

変位計測手法の高度化に関する 既往の事例と今後の動向

○御子柴 正¹・藤田 聡²・新津 靖²・古屋 治³・相川 慎一郎⁴・藤村 俊⁴

¹防災科学技術研究所防災総合研究部 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

²東京電機大学工学部機械工学科 (〒101-8457 東京都千代田区神田錦町 2-2)

³東京都立工業高等専門学校機械工学科 (〒140-0011 東京都品川区東大井 1-10-40)

⁴東京電機大学大学院工学研究科機械システム工学科 (〒101-8457 東京都千代田区神田錦町 2-2)

The 3-D full-scale earthquake testing facility is under construction, and it will be completed in 2005. The fracture experiment of the structure is carried out using the 3-D full-scale shaking table. In the breaking test, it is necessary to measure the dynamic large displacement amplitude. Therefore, it is necessary to develop the dynamic large displacement measurement system. This paper reports the following. The outline of displacement measurement system by the image processing developed before was shown. And, we make technology survey on the displacement measurement, which applies the GPS technology. As the principle, displacement magnitude is measured by the position measurement with radio wave technology applied.

Key Words: *Dynamic Large Displacement Amplitude, Image Processing, 3-D Full Scale Earthquake Testing Facility, GPS System*

1. 緒言

阪神・淡路に大震災をもたらした兵庫県南部地震から5年が過ぎ、実大構造物の動的破壊過程を解明するために実大三次元震動破壊実験施設の建設が兵庫県三木市で進められている。この震動台は、兵庫県南部地震などの強震記録を再現する性能があり、実大構造物の破壊実験を目的としている。そのため、破壊実験において実大構造物の破壊過程の解明を行うにあたり、多種多様なセンサーを用いて破壊過程を的確に計測することが重要である。特に、動的変形量を的確に捉えるために動的大变位計測の整備が必要不可欠である。

しかし、実大構造物の破壊実験において動的大变位を計測するには技術的に多くの課題が残されている。例えば、建設される実験施設や試験構造物が巨大になり、既存のセンサーのみを用いて三次元震動時の動的大变位を計測することは困難と考えられる。従って、既存センサーの高度化または新方式センサーの開発を行い、動的大变位計測システムと既存センサーと併用することによって破壊過程を的確に捉えられると考えられる。そこで、実大三次元震動破壊実験施設において実大構造物の動的大变位を計測するシステムの開発を行っている。本稿はその中間報告であり、主な内容は次の3章から成っている。すなわち、第2章では代表的な変位計測法について接触型変位計及び非接触型変位計の特徴を示し、第

3章では、画像処理法を用いた変位計測システムの既往の適応例について振動実験を踏まえて示した。最後に、第4章では新手法の電波を用いた変位計測システムの概念・問題点等について示す。

2. 代表的な変位計測法

耐震実験及び実験構造物の耐震診断において、対象構造物の震動特性、構造特性、破壊特性などを的確に把握するために、加速度計、速度計及び変位計等を使用して計測を行っている。動的変形量を的確に捉える変位の計測手法を接触型及び非接触型と2種類に分類すると、接触型計測法では、代表的な計測法としてポテンションメータ式及びインダクタンス式が、また、非接触型計測法では、超音波¹⁾・レーザー・赤外線・画像処理²⁾等の手法がある。実大三次元震動破壊実験施設においては、震動台の最大変位は水平±100cm、鉛直±50cmの大变位での加振が可能であり、兵庫県南部地震で観測された強震記録等を再現し、破壊実験を行う。そのため、接触型センサーを用いて直接、構造物の動的大变位を計測することは困難と考えられる。そこで、非接触型センサーによる動的大变位計測システムが必要となる。

非接触型計測法に分類される各計測法の特徴として、まず、超音波及びレーザーは、著しい指向性を示しているため1軸の計測を行うのに適している。

超音波は空気中での減衰が激しいため大変位計測には向かないと考えられる。赤外線は赤外線 LED と撮像に PSD を用いることで、3 軸の計測が可能である。この場合、測定箇所に赤外線 LED を設置し、2 台の PSD 撮像装置をステレオ視的に配置して、座標を算出する。または、3 軸の内 1 軸の精度は悪くなるが、測定箇所に複数の赤外線 LED を設置し、1 台の撮像装置で座標を算出する。画像処理での座標算出はかなり以前から行われており実績がある方法である。基本的には、識別しやすい標識又は色彩を試験体の測定箇所に設置し、2 台の CCD カメラで撮影して、画像処理により座標を算出する。オリジナルデータが画像で保存されることが多く、座標検出の確認が繰り返し行える特徴がある。最近では、CCD と画像処理機能が一体となった人工網膜 LSI が製品化されている。代表的な変位計測方式を表-1 に示す。

