

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 22 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。リスクマネジメントグループでは、計測機器メーカーと共同して地震計測システムの改良を継続的に行い、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、システムを実装して常時振動データの集録・蓄積を実施した。今後、その他の基盤技術も試験的に実装することを目指す。

さらに、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」グループ

① 研究分担グループ長: 藤野 陽三 (東京大学大学院工学系研究科、教授)

② 研究項目

- ・ 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
- ・ 都市基盤リスクの統合的評価手法の確立
- ・ 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」グループ

① 研究分担グループ長: 中山 雅哉 (東京大学情報基盤センター、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」グループ

① 研究分担グループ長: 安藤 繁 (東京大学大学院情報理工学系研究科、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」グループ

① 研究分担グループ長: 仲嶋 一 (三菱電機(株)先端技術総合研究所、グループマネージャー)

② 研究項目

- ・ 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の構築
- ・ 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, 伝送速度を検証

(5) 「E. 光ファイバ」グループ

① 研究分担グループ長: 呉 智深 (茨城大学工学部、教授)

② 研究項目

- ・ 分布光ファイバセンシングの精度向上に関する研究
- ・ 都市基盤の分布型構造ヘルスモ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) + B. ネットワークグループ(東大・中山)

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に取り組んでいる。本年度に得られた結果を次にまとめる。

- 地震記録の集積および公開準備を行っている(表 1)。表1の最大値・SI・計測震度の欄には、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。
- 建物内の震度分布を WEB 上で表示し, 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(図 1)。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, などが挙げられる。

表 1. これまで観測された地震の諸元

地震 ID	地震発生時刻 ¹⁾	震源位置 ¹⁾			M _J ¹⁾	震央地域名 ¹⁾	最大値 SI・計測 震度表	最大 震度 ²⁾	備考
		緯度	経度	深さ km					
EQ201012220222	2010 年 12 月 22 日 02:19:37.2	27° 03.1'N	143° 56.1'E	8	7.4	父島近海	有	2.47	
EQ201012110633	2010 年 12 月 11 日 06:33:27.6	35° 47.8'N	140° 04.3'E	64	3.5	千葉県北西部	有	1.14	
EQ201012060320	2010 年 12 月 06 日 03:20:02.3	35° 39.2'N	140° 10.1'E	68	4.3	千葉県北西部	有	2.11	
EQ201011301226	2010 年 11 月 30 日 12:24:39.4	28° 21.5'N	139° 35.3'E	494	7.1	小笠原諸島西方沖	有	3.31	動画
EQ201011242009	2010 年 11 月 24 日 20:09:10.7	36° 13.7'N	140° 54.1'E	47	4.9	茨城県沖	有	2.12	
EQ201011200549	2010 年 11 月 20 日 05:49:18.8	35° 39.4'N	140° 10.8'E	67	3.8	千葉県北西部	有	1.71	
EQ201011051914	2010 年 11 月 05 日 19:14:03.0	36° 03.7'N	139° 50.5'E	45	4.6	茨城県南部	有	2.43	
EQ201010241350	2010 年 10 月 24 日 13:50:42.6	36° 03.5'N	139° 51.1'E	45	4.4	茨城県南部	有	1.47	
EQ201009270255	2010 年 09 月 27 日 02:55:00.0	35° 41.7'N	140° 05.8'E	68	4.5	千葉県北西部	有	1.89	
EQ201007230606	2010 年 07 月 23 日 06:06:31.4	35° 52.7'N	140° 29.1'E	35	4.9	千葉県北東部	有	2.23	
EQ201007050658	2010 年 07 月 05 日 06:55:52.3	39° 39.4'N	142° 39.1'E	34	6.4	岩手県沖	有	2.73	
EQ201006131234	2010 年 06 月 13 日 12:32:57.0	37° 23.7'N	141° 47.7'E	40	6.2	福島県沖	有	3.29	
EQ201006060719	2010 年 06 月 06 日 07:19:30.7	35° 47.2'N	140° 06.1'E	63	4.3	千葉県北西部	有	2.06	

