

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名：都市基盤の災害事故リスクの監視とマネジメント

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):

研究代表者

藤野 陽三(東京大学大学院工学系研究科 教授)

主たる共同研究者

中山 雅哉(東京大学情報基盤センター 准教授)

安藤 繁(東京大学大学院情報理工学系研究科 教授)

仲嶋 一(三菱電機(株)先端技術総合研究所 グループマネジャー)(平成 21 年 4 月～)

鷺見 和彦(三菱電機(株)先端技術総合研究所 部長)(平成 20 年 6 月～21 年 3 月)

平位 隆史(三菱電機(株)先端技術総合研究所 グループマネジャー)(平成 18 年 10 月～

平成 20 年 6 月)

呉 智深(茨城大学工学部 教授)

3. 研究実施概要

本研究は、都市基盤、なかでも建築物や鉄道や道路などの交通基盤において、事故災害リスクを低減するために、センシングを使った監視システムを埋め込むことを目標に行うものである。個別技術に関しては、センシング技術を中心に、センサを含むネットワーク(グループB)、光を用いた多自由度変位センシング(グループC)、電磁波による降雨環境センシング(グループD)、光ファイバ分布センシング(グループE)について、4グループがそれぞれ推進し、また実務への展開も検討した。リスク統合センシングの検討(グループA)においては、都市基盤モニタリングの効用を当該者に認識させる研究例を推進しつつ、実装の促進を図るために、センシング情報の利活用マネジメントを含めた研究開発を実施した。センサを含むネットワークの研究においては、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させ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。

多自由度変位センシング研究においては、まず、6軸変位計測用の 19 次多重零点ビームを設計、ホログラムを作成し、時間相関イメージセンサによりビーム複素波面を検出し変位計測パラメータ検出用の複素画像解析アルゴリズムを開発、実装し、マイクロmレベルの精度で相対変位検出の可能性を確認した。次に、遠隔で自律的にヘテロダイン干渉を可能にするために必要なヘテロダイン周波数について、荷重積分法に基づき、数学的に厳密かつ代数的に演算可能な周波数推定法の方法論を確立した。平成 21 年度からは、D グループとの共同開発を開始し、デモ機を開発した。フィールド上での微小変位検出を確認し、90m 伝播を目指して多重零点ビーム同士を干渉させる 2 号機を作製して基本性能を確認し、長距離化の可能性も確認した。電磁波による降雨環境センシング研究においては、電磁遮蔽された低外来雑音レベルの試験場で人工降雨実験を行った結果、受信信号強度の差分ゆらぎの大きさと降雨強度との間に高い線形相関があり、豪雨のモニタリングには表面波モードが有効であることを確認した。一方、屋外では非定常ランダム過程かつ高レベルの連続性雑音と衝撃性雑音とで構成される外来雑音が受信信号に重畳されていたため、これらから降雨による微弱なゆらぎのみを抽出するデジタル信号処理理論に基づくアルゴリズムを構築した。本アルゴリズムにより降雨強度約 30mm/h(気象庁定義で「激しい雨」)以上の実豪雨をリアルタイムに捕捉することに成功した。光ファイバ分布センシング研究においては、従来の通信用光ファイバをセンサに用いると、被覆と光ファイバ間にすべりが生じて測定精度が低下することを実験的に明らかにしたうえで、連続繊維複合材との複合化により被覆すべりを制御して、ひずみ

測定の高精度化、実質的な空間分解能の改善と高感度化を図った。

最後に、リスク統合センシングの検討においては、同期振動センサネットワークシステムを新たに開発し、東京大学キャンパス内の建築物に学内LANを利用した実装を行い、それに伴うデータ管理、配送技術の洗練化を行った。その後改良を重ね、CPUを組み込んだCI-740を開発した。平成20年度後半から21年度にかけては、高層建築物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基本計画を構築し、センシング技術と構造性能評価手法、モニタリングデータの利活用方法の実用化へ向けて、L字形の大規模な偏心構造物であり、かつ免震構造であって、モニタリングの構造工学的意義も高い芝浦工業大学豊洲校舎をケースに、1)新たに開発するGPSを組み合わせたLAN同期センサによる建屋内地震応答高密度計測、2)構造物の安全性確認のためのデータ解析手法、3)準リアルタイム地震応答状況の館内掲示ディスプレイ等を通じた情報発信システムの開発を進めた。2011年3月11日の東日本太平洋地震の際には、前震、本震、余震群の記録に成功、世界で初めて複雑免震建屋の高密度大振幅地震計測に成功し、その挙動を理解する上で極めて重要なデータであることを定量的に示した。

