

「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 20 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、昨年度までの基礎的技術の確立、高度化に続き、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きつつある。大学キャンパス内の建築物に関するセンサノードの改良を行い、また、都内の新築ビルを対象に長期安全保証、緊急安全確認のためのセンシングの基本計画を構築した。

今後は各基盤技術の試験実装や、計測フィールドを大学外の施設に広げた実証実験の準備を行う。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. 研究実施内容

A. リスク統合センシンググループ(東大・藤野)

都市基盤のリスクはハザードと脆弱性によって決定される。広域に広がる都市基盤群を対象としたハザード、脆弱性について共同研究者グループの開発する要素技術を統合し、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を構築し、都市基盤リスクの統合的評価手法の確立を目指す。東大キャンパスの建物群、高速鉄道高架橋を主たるフィールドとして、その有効性を示す。

本年度も、昨年度までと同様 B.ネットワークグループとも協力しながら、大学キャンパス内での建物の地震応答を 2 年以上にわたる計測を継続してきた。また、1 年以上の計測結果から、建築物の動的特性の他にも、外部入力となる地震の特性についてもいくつか特徴が見られることがわかった。さらにセンシングノードに関しては、昨年度までと異なり、組込 PC をベースに計測の安定性や耐障害性を向上させるとともに、ハードウェアフィルタおよびソフトウェアによるフィルタを適用することによりノイズレベル

を低減した。また、構造物の損傷レベルを示す尺度の1つである最大変位を、不規則振動理論に立脚した、加速度計による記録から求める方法を提案し、実データを使ってその妥当性を検証した。

これらの研究成果をベースに、都内の新築ビルを対象に長期安全保証、緊急安全確認に向けてのセンシング方式ならびにオフライン、準オンライン処理による安全確認のためのデータ処理法に関する基本設計を行った。

また、昨年度に続き、D.光・電波応用システムグループと連携を取り、東大キャンパス内における降雨検出、降雨強度同定に関する基礎的実験を引き続き行っている。

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。

本年度は、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。

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。

本年度は、グループ単独の基礎研究としては、6軸変位の計測にほぼ最適と思われる多重零点ビームとして、 $1+6+12=19$ 次で断面光量分布が平坦の波面を設計し、このホログラムを作成し、まずその検出の容易さを実験により確認した。続いて、このビームから変位計測のパラメータを実時間検出するための複素画像解析アルゴリズムを開発し、これを実装した。定量的評価実験は現在実行中であり、これまでにz軸まわりの角度変位の検出感度が10倍以上に向上していること、横変位、角度変位の精度とも昨年度報告よりも格段に向上していること、相対変位の検出感度でナノメートルレベルが可能であること、空気の擾乱に対してもほぼ安定した追従が可能であることを確認した。

新たに検証実験用のデモ機の開発で今年度より連携を開始した光・電磁応用システムグループとの共同開発においては、昨年度までの研究開発成果や開発プログラムを提供し、数回の討議を重ねて、デモ機として最適なシステム構成に関して一応の結論に達し、装置の開発を進めているところである。また、コストダウンの要点となるヘテロダイン光発生の部分に新たな方式が提案された。また、ノード間の時間・位相同期の問題に関しても、荷重積分法による厳密周波数推定という新たな数理的な方法の導入を基礎実験を開始し、既に有望との見通しを得た段階にある。

D. 光・電波応用システムグループ(三菱電機・鷺見)

本研究では、漏洩同軸ケーブル(LCX)を用いた降雨計測と、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。

これまでの研究においては、300MHz で漏洩電磁界の放射モードを形成した状態における降雨実験を様々に実施してきたが、受信信号の挙動は放射波の壁面反射などの影響を受けやすく、降雨量の同定までには至らなかった。そこで、今年度は、漏洩電磁界が表面波のみで構成される表面波モードの降雨時の状態に着目し、降雨量の同定原理の提案とその妥当性の理論的検証を行った。

- ・ 表面波モードは、LCX の各スロットから均一に放射された電磁波が全方向において減殺的干渉を起こし、LCX 表面から動径の増大に従い指数的に電界エネルギーが減衰することで形成される。そのため、LCX 表面への水滴付着に起因する減殺的干渉の乱れは、表面波モードのモード崩れを起こす要因となると考えられる。表面波モードのモード崩れはエネルギーの放射を意味するため、この放射による漏洩電解強度の増大量を観測することで降雨量を同定できると考えた。
- ・ 水膜がスロットの放射レベルに与える影響を定量的に評価するため、三次元 1 スロット LCX モデルに厚さ 0.5~5.0mm の均一水膜が付着した状況について、FDTD 法(Finite Difference Time Domain 法)を用いて電界分布シミュレーションを行った。吸収境界条件には 2 次の Mur を使用し、伝送周波数は 100MHz とした。シミュレーションの結果、水膜厚さの増大に従い単調に放射レベルが低下することを確認した。
- ・ さらに、FDTD 法による解析の結果得られた 1 スロットの放射レベル変化を複数スロットの漏洩電磁界の解析解に導入、降雨時の漏洩電界分布を仮想的に求めた。その結果、乾燥状態と比較して、仮想降雨時はスロットの放射レベルが平均的に低いにも関わらず電界強度の高い点が見られた。これは、上述したとおり、表面波モードの崩れにより一部のエネルギーが放射されたことが原因であると考えられる。さらに仮想降雨時の電界強度の最大値を仮想降雨量毎に抽出し、乾燥状態のそれと比較した結果、仮想的降雨量の増大に伴い電界強度の最大値が増大することが確認された。以上より、実際の降雨時にも、降雨量の増大に伴いスロットの放射レベル分布の分散上昇が認められれば、降雨量を同定できると考えられる。

