

「先進的統合センシング技術」
平成18年度採択研究代表者

藤野 陽三

東京大学大学院工学系研究科・教授

都市基盤の災害事故リスクの監視とマネジメント

§ 1. 研究実施の概要

都市基盤における災害や事故防止による安全・安心の実現に向けて、リスクを定量的に評価・監視し、合理的なリスクマネジメントを支援する統合センシングシステムを開発する。長期的防災保全の最小化、災害事故の事前防止・影響波及の最小化の達成を目的に、1) 都市基盤施設のリスクをリアルタイムに監視し、2) その特性を明らかにした上での対応の合理化・迅速化を図るのが本研究のねらいである。

平成 21 年度は、都市基盤のハザード脆弱性センシングと統合リスク評価に向け、昨年度に引き続き、光系センシング、電磁気系センシングに関する基盤技術の実装に向けたシステム開発に重点を置いて研究を推し進めた。さらに、計測機器メーカーと共同して高精度な同期を実現する地震計測システムを構築し、芝浦工業大学豊洲キャンパスの高層免震校舎をテストフィールドに実装し、常時振動データの集録・蓄積を開始した。

今後は各基盤技術の試験実装や、計測フィールドをこれら大学外の施設に広げた実証実験の準備を行い、順次実施していく。また、リスクの統合的な指標の可視化技術についても研究を進める。

§ 2. 研究実施体制

(1)「A. リスク統合センシング(東大・藤野)」グループ

① 研究分担グループ長:藤野 陽三(東京大学大学院、教授)

② 研究項目

(ア) モニタリング、データ伝達・処理に関わる実用性の高いシステムの構築

(イ) 都市基盤リスクの統合的評価手法の確立

(ウ) 共同研究者グループの開発する要素技術の統合

(2)「B.ネットワーク(東大・中山)」グループ

① 研究分担グループ長:中山 雅哉(東京大学、准教授)

② 研究項目

センサノードにおける観測データ収集のためのネットワーク技術の研究開発

(3)「C. 多点多自由度変位センシング(東大・安藤)」グループ

① 研究分担グループ長:安藤 繁(東京大学大学院、教授)

② 研究項目

RLI(リアルタイムロックインイメージング)多点多自由度変位センシングの研究

(4)「D. 光・電波応用システム(三菱電機)」グループ

① 研究分担グループ長:仲嶋 一(三菱電機株式会社、グループマネージャー)

② 研究項目

(1) LCX による降雨・強風計測アルゴリズムに関し, IQ 平面の変動解析法による侵入者と環境変動の識別アルゴリズムを構築する.

(2) LCX による計測データ伝送方式に関し, ローノイズアンプ開発により, 伝送距離, 伝送容量, 伝送速度の検証を行う.

(5)「E. 光ファイバ(茨城大学)」グループ

① 研究分担グループ長:呉 智深(茨城大学、教授)

② 研究項目

(1) 分布光ファイバセンシングの精度向上に関する研究

(2) 都市基盤の分布型構造ヘルスマニタリング手法の構築

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

A. リスク統合センシンググループ(東大・藤野)

① 慣性計測による変位推定, 広域社会基盤モニタリング, 性能評価, スtockマネジメント^{A1)}

既設都市施設の性能を評価するためには, 最大変位, 残留変位, 塑性変形量などの変位量が, 性能規定設計の枠組みと適合し有効性が高い. しかしながら, 変位計測には固定点が必要とされることから, 広域の都市社会基盤システムに対して, 効率よく変位を計測することは困難である.