表-1 代表的な変位計測方式

■ 接触型計測方式
□ ポテンションメータ
□ インダクタンス
■ 非接触型計測方式
□ 超音波
□ レーザー
□ 赤外線
□ 画像処理

3. 画像処理法を用いた既往の適応例

3. 1 開発の背景

防災科学技術研究所では、大型振動台実験装置を用いて多種多様な振動実験を行っている。この振動台は、1970年に建設され、当初、振動台実験装置は振幅が±3cm と小さく大変形を生じる振動実験は出来なかったが、1989年に改造工事を行い振幅が最大±23cm まで動かせるように性能を向上させた。この結果、大変形を生じる振動実験が行えるようになり、変位計測の必要性から非接触型の変位計として画像処理法による変位計測の開発を行った。当初、低速再生により画像処理を行っていたが、コンピュータの進歩に伴ってリアルタイム処理へと高度化を行った。^{3), 4)}

3. 2 変位計測システムの概要

変位計測システムの開発を行うにあたり、当時、一般に使われ始めた家庭用ビデオカメラとVTRを使用して、極力高価な特殊機器の使用は避けた。本システムは、VME バス仕様のボードコンピュータ、ビデオ信号入力ボード及び周辺機器として、ハードディスク、フロッピーディスク、マウス、カラ

ープリンター、モニターで構成している。本システムの特徴として、ボードコンピュータは、モトローラの68000系CPUを搭載しており、OSは16ビット対応のOS9である。このOS9はシンプルな構造であるため、リアルタイム処理が比較的簡単に行えることからリアルタイムOSとして現在も主にFAなどに使用されている。また、ビデオ信号入力ボードは、NTSC方式のカラー1入力の映像信号を解像度640×484、濃度分解能RGB各8ビットにデジタル変換し、2画面のフレームメモリに交互に格納している。1画面分の映像信号は1/30秒(33ms)でフレームメモリに格納され、次の書き込みがあるまで33ms間保持される。なお、このビデオ信号入力ボードはCPUに負担をかけずに独立に動作している。システム構成を図-1に示す。

ビデオ座標を空間座標に変換するための係数を求めるために、測定点の実測値(空間座標)を正確に測定しなければならない。本システムでは専用の測器を用いて測定を行った。これにより巻き尺などで測定するよりも正確で尚かつ、複雑な測定点の空間座標の測定が可能となった。

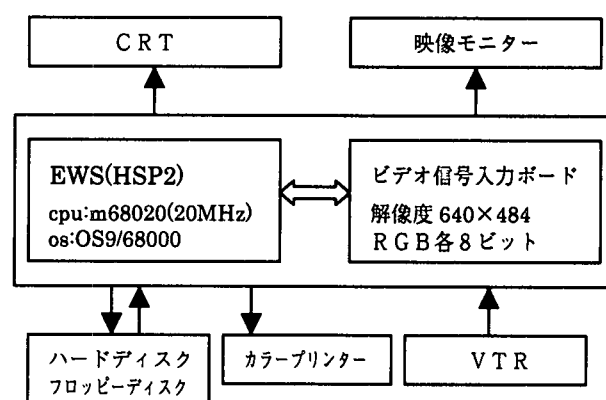


図-1 システム構成

3. 3 ビデオ座標の検出

画像処理によりビデオ座標を検出するとき、画像処理で測定点の誤認識の発生防止及び精度の点から測定点には明暗のはっきりした標識(ターゲット)を付けている。このターゲットは白い厚紙に黒い縁取りした直径10~20cm程度のものである。計測では、ビデオ座標を空間座標に変換するための係数を求めるため、変位の測定点以外にも試験体を取り囲むようにできるだけ多くのターゲットを貼り付ける。なお、各ターゲットの空間座標は実験の前に測っておく。

