

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 23 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560589

研究課題名(和文)カオス信号入力に基づく構造物の健全時情報を必要としない即時異常性診断法の開発

研究課題名(英文)Development of baseline-free structural abnormal diagnosis systems based on chaotic excitation

研究代表者

野村 泰稔(NOMURA, YASUTOSHI)

立命館大学・理工学部・任期制講師

研究者番号：20372667

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)：本研究では、カオス信号入力に基づく構造異常診断法および非接触変位場計測に基づくき裂同定法を基礎として、健全性評価の際に、事前に判定基準を必要とせず既設構造物の損傷を即時に同定するベースラインフリー型異常性診断法の開発を試みた。カオス信号入力に基づく異常診断法では、入出力情報から融合粒子フィルタを適用することで、層剛性を同定することに成功した。ただし、損傷を仮定した層の剛性を過剰に推定し、本来の剛性よりも下回る値を算出した。一方、画像相関法に基づく異常診断法では、1次モード形状の連続性をフラクタル次元解析により評価することで、健全時情報を必要とすることなく損傷位置が同定されることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, we attempted to develop baseline-free structural damage detection systems using chaotic excitation and digital image correlation method.

In the system using chaotic excitation, we succeeded in identifying the structural parameter such as the bending rigidity and the damping ratio by using a merging particle filter. Through the identified structural parameter, it was found that the proposed system makes it possible to quantify the damage. However, the stiffness at the story with damage was overestimated, which means that further improvements to identify the structural parameters are needed for a practical tool.

In the system using digital image correlation method, it was demonstrated from laboratory experiments that response displacement can be measured appropriately by using digital image correlation method and the proposed system makes it possible to detect the damage by evaluating the fractal dimension of the primary mode shape without using any baseline data.

研究分野：応用情報学

キーワード：構造ヘルスマニタリング 健全性評価 カオス デジタル画像相関法 フラクタル次元解析 データ同化

1. 研究開始当初の背景

近年、社会基盤の安全性確保の観点から多くの健全性評価法が開発されている。長期的な視野で社会基盤の補修計画を策定するためには、直ちに修復すべき損傷だけでなく、き裂レベルの微小損傷を同定することが重要である。通常、損傷同定には診断対象の健全時の状態量が必要であり、健全時情報を持たない多くの既設構造物に対する損傷同定は極めて困難となる。

健全性評価の一つの方法として、カオス信号を入力する診断対象の応答から、アトラクタを再構成し、そのカオス特徴量を損傷前後で比較することで損傷検出を行う手法が提案されている。J.M.NICHOLSらは、診断対象の損傷に起因するカオス特徴量の変化はモーダルパラメタの変化と比較して大きいことを解析的・実験的に明らかにしている (Meccanica, Vol.38, pp.239-250, 2003., Physical Review E, Vol.67, 論文番号 016209 pp.1-8, 2003.)。ただし、それらの実験では片持ち梁の損傷の有無が議論されているのみで、損傷箇所の特定には至っていない。国内では、佐藤ら (土木学会論文集 A, Vol.62 No.4, pp.915-924, 2006.) また研究代表者らは、カオス信号入力により周波数応答の調査では捉えられない数パーセントの剛性低下部材を特定できることを数値実験により明らかにした。ただし、これらの方法はすべて損傷箇所を把握する際、健全時の特徴量(ベースラインデータ)が必要であり、古い既設構造物のように完成時の状態が不明の場合は適用できない。今後、診断すべき既設構造物がさらに増加することを勘案すると、健全時の基準データを必要とせず社会基盤の即時損傷診断が可能な技術の開発は極めて重要である。ただし、現状では振動評価による構造全体系異常診断法の中で、ベースラインレス化を実現したものは国内外を通じてほとんど見当たらない。

2. 研究の目的

本研究では、申請者らの既往の成果であるカオス信号入力に基づく構造異常診断法および非接触変位場計測に基づくき裂同定法を基礎として、健全性評価の際に、事前に判定基準を必要とせず既設構造物の微小損傷を即時に同定するベースラインレス型異常性診断法の開発を目指す。

具体的には、健全時情報を必要としない即時異常診断法の開発を目指し、カオス応答アトラクタの評価に基づく異常診断と画像相関法に基づく異常診断法の開発に取り組むとともに、数値実験・模型実験を行い、これらの方法の有用性を調査し、各課題を明らかにした。以下に本申請課題を通じて検討した方法論をまとめる。

