

高密度地震観測網を用いた建造物の振動性状の可視化システムの開発

山中浩明¹⁾, 盛川仁²⁾, 伊藤貴盛³⁾

- 1) 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻, yamanaka@depe.titech.ac.jp
- 2) 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 人間環境システム専攻, morika@enveng.titech.ac.jp
- 3) 応用地震計測株式会社, ito@oyo.seism.jp

1. はじめに

建造物と地盤の地震時の実際の挙動を詳細に把握することを目的として、これまでに東工大都市地震工学センターでは21世紀COEプロジェクトの支援によって同大すずかけ台キャンパスの超高層免震建物、通常の建物および周辺地盤において地震観測を実施している。

本研究では超高層免震建物と地盤を一体とした地震観測で得られた稠密地震観測データに基づいて、建物-地盤系の地震時の挙動を理解することを目的としている。観測システムの詳細と記録の例については、昨年度紹介したので、以下では、観測結果を視覚的に把握することで、建物の挙動を主観的に理解するとともに、一般市民の防災意識の向上といった目的に資するよう地震観測の様子を広く一般に公開することを念頭においた、視覚化システムについて紹介する。

2. 建物観測システム

観測システムについては、大木ほか [1] に詳しいので以下に概要のみを述べる。

対象としている建物は超高層免震建物 (J2 棟) と通常の建物の (J1 棟) の2棟で図1に示すようにネットワークを介して時刻を同期させたデータロガーがネットワーク経由でデータをサーバーに送るようになっている。J2 棟には10ヶ所、J1 棟には3ヶ所にセンサーを設置しており、J2 棟に設置されたサーバーへデータを送るために J1 棟からは無線 LAN によって通信を行っている。ネットワーク経由で集められたデータは、データサーバーおよび予備のバックアップサーバーのハ-

ードディスクにミラーリングして保存される。また、各ディスクサーバーは RAID システムによってデータが冗長化されており、データは2重に保護され高い安全性が確保されている。

センサーは加速度計であるが、非常に S/N 比が高く、かつ、データロガーに 24bit 分解能の AD 変換器が用いられているため、130dB という広いダイナミックレンジで常時微動から強震動までシームレスに観測可能である。

なお、データはすべて win システムに準拠したプロトコルとデータフォーマットに従ってやりとりされている。

3. 建物振動表示システム

3.1 システムの構成

非常に稠密な観測を行っているため、2棟の観測記録だけでもおよそ40成分にも及ぶ。これらを各成分ごとに詳細に解析することは当然であるが、データが多くなればなるほど、建造物全体を見渡してその挙動を直感的に把握することが難しくなり、全体の挙動を知るという本来の目的にあわない状況に陥りがちである。そこで、建物の挙動をおおまかに把握するために、記録を用いて建物の挙動を視覚化するシステムを構築した。視覚化にあたっては、リアルタイムに微動を表示するものと地震等のイベントを切り出してそのときの挙動を再生表示する、という2種類の表示を可能とする。

観測システムが大規模になるほど、一部のセンサーの不具合などを見つけることが困難になり、大きなイベントの時になってはじめてシステムの不具合に気が付くというようなことがしばしば発生する。しかし、リアルタイム表示を行うことで、センサーが正しく動作しているかを常に目視確認することが可能となり、リアルタイム表示は単なる展示としての機能以上に有用である。建物の常時の微振動はその挙動はおおよそは予測可能であるため、リアルタイム表示によってセンサーの異常を容易に発見できるのである。

可視化のためのシステムは、地震観測ネットワークシステムと切り離して開発を行った。観測システムに可視化のためのシステムを組み込むことも可能ではあるが、一つのシステムを複雑にすることはセキュリティ

