

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25242033

研究課題名(和文) ピエゾケーブルを用いた構造物簡易スマートセンサシステムの研究

研究課題名(英文) Study on simple smart sensor system for structure using a piezo electric cable

研究代表者

下井 信浩 (Shimoi, Nobuhiro)

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授

研究者番号：10300542

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,800,000円

研究成果の概要(和文)：橋梁などの構造物の劣化や老化に伴う崩壊を助長する可能性が存在する。その為、安全な道路の安全確保には橋梁の構造条件の計測や点検が必要である。本研究では、構造物の健全性を容易に評価できる振動監視システムのための Piezocable センサの試作を提案した。実装試験では、秋田県の国道上にある飛鳥大橋を対象として選定した。本センサは、応力状態の変化が発生したときに電圧信号を発する。この性質を利用して等価重量のトラックを用いて走行試験を実施し得られた振動による周波数応答は、適確に橋の固有振動数を計測することを確認した。それらは加速度計を使用して得られる周波数応答と同等であることが検証された。

研究成果の概要(英文)：Deterioration and aging of bridges structures and damage caused by strong earthquakes might be conducive to collapse of the bridge, sometimes with catastrophic consequences. Therefore, investigation of structural condition of bridges is necessary for secure safe road operations. This paper presents a prototype of piezoelectric-cable sensor for vibration monitoring system that permits easy evaluation of the bridge structure integrity. For this study, a bridge located at Yurihonjo city, Japan was chosen as a target structure. The experiment was performed using a truck of 19 t of equivalent weight. Responses were captured appropriately using the proposed system. They are comparable to responses obtained using accelerometers. Although the general response pattern is obtained appropriately, it is necessary to improve the accuracy of the proposed system to gather more reliable data.

研究分野：計測工学、ロボット工学

キーワード：Piezocable 加速度計 微動振動 圧電センサ 固有振動数

1. 研究開始当初の背景

わが国では戦後急速に社会基盤施設を整備してきたが、トンネル内のコンクリート片はく落、釣り天井の崩落、鋼製橋脚隅角部の疲労き裂などにみられるように、建設されてきた道路ストックの劣化・老朽化が急速に進行していることが証明されている。アメリカの例を参考にして考察すると、建設年度から計算して 2010 年代以降に多くの老朽化橋梁が出現することが予想される。その上さらに、様々な使用条件が付加される我が国の道路ストックは、地震や台風等の厳しい自然条件下や地形が存在するため、予期しない災害に見舞われるリスクの大きさも計り知れない。利用者の「安心・安全の社会構築」を確保するためには適切な管理が必要であり、特に使用条件の厳しい道路では損傷が顕著であるため、早期対策が不可欠である。土木学会のインフラ維持管理に関する研究討論会やコンクリート工学の「最新コンクリート計測技術」の研究論文特集などは、土木工学分野において「造る土木」から「維持管理工学」への中心軸の移動を如実に示すものであると言える。

2. 研究の目的

(1) 地域の安全・安心の為に住民生活を重視したセンサシステムの構築

震災や老朽化により建築物や橋梁等の破壊がいつ生じる分からない場合、その居住者や通行者達は不安であり安心した生活を送ることが出来ない。このような問題を解決するために本システムでは、スマートセンシング技術による昼夜を問わない遠隔からの構造物モニタリング技術の実施を可能にする。

(2) 震災等における避難経路確保のための構造物ヘルスマニタリングシステムの構築

震災時において複数の建物や橋梁等の損傷及び強度を自律的に判定し、市町村の防災責任者が安全な避難経路を作成するための資料をリアルタイムに提供するシステム構築と管理評価ソフト開発のための基礎資料を得る。