一方, 加速度などの慣性計測は固定点が必要としないため, 現状のセンシング技術で, 簡易か

つ安価に大規模なシステムに導入可能である加速度計測結果から変位量を推定する方法としては、従来から、2 階積分を前提とした各種手法が提案されているが、雑音や誤差の影響によって、信頼性・精度が大きく低下することが指摘されている。

そこで、不規則振動理論を援用することで、外力特性、構造特性、応答加速度、応答変位の統計間に成立する代数的関係を導出し、積分操作によらずに簡易に最大変位を推定する方法の研究を進めている。地震時応答については、外力が定常白色雑音である場合において応答加速度および変位の 2 乗平均値が解析的に存在することを利用し、加速度と変位の理論的比率を求め、実際の地震における最大応答値にその比率を乗じる方法を提案した。一方、メンテナンス等で問題となる交通荷重や風荷重などの一般的な外力が加わる場合は、定常白色雑音外力に対して、加速度応答の 2 乗平均値が収束しないことから、有限区間での加速度累積パワーと変位の 2 乗平均値の統計間に成立する代数的関係を導出し、さらに、ピークファクタを半経験的に推定することで最大変位応答を簡易に推定する方法を構築した。また、数値シミュレーション、ならびに速度と変位が同位置で同時計測されている明石海峡大橋における強風時の計測記録や交通荷重を受ける橋桁での計測によって、理論の有効性を検証した。図 1 は、交通荷重下での検証例であり、実測波形と良好な対応が示されている。

都市基盤全体に対して本手法を適用する場合、廉価な MEMS 系のセンサデバイスの採用が現実的であると思われる。その場合、センサ性能が特に低振動数領域で低下する例が多いことから、低振動数領域でのセンサ性能が低い場合の変位推定法を新たに構築した。構造系における高振動成分と低振動成分との間に存在する統計的相関関係を利用するものであり、概念的には、設計における衝撃係数を、維持管理・モニタリングに適用可能な形で発展・拡張させたものである。その結果が図 2 であり、図 1 と比較して精度は低下しているが、傾向の再現には成功していると考えられる。

このように、広域社会基盤の大規模モニタリングの基盤となる、慣性計測からの変位量推定については、実用に近い段階に達している。現在、理論面では、構造物が損傷を受けた場合に相当する非線形系に拡張することで損傷の評価を精緻化する研究、ならびに実際の荷重環境条件を反映させて精度を向上させる研究をそれぞれ進めている。また、実際の構造物におけるモニタリングを実施し、理論の検証ならびにモニタリング情報のマネジメントに関する研究を開始している。

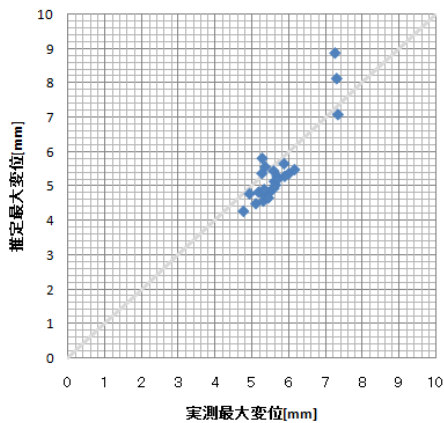


図 1. 交通荷重における実測変位と推定値の比較

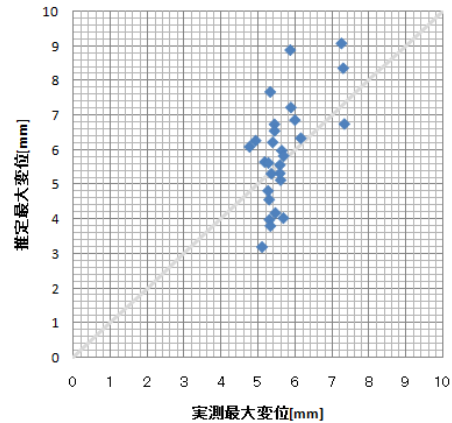


図 2. 交通荷重における実測変位と推定値の比較：低振動数のセンサ性能が低い場合

② 移動体センシング, 局所強風モニタリング, リスクマネジメント

また、広域モニタリングの実用的方法として本研究課題で提案している移動体センシングについては、最近の鉄道等における事故を受けてニーズが高まっており、実用化が期待される局地的な強風現象のモニタリングに絞って研究に着手したところである。移動体による他の構造系・環境系の物理量センシングも研究対象として想定され得るが、システム技術や通信技術などの社会基盤の移動体モニタリングに関する基盤技術は同様のものであること、ならびに移動体における風計測については研究代表者らによる既往の研究による研究蓄積があることから、研究開発の重点化・効率化の観点から、ニーズの高い風観測を優先的に、研究を実施することとした。