1)地震発生時刻, 震源緯度, 経度, 深さ, M, 震源地域は気象庁の[震度データベース検索](#)より得ています。

2)最大震度は, 地震計 1~14, 101~112 で得られた最大震度を示しています。

3)3 月 11 日に東北地方で発生した地震(M9)を含む最新の地震データは上記 WEB サイトに掲載しています。

2010/11/30 12:26:34 ごろ発生の地震

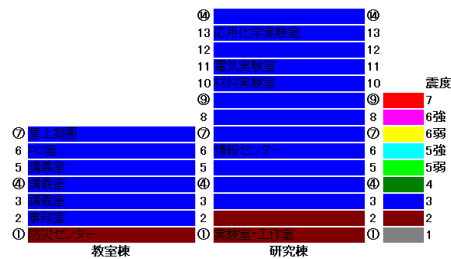


図1 各棟の震度分布図例(WEB で公開予定)

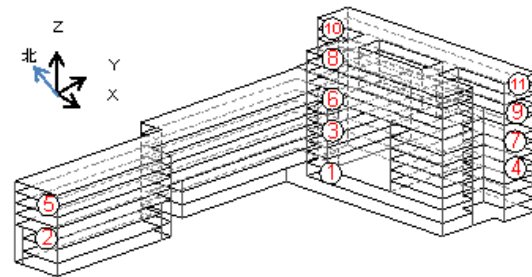


図2 センサ配置図

地震時の性能評価を行うための指標としては、最大応答変位が有効である半面、変位計測は固定参照点が必要であることから、広域におけるセンシングが困難である。そこで、固定点不要で設置が容易な慣性計測によるセンシングに、不規則振動理論を援用した最大変位推定法に関する研究を進めている。本年度は、提案手法を芝浦工業大学校舎の地震観測に適用するとともに、実装を念頭においた改良を進めた。

図2は、芝浦工業大学の解析で利用した観測点配置である。図3には、提案手法によって推定した地動最大速度と最大応答変位の相関を示した。地動最大速度は地震入力強度の、最大応答変位は建物の性能指標である。左図に示したとおり、両者の相関は必ずしも高くなかったが、地盤の動的特性を考慮して理論を改良したところ、右図のように高相関の結果が得られ、指標としての有効性が明らかとなった。

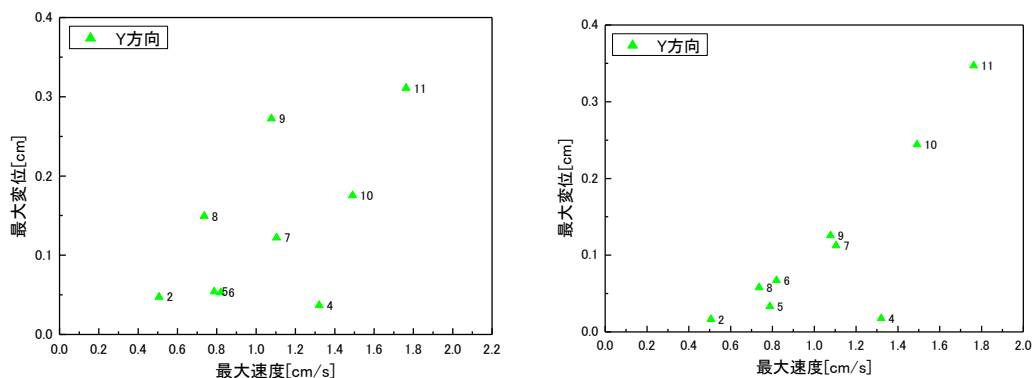


図3 地盤応答を考慮したY方向最大変位と最大速度の関係

(左：地盤特性を考慮しない 右：地盤特性を考慮)

また、最大応答変位の推定にあたっては、地震波形全体のパワースペクトルを利用するアルゴリズムであったため、推定に先立って地震の発生と終了を判別する必要があった。即応性の更なる向上と、波形判別に伴ってデータ管理が煩雑となることを避けるため、アルゴリズムを改良し、地震終了前であっても、リアルタイムに最大応答変位を推定可能とした。具体的には、区分的にデジタルフィルタを適用することで、パワースペクトルの概略分布をリアルタイムに算定するアルゴリズムを開発し、組み込むことによって、リアルタイム推定を実現したものである。