3. 研究の方法

(1) 従来技術との比較

橋梁等の計測に用いられるセンサには橋梁の微小変位や微小振動等の計測が求められるため、従来は高分解能で高精度の計測器が用いられていた(渡邊, 佐溝, 2011), (土木工学構造委員会, 2004), (小野, 2003), (中村, 2002), (Chang, 2001), (中村, 安井, 1999), (岡林他, 2012)。これらの機器には、加速度計測器、レーザ変位計測器、光ファイバーケーブルを用いたひずみ計測方法等が用いられ、その計測精度は約 5 μ m の誤差で高精度の計測が可能とされている(三上, 2006)。

簡易計測手法においては、本研究と類似する piezoelectric ケーブルを用いた構造ヘルスマニタリング方式が論文誌等に発表されている。その事例として、市販されている鉄製の締結ボルトの中心に piezoelectric ケーブルを挿入し接着固定後、端子コードをロガーに接続してボ

ルト軸方向のひずみによる電圧の出力変化を計測する方法がある。このボルトセンサは、構造物の締結用穴にそのまま挿入してナットの締結トルクを一定にした他の締結ボルト同様の固定を実施しており、ボルト軸方向のせん断応力やボルトのひずみを計測している。他方、構造物の亀裂を計測するために、圧電ケーブルを鉄筋入りモルタルの試験体全長に埋め込み、曲げ荷重による検出が可能なセンサもある。しかし、これらのセンサは、締結ボルト自体が受ける荷重に対して計測しており、鉄筋入りのモルタル等が破断または変形するような衝撃をセンサ自身が受けて検出するため、センサ本体が疲労変形または破壊される可能性から長期的な測定を必要とするスマートセンシングには適していない。また、微小変形に対応したセンサ出力からの S/N 比の関係を考慮したノイズの分離には非常に難しい問題が存在する。実際に販売実績のあるセンサの中には Measurement Specialties 社製の「トラフィックセンサ」がある。しかしこのセンサは、piezoelectric ケーブルを高速道路に直接埋設して出力電圧の比較による「通行車両の通過状態」や「積載重量の計測」に用いられており、このセンサも本論文の測定目的とは異なると言える。

また加速度計を用いた方法では、振動解析による FFT 処理から固有振動数を判定することで構造物の健全性を判断することが研究されている。一般的に構造物の健全性が失われると固有振動数は低くなると言われており、この特徴を判定することが重要である。これらの固有振動モードを測定する方法は機械工学や建築工学の分野でその理論や実証が多く行われている。橋梁等のダメージについても固有振動数の変化や撓みの大きさ等を正確に検出するためには、長期にわたり構造物の変化を高精度に計測して、定量的に分析することが必要とされる。しかし、要求される高精度のヘルスマニタリングシステムを構築するためには、精度や分解能に優れたセンサを多数使用しなければならない。従って、構造物の健全性を過度に求めると、計測が複雑になり判定も難しく、システム価格も高額になる。現実的に考えると、センサの使用個数や性能の維持管理を持続しながら 1~2 年の長期的なリアルタイムのスマートセンシングを実施することは難しく、実施した解析結果や健全性を評価した報告事例は少ない。このような問題を解決するためには、大震災直後や老朽化等によって起きることが予想される橋梁等の構造物の異常振動や変位を測定することにより、崩落の危険を早期に予兆してダメージを推定する簡易計測システムの構築と ICT 技術を用いた早期情報判定システムの発展を進めることが重要であると考えられる。