具体的には、移動体上における風速センシングから竜巻を検知する基礎的アルゴリズムを開発し、理論計算ならびに既存データによる検証を行っている。竜巻による交通機関の事故は後を絶たないが、竜巻はメソスケール気象現象であるとされ、信頼性・精度の高い事前予測は現状では困難である。そこで、実際に風力を受ける移動体におけるセンシングが可能となれば、直接的なリスク低減に寄与することが期待される。本年度実施した研究によって、竜巻による最大風速発生の概ね 1 分前程度には予測が可能となる結果が得られており、直前検知によるリスクマネジメントに繋がる成果が得られている。今後、実測データによる風の乱れの影響の評価ならびにモデルの精緻化を進め、実用化に向けた開発を進める予定である。

③ 振動センシングシステムとセンサネットワークの構築, 集録データの解析

LAN 同期センサを用いて建屋内地震応答高密度計測を行い、構造物の安全性確認のためのデータ解析手法および準リアルタイム地震・耐震性情報発信システムの開発を行う。ケース・スタディの対象は、L 字形の大規模な偏心構造、かつ、免震構造である芝浦工業大学豊洲校舎である。本研究の目的は、今回のケース・スタディを通して、今後、益々の普及が見込まれる免震構造や超高層ビルにおける地震リスクの監視技術とリスクマネジメント技術の両者を有機的に確立して

いくところにある。

地震リスクの監視技術に関して、21年度は、免震装置および上部構造の地震応答を計測するためのセンサの高密度配置を行い、常時および地震時の振動、免震層の変位データの集録・蓄積を開始した。そこで得られたデータをもとに構造物の性能を評価するために、常時微動により構造物の固有周期、減衰定数、振動モードの連続評価を行い、劣化・損傷度を追跡していく。同時に、構造解析モデルの同定・更新を行い、この解析モデルを通したリスクマネジメント技術の開発を行っていく。

これまでに得られた結果を次にまとめる。

- 低層棟(7F)と高層棟(14F)が直角に結合した L 字形偏心構造の校舎において携帯型地震計を用いて常時微動同時観測を行った結果、校舎の振動モードは両棟の連成振動により複雑であることが分かった。
- 校舎の連成振動を的確に捉えるために 13 基の LAN 同期センサを配置し、常時および地震時の振動応答データの集録・蓄積を開始した。これにより、校舎の振動特性の分析が可能となった。その一例を図 3 および図 4 に示す。(図 3: 周期 1.47 秒では、研究棟の東西方向の振動が卓越している。ただし、研究棟北側は南側に比べて揺れの振幅が小さい。これは、北側では教室棟長手方向の抵抗をうけているためと考えられる。図 4: 周期 1.23 秒も同様に、研究棟の東西方向の振動が卓越しているものの、研究棟北側の振幅が大きい。これは、教室棟もこの周期で連成振動しているためと考えられる。)
- 開発中の LAN 同期センサの同期誤差は、開発環境下で 0.001 秒以下であることを確認した。今後は、当該建物の LAN 環境下における時刻同期精度を、実データをもとに検証する。

