

# テレビカメラによる3次元動的変位計測 ——耐震実験における変位計測への適用——

矢崎 忍\* ・ 勝山ヨシ子\*

国立防災科学技術センター

## Three Dimensional Motion Measurement by TV Image Analysis ——Application to Displacement Measurement in Earthquake Simulation——

By

**Shinobu Yazaki and Yoshiko Katsuyama**

*National Research Center for Disaster Prevention, Japan*

### Abstract

The three-dimensional motion measurement system with ordinary TV camera was developed. The video images are digitized then processed with the general computer to detect space motion of target points.

Generally two TV cameras are needed to detect three-dimensional motion of points, while one camera is enough if each point is restricted to move within a definite plane.

This time, the system was applied to the motion measurement at four kinds of earthquake simulation experiments and satisfying results were obtained. By comparing the resultant displacements by the video system with ones by potentiometer, the mean deviation was found to be 1.5mm out of full range of 80mm.

The system seems to be applicable to other types of motion measurement with small changes of the computer programs.

### 1. はじめに

防災関連の分野の実験、計測では振動実験、斜面の崩壊実験等、3次元空間での物体の動きを計測しなければならない場合が多い。特に、連続的な物体の運動を正確に知るためには、できるだけ多くの点の3次元変位を動的に計測する必要がある。

---

\* 第4研究部計測研究室

変位を動的に計測するには種々の方法があるが、このうち差動トランス型変位計や加速度計などを用いる接触式のもの、装置が大がかりになる、精度が十分でない等の問題があり上記の目的には必ずしも適さない。また非接触式のものでも光学式変位計のように1点ずつ測るものは、3次元の動きをする多数の点を同時に計測するには向かない。対象全体を同時に測るという目的には、いわゆる画像計測の方法が最も適していると思われる。

画像計測の手法により3次元の動的な位置計測を行った例として中根(1976)がある。中根の場合、2台の16mmフィルム撮影機により土石流の運動の検出を行った。しかし、フィルム撮影機の場合、フィルム上の点位置の検出に人手を要するため、速いサンプリングが必要な振動実験などでは作業量が膨大になる。

一方、TVカメラやPSDカメラ(非走査式動位置検出器)を用いた専用の動変位測定装置も開発されているが(増田他, 1984; 倉沢他 1979), これらのものでは測定点にあらかじめ特殊な標識を設置しておかなければならず、測定点の数も限られている。また、液体のように標識を設置しにくいものもあり、用途が限られる。

われわれの方法は、一般のTVカメラとビデオテープレコーダーを用いて供試体を撮影し、画像解析により測定点の動変位を検出するものである。今回の適用例では精度を高めるため測定点に一定の標識を設けたが、原理的には標識を設けない点についても計測可能であり、したがって実験後に測定点を選ぶこともできるなど、汎用性の高いシステムである。

なお、今回は実際の適用例として4種類の耐震実験における動変位計測を行った。

## 2. システムの概要

計測の手順の概要を以下に示す。またシステム構成を図1に示す。

- (1) 実験供試体の全景を1台または2台のTVカメラで撮影しビデオテープに収録する。このとき変位測定点および座標変換データを得るための標点に標識を設定する。また、ビデオタイマを同時収録する。
- (2) 収録したビデオテープを再生、デジタル化しデジタル画像データを作成する。
- (3) 画像データを汎用計算機システムにより解析し標識を設けた点の3次元動変位を検出する。
- (4) 必要により、測定点の変位から供試体全体の運動を内挿し、コンピュータグラフィクスを用いて動画を作成する。

## 3. 実験の撮影

TVカメラ1台または2台を測定範囲全体が画面に入るように、かつ測定精度を良くするた

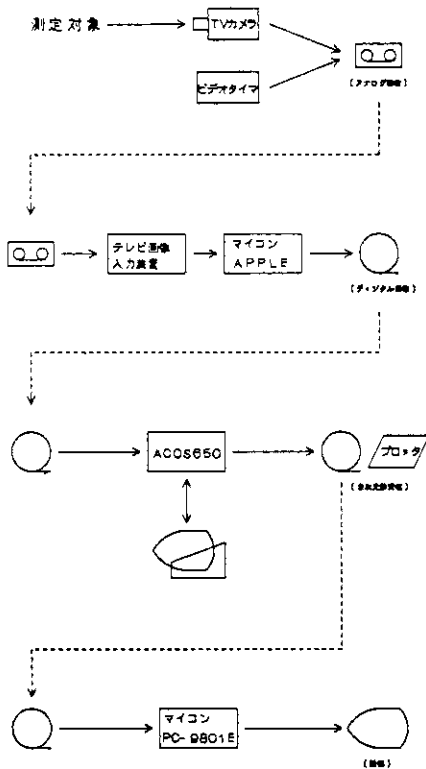


図1 システム構成  
Fig.1 Video measurement system

めにできるだけ供試体に近づけて設置する。構造上カメラをあまり近づけられないときはズームレンズを用いる。各測定点の動きが2次元である場合はTVカメラは1台でよいが、3次元になる場合は2台必要である。