(2) 橋梁の概要

飛鳥大橋は、1 級河川の子吉川に架かる最大支間長 38.0m、全 7 スパン、橋脚 8 基から

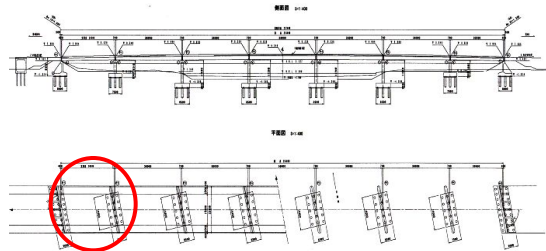
構成されている 1979 年に竣工した RC 橋梁である。本試験においては、センサ設置場所等の関係から図 1 (a) の橋梁平面図上に丸印で示す部位、羽後本荘駅側に架かる橋梁最初のスパン 31.1m のみの測定を実施した。構造は図 1 (b) の橋梁断面図が示すように RC 地覆の道路面下に H 型鋼による下弦材が有り、強固な鉄筋 RC 橋脚にボルト締結を用いて固定されている。なお、橋梁外観の目視による破損やクラックは認められず、定期点検による適切な補修が実施され、検査上からも健全性が維持されている。図 2 (a) にセンサ敷設の位置とその敷設状況の詳細図を示す。加速度計とピエゾ振動センサを橋梁床版の裏側から同一箇所に各々 7 セットを * 印の位置に聴診器のように接触式で設置した。図 2 (b), (c) に示したセンサ番号 1, 3, 5, 6 は橋梁の長手方向から見て垂直方向に設置し、センサ番号 2, 4 は同水平方向とした。また、図 2 (d) に示したセンサ番号 7 とレーザセンサは床版中央部に上向きに設置した。図 2 (e) は無線ユニット、(f) はレーザセンサの設置状況、(g) は荷重試験に使用した 19t ダンプカー（積載重量測定済み）、(h) は従来のせん断力計測のセンサ設置方法についての説明を示す。

(3)センサの敷設方法及び測定方法

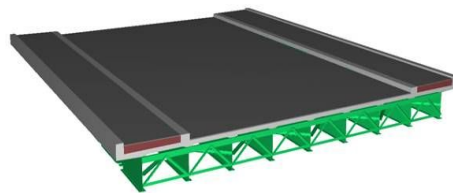
計測においては、秋田県振興局建設部と由利本荘市建設部建設管理課の試験協力を得て、本簡易計測システムと加速度計及びレーザ変位計による、19t ダンプカーを用いた動荷重および静止荷重による実装試験を実施した。

図 3 に実装試験で使用した簡易スマートセンシングシステムの基本構成図を示す。ピエゾ振動センサを用いた簡易計測システムの測定データは、図 3 (a) のシステム図に示すように全て無線による送信で一括してパソコン管理による測定を実施した。簡易マイコンボードにおけるセンサの出力データは Zigbee 無線モジュールによりパソコンに送信され、データ収録と解析を実施可能にしている。計測システムの電源は、センサ情報を認識する簡易マイコンボードとデータ送信に用いている Zigbee 無線のモジュールだけに使用した。図 3 (b) に従来の計測システムを示す。各 1~7 の各チャンネルを有線接続によるプリアンプ（リオン VP-26A）と振動計（リオン UV-05）を接続し、記録・解析装置（共和電業 EDX-2000A）（同 CDV-40A）を用いてパソコンでデータの管理を実施した。データはパソコンに送信され、収録と解析を実施可能にしている。計測に用いたピエゾ振動センサの構造は、図 4 に示すセンサ形状においてピエゾケーブル（80mm）を中空のウレタン樹脂（15mm×80mm）の中心に挿入後、接着固定して外形は円筒型のボルト形状とした（下井，西條，2013）。センサは簡易マイコンボードに有線で接続を可能にするため、4mm の被覆リード線 1.5m を接続し絶

縁処理を実施した。本センサは、ピエゾケーブルの変形に応じて出力される電圧の大きさを測定し、この電圧値に相対した橋梁を通過する車両等の振動による変位や振動の大きさを簡易的に測定可能なように設計されている。図 5 (a) にピエゾ振動センサの簡易計測システム図を示す。

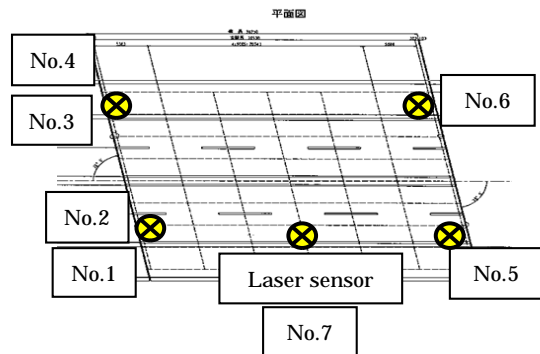
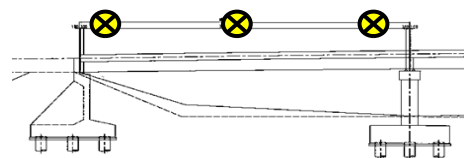