図4は、リアルタイム・アルゴリズムによる推定精度を数値シミュレーションによって検証したものである。青線はシミュレーションによる最大応答変位で、赤線でスペクトルとあるのは、全波形のパワースペクトルを用いた推定結果である。緑で示したリアルタイム推定による最大値が良好な結果を与えていることがわかる。

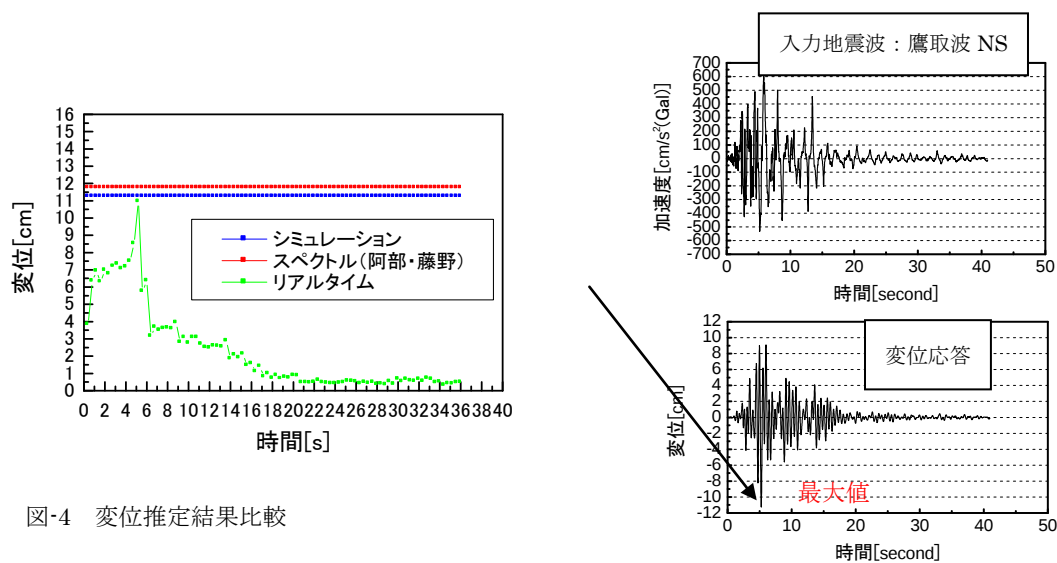


図-4 変位推定結果比較

また、設計のクライテリアとして利用されている建物各層の層間変位を、同様に算出する方法として、相対加速度を利用した変位推定方法を構築した。さらに、建物等の変位応答においては高次モードが寄与しえることを考慮し、多自由度系への拡張を行い、シミュレーションにより手法の有効性を確認した。図5に2自由度系のシミュレーションによる検証結果を示す。また、図6は、芝浦工業大学サイトにおけるセンサ間から求めた相対加速度を利用して求めた最大変位と、従来の方法によって絶対加速度を利用して求めた最大変位を比較したものである。図5、図6ともによくあっており、提案手法の有効性が示された。