今後は、追実験による再現性の確認、フィールドでの実証実験を実施する。

(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。

- ・ 実用化に向けての要素技術構築: 実用化に必須となる小型・低コスト化技術として、レーザダイオード(LD)の適用可能性を検討した。光源代替に向けての基本技術として、LD によるラゲールガウス(LG)ビーム生成光学系を新たに構築し、生成 LG ビームの 50m 伝送を確認した。
- ・ 実証システム構築に向けての課題抽出: 基本特性としての課題点を抽出するため、He-Ne レーザと超音波周波数シフターを用いた機能検証モデルの設計を完了した。

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、本年度、新たに、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り測定精度が飛躍的に向上されることが理論的に示され、初歩的な実験検討によりその効果が明確となった。また、昨年度に試みられた、①校正ファイバの設置による相対周波数安定度の改善、②温度補償抵抗の使用による温度変化に伴う振幅ゆらぎの改善、そして③SNRの改善といった調整や改良をより深めて実施することにより、ひずみ測定精度および測定の安定化が図られ、測定精度は $\pm 25 \mu \epsilon$ の範囲で安定化され、 $\pm 10 \mu \epsilon$ のレベルにも高められる可能性が見出された。さらに、①SNRの改善、②高速偏波スクランブラーの採用、③高速周波数制御や高速ADおよびハード加算の採用、そして④処理アルゴリズムの改善によるひずみ測定の高速化が図られ、2Hzでもある程度安定した計測が実現されており、分布型光ファイバセンシングによるリアルタイム計測実現の可能性が示された。

(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

昨年度、連続繊維複合材との複合化により被覆すべりを制御することにより、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、そして高感度化が図られた。本年度は、実構造物への実装のために、連続繊維複合材との複合化およびプラスチックチューブの埋め込みによる保護、定点接着化により、高精度化光ファイバセンサの長期耐久性や耐候性の高度化構造の創出を行った。そして、製作工程の考案および試験製作を行い、実構造物に試験的な実装を行い、実構造物に対する適用性や汎用性が初歩的に示された。

(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

実構造物への実装実験で得られたデータにより、昨年度に構築された分布型のセンシングによる直接的な損傷検知方法、損傷が生じない箇所を参照歪とした間接的な損傷検知方法、そして、分布ひずみ値を用いた逆解析による荷重同定や鉄筋断面積の減少量同定による構造物の健全性評価システムの有意性が初歩的に実証された。

(4) 実橋梁への実装実験

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実施して、計測の安定性や汎用性を初歩的に検討した。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、実装実験の基本データを取得した。

3. 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

- (1) 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
- (2) 都市基盤リスクの統合的評価手法の確立
- (3) 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:鷺見和彦(三菱電機株式会社 部長)

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

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

[A-1] Yusuke Mizuno, Evan Monroig, and Yozo Fujino, Wavelet Decomposition-Based Approach for Fast Damage Detection of Civil Structures, Journal of Infrastructure Systems, ASCE, pp.27-32, 2008.3

[A-2] 阿部雅人, 藤野陽三, 自然災害リスクの特性に関する統計的分析, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.750-764, 2008.11

[A-3] 阿部雅人, 藤野陽三, 不規則振動理論を援用した加速度記録からの地震時最大応答変位のリアルタイム推定, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.1, pp.136-150, 2009.2

[A-4] 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)

[C-1] 安藤 繁, 魏 大比, Paul Masurel, ``複素正弦波変調撮像によるオプティカルフロー検出理論 および時間相関イメージセンサによる実現," 情報処理学会 CVIM 論文誌, vol.49, no.6 (CVIM20), pp.13-21, 2008.

[C-2] 安藤 繁, 本谷秀堅, ``ユビキタス指向センサと統合情報処理," 人工知能学会誌, vol.23,

- no.5, pp.604-610, 2008.
- [C-3] 安藤 繁, ``微分ガウシアン演算子と画像の特徴抽出処理," ふえらむ(日本鉄鋼協会会報), vol.13, no.6, pp.360-367, 2008.
- [C-4] 来海 暁, 安藤 繁, ``時間相関イメージセンサー高度な実時間パターン計測を実現する画像センサー", 計測と制御, vol.47, no.1, pp.10-17, 2008
- [C-5] 来海 暁, 安藤 繁, ``時間相関イメージセンサと実時間ロックイン撮像技術", 光アイアンス, vol.19, no.2, pp.1-6, 2008.
- [E-1] 李 哲賢, 津田 勉, 澤 貴弘, 牧田 篤, 高野 宏和, 岸田 欣増, 吳 智深, 武田 展雄, 水口 周, PPP-BOTDA を用いた高分解能(10cm)かつ高速(10Hz)分布計測の実現, 信学技報, 電子情報通信学会, Vol. 108, No. 245, OFT2008-42, pp. 39-44, 2008 年 10 月
- [E-2] H. Zhang and Z.S. Wu, Performance evaluation of BOTDR-based distributed fiber optic sensors for crack monitoring, Vol.7, No.2, pp.143-156, 2008.6
- [E-3] Z.S. Wu, B. Xu, T. Takahashi, and T. Harada, Concrete Crack Monitoring with BOTDR Fiber Optic Sensing Technique, Structure & Infrastructure Engineering, Vol.4, Iss.4, pp.311-323, 2008.8
- [E-4] G. Chen, B. Xu, D.J. Pommerenke, and Z.S. Wu, Distributed Strain Measurement of a Large-scale Reinforced Concrete Beam-column Assembly under Cyclic Loading, Smart Structures and Systems, 2008 (In press)
- [E-5] H. Zhang and Z.S. Wu, Performance evaluation of PPP-BOTDA based distributed optic fiber sensors, Structure and Infrastructure Engineering, 2008 (In press)

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 3 件)