(a) Elevation and plan views of bridge



(b) The bridge in three dimensional an illustration (FEM model)

図 1 Scheme of target structure for measurement. The target is a girder type bridge with seven spans, as shown in (a). For measurements only of the first span.



(a) Sensor location in Asuka RC bridge for elevation view and plan view



(b) Sensor No. 1, 3 and No. 2, 4



(c) Sensor No. 5, 6

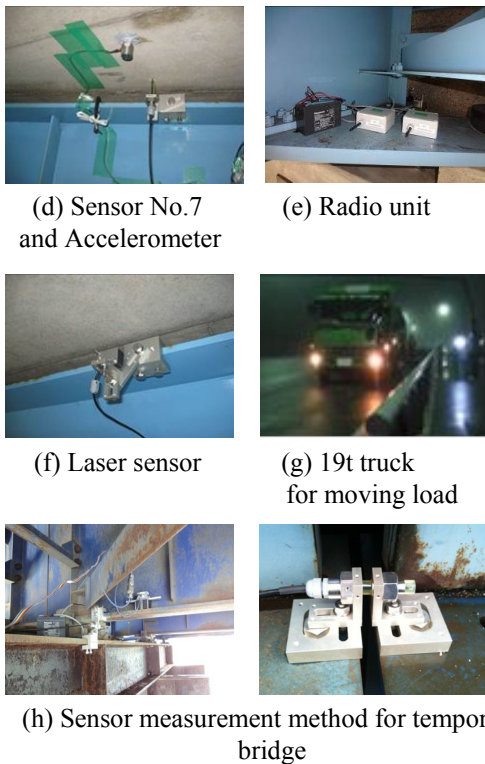
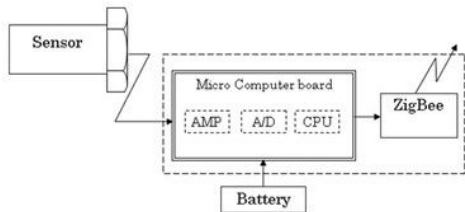
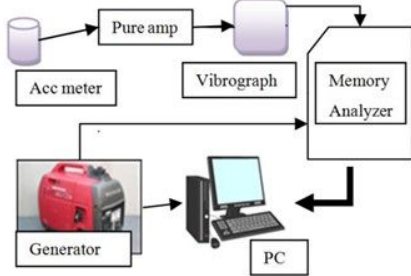


図 2 Presents some details of the sensor setup.

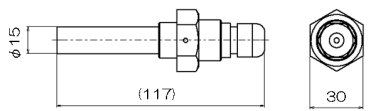


(a) Smart sensing system by piezoelectric sensors

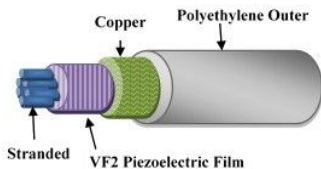


(b) Conventional sensing system as usual

図 3 The proposed sensors system.