ビデオ画像上で座標の検出は次のように行っている。実験で収録したビデオ画像から試験体の静止時(加振前)におけるターゲットのビデオ座標を求めておく。そして、このビデオ座標を基準にしてターゲットを含む適当な大きさのウィンドーを設定し、

その中で画素の輝度（RGB各8ビットで現されているが、解析では1色のみ使用している）が、ある一定以上の座標値の平均（重心）を求めて、これをターゲットのビデオ座標とする。このときウインドーの位置はターゲットの動きに追従して動かしている。ここで求めたターゲットのビデオ座標は、メインメモリーに記憶されハードディスクに格納する。3次元の空間座標を求めるにはビデオ画像を2方向から撮影しているため、もう一方のビデオ画像に対しても同じ方法でターゲットの座標を求める。以上の画像処理をリアルタイムで行っている。リアルタイム処理が可能なのはフレームメモリが2画面分あるため、一方のフレームに画像を取り込んでいる間にもう一方のフレームメモリからターゲットのビデオ座標位置を検出しているためである。1/30秒のフレーム単位（解像度 640×484）のビデオ座標位置を検出するときは33ms以内で処理を行い、1/60秒のフィールド単位（解像度 320×484）で検出するときは16ms以内で処理を行っている。

2方向の検出した座標位置は、別々に画像処理を行ったため、同期を取る必要がある。そのため、ビデオ画像の片隅にビデオタイマーも併せて録画しており、このビデオタイマーを基にビデオをスタートさせて大体の時刻を合わせた後、画像処理によりビデオタイマーの数値を読み取り合わせている。しかし、録画が1/30秒間隔のため、ある程度の誤差は生じる。ビデオ座標から空間座標への変換は、透視変換理論^{5), 6)}で最小自乗法により求めている。耐震実験への適応例における実験結果から、ターゲットを認識できる最小の大きさにビデオ画像を調整して、フレーム処理で座標位置を検出した時、一度に検出できるターゲット数は8箇所が最大であった。図-2に画像処理による動的変位検出の手順を示す。

3. 4 耐震実験への適応例

実験で用いた試験体は一般に市販されている軽量棚である。この軽量棚は、加振によりロッキングが起り易く大変位が計測できる。また、転倒した場合でも簡単に持ち上げられるため繰り返し実験が行えることから使用した。軽量棚の大きさは、高さ2100mm、幅900mm、奥行き450mmである。軽量棚にはターゲットを9箇所、また、振動台にもターゲットを5箇所貼り付けた。ターゲットの大きさは直径160mm（直径80mmの中ぬきの白地）である。写真1に試験体全景を示し、図-3に軽量棚の寸法及び測定点を示す。

実験に使用した振動台は防災科学技術研究所の大型振動台である。諸元を表2に示す。振動台への入力波は正弦波スイープ及び実地震波（エルセントロN-S、宮城沖E-W）である。実験手順として、まず、正弦波スイープにより軽量棚の固有振動数の探索を行った。次に、実地震波で加振レベルを段階的に大きくして最終的には軽量棚が転倒するまで加振を行

った。実験結果の一例として、エルセントロ波N-S、加速度レベル400galの加振を行い、ビデオ画像から変位波形を求めた結果を図-4に示す。t0は振動台、t1～t6は軽量棚の測定点の変位波形である。軽量棚はロッキングが起り、最上部測定点t6の変位は片振幅で最大280mmであった。また、振動台に取り付けた速度計から求めた変位GLと画像処理で求めた振動台の変位t0とは合っており、良い結果が得られた。