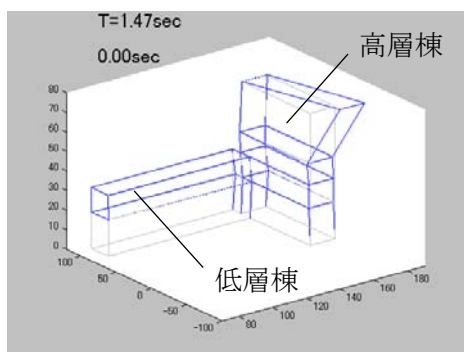


図 3. 周期 1.47 秒の 3 軸方向加速度応答例

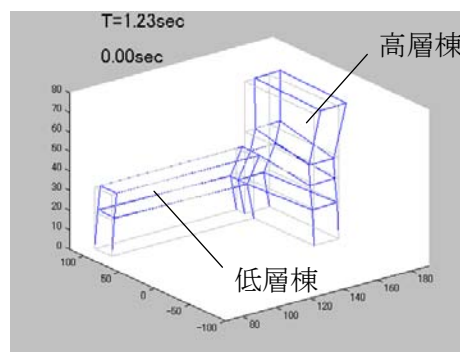


図 4. 周期 1.23 秒の 3 軸方向加速度応答例

B.ネットワークグループ(東大・中山)

本研究では、構造物に加速度センサ・変位センサ・歪センサ・風速計測センサなどを高密度に配置し、高精度の測定を行うセンサ群を都市規模に配置した構成において、各センサからの情報を常時リアルタイムに収集しながら、災害損傷検出・被害予測や復旧予測などを行うために必要となるセンサノードからの観測データを災害時でも安定して収集することができるネットワーク技術の研究開発を行うことを目的としている。

A. リスク統合センシンググループが配置したセンサノードからのデータを集約するためのデータベースやネットワークにかかる負荷を継続的に監視し、現状で特に問題ないことを確認した。また、セキュリティを向上したオンラインデータベースを設置し、計測データの保持の堅牢性および使用性を飛躍的に高めた。さらに、計測フィールドを大学外の施設とした場合の、データ配送について、第三世代の携帯電話網を中心に適用の可否や問題点の検討を行った。芝浦工大での実装実験から豊洲地区への展開を考慮し、扱うデータ量の増加、多種多様なデータの利活用方法の検討を進めている。

また、高速鉄道でのフィールド実験を想定したデータ配送・集約に関する準備として、高速走行中の新幹線から、基盤構造物における計測データの収集、サーバへのデータ伝送テスト、トンネル通過時などのネットワーク遮断状況下での伝送遅延やデータ欠損等に関する実験を実施した。今後は、さらに実際のモニタリング環境下において、実データを用いた収集・伝送テストおよびネットワークインフラの構築に取り組む。

C. 多点多自由度変位センシンググループ(東大・安藤)

本研究の目的は、自由空間中での光波伝搬を媒体として用いた静的・多次元・高精度の位置姿勢計測能力を有する多点多自由度静的変位計測センサネットワークシステムの実現にある。すなわち、非常に狭いビーム幅で高い精度での位置姿勢計測を可能にし、橋梁やトンネルやビルなどの大型構造物に多い1次元的な連なりで横幅が確保できない構造に対して高い精度の実現を図る。また、柔軟センサネットワーク機能により、人手を介さずに長期間に渡る安定計測を可能にする。

年度前半においては、実用化に向けたコストダウンの要点となるヘテロダイン光発生部分への新たな方式の導入、ノード間の時間・位相同期の問題に関して、前年度で理論的基礎を得た厳密周波数推定法を時間相関イメージセンサで実時間実現可能であるとの見通しを得た。また、1次のLGビームを、ガウス透過率分布を持つ開口を透過させることで、ビーム中心と開口中心の相対位置に応じて零点位置がシフトすることが確認できた^{C4), C5)}。このことは中間ノードの並進シフトの計測に用いることができる可能性を有する。また、検証実験のため、戸外あるいは廊下等のレンジの取れる環境で動作させるためのソフトウェアおよびネットワークの整備、性能検証と精度校正のための実験環境の構築のため、三菱電機と緊密な連携をとり、評価用の光学系を試作した。これを屋内環境にて評価実験を行い、中距離伝搬(24m)までのLGビーム全体像の撮像に成功した。