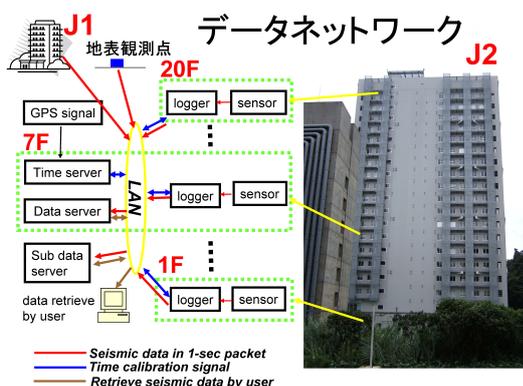


図1: 建物観測システムの概要

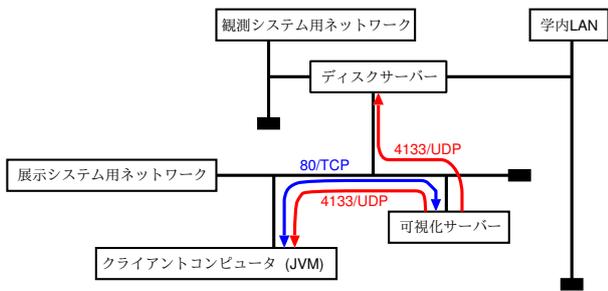


図 2: 建物振動の展示用システムのためのネットワーク構成

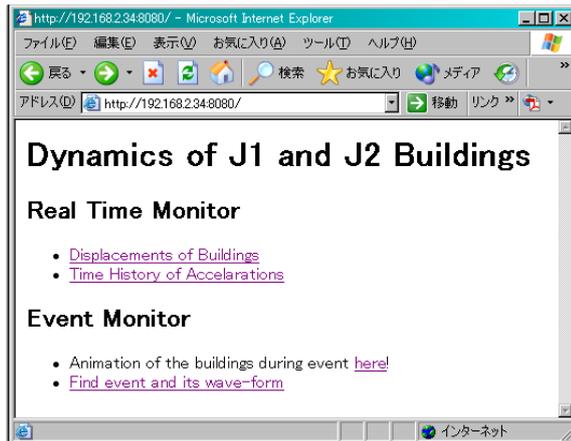


図 3: 建物振動表示のためのメニューページ

上の問題が見つかりにくくなるだけでなく、メンテナンスが困難になる可能性が高いと考えた。また、開発の期間とコストを節約するために既存のシステムで利用可能なものを改良するという方針をとった。実際には、IT 強震計研究会 [2] で開発された建物の揺れを表示可能なプログラム群を利用している。

可視化システムは、データハンドリングのためのサーバー（以下、可視化サーバーと呼ぶ）と、表示のためのクライアントから構成される。可視化サーバーは観測システムのデータサーバーから win フォーマットでデータを随時取得し、フィルタ処理などをして表示が可能な形にデータを整形する。表示そのものは Java アプレットによって行っており、クライアントは可視化サーバーに接続すると Java アプレットとデータをダウンロードしてクライアント側の Java バーチャルマシン (JVM) 上でローカルの CPU パワーを利用して表示を行う。

現在は、セキュリティ上の理由により、展示用ネットワーク内のみで建物の振動を閲覧できるようにしているが、そのネットワーク構成の概念図を図 2 に示す。

表示にあたっては、クライアント側に JVM をインストールする必要があるが、通常利用されているオペレーティングシステム (OS ; Windows , Mac OS , Linux , Solaris 等) では各 OS 上で利用可能な JVM が OS に最初から添付されているか、または無料で配布されてい

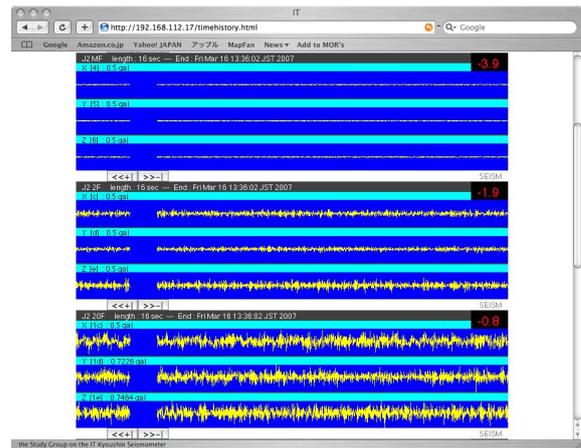


図 4: 各センサーの加速度波形をリアルタイムで表示する画面の例 (Mac OS X の safari で表示)。なお、建物の 3 次元の揺れをリアルタイム表示する画面は、図 5 とほぼ同じである。

るためクライアントの環境によらず、一つの Java ソースコードのみで誰もが建物の振動を見ることができる。しかも、表示のための処理をクライアント側に受け持たせることで CPU の負荷を分散させる設計となっており、可視化サーバーは表示のためにほとんど CPU パワーを必要とせず多くのクライアントに対してデータを表示させることが可能である。

可視化サーバーは FreeBSD 上に実装されており、表示のためには Apache サーバーを用いており、クライアントからの TCP 80 番ポートへの http 接続によって表示を開始する。可視化サーバーへの接続時のメニュー画面を図 3 に示す。メニュー画面からわかるとおり、可視化サーバーは、リアルタイム表示機能として、建物の 3 次元の揺れと波形を、また、イベント表示機能として、過去の地震時の建物の 3 次元の揺れを再生表示することができる。

3.2 常時微動のリアルタイム表示

振動のリアルタイム表示では、加速度波形を直接表示する画面と建物の 3 次元的な振動の様子を表示する画面を作成した。加速度波形の出力画面の例は、図 4 に示す通りであるが、可視化サーバーが観測システムのデータサーバーに対して UDP で接続し、およそ 1 秒間隔で win パケットとして取得し、各チャンネルのデータの時刻をそろえてそのまま表示している。