(a) Piezoelectric vibration sensor



(b) Piezoelectric cable

図 4 Piezoelectric cable structure sensor

ピエゾ振動センサと加速度計を橋梁の同じ位置に設置した。センサ番号 7 は、図 2(d) に示すようにセンサの固定方法の関係から橋脚の鋼材に治具を取り付けてピエゾ振動センサを敷設した。また加速度計は床版に接するように取り付け、ピエゾ振動センサとの比較試験を実施した。今回の実験は、以前実施した仮設橋の締結部にセンサを挿入したせん断力の測定方式とは異なる方式を用いた。センサ設置の利便性を考慮して図 2(h) に示すように、ピエゾケーブル簡易振動センサを聴診器のように接触するだけの方法に改めて実施した。PM10:00 ~ AM1:00 の間に他の通行車両が無いことを確認し、19t 大型ダンプカーを荷重としてセンサの設置上部における静止実験と通過実験を実施した。この定荷重試験においては各 20, 40, 60km/h 走行時の速度変化における橋梁床版の鉛直振動・変位についても測定を実施した。また、計測時においては、19t 大型ダンプカーの通過時間とセンサ上部における通過時間をトリガ信号で管理してセンサ番号 1~6 までの加速度計とピエゾ振動センサの計測比較及びセンサ番号 7 におけるレーザ変位計との出力比較を可能としている。サンプリング周期は各試験ともに 100Hz で 2 分間による計測を実施した。その他、ビデオカメラを橋梁の川上に設置して橋梁上部における計測箇所を通過する 19t ダンプカーや他の車両通過状況を記録した。河川敷に仮設した家屋内にはノートパソコン(VAIO VGN-G3)を設置し、無線による各ピエゾ振動センサからの測定結果を入力し、記録装置及び解析装置として使用した。また、加速度計による測定には有線で計測家屋内に設置した 1~7 チャンネルのアンプ 7 台と振動解析装置、記録装置及び表示装置等を使用した。屋内における計測の解析状況を図 5(b) に示す。

(4) 橋梁の振動・変位計測の比較

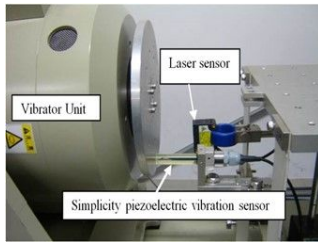
a. ピエゾ振動センサの基本特性

振動試験装置を用いた振幅によるピエゾ振動センサの周波数応答等特性や変位と出力の関係に関する事前試験を室内にて実施検証した。振動計測装置の構成を図 6(a) に示し、測定結果を図 6(b) に示す。以前実施したせん断力を測定するために金属面の接合穴に挿入した方式(下井・西條 2012)から聴診器のような接触方式に変更するため、ピエゾ振動センサを固定治具に取り付けて、振動台試験機の両振幅を 0.05, 0.2, 0.1mm に固定した時の周波数変化とピエゾ振動センサからの出力について測定した。振幅についてはレーザ変位計を外部に固定した状態で計測を実施した。この測定により、振幅の大きさとセンサ出力の関係は比例関係に有り、周波数とセンサ出力の関係は正比例に近似した結果を得ることができた。よって、構造物の実装試験においても固有振動数を測定できると判断された。また、図 6(c)に示すようにセンサ性能評価のために周波数特性の計

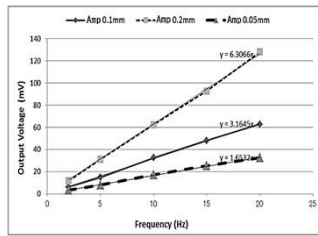
測を行い、40Hz 近傍までの計測が安定し実施可能であることを確認した。



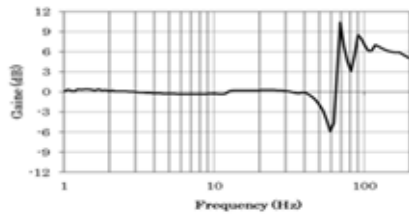
図 5 Piezoelectric vibration sensor for structural health monitoring system



(a) Experiment of vibration



(b) Relationship of frequency and output voltage of piezoelectric sensor according to vibration



(c) Characteristics of frequency

図 6 The test was conducted to ascertain the sensor response to dynamic actions.