(1)カオス応答アトラクタのリカレンスプロットに基づく構造異常診断法

(2)融合粒子フィルタに基づく構造動特性の

同定法

(3)非接触変位場計測によるコンクリート構造物のき裂検出システム

(4)画像相関法とフラクタル次元解析を用いた Baseline-free 損傷検出法

3. 研究の方法

(1)カオス応答アトラクタのリカレンスプロットに基づく構造異常診断法について

本研究では、カオス応答の低次モード成分に着目し、アトラクタの評価として Recurrence Quantification Analysis の内、リカレンスプロットを適用し、数値実験及び模型実験を通じて損傷位置同定を試みる。リカレンスプロットの評価指標である%REC は計算時の閾値の設定により変化することから、本研究では複数の閾値を設定し、%REC を標準化することを考える。また、既往研究では、各計測点で算出された%REC を損傷前後で比較することで損傷位置が評価されるが、損傷前後で応答の波形構造や振幅レベルが大きく変化する場合、損傷位置の同定は困難となる。そこで本研究では、各計測点で得られる%REC を損傷前後で比較するのではなく、健全時および診断時において計測されるデータに対して個別に標準化された%REC を評価することを考え、各状況下で、計測点間の%REC の減少・増加などの相対関係を評価し、その相対関係が損傷前後で異なることに着目した。実証試験において、構造物に一箇所および二箇所の損傷を与え、層レベルの損傷の位置を同定できるかどうか検討し提案手法の有効性を確認した。

(2)融合粒子フィルタに基づく構造動特性の同定法について

本研究では、粒子フィルタで生じるアンサンブルの退化を緩和することが可能な融合粒子フィルタを利用して、構造動特性の同定を行い、それを通じて損傷程度を把握できるかどうか調査した。これまでに、鉄道車両走行における橋梁の動特性同定および未観測データの取得に関する研究も行われているが、アンサンブルの退化が確認されている。本研究では、構造物に対する入出力が計測されている状況を想定し、構造物の動特性が適切に同定できるかどうか数値実験および模型実験により検討するとともに、粒子の更新頻度が動特性の同定精度に与える影響について調査した。なお、模型実験では二つの損傷シナリオを想定し、層剛性がどのように同定されるか調査し、最終的に得られる動特性パラメータを利用して、未観測データである変位応答の推定を行った。

(3)非接触変位場計測によるコンクリート構造物のき裂検出システムについて

本研究では、コンクリート構造物を対象として、デジタル画像相関法から得られる変形情報およびき裂周辺の力学情報に着目し、表

面の変位場からき裂を検出するシステムを開発することを試みた。獲得される表面の変位場から見かけ上の最大主ひずみおよびその方向を推定し、これらの値を用いて、き裂開口時におけるき裂開口量に相当する評価パラメータを算出することを考えた。このき裂評価パラメータはき裂開口量に相当するものであり、検査要件により指定される検出対象のき裂開口量の閾値との比較を通じて、定量的にき裂を検出することが可能となると考えられる。画像から得られる表面の変位場情報からき裂開口量へ換算する方法について検討し、き裂開口量を推定する際に生じる誤差について理論的に明らかにする。そして、その推定誤差を低減するための方法について検討し、各種様々な表面状態の供試体に対して実証試験を行い、開発システムの有効性を明らかにする。

(4) 画像相関法とフラクタル次元解析を用いた Baseline-free 損傷検出法について

本研究では、健全時の情報を必要とすることなく、既設構造物の即時診断を簡易に実施できるシステムの開発を目的として、可視光動画の画像相関法を用いた Baseline-free 型の異常診断法を開発することを目指す。デジタル動画をもとに画像相関法を用いて、振動応答を空間的高密度に計測し、フーリエ振幅値で簡易的に推定される基本モード形状の連続性の変化を検出することを試みる。損傷が発生するとモード形状の曲線構造に局所的な連続性の変化が現れると考え、それをフラクタル次元解析により評価することを試みる。なお、本研究では剛性が均一状態の一様断面を有する構造物を診断対象として、その構造特性に局所的に欠陥が生じる状態を損傷と考える。数値実験により、フラクタル次元解析を用いて、損傷発生に起因するモード形状の連続性の喪失を適切に評価できるかどうかを検証する。そして、画像相関法を用いて、対象の変位応答が正確に取得できるかどうか実験を行う。最後に橋梁模型を用いて、車両走行実験を行い、桁上の切欠きを損傷と見なし、振動応答から構造形状の変化点を抽出できるか確認し、獲得されるフラクタル次元と損傷領域の関係性について調査する。