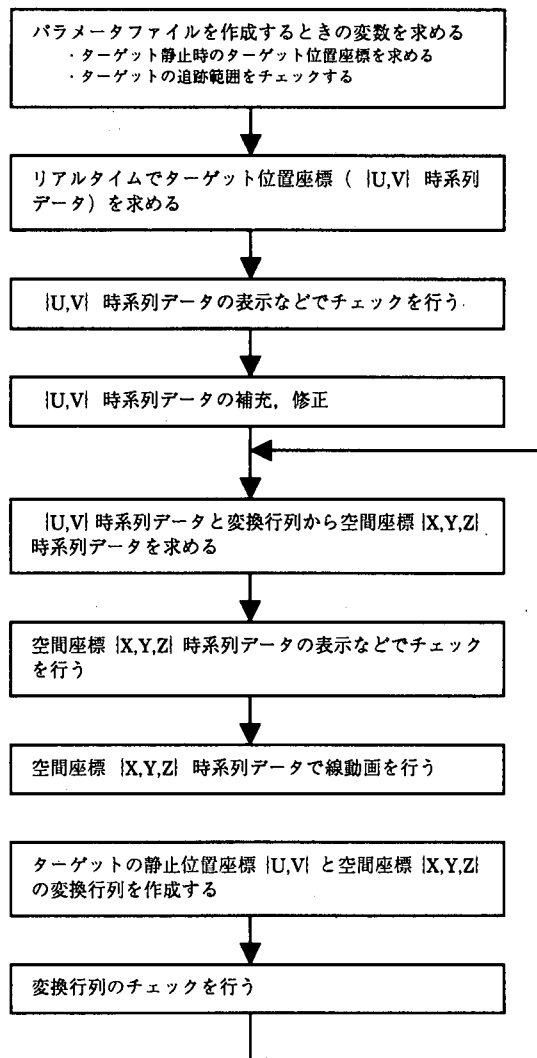


図-2 画像処理による動的変位検出の手順

表-2 大型振動台の諸元

振動台面積	15.0m×14.5m
最大搭載重量	500ton
加振方向	水平1方向
最大振幅	±23cm
最大速度	90cm/s（実験時75cm/s）
最大加速度	0.94G（200ton時）
加振周波数範囲	DC～50Hz

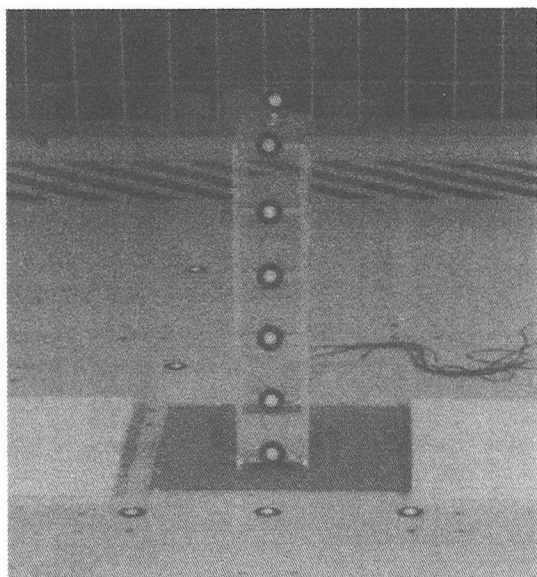


写真-1 試験体全景

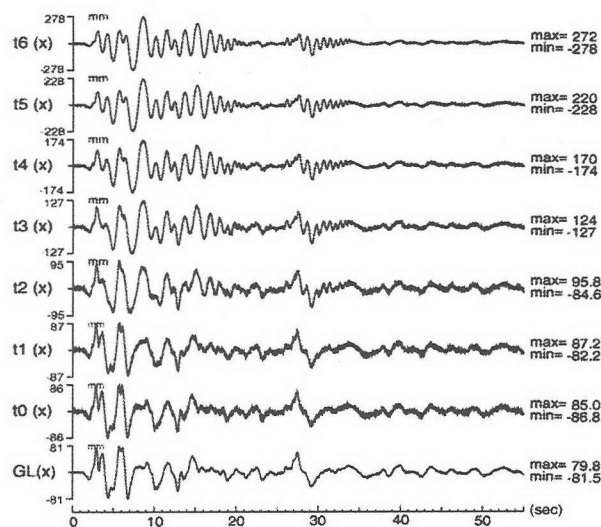


図-4 ビデオ画像から求めた変位波形

4. 電波を用いた大変位計測法の検討

4.1 背景

近年、GPS（汎地球測位システム）^{7), 8), 9)} を使用して位置を測定する技術が飛躍的に進歩した。GPSは4個以上の衛星から発信された固有の電波を同時に受信して位置を知る装置である。この技術を応用した、全国GPS連続観測システムは、2地点で同時にGPS衛星4個以上が出す固有の電波を受信して、地点間の相対位置（距離、高度差）を高精度で測定している。2地点間の相対位置は水平距離で1cm、高度差で数cmの精度で測定できるため地殻変動観測の有力な手段として利用されている。そこで、この技術を応用することにより、実大三次元