b. 振動波形と固有振動数の評価

ピエゾ振動センサの性能評価のために、従来の計測技術である加速度計を用いた振動計測とピエゾ振動センサの出力計測を実施し、両振動波形の値から FFT 解析を行うことにより固有振動の比較検討を実施した。図 7 に 19t 大型ダンパーがセンサ番号 1 の上部を速度 20 km/h で通過した際の自由振動の中から鉛直振動について、加速度計の計測値（左側）とピエゾ振動センサ（右側）の計測値における出力比較を示す。図 8 は図 7 で記録された加速度計の計測波形（左側）とピエゾ振動センサ（右側）の電圧出力から各々の FFT 処理を実施した結果を示す。なお、測定時間の合計 2 分間記録をしているが、FFT 処理により判明した固有振動数の一番大きな値が記録されている計測時間と、19t 大型ダンパーがセンサ上部を通過する直前の 20 秒間について両センサの測定比較を実施し

た。波形に関しては図 7 の結果からもわかるように顕著な特徴を判断することは困難であるが、全般的に両センサの測定結果は同じ計測時間で同期した出力の特徴が見られる。

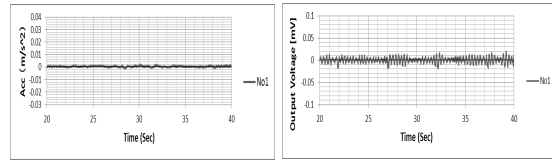


図 7 Portrays acceleration responses obtained using accelerometers.

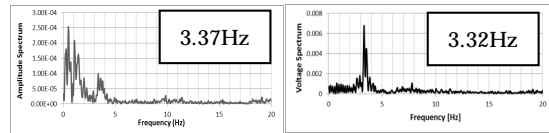


図 8 The Fourier spectrum for signals from points No.1

4. 研究成果

橋梁接合部等の簡易ひずみ計測ボルトセンサからの出力電圧を計測することにより、振動の大きさや周波数を推定することを可能にした。また、本システムを用いた計測手法により簡易的で実用的なスマートセンシングを可能にした。荷重の違いによる接合部の振動計測において、簡易ひずみ計測ボルトセンサからの出力電圧と高性能3軸加速度計の出力は極めて類似した計測結果を得ることが出来た。ピエゾ変位計測センサは変位と比例した電圧による出力を得ることができ、この数値から振動の大きさや周波数を推定すること、および変位を換算することが可能である。本計測システムによる簡易測定手法はセンサ電源が不要であり、複雑な解析値を求める必要もなく簡易な計算式から求める数値が得られる。よって本計測システムによる実用的なスマートセンシングの構築が可能である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 16 件)

Nobuhiro Shimoi, Tetsuya Nishida, Akihiko Obata, Kazuhisa Nakasho, Hirokazu Madokoro, Carlos Cuadra, “Comparison of Displacement Measurements in Exposed Type Column Base Using Piezoelectric Dynamic Sensors and Static Sensors”, American Journal of Remote Sensing, vol.4, No.5, pp.23-32, (2016) ,DOI:10.11648/j.ajrs.20160405.11, 査読有

Nobuhiro SHIMOI, Carlos CUADRA, Kazuhisa NAKASHO and Takuya SASAKI, “Comparison of FEM Analysis and Actual Measurement for Destruction of Brick Masonry Specimen Using a Piezoelectric Limit Sensor”, International Journal of Science and Engineering Investigations, vol.5, issue55, pp.61-66, (2016.8), 査読有
C. Cuadra, N. Shimoi and M. Saijo, “Dynamic

Characteristics of a Bridge Estimated with New Bolt-type Sensor, Ambient vibration Measurements and Finite Element analysis”, Int. J. of Safety and Security Eng., Vol.6, No.1, pp.40-52,(2016),

DOI:10.2495/SAFE-V6-N1-40-52, 査読有
Nobuhiro SHIMOI, Masahiro SAIJO, Carlos CUADRA and Hirokazu MADOKORO, “Comparison of Natural Frequency of Vibration Analysis for a Bridge Using Accelerometers and a Piezoelectric Cable Vibration Sensor”, International Journal of Instrumentation Science, Vol.4, No.1, pp.1-9, (2015.4),DOI:10.5923/j.instrument.20150401.01, 査読有