4. 研究成果

(1) カオス応答アトラクタのリカレンスプロットに基づく構造異常診断法

構造模型および結果の一例をそれぞれ、図-1 および図-2 に示す。図-2 は第1層および第3層についてそれぞれの層で柱を1本、40mm から 30mm の幅を有する柱に変更した場合の結果である。第1層および第3層に配置したセンサから算出される Damage Index (DI 値) が他と比較して大きい値を示し(健全な層に配置されたセンサ S3, S4, S7, S8 は概ね 1.0 を示す)、損傷の可能性を示唆していること

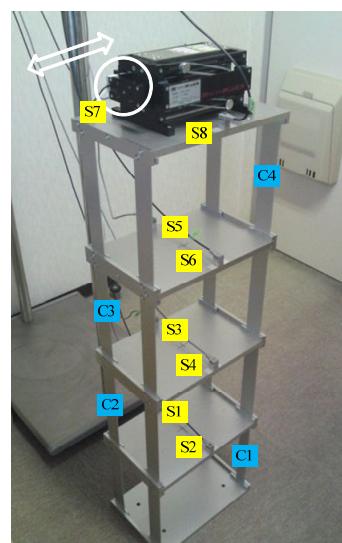


図-1 構造模型と起振器

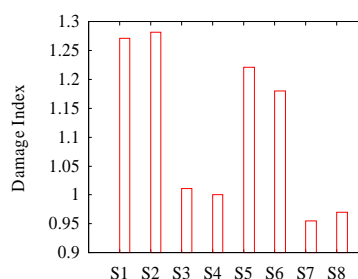


図-2 第1・3層の6.25%剛性低下時のDI値

がわかる。以下に、本研究を通じて得られた知見を整理する。

- ・層間加速度の Wavelet 係数で表現される1次モード相当の振動成分を評価の対象とし、それらのアトラクタのリカレンスプロットから%RECを計算した結果、損傷位置同定が正確に行えた。

- ・%RECを計算する際の閾値を、各センサで計算されるそれぞれの Wavelet 係数の標準偏差から設定し、%RECを標準化した複数のNRECをBaselineデータとする。このBaselineデータと診断時に得られたNRECとの比の最大値を選択して評価に用いることで、損傷を有する層を特定できた。

ただし、損傷の位置を検出する際に、健全時のカオス応答の情報を必要とし、応答アトラクタを評価するだけでは、本研究課題の目的達成には至らなかった。

(2) 融合粒子フィルタに基づく構造動特性の同定法

図-3に図-1で示した構造模型に対する各層の剛性の同定結果を示している。なお、表-1は最終ステップで得られた各層剛性の分布の期待値を示している。図・表から明らかのように、剛性の同定は概ね成功することが明らかとなった。ただし、損傷を仮定した層の剛性を過剰に推定し、本来の剛性よりも下回る値を算出した。また、数値実験により、融合粒子フィルタを利用しても、アンサンプル

表-1 剛性の真値と予測値の比較

	Stiffness(N/m)
	True/ Estimate, (error: %)
1 st story	2730.6/2486.9, (-14.61%)
2 nd story	2912.6/2956.0, (1.49%)
3 rd story	2912.6/2860.9, (-1.78%)
4 th story	2912.6/2909.7, (-0.10%)

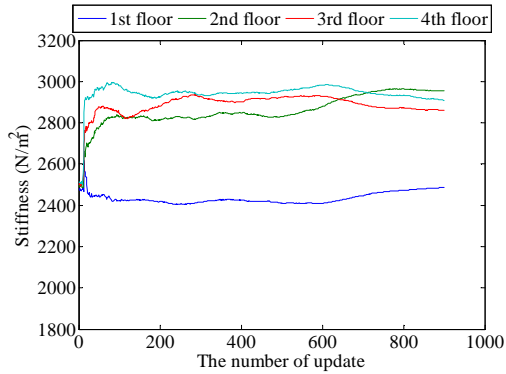


図-3 各層の剛性の同定履歴結果

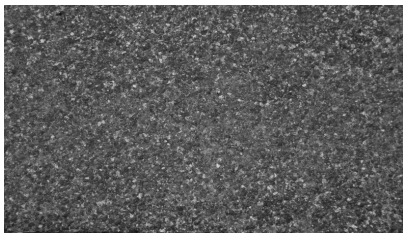


図-4 評価画像

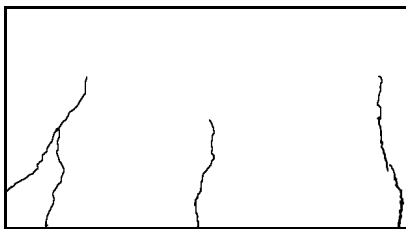


図-5 き裂分布 (実測結果)