D. 光・電波応用システムグループ(三菱電機・仲嶋)

本研究では、(1)漏洩同軸ケーブル(LCX)を用いた降雨計測と、(2)グループCにおける多点多自由度変位センシングの実用化を目的とする。

① 漏洩同軸ケーブル(LCX)を用いた侵入者検知システムを三菱電機が製品化済みであるが、

本研究では本システムを降雨計測に用いることで、すでに LCX が敷設されている新幹線沿線の広域かつ連続的な気象変動を計測し、運行システムの高機能化を図ることを目的とする。

平成 19 年度までは、LCX通信システムを放射モードで動作させた時、降雨がLCX通信システムに与える影響について検討を行ってきた。LCXに雨粒が付着すると受信信号の変動が観測されたが、路面反射波等の外乱の影響を抑圧することが困難であることも明らかになった。そこで、H20 年度からは、LCX通信システムを外乱の影響を受けにくい表面波モードで動作させることに着目し、降雨がLCX通信システムに与える影響について検討を開始した。

平成 21 年度は、昨年度から継続して実施してきた理論検討により、表面波モードでシステムを動作させた際、LCXに雨粒が付着すると、表面波モードが崩れて放射モードへ遷移することを明らかにした。さらに、このモード崩れによるLCX通信システムの受信信号の変動を検知して降雨を検知する方法を考案し提案した。

次に、提案手法の有効性を検討するため、実環境におけるフィールド試験を実施した。LCX通信システムと雨量計による同時降雨観測装置を構築し、東京大学構内にて長期計測しLCX通信システムの受信信号と雨量を比較検討した。受信信号の振幅と位相の変化を時間領域および周波数領域の様々な側面から解析した結果、連続ウェーブレット変換を用いた解析で、先述のモード崩れによる受信信号の不連続な変動を抽出できる可能性を見出した。これは、集中豪雨のように短時間で多量の雨が降った時、モード崩れがより急峻に生じると考えられるので、集中豪雨の検知に非常に有効な方法の一つと期待できる。

今後は、人工散水装置を用いて、降雨量とLCX通信システムの受信信号の詳細な関係を明らかにし、降雨量検知アルゴリズムの構築を目指す。また、シミュレーション技術を活用し、降雨検知に最適なLCXシステム仕様について提言する。

② 本テーマはグループ C「多点多自由度変位センシング」にて構築された検出原理の実用化に向け、要素技術確立と実証システム構築を目指す。本年度は、LGビーム生成光学系の小型化検討を行い、フィールド試験用多点多自由度センサの試作の設計、試作を行った。本試作品は、750×900mm のベース上に構成された基幹ノードと中継ノードを各々可動式の架台に搭載したもので、架台を適切な距離離し、その間を屋外環境とすることでフィールドにおける風雨、飛来物等の影響を評価する。本年度のモデルでは、He-Ne レーザと音響光学素子を用いた光学構成で、基本的な特性の把握を行う。

E. 光ファイバグループ(茨城大学・呉)

① 計測機の改良による分布型光ファイバセンシングの高精度化およびリアルタイム測定の実現

計測器の改良について、昨年度までに、PPP-BOTDA におけるプリポンプ光の形状およびそれと主ポンプ光間距離の最適化による測定精度向上や、校正ファイバの設置による相対周波数安定度の改善などにより、ひずみ測定精度および測定の安定化が図られた。また、SNR の改善などによりひずみ測定の高速度化が図られ、2Hz でもある程度安定した計測が実現された。本年度は、1Hz を超えるリアルタイム計測が可能で、ひずみ測定精度も従来より安定化した改良版