4. 事後評価結果

4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

「監視」技術に関しては、各センサ、及びセンサ・ネットワークの開発で、十分な成果が得られている。個別技術に関する論文・学会等における発表も積極的に行っており、評価は高い。センサを含むネットワークの研究においては、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ってきた。多自由度変位センシング研究においては、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を目的として、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精度の計測の実現を目指した。特筆すべき成果は、ヘテロダイン周波数推定の実現と、低次数LGビームの重ね合わせによる高次数LGビームの生成の考案である。具体的には、LG(ラグールガウシアン)ビームを変位計測に応用し、遠隔で自律的にヘテロダイン干渉による高精度な計測を可能にするために必要なヘテロダイン周波数について、数学的に厳密かつ代数的に演算可能な推定法の方法論を確立した。また、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、干渉させる2ビームのそれぞれを9次とすることで18次の多重零点光ビームを生成できることを示した。

電磁波による降雨環境センシング研究においては、送受信の漏洩同軸ケーブル(LCX)対により集中豪雨を線状にモニタリングする技術の実用化を目的として進めた。本アルゴリズムにより降雨強度約30mm/h(気象庁定義で「激しい雨」)以上の実豪雨をリアルタイムに捕捉することに成功した。この研究成果により、LCXに沿ってリアルタイムかつ数mの高時空間分解能で豪雨をモニタリングする技術の基礎を確立できた。光ファイバ分布センシング研究においては、PPP-BOTDA方式を使った光ファイバにひずみ計測に関して、大きな進展をもたらした。具体的には、pump光に着目してPPP-BOTDAの測定精度を高度化、安定化する手法を構築し、また処理アルゴリズムの改善等により安定して超高速計測を実現した。更に、センサの被覆すべりを制御することにより、高精度化、実質的な空間分解能の改善、高感度化、耐久性・耐候性の向上が図られた。次に、製作工程の考案と試験製作を行い、これらを実橋の変位(歪)計測実験に試験実装し、適用性や汎用性を初歩的に検討し分布型センシングによる新たな損傷検出方法の可能性を実証した。

本研究では更に、実フィールドにおいて、センシング技術の実装化と構造損傷同定手法の確立へ向けた理論的アプローチの実データによる実証により、有効性が検証されている点においても、高く評価することができる。特にリスク統合センシングの検討においては、都市基盤のハザードや脆弱性に関わるセンシングと統合リスク評価に向け、振動センシングに関する基盤技術の高度化を図るとともに実装化へ向けたシステム開発を進めた。まず2006年12月より、東京大学構内における建物の地震応答計測を開始し、「B.ネットワーク(東大・中山)」

グループと連携を取り、その計測記録を継続的にファイルサーバおよびデータベースへ蓄積した。計測記録は広く学術・教育目的で利用できるようインターネットを通じて公開している。地震応答を集録するシステムとして初年度には、プロトタイプシステム、Model Iを開発した。これは、小型 PC に A/D コンバータを介して加速度センサを接続し、GPS から取得する時刻・位置情報とともに、計測ノードの振動計測を実現するものである。データの蓄積・解析を担う小型 PC は既設のネットワークを経由した遠隔操作が可能であり、センサ・ネットワークの構築に非常に有用である。また非常にコンパクトであるためシステムの運搬・導入・運用が容易なことも大きな特長のひとつである。Model I を利用したフィールド計測実験では、複数の東京大学校舎の地震応答を計測し、モード解析や周波数解析を行った結果、建物の耐震補強前後での振動モードの変化、固有振動数の変化傾向から、耐震補強の効果である剛性の増加を定量的に評価することに成功した。更に第 2 年度からは、計測精度とシステムの運用性の向上を目的に、組込 PC とリアルタイム OS を用いたロバストな計測機器の開発に取り組んだ。2 世代目となるこのシステムは、Model I のデータ解像度を 14bit から 16bit へ向上させることで、計測分解能を格段に向上させたものである。また組込システムを用いることにより、システムの安定性が向上するとともに、計測システム全体の簡素化、省電力化、小型化を実現した。これらの開発した振動計測ユニットをキャンパス内の各所建物に設置してセンサ・ネットワークを構築した。これを用いて長期的に振動モニタリングを実施し、有感地震に対する応答解析によって耐震性能の評価や構造損傷の検知・同定手法を構築するための実データを蓄積した。データの転送は既設の学内 LAN によって行い、データ管理・配送技術についても安定化や合理化について検討を行った。地震研究所の耐震補強の工事中の計測では、補強工事の進捗とともに、固有振動数の増加が明確に確認された。また実際の地震応答では、想定以上にねじれ振動が発生していることが、地震研究所、情報基盤センターなどの応答観測結果において明らかとなった。