一方、建物の揺れを表示するためには、可視化サーバーがデータを取得した後、適当な量のデータをバッファリングし、加速度波形を準リアルタイムに積分して変位波形を求めて各センサーの 3 次元的な位置の変化を建物を模したワイヤーフレームとともに動かす、という処理を行っている。建物の振動の様子の表示は地震イベントの際の表示の場合と同じであり、図 5 に見られる画面である。表示にあたっては、各センサーの



図 5: イベント時の建物の応答の表示例 (Windows XP の Internet Explorer で表示)

位置の動きがわかりやすいように、各センサーの軌跡を残すような表示方法をとっている。

変位を求める際に、加速度波形を単純に積分すると、データそのものや数値積分の誤差によって変位が無限に大きくなってしまふ。そこで、適当なローカットフィルタを挿入して積分している。このとき、フィルタのカットオフ周波数の設定は建物の挙動を直感的に理解する際に重要なパラメータであり、建物の固有周期にあわせてカットオフを設定することが重要である。J2棟は固有周期が2.5秒程度であることがわかっているので、カットオフが5秒のローカットフィルタを用いている。

データの取得と積分のためのバッファリングのため、完全にリアルタイムに建物の挙動を表示しているわけではないが、リアルタイム性がそれほど要求される性質のものではないため、特にこの点について特別な配慮は行っていない。また、データ転送には信頼性は低いが高速度な通信プロトコルであるUDPを用いている。信頼性を要求される通信では通常、TCPが用いられるが、建物の挙動を見る、という本システムの目的に対しては多少のパケット落ちが生じて大きな問題とはならないので、速度を重視してUDPを採用した。

3.3 地震イベントの表示

リアルタイム表示では、地震のときの建物の挙動を見るためには、地震時にその場に居合わせなくてはならないため、あまり実用的ではない。そこで、過去の地震イベントを切り出して再生することができるようにした。建物の振動の様子を表示そのものは、上で述べたリアルタイム表示と同じ仕組みを用いているが、イ



図 6: 展示スペース全体の様子。J2棟2階の一角に設置されている。

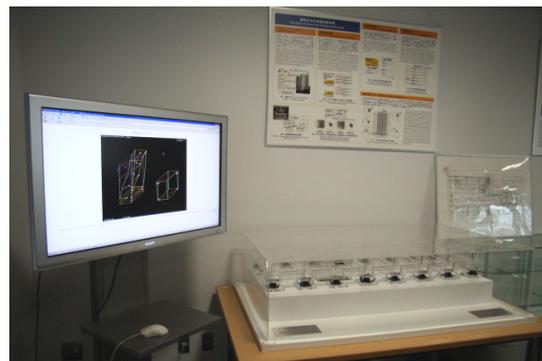


図 7: リアルタイムの振動表示の様子。免震層の模型や観測システムを説明したパネルとともに設置されている。

ベントの発生を可視化サーバーが認識したうえで、連続データのなかからイベントに対応する必要な部分のみを切り出すことが必要である。

本システムでは可視化サーバーが観測システムのデータサーバーから常時データを取り込んでいるため、一時ファイルとして連続記録を保存し、winシステムに実装されているイベントトリガーの判定機能を用いて必要な部分を取り出す、という方法をとった。また、切り出したデータから変位波形を得るために、5秒のローカットフィルタを通して積分を行い、所定の場所にファイルを書き出している。これらの作業は、cronを用いて1日に1回自動的に実行し、人手がかからないように工夫している。

再生表示のための画面には、Javaアプレットを用いて振幅スケールおよび再生速度の変更のためのユーザーインターフェースを設けている。あるイベントの際の建物振動の表示画面の一例を図5に示す。

3.4 展示用クライアントシステム

観測データを表示するためには、図2のクライアントコンピュータが必要となるが、これをJ2棟の2階ロビーに設置し、一般の学内者や来訪者が地震観測の様子を自由に閲覧できるようにした。図6に展示スペース全体の様子を示す。写真奥のモニターに建物の常時微動を準リアルタイムに3次元表示している。風などに応じて建物が大きく振動する様子が視覚的にとらえ