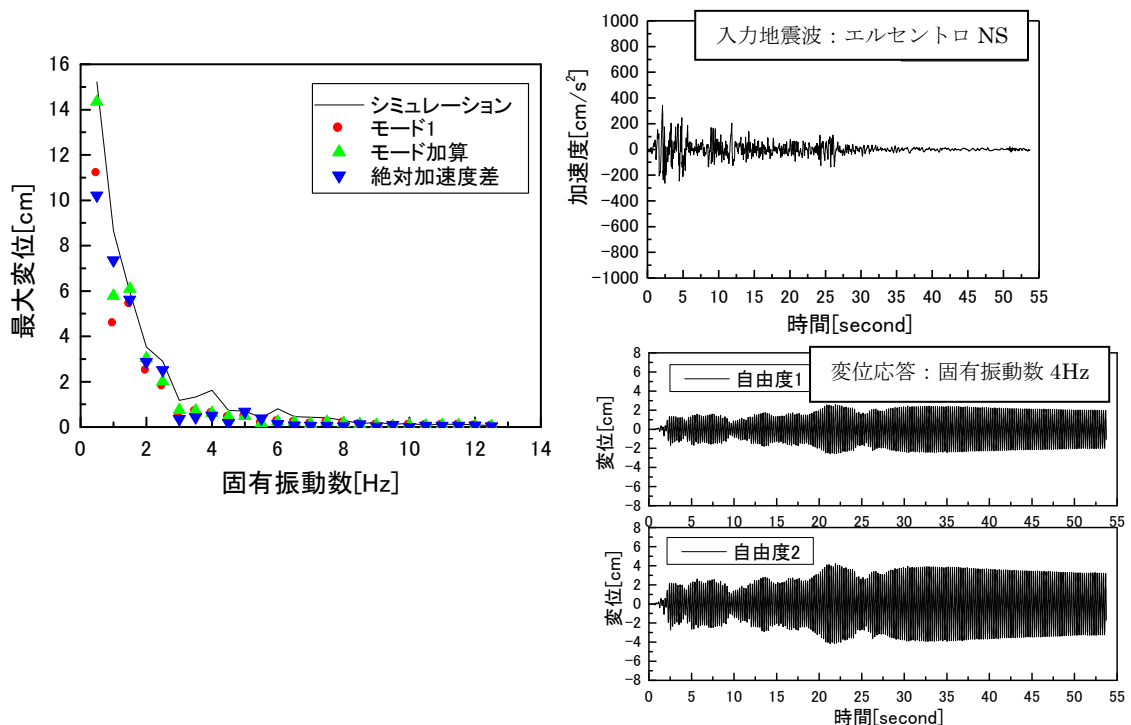


図5 相対加速度を利用した変位推定

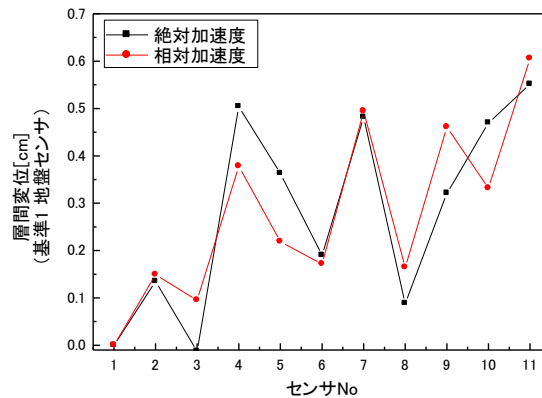


図 6 推定結果 2010 年 11 月 30 日 12 時 26 分 Y 方向

さらに、強風時の応答による建物の振動特性の評価についても、パワースペクトル分布を用いた推定法を構築して検討を行った。図 7 は、横軸に加速度応答の大きさ、縦軸に固有振動数の推定結果を示したものであり、応答が大きくなるにつれて、ばらつきが減じ、より良好な推定が可能となることがわかる。

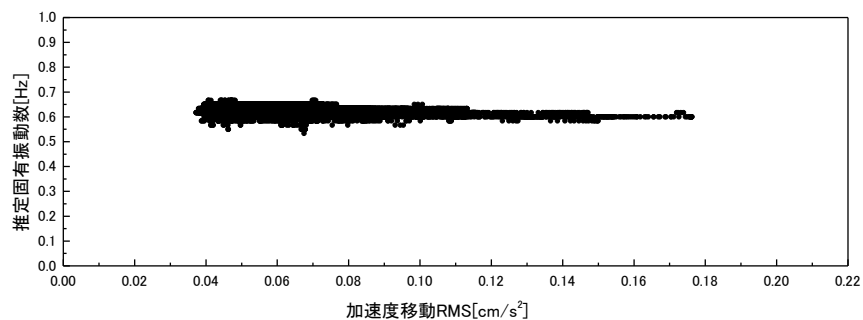


図 7 移動 RMS と推定固有振動数の関係 (X 方向)