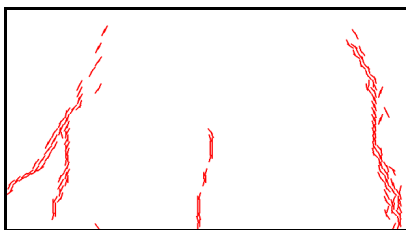


図-6 提案システムによるき裂分布

の退化が発生していることが確認された。ただし、モデルの尤度を比較することで、リサンプリング間隔は、ある程度決定することが可能であることが分かった。リサンプリング間隔を変更した複数の実験を行った結果、高精度に動特性が同定されるケースは、対数尤度が最も大きい場合であることが分かった。

(3) 非接触変位場計測によるコンクリート構造物のき裂検出システムの開発
結果の一例として、図-4 に評価画像を示し、そのき裂の実測値および提案システムの出

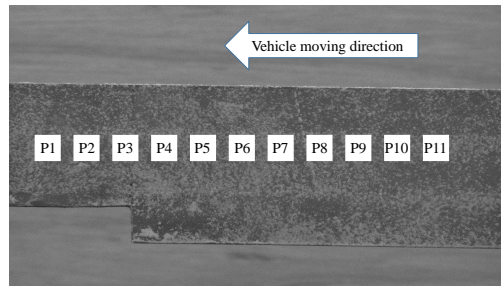


図-7 動画画像計測領域

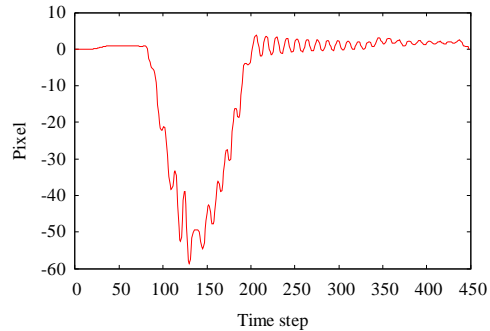


図-8 画像相関法による振動計測結果

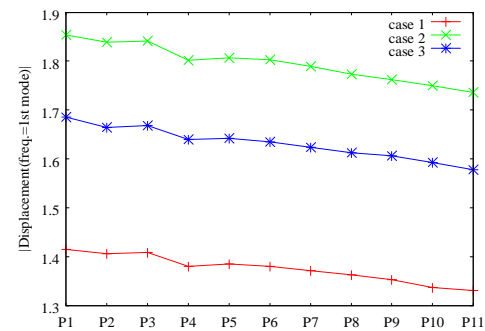


図-9 1次モード形状の推定結果

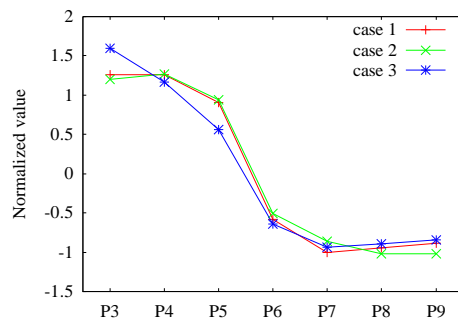


図-10 フラクタル次元解析結果

力結果を図-5、図-6 に示す。図から明らかなように、視認困難な表面状態においても、き裂の発生位置、方向、および長さなどが概ね正確に検出されることがわかる。以下に本研究を通じて得られた知見を整理する。

・要素内の見かけ上の最大主ひずみとその方向に着目し、これらをき裂開口量に換算して評価パラメータとすることによってき裂を高精度に検出することができた。またその際、要素内のき裂経路を同定することなく、き裂進展方向を近似することで、き裂開口量の推定が可能であることが分かった。

・提案システムはき裂の視認が容易な状況、視認が困難な状況、および表面がタイルで覆われき裂が不可視の状況においても、コンクリート表面に発生するき裂を正確に検知することに成功した。

ただし、これらの実験では4点曲げコンクリート供試体のき裂発生前後の画像を用いていることから、今後は実用化に向けて、すでに視認困難なき裂が発生している状況下で、振動中の供試体の動画計測から表面き裂が同定できるかどうか確認する必要がある。