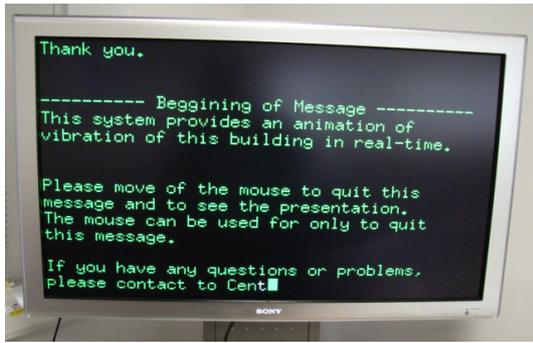


図 8: スクリーンセーバー兼用のメッセージ。マウスを動かして画面を表示するように促している。

られ、見学者などに好評である。

展示用システムのアップを図 7 に示す。写真には、建物の振動の様子がリアルタイムで表示されていることがわかる。なお、常時、建物の振動を表示していると、モニターに焼き付きが生じるなどの問題があるため、通常は、スクリーンセーバーを利用している。単なるスクリーンセーバーでは、何を展示しているかわからないため、図 8 に示すように、展示内容や問い合わせ等のメッセージを表示している。マウスを動かすことでスクリーンセーバーが終了し、建物の振動の様子を見ることができる。スクリーンセーバーソフトには、X screensaver を利用している。

スクリーンセーバーを終了させるために、マウスを接続しているが、マウスを使って、システムにいたずらをされ、観測システムに対して思わぬ攻撃をうけないよう、マウスでは、左右のボタン、ホイールはコンタクトスイッチを物理的に削ってマウスボール以外のボタン類が機能しないようにしている。また、展示用のクライアントコンピュータでは、セキュリティ上の問題が多く報告されている Windows 系の OS を避けて FreeBSD を OS として採用し、Firefox 上で JVM を動かして、建物振動を表示している。

4. セキュリティ対策と対外表示の可能性

現在は、可視化サーバーへの接続を展示用ネットワークからのみに限っている。これは、セキュリティポリシーについて十分な議論を行っていないためであるが、地震観測の結果を広く一般に公開するためには、展示用システムをインターネット上に公開することを検討する必要がある。可視化サーバーを対外的に公開することは外部から観測ネットワークへの侵入経路をつくることになり、そのセキュリティ対策は十分に行うことが求められる。現状のネットワーク構成(図 2)は、対外公開を前提としていないため、学内 LAN への出口が複数あるなど、明らかにセキュリティホールとなりうる箇所が存在している。

セキュリティポリシーの制定については今後、議論

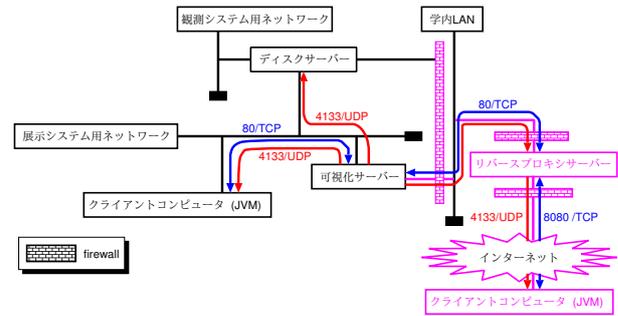


図 9: 建物振動の展示用システムの対外公開のためのネットワーク構成案

を深めていくことは当然であるが、当面、考えられるネットワーク構成として、図 9 に示す構成を考えた。できる限り、外部との直接的な接続を避けることを考慮して構成している。観測システム全体の外側にファイアウォールを設けて学内 LAN に接続し、さらに、そのファイアウォールが直接インターネットと接続しないよう、学内 LAN 上にリバースプロキシを設置し、リバースプロキシの前後に配したファイアウォールを通して通信を行うものである。これによって、可視化サーバーのポートに対してインターネット上のコンピュータから直接接続できないだけでなく、well-known port 以外の適当なポートを利用してサーバーを運用し、外部から内部を隠蔽することが可能となる。

また、観測システムのネットワークも一つのファイアウォールを介して学内 LAN に接続することで一括してセキュリティ管理を行うことができる。展示用ネットワークにはクライアントコンピュータを接続せず、クライアントは必ずファイアウォールをとおして接続する。図 9 のネットワーク構成は現時点の目から見るとやや古典的な構成に見えなくもないが、実際のセキュリティの維持はネットワーク構成だけではなく、地道で、かつ、きめ細かい管理体制が重要となる。

5. まとめ

建物の稠密地震観測システムによって得られた記録を準リアルタイムに表示するとともに、過去の地震イベントの記録を再生表示するためのシステムを開発し、それを実際の展示用コンピュータに実装した。不特定対象への一般公開の際のシステムのセキュリティ確保については、今後のより緻密な検討が必要であるが、ひとつの対策案を示した。今後は地盤震動データを統合したシステムとしてさらなるシステムの充実をはかる予定である。

参考文献

- [1] 大木洋司ほか：超高層免震建物の長期観測システム構築に関する具体的取り組み、日本建築学会技術報告集、第 21 号、pp.73-77、2005.
- [2] IT 強震計研究会：http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/ITKyoshin/