性能評価方法として、図 8 に示すように階層ごとに層間変位を整理することで、設計クライテリアに照らした性能評価が可能となる。図 9 に示すような累積スペクトルを利用した振動数の同定と合わせて、階層、方向、また設置場所(研究棟、教室棟)等による応答特性の相違を考慮しながら、性能評価方法を実装することが可能である。

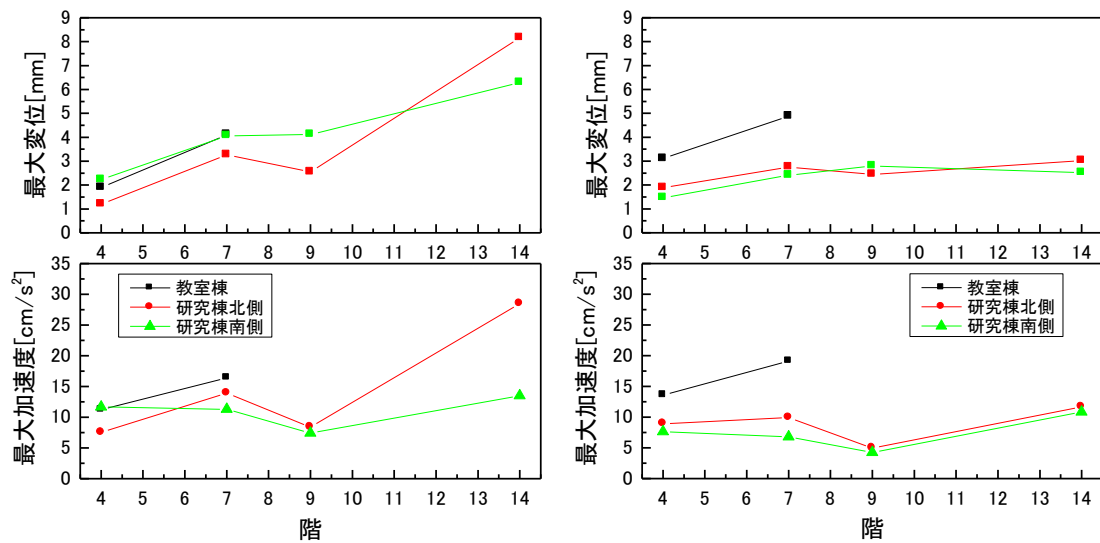


図8 階層別の層間変位評価 (左: Y 方向 右: X 方向)

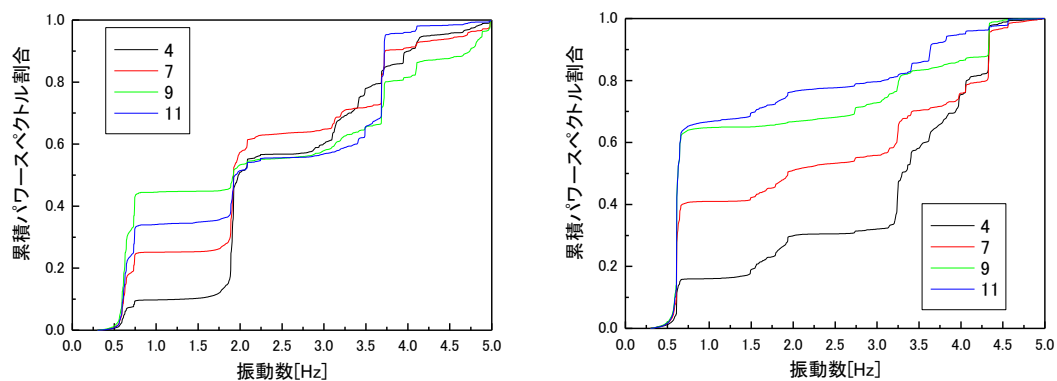


図9 固有振動数の評価 (左: Y 方向 右: X 方向)

このように、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

に成功した。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。

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。今年度は一次解析を行い、土木学会、日本建築学会の年次学術講演会に投稿したが、来年度、さらなる入念な解析を行う予定である。

これらの成果を、計測とリアルタイムにリンクして、リスクマネジメントならびにストックマネジメントへの活用が可能なシステムとしての全体像を提示することを目指す。

B.ネットワークグループ(東大・中山)+A. リスク統合センシンググループ(東大・藤野)

