敏孝, 小幡卓司: ARM および FPGA を利用したモンテカルロシミュレーションシステムの開発, 第 34 回数理学講演会概要集, 2015.
- 8) 山野龍佑, 早川潔, 梅本敏孝, 小幡卓司: 科学技術計算式のハードウェアオフロード手法の検討, 第 34 回数理学講演会概要集, 2015.
- 9) 小幡卓司, 西村 勇軌: 圧電素子を用いた橋梁構造物の走行荷重による損傷同定の可能性について, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014.

[図書] (計 1 件)

- 1) 小幡卓司ほか 34 名: センシング情報社会基盤, 土木学会 構造工学シリーズ 24, 2015.

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名: 早川 潔

ローマ字氏名: KIYOSHI HAYAKAWA

所属研究機関名: 大阪府立大学工業高等専門学校

部局名: 電子情報コース

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 20325575

研究分担者氏名: 和田 健

ローマ字氏名: TAKERU WADA

所属研究機関名: 大阪府立大学工業高等専門学校

部局名: メカトロニクスコース

職名: 准教授

研究者番号 (8 桁): 00469587

(2)研究協力者  
研究協力者氏名：  
ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。