2008 年末頃からは、センシング技術と構造性能評価手法、モニタリングデータの利活用方法の実装化へ向けて、都市基盤構造物のセンシングにおける要件である時刻同期とデータ転送に主眼をおいた高精度センサを開発した。ケース・スタディとしては、建屋内地震応答高密度計測について、東京測振(株)と協力して実施した。具体的な建物は、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を対象とした。本研究でこれまでに得られた結果は、主に 3 点挙げられる。1 点目は、地震記録の集積である。この記録は、WEB 公開を行っている。そこでは、全加速度計(25 基)の最大加速度、最大速度、最大変位、SI 値、計測震度の結果が、地震ごとにリンクされている。2 点目は、建物内の震度分布を図化し、場所による揺れの大きさの違いなどを把握できるようにした点である。この情報も WEB 公開している。利用方法としては、建物利用者に対して、建物の揺れ方の認識を深めてもらい、地震についての関心を更に深めてもらうことや、1 階に常駐する防災センター員が建物上部での揺れを把握すること等が挙げられる。特に、311 東北太平洋地震(M9)による免震構造における揺れが高密度な記録としてとれ、その後の余震も継続的に記録できたことは、極めて稀なことであり、これまでの免震建物の記録として最も貴重なものの一つになると考えられる。これまでに一次解析を行い、土木学会、日本建築学会の年次学術講演会に投稿した。現在、さらなる入念な解析を進めている。3 点目は、構造損傷同定手法の確立へ向けて、理論的にアプローチした点である。既設都市施設の性能・リスク評価の指標としては、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を必要としないため、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、演算が複雑で計算量が大きいことに加えて、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。そこで本研究では、慣性計測を活用し、ランダム振動理論を援用や、地震時の応答加速度と変位間にある理論的關係等を利用することで最大変位を推定する、センサ上での実装が可能な計算効率が高い手法を開発した。芝浦工業大学における計測と検証を通して、実装を念頭に置いた変位推定法の改良、具体的には、地盤の影響の考慮、リアルタイム化、層間変位推定、強風観測記録の活用成功した。また、評価方法を見据えた指標の整理方法について検討を行った。

これらの研究の結果、藤野プロジェクトチームは都市基盤モニタリングの世界拠点とみなされるようになった。内外の評価も高く、国際会議や国内集会での基調講演の依頼が非常に多い。2700 ページを超える構造ヘル

スモニタリング百科事典をヨーロッパ、北米の研究者と藤野研究代表者が編集者となってワイリー出版社から平成 21 年春に世界で初めて刊行し、また学会賞(土木学会, アメリカ土木学会)や国からの章を授与された。このように、モニタリングに関しては、非常に高レベルの成果が得られていると言える。しかし、人工物全体のセンシングや、リスクマネジメントに関してアピールできる部分が不足気味である。

4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

安全・安心な都市基盤及び構造物の構築は、今後益々重要となる。今回開発された手法を用いて、建物や橋等のインフラの脆弱性に関する広範なデータが集積され、それらの維持・管理に関するガイドラインの構築に繋がることを期待している。今後の継続を真剣に議論して、メンテナンスビジネス産業を育てていくことが望ましい。また、幅広い分野を対象としているが、よりターゲットを明確化したほうが、社会的なインパクトは強くなると思われる。

4-3. 総合的評価

建物のセンシングは、今回の大地震においてリアルなデータとして訴えるものがあつた。今後これらを発展させた耐震強度の記録システムや、メンテナンス産業への展開が十分期待できる。なお、研究の最終ゴールは、センシング技術を活用して、リスクマネジメントに発展させることであるが、その点の達成度に関しては、若干不十分である。