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、22 年度には、従来のモニタリングでは主に専門家や管理者に対象が限られていたセンシング情報を一般利用者に対しても利活用する取り組みを開始した。具体的には、公開対象(ここでは主に一般利用者)に合わせてモニタリングデータ(=「情報」)を「翻訳」するステップを従来のモニタリング・プロセスに加え、「計測」「データ収集」「分析・解析」「翻訳」「情報発信」を行い、それにより専門家だけでなく一般利用者への情報公開も行う。芝浦工業大学豊洲校舎(以下、豊洲校舎)の建物をテストフィールドとして、図 10 に示すようなプロセスを自動的に行うシステムフレームを構築した。特に「翻訳」のプロセスについては、実際に校舎を利用している学生・教職員にアンケート調査を実施し、利用者のリアルなニーズに応える仕様とした。

上記システムの実装により、センシング情報を一般利用者にも公開することで、専門家にわかる「安全」だけでなく、一般利用者にもわかる「安心」を提供することに意義がある。今後、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・実装化を進める。

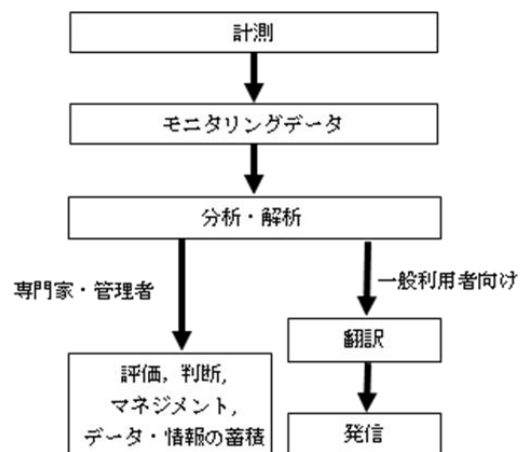


図 10 モニタリング情報発信プロセスの概要

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。

本年度は主に下記の3点について実施した

1) 短時間厳密周波数推定法の適用

従来提案法では、遠隔位置にある基幹ノードと中継ノードとの間でヘテロダイン信号を伝送しなければ、多重零点光ビームの複素振幅を撮像することができなかった。これに対し、短時間厳密周波数推定法を適用し、この変調周波数をフレームごとに推定することで周波数伝送なしに 2 次元複素振幅の撮像が可能になることを示した (C2), (C3)。これにより、2 つのノードをワイヤーでつながなければならないという課題を解決することができ、より自由度の高いノード配置が可能となった。

2) 新しい 6 軸変位計測光学系の提案

多重零点光ビームは、伝播と共にビームサイズが拡大する性質を持つ。次数が高いほどより大きく拡大する性質を持ち、零点の個数を増やしより高精度に 6 軸変形計測を行おうとする我々の方針の大きな障害となっていた。そこで、2 つの多重零点光ビームを干渉させることで、これまでと同じ零点個数を持つ干渉波面を構成することに成功した^(C1)。これにより変位計測可能距離が格段に大きくなることが期待される。また、装置の小型化/低コスト化/安定化のため、光源として HeNe レーザから半導体レーザを利用することとし光ファイバを用いて多重零点光ビーム生成部に供給する構成とした。

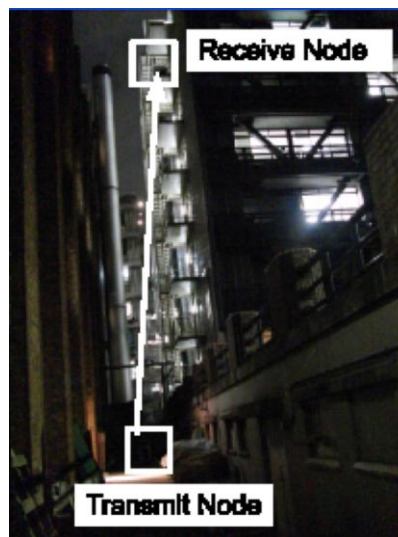


図 11 工学部 8 号館屋外での実験の様子

3) 小型 6 軸変形計測装置の改修

昨年度、三菱電機との連携により設計制作した小型 6 軸変形計測装置について、屋外でよりクオリティの高い光渦ビームを生成し撮像するため必要な改修を行った。これにより 30m 程度まで後段の変位推定に適用可能な光渦ビームの生成が可能となった。これを用いて工学部 8 号館付近において垂直ビーム射出試験を行った。基幹ノードと中継ノード間の距離は約 25.5m ほどであり、8 号館 7 階付近に設置した時間相関イメージセンサでの多重零点光ビームの撮像に成功した。