(4) 画像相関法とフラクタル次元解析を用いた Baseline-free 損傷検出法

図-7 に動画計測領域を示し、画像相関法による振動計測結果(P1 点)を図-8 に示す。本研究では、空間的に高密度に計測された振動応答からモード形状(図-9)を推定し、その曲線構造をフラクタル次元解析により評価することで、損傷検出を試みた。以下に本研究により得られた知見を整理する。

・数値実験を通じて、1 次モード形状の連続性をフラクタル次元解析により評価することが可能であること、また、得られたフラクタル次元の連続性の変化を与える位置は仮定する損傷領域と一致することが明らかとなった。

・橋梁模型を用いた車両走行実験結果から、1 次モード相当のフーリエ振幅値をフラクタル次元解析により評価することで、構造特性の変化を同定することが可能であることが分かった(図-10)。

・各計測ポイントで計算されるフラクタル次元の相対評価だけでなく、フラクタル次元を計算する際に参照される計測ポイントを考慮すると、構造特性の変化だけでなく、大まかな損傷領域の特定が可能となることが分かった。

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9件)

石橋健,古田均,野村泰稔,中津功一朗,高橋亨輔,セルオートマトン PSO を用いた多重モード解析による構造物の信頼性評価,材料,査読有,Vol.64, No.3, pp.190-195, 2015.

<http://doi.org/10.2472/jsms.64.190>

T.KUSAKA, T.KONO, Y.NOMURA, H.WAKABAYASHI, Dynamic Compression Test of CFRP Laminates Using SHPB Technique, 査読有, Applied Mechanics and Materials, Vol.566, pp.122-127, 2014.

DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.566.122

日下貴之,河野孝典,野村泰稔,若林宏樹, SHPB 法を用いた CFRP 積層材の衝

撃圧縮試験法 材料,査読有,Vol.63, No.5, pp.362-367, 2014.

<http://doi.org/10.2472/jsms.63.362>

石橋健,古田均,野村泰稔,中津功一朗,高橋亨輔,メタヒューリスティクスを用いた複数の破壊モードを持つライフラインネットワークの信頼性解析,材料,査読有,Vol.63, No.2, pp.143-148, 2014.

<http://doi.org/10.2472/jsms.63.143>

日下貴之,野村泰稔,日根野陽介,久木祥兵,非接触変位場計測によるコンクリート構造物のき裂検出システムの開発,土木学会論文集 F(安全問題),査読有,Vol.69, No.2, I_75-I_80, 2014.

http://doi.org/10.2208/jscej.69.I_75

野村泰稔,森本大貴,日下貴之,古田均,カオス応答アトラクタのリカレンスプロットに基づく構造物の損傷位置同定,日本機械学会論文集(C編),査読有,Vol.79, No.807, pp.209-221, 2013.

<http://doi.org/10.1299/kikaic.79.4210>

野村泰稔,古田均,日下貴之,吉田和世,石橋健,画像相関法とフラクタル次元解析を用いた Baseline-free 損傷検出法,土木学会論文集 A2(応用力学),査読有,Vol.69, No.2, pp.I_633-I_642, 2013.

http://doi.org/10.2208/jscej.69.I_633

古田均,石橋健,野村泰稔,中津功一朗,例外検出を考慮したパターン認識に基づく橋梁損傷度判定の実用性の向上,土木学会論文集 A2(応用力学),査読有,Vol.69, No.2, pp.I_751-I_760, 2013.

http://doi.org/10.2208/jscej.69.I_751

石橋健,中津功一朗,古田均,野村泰稔,高橋亨輔,GA を用いた大規模橋梁群の長期的な維持管理計画の最適化,土木学会論文集 A2(応用力学),査読有,Vol.69, No.2, pp.I_731-I_740, 2013.

http://doi.org/10.2208/jscej.69.I_731

[学会発表](計21件)

野村泰稔,松浦友樹,古田均,デジタル画像相関法に基づく構造物の損傷検出,第28回信頼性シンポジウム,2014年12月11日,あべのハルカス(大阪府).

野村泰稔,森本真規,佐藤忠信,古田均,融合粒子フィルタに基づく構造動特性の同定,第28回信頼性シンポジウム,2014年12月11日,あべのハルカス(大阪府).

Y.NOMURA, T.SATO, H.FURUTA, Structural damage quantification using recurrence plot and merging particle filter, The 4th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE2014), 2014年11月17日,早稲田大学(東京都).

T.SATO, C.WAN, Y.NOMURA, L.XIE, R.SONG, X.GUO, Early-Stage Damage Identification subjected to Chaotic

Excitation, The 6th World Conference on Structural Control and Monitoring, 2014年7月17日, Barcelona (Spain).