PPP-BOTDA の試作機が開発され、実橋梁への実装実験に導入して、実橋梁のヘルスマモニタリングに対する有意性を初歩的に実証できた。

② センサの構造形式の改良による分布型光ファイバセンシングの高精度化の実現 ^{E3), E6)}

昨年度までに、連続繊維複合材との複合化による被覆すべり制御による、分布型光ファイバセンシングの高精度化、実質的な空間分解能の改善、そして高感度化の手法を考案し、実構造物への実装に用いる連続繊維複合材被覆光ファイバを試作した。本年度は、センサ内部で自動的に被覆と光ファイバの接着が定点化される構造形式に改良して、一定間隔ごとにひずみが一定となり、測定ひずみが安定化されるセンサを開発した。また、連続繊維複合材により光ファイバを部分的に補剛することによる高精度化も図られ、センサを試作して、実構造物に実装した。さらに、試作センサを設置した、斜張橋や PC 構造物などに用いられるケーブル材の引張試験を行い、全断面に対して 6%程度の部分破断を検知できることを実験的に明らかにした。一方、橋脚の洗掘の発生検知モニタリングに対するニーズが高まっているため、洗掘検知センサの構造形式を考案し、特許出願を目指して、詳細な検討を進めている。

③ 分布センシングによる構造物の健全性評価システムの構築 ^{E1), E2), E4)}

上記の計測器改良によるリアルタイム計測の実現により、走行中の車両により橋桁等に生じるひずみ分布の活用が可能になった。平成 21 年度は、実構造物への実装実験で得られた分布ひずみデータを昨年度までに構築した間接的な損傷検知方法(分布ひずみ間の比を損傷評価指標とする方法)に適用し、実構造物の健全性をうまく評価できることが示唆された。

④ 実橋梁への実装実験

昨年度まで、茨城県内の RC 橋梁および鋼製橋梁を選定して、実装実験の事前準備および上記の高精度光ファイバの試験実装を継続的に実施して、計測の安定性や汎用性を検討してきた。また、光ファイバセンサの設置方法や、定期的な測定・データ取得手法、そして交通量や環境条件の計測を実施して、実装実験の基礎データを取得してきた。21年度は、継続的なデータの蓄積を行い、長期的な健全性モニタリングに対する光ファイバセンサの適用性の実証を進めた。また、上記のとおりリアルタイムで高精度測定が可能な計測器および高精度センサを使用したことにより、車両走行により生じるひずみ分布を活用できるようになったため、より明確な健全性評価が可能となった。さらに、ひずみ分布から容易にたわみを算定できることから、今後、より明確で詳細な橋梁構造物の健全性評価の実現に期待できる。現在、新たに既損傷あるいはこれから実質的な損傷の発生が予測される橋梁の選定を進めており、実装実験により既損傷橋梁に対する適用性を検討する予定である。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