Nobuhiro SHIMOI, Carlos CUADR, “A Study of Measurement for Dangerous Prediction on Static Lording Test Using Piezoelectric Limit Sensors”, American Journal of Remote Sensing issued by Science Publishing Group, Vol.3, No.3, pp.43-48 (2015.6),

DOI:10.11648/j.ajrs.20150303.12, 査読有
C.Cuadra, N.Shimoi, T.Sasaki, T.Taguchi, “Preliminary Evaluation Of Piezoelectric Sensors For The Prediction Of Compression Failure Of Brick Masonry Components”, Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XIV, Vol.153, pp.605-612, (2015.7), DOI:10.2495/STR15050, 査読有

C.Cuadra, N.Shimoi, “Preliminary study on applicability of a Piezoelectric Sensor for structural monitoring.” Congreso internacional de computations y telecommunications, No.VII, COMTEL2015, pp.211-216(2015), 査読有

下井信浩, C.H.Cuadra, 佐々木拓哉, 間所洋和, 西條雅博:「ピエゾ極限センサを用いた静的荷重試験による破壊前の測定比較」, 計測自動制御学会論文集, Vol.51, No.10, pp.696-705, (2015.8), 査読有

Nobuhiro SHIMOI, Masahiro SAIJO, Carlos CUADRA and Hirokazu MADOKORO: “Comparison of Natural Frequencies of Vibration for a Bridge Obtained from Measurements with New Sensor System”, American Journal of Remote Sensing issued by Science Publishing Group, Vol.2, No.4, pp.30-36. (2014), DOI:10.11648/j.ajrs.20140204.12, 査読有

下井信浩, C. Cuadra, 間所洋和, 西條雅博: 「簡易ピエゾケーブル変位センサと有限要素法を用いた伝統木造建造物の振動解析」, 日本機械学会論文集(C編), Vol.79, No.806, pp.3442-3452, (2013.10), 査読有

[学会発表](計12件)

[図書](3件)

下井信浩, クアドラ カルロス, 中正和久, 間所洋和:「ピエゾセンサを用いた木造建造物の振動解析」, FEM解析と比較したピエ

ゾセンサの性能評価」, 超音波テクノ, Vol.29, No.2, pp.29-33, (2017)

下井信浩, 西條雅博:「橋梁の危険予知用簡易スマートセンサ(簡易ひずみ計測ボルトセンサ)」, 劣化のセンシングとモニタリング - インフラと安全監視のトピックス -, (株)東レリサーチセンター, P.18, (2016.8)

[産業財産権]

○出願状況(計2件)

名称:リミット型変位検出装置および構造物等の健全性モニタリングシステム

発明者:下井信浩

権利者:秋田県立大学

種類:特許

番号:特願 2016-134129

出願年月日:2016年7月6日

国内外の別:国内

名称:雪崩・落石のモニタリングシステム

発明者:下井信浩,佐野康,西條雅博,石塚理

権利者:秋田県立大学,応用地質(株)

種類:特許

特許番号:特願 2016-084918

出願年月日:2016年4月21日

国内外の別:国内

○取得状況(計2件)

名称:ボルト型ひずみ検出器

発明者:下井信浩, 応用地質(株)

権利者:秋田県立大学, 応用地質(株)

種類:特許

番号:特許 5487441

出願年月日:2014年3月1日

取得年月日:2014年11月7日

国内外の別:国内

6.研究組織

(1)研究代表者

下井 信浩 (SHIMOI NOBUHIRO)

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授

研究者番号:10300542

(2)研究分担者

西田 哲也 (NISHIDA TETSUYA)

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授

研究者番号:40315627

CUADRA CARLOS

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号:30302194

間所 洋和 (MADOKORO HIROKAZU)

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号:10373218

青木 義男 (AOKI YOSHIO)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号:30184047