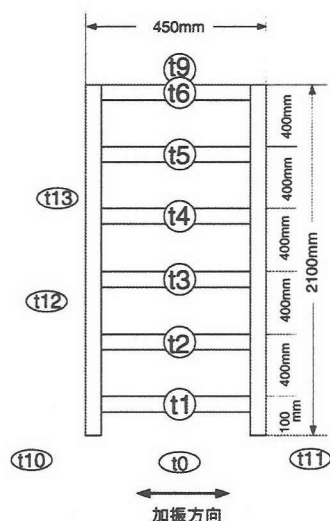


図-3 軽量棚の寸法及び測定点

震動破壊実験施設内において発信機と受信機とを組み合わせることで、位置測定が可能ではないかと考え、技術調査を実施している。まだ、調査中ではあるが、可能性、技術的課題などについて示す。

4.2 概要

GPSの測位法を震動実験における試験体の位置測定に当てはめてみると、実験施設の天井や壁が電波発信地点（固定点）になり複数の発信機を設置する。そして、試験体の計測点箇所が電波受信地点（位置測定地点）となる。しかし、この場合、試験体側に位置算出を行う機器類を設置しなければならない。そこで、試験体の位置測定地点から固有の電波を発信して、実験施設の天井や壁に複数設置した受信アンテナで同時に受信を行い、位置を算出する方法が考えられる。この方法は、複数の受信アンテナで受信した受信信号の位相差から電波発信位置を演算推定する。電波の位相差による測位法の計測イメージを図-5に示す。

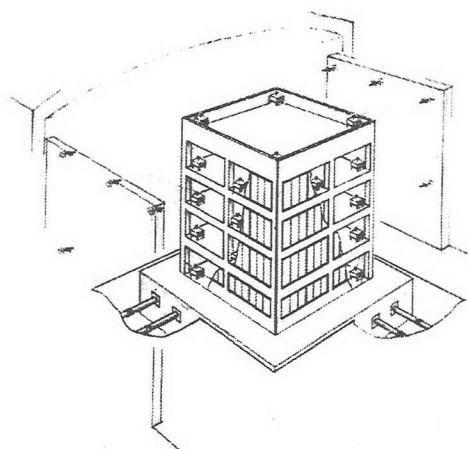


図-5 波の位相差による測位法の計測イメージ

4. 3 測位法の性能及び位置測定方法

測位法の性能及び位置測定方法を下記に示す。

1) 三次元計測

受信アンテナを少なくとも4箇所に設置することにより三次元計測が可能である。

2) 多数地点同時計測

各変位計測点の発信機送信周波数は $f_c + f_n$ とする。 f_c は基準周波数であり、 f_n は発信機毎に異なる周波数である。 f_n は f_c に比べて小さい値である。受信機は発信周波数の差を利用して帯域通過フィルタを用いて受信信号を識別することにより、各計測点を独立に処理することができる。この方法により、最低20点の位置算出は可能と考えられる。図-6に位置測定の基本構成を示す。

3) サンプリング周波数と測定精度

発信機送信周波数を数GHz~100MHz程度の周波数で行い、4.4の技術的課題が解決されれば、最大変位量mオーダー、精度cmオーダーは可能と考えられる。

4) 位置測定方法

第n計測点の発信機からの電波は、4箇所のセンサーで受信する。この4信号の間には位相差 $\Delta\phi$ を観測することにより発信機の位置(第n計測点の位置)を求めることができる。例えば図6のセンサー#1受信信号と#2受信信号の位相差 $\Delta\phi_{12}$ に電波の波長(=光速/ f_c)を乗じれば、(発信機-センサー#1の距離)と(発信機-センサー#2の距離)との距離差が得られるが、これによりセンサー#1とセンサー#2を焦点とした放物面(図-7の等位相差面)上に発信機があることが分かる。同様に、例えばセンサー#1と#3、センサー#1と#4の位相差から放物面を求めれば、上記3放物面の交点が発信機位置(第n計測点の位置)になる。