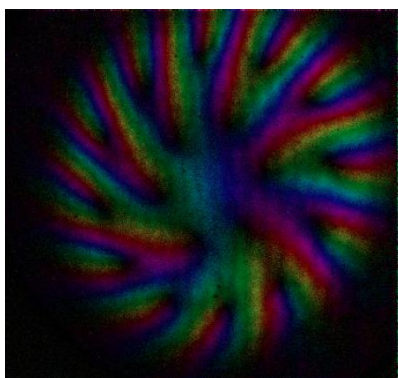


図 12 屋外実験で撮影された 18 次多重零点光ビーム

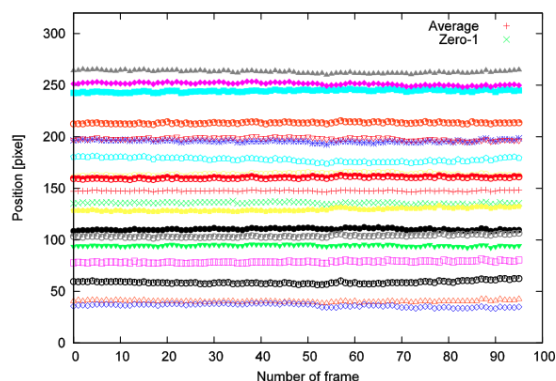


図 13 屋外実験による 18 個の零点の変位(横軸: 時間, 縦軸: ピクセル)

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。

本年度は、大型人工降雨実験施設を利用し、表面波モード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の実証実験を実施した。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、さらに、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 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、フィールド試験用多点多自由度センサを試作し、屋内で実証実験を実施した。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。昨年度に引き続き、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、主ポンプ光に対するプリポンプ光の影響除去により、ひずみ測定における空間分解能が従来の 10cm から2cm まで向上させることに成功した。また、BGS スペクトルの中心周波数推定方法をさらに改良し、サンプリング周波数を昨年度までの 5Hz から 100Hz に飛躍的に高められる可能性を示した。

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、光ファイバとしてより高精度の FBG ロングゲージセンサを活用し、接着端部を玄武岩繊維複合材(BFRP)でパッケージして光ファイバのすべりをより高度に制御し、精度や耐久性を高め、センサの実用性をさらに高めた。

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 ^{E1), E2), E3),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。本年度は、実橋梁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、そして光ファイバセンサによる静的なひずみ分布測定を実施して、実装実験の基礎データを取得してきた。本年度は、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、100Hzと高速で高精度なひずみ測定が可能な計測器を試作し、上記のように高精度化した光ファイバセンサを使用することにより、車両走行により生じるひずみ分布を100Hzのサンプリング周波数で動的に計測し、200Hz動的計測のFBGセンサを用いた場合と概ね同様のひずみデータが得られることが初歩的に示された(図14)。また、高精度測定により、本来環境ノイズや温度変化等により隠されてしまう実測データをより明確に取得できるようになり、健全性評価の実用性が高められた。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。