Y.NOMURA, H.FURUTA, K.ISHIBASHI, K.TAKAHASHI, K.NAKATSU, Baseline-free Structural Damage Detection Based on Video Image Correlation Method and Fractal Dimension Analysis, International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management (ISRERM2014), 2014年5月21日, TAIPEI (TAIWAN).

野村泰稔, 寺元丈雄, 日下貴之, 融合粒子フィルタに基づくデータ同化技術を利用した構造同定と未観測データの取得, 材料学会第63期学術講演会, 2014年5月17日, 福岡大学(福岡県)

古田均, 野村泰稔, 中津功一朗, 高橋亨輔, 石橋健, 年度予算の変動を考慮した橋梁維持管理計画の最適化に関する研究, 信頼性・破壊力学合同シンポジウム(材料学会), 2013年11月21日, 阿蘇ファームランド(熊本県・阿蘇郡)

野村泰稔, 古田均, 日下貴之, 石橋健, 画像相関法とフラクタル次元解析を用いた橋梁の損傷同定, 信頼性・破壊力学合同シンポジウム(材料学会), 2013年11月20日, 阿蘇ファームランド(熊本県・阿蘇郡)

Y.NOMURA, T.KUSAKA, D.MORIMOTO, Structural health monitoring based on chaotic excitation and recurrence quantification analysis, The 11th International conference on structural safety and reliability (ICOSSAR2013), New York (USA), June 17, 2013.

T.KUSAKA, Y.NOMURA, Y.HINENO, T.FUJII, Crack growth detection for concrete structures based on non-contact displacement measurements, The 11th International conference on structural safety and reliability (ICOSSAR2013), New York (USA), June 17, 2013.

T.SATO, Y.NOMURA, C.WAN, Detection of structural parameter detection using chaotic excitation technique, The 11th International conference on structural safety and reliability (ICOSSAR2013), New York (USA), June 17, 2013.

久木祥平, 日根野陽介, 日下貴之, 野村泰稔, 非接触変位場計測に基づくコンクリートのき裂検出, 機械学会関西支部第88期定時総会講演会 2013年3月17日, 大阪工業大学(大阪府).

三木啓史, 野村泰稔, 日下貴之, カオス応答アトラクタの評価に基づく構造異常診断法, 機械学会関西支部第88期定時総会講演会, 2013年3月16日, 大阪工業大学(大阪府).

古田均, 高橋亨輔, 野村泰稔, 中津功一

朗, 石橋健, メタヒューリスティクスを用いた複数の破壊モードを持つ大規模構造物の信頼性解析に関する研究, 第26回信頼性シンポジウム, 2012年12月13日, サポートホール高松(香川県).

日根野陽介, 日下貴之, 野村泰稔, 非接触変位場計測に基づくコンクリート構造物のき裂検出システム, 第26回信頼性シンポジウム, 2012年12月13日, サポートホール高松(香川県).

日根野陽介, 藤井俊史, 日下貴之, 野村泰稔, 非接触変位場計測に基づくコンクリートのき裂検出システム, 第56回日本学術会議材料工学連合講演会, 2012年10月29日, 京都テルサ(京都府).

H.FURUTA, Y.NOMURA, K.NAKATSU, K.YOSHIDA, Structural health monitoring system using recurrence quantification analysis of ambient vibration, The 3rd International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE2012), 2012年10月06日, Vienna (Austria).

野村泰稔, 古田均, 日下貴之, 吉田和世, 振動モード形状のフラクタル次元解析に基づく Baseline-free 型構造損傷同定, 第28回ファジィシステムシンポジウム, 2012年09月13日, 名古屋工業大学(愛知県)

Y.NOMURA, T.KUSAKA, D.MORIMOTO, H.FURUTA, Baseline-less Structural Health Monitoring System Based on Recurrence Quantification Analysis, The 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization (IABMAS2012), Stresa (ITALY), 2012年7月10日.

K.NAKATSU, H.FURUTA, Y.NOMURA, K.TAKAHASHI, K.ISHIBASHI, Reliability Analysis Using Evolutionary Algorithm and Importance Sampling, The 5th Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications(APSSRA2012), Singapore (Singapore), 2012年5月25日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野村泰稔 (NOMURA, Yasutoshi)
立命館大学・理工学部・任期制講師
研究者番号: 20372667

(2) 研究分担者

日下貴之 (KUSAKA, Takayuki)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 10309099