4. 4 技術的課題

この電波を利用した測位法は他の方法にない特徴を持つと考えられるが、実現するには解決しなければならない技術的課題が多数ある。問題となっている項目を下記に示す。

1) マルチパスの対策

実大三次元震動破壊実験施設内で、試験体の測定点に設置した発信機から発信した電波は、施設構造物や試験構造物等に反射しアンテナに受信される。この場合、計測精度の劣化を招くことが考えられる。

2) 周波数の選定

計測精度及び計測領域を満足する最適な発信機の基準周波数及び発信機毎に異なる周波数の選定。

3) アンテナの幾何学的配置

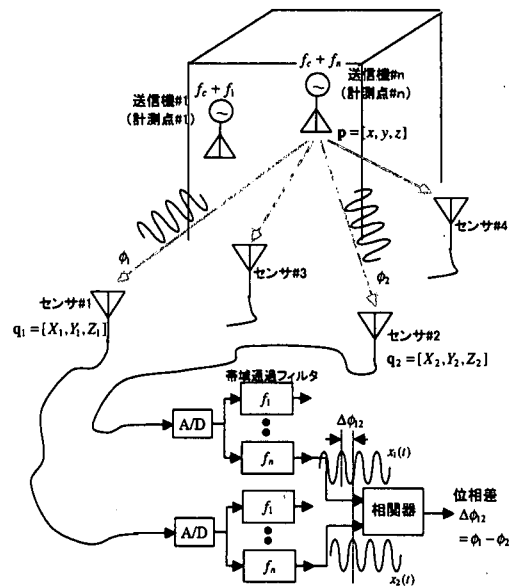


図-6 位置測定の基本構成

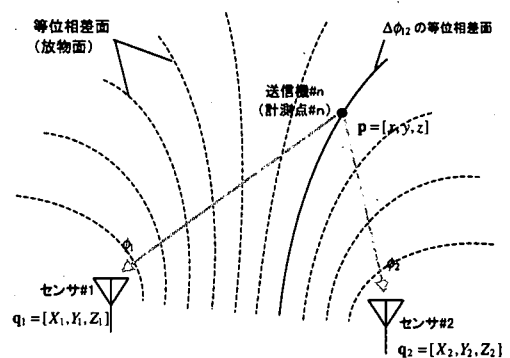


図-7 等位相差面

最大の効果を得るようなアンテナの配置数及び幾何学的配置。

4) 震動系と計測系の絶縁

震動実験時には、発電機、アクチュエーター等により実験施設に振動が発生すると考えられる。そのため、計測系は震動系と免震などの方法で絶縁されていることが望ましい。

5. 結言

画像処理による変位計測の既往の適応例及び新たな変位計測手法の可能性を秘めた電波の位相差による測位法について示してきた。画像処理による変位計測では、近年、パソコンの性能が向上し、OSもWindows98などグラフィカルになりマンマシンインタフェースが充実してきた。そして、イーサネット技術によりコンピュータ間の通信が簡単に行え

えるようになった。現在、開発を進めている画像処理による変位計測システムにおいては、今までの経験を踏まえ従来のシステムで実現できなかった、「簡単に使用できる」、「高速サンプリング」などを実現していきたいと考えている。また、新たに提案した、電波の位相差による測位法による変位計測は、他の手法にない特徴を持つと考えられる。今後、技術調査の結果から実現性があるのか判断をしていきたいと考えている。

参考文献

- 1)超精密生産技術大系 第3巻 計測・制御技術, フジ・テクノシステム, 1995.
- 2)木下幹雄, 他: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 1992.
- 3)矢崎忍, 他: テレビカメラによる3次元動的位位置計測, 第7回日本地震工学シンポジウム論 pp.1429-1433, 1986.
- 4)御子柴正, 他: ビデオカメラによる3次元動的変位計測, 土木学会第48回年次学術講演概要, pp.14-15, 1993.
- 5)D.F.ROGERS 他: コンピュータグラフィックス (山口富士夫訳), 日刊工業新聞社, 1976.
- 6)岡本博: パソコンによる透視図の作り方, オーム社, 1984.
- 7)土屋淳, 他: やさしいGPS測量, 日本測量協会, 1991.
- 8)GPS ー人工衛星による精密測位システムー, 日本測地学会編著, 日本測量協会, 1989.
- 9)近藤倫正, 電波情報工学, 共立出版, 1999.