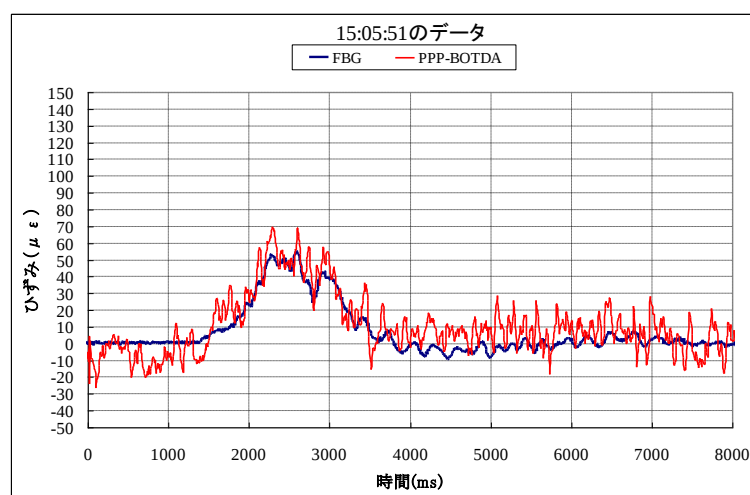


図14 超高速化 PPP-BOTDA と FBG によるひずみ測定と比較

§4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

- [A1] Yozo Fujino, Dionysius M. Siringoringo, Masato Abe: “The needs for advanced sensor technology for risk assessment of civil infrastructure”, Smart Structure and System (2010),
- [A2] Wyss, J.-C., Fujino, Y., and Su, D.: “Prediction of traffic-induced local dynamic stresses and response characteristics in a skew bridge”, Engineering Structures (2010),

- [A3] 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, 53(5), pp.23-30, 2010,
- [A4] Takafumi Nishikawa, Hiroyuki Asakawa, Toshio Kimata, Toshinori Toda, Kotaro Nishigata: "Real-time Monitoring System Using Dynamic Response of Vehicles and Its Application for Road Investigation in Kyrgyzstan," Proceedings of The 11th International Conference on Asphalt Pavements (CD-ROM), No. 90231, 2010
- [C1] 佐藤世智, 栗原 徹, 安藤 繁, ``荷重積分法に基づく白色光干渉信号の直接中心決定アルゴリズム,`` 計測自動制御学会論文集, vol.46, no.9, pp.539-546, 2010.
- [C2] 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, pp.17-24, 2010.doi: 10.1541/ieejsmas.130.17
- [C3] Takaaki Nara and Shigeru Ando, ``Direct localization of poles of meromorphic function from measurements on incomplete boundary," Inverse Problems, vol.26, ID:015011, 2010. doi: 10.1088/0266-5611/26/1/015011
- [E1] Zhishen Wu, Hao Zhang, Caiqian Yang, Development and performance evaluation of no-slippage optical fiber as Brillouin scattering based distributed sensors, Structural Health Monitoring, Volume 9 Issue 5, pp.413-431, 2010, DOI: 10.1177/1475921710361328
- [E2] Suzhen Li, Zhishen Wu, Lili Zhou, Health monitoring of flexural steel structures based on distributed fibre optic sensors, Structure and Infrastructure Engineering, 2010, Volume 6, Issue 3 , pages 303-315, 2010, DOI: 10.1080/15732470701492066
- [E3] S. Li, Z.S. Wu, Parametric estimation for RC flexural structures based on distributed long-gage fiber optic sensors, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 136, No. 2, pp. 144-151, 2010, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2010)136:2(144)
- [E4] N.H.M. Kamrujjaman Serker, Zhishen Wu, Suzhen Li, A non-physics based approach for vibration-based structural health monitoring under changing environmental conditions, Structure Health Monitoring, Vol.9, No.2, pp.145-158, 2010, DOI: 10.1177/1475921709352149
- [E5] S. Shen, Z.S. Wu, C.Q. Yang, An improved conjugated beam method for structural deformation monitoring based on distributed optical fiber strain sensing technique and a new optical fiber with improved strain sensitivity, Structural Health Monitoring, Vol. 9(4), pp.361-379, 2010, DOI:

10.1177/1475921710361326

[E6] Yongsheng Tang, Zhishen Wu, Caiqian Yang, Gang Wu and Sheng Shen, A new type of smart basalt fiber-reinforced polymer bars as both reinforcements and sensors for civil engineering application, Smart Materials and Structures, Volume 19, Number 11, 2010, DOI: 10.1088/0964-1726/19/11/115001

(4-2) 知財出願

- ① 平成22年度特許出願件数(国内 0 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 4)