[A1] 阿部雅人, 藤野陽三: 「システム制御理論の視点からのストックマネジメントのマクロ分析」,

土木学会論文集 A, Vol. 65, No. 2 pp.474-486, 2009, doi: 10.2208/jsceja.65.474

- [A2] Yozo Fujino, Dionysius M. Siringoringo, Masato Abe: “The needs for advanced sensor technology for risk assessment of civil infrastructure”, *Smart Structure and System* (in press 2009), doi: not assigned yet
- [A3] Wyss, J.-C., Fujino, Y., and Su, D.: “Prediction of traffic-induced local dynamic stresses and response characteristics in a skew bridge”, *Engineering Structures* (Submitted 2009), doi: not assigned yet
- [A4] Su, D., Fujino, Y., Nagayama, T., Hernandez, J., and Seki, M.: “Vibration of reinforced concrete viaducts under high-speed train passage: measurement and prediction including train-viaduct interaction”, *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 1744-8980, 2009, doi: 10.1080/15732470903068888
- [A5] Dionysius M. Siringoringo, Yozo Fujino: “Noncontact Operational Modal Analysis of Structural Members by Laser Doppler Vibrometer”, *Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol.24, pp.249-265, 2009, doi: 10.1111/j.1467-8667.2008.00585.x
- [A6] Yozo Fujino, Dionysius M. Siringoringo, Masato Abe: “The needs for advanced sensor technology for risk assessment of civil infrastructure”, *Smart Structure and System* (in press 2009), doi: not assigned yet
- [A7] Evan Monroig, Kazuyuki Aihara, Yozo Fujino: “Modeling dynamics from only output data”, *The American Physical Society, Physical Review E* 79, 056208, 2009.5, doi: 10.1103/PhysRevE.79.056208
- [A8] 長山智則, B.F. Spencer, Jr, 藤野陽三: 「スマートセンサを用いた多点構造振動計測のためのミドルウェア開発」, *土木学会論文集 A*, Vol.65, No. 2, pp.523-535, 2009, doi:10.2208/jsceja.65.523
- [A9] 藤野陽三, 西川貴文, 長山智則: 「日常点検車を用いた道路高速モニタリングシステムの開発と実装化」, *高速道路と自動車*, 高速道路調査会, 2010 (in press, 2010年5月掲載確定)
- [C1] 安藤繁, 来海暁, 「時間相関イメージングとその応用」, *電気学会センサマイクロマシン部門誌*, vol.129, no.5, pp.129-137, 2009, doi:10.1541/ieejsmas.129.129
- [C2] Kimachi and S. Ando: “Real-time phase-stamp range finder using correlation image sensor”, *IEEE Sensor Journal*, vol.9, no.12, pp.1784-1792, 2009, doi: 10.1109/JSEN.2009.2031228
- [C3] 小山翔一, 栗原徹, 安藤繁, 「波動場の小領域観測による瞬時波源定位の理論と実験的検証」, *電気学会論文誌*, vol.129-E, no.10, pp.350-356, 2009, doi: 10.1541/ieejsmas.129.350

- [C4] S. Ando and T. Nara: “An exact direct method of sinusoidal parameter estimation derived from finite Fourier integral of differential equation”, IEEE Trans. Signal Processing, vol.57, no.9, pp.3317-3329, 2009, doi: 10.1109/TSP.2009.2021501
- [C5] 佐藤世智, 栗原徹, 安藤繁, 「白色光干渉と時間相関イメージセンサを用いる微小構造体の振動振幅位相分布の実時間観測システム」, 電気学会論文誌, vol.130-E, no.1, 2010, doi:10.1541/ieejsmas.130.17
- [E1] Adewuyi, A.P., Wu, Z.S., Serker, N.H.M.K.: “Assessment of vibration based damage identification methods using displacement and distributed strain measurements”, Journal of Structural Health Monitoring, published online, 2009, doi: 10.1177/1475921709340964
- [E2] Serker, N.H.M. Kamrujjaman and Wu, Z.S., “Structural health monitoring using distributed macro-strain response”, Journal of Applied Science, 2009, Volume: 9, Issue: 7, pp. 1276-1284, doi: 10.3923/jas.2009.1276.1284
- [E3] S. Li and Z. Wu, “Sensitivity enhancement of long-gage FBG sensors for Macro-strain measurements”, Structural Health Monitoring, an International Journal, Vol. 8, No. 6, pp.415-423, 2009, doi: 10.1177/1475921709349264
- [E4] A. P. Adewuyi and Z.S. Wu, “Vibration-based structural health monitoring technique using statistical features from strain measurements”, Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 4, no. 3, pp.38-47, 2009, doi: unknown
- [E5] S. Li, Z.S. Wu, “Parametric estimation for RC flexural members based on distributed long-gage fiber optic sensors”, Journal of Structural Engineering, Vol. 136, No. 2, February 2010, pp. 144-151, ASCE, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2010)136:2(144)
- [E6] Zhishen Wu, Hao Zhang, and Caiqian Yang, “Development and Performance Evaluation of Non-slippage Optical Fiber as Brillouin Scattering-based Distributed Sensors”, Structural Health Monitoring, an International Journal, March 2, 2010, doi: 10.1177/1475921710361328

(4-2) 知財出願

- ① 平成 21 年度特許出願件数(国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 4 件)