測定点は、形状の特徴がはっきりしている場所ならば必ずしも標識を設けなくても位置の検出は原理的に可能であるが、今回はデジタル系の分解能(空間、濃度ともに)があまり良くないので、位置の検出を行いやすくすること、位置検出の精度を良くすることの両方の目的のために一定の標識を設置した。標識の形は、構造物に対しては厚紙の円抜で中を白、周囲を黒に塗ったものや発光ダイオードを用いた。また水槽の実験では、白い発泡スチロールのボールを水面に浮かべた。

標識は、空間座標への変換のデータを得るため、変位測定点以外のいくつかの点にも設置する。そしてすべての標識の3次元座標を実験開始前に測っておく。

また、時間情報を得るためにビデオタイマをビデオテープに同時収録する。ビデオタイマは100分の1秒のきざみで時刻を表わす数値をビデオ画像上に付加するものである。表1にTVカメラとVTRの仕様を示す。

TV カメラ	VTR
カラー*またはモノクロ	カラー*
出力信号 NTSC 信号	入出力信号 NTSC 信号
走査線 約300本	記録速度 標準, 低速
サンプリング 30 HZ	再生速度 標準, 低速, 高速,

\*: カラー情報は用いていない

座標分解能	水平 256 × 垂直 256
輝度分解能	4 bit (16 レベル), 単色
サンプリング	60 Hz

表 1 TVカメラとVTRの仕様

Table 1 Specifications of TV camera and video tape recorder

表 2 テレビ画像入力装置の仕様

Table 2 Specifications of video signal digitizer

#### 4. 画像のデジタル化

実験を収録したビデオテープを再生し、再生信号をテレビ画像入力装置(ビデオ信号用の高速A/D変換器)に入力してデジタル化する。装置の仕様を表2に示す。デジタル化された画像データはマイクロコンピュータを用いて磁気テープに記録する。このとき、システムの処理速度の制限のため、ビデオテープを低速再生し、しかも全画面をいくつかの部分に分けて各部分毎に変換する等の工夫を要した。

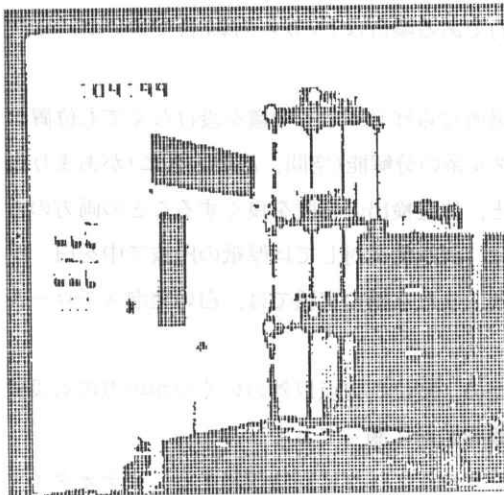


図 2 デジタル画像(全画面, 2値化)

Fig. 2 Two-valued digital image



写真1 三層骨組モデルの振動実験

Photo. 1 Three-storied frame with slippable weights

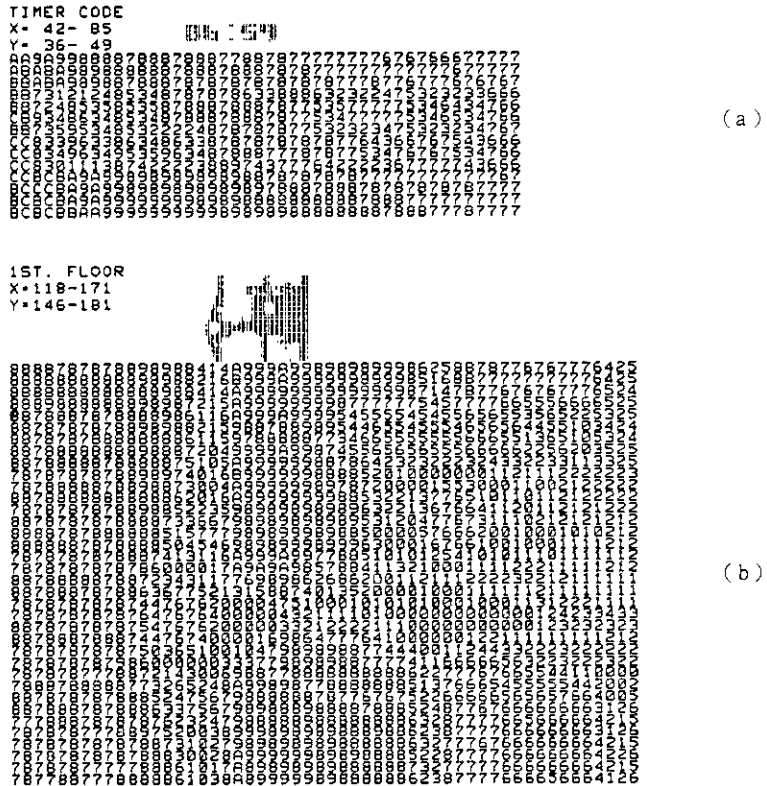


図3 デジタル画像(部分, 16進数表示)

Fig.3 Digitized image in hexadecimal numeral (part)

図2, 図3にデジタル画像の例を示す。図2は写真1の三層骨組モデルの全画面を濃度レベルを2値化して表わしたものである。また図3は図2の一部分で(a)はビデオタイマ、(b)は標識を含む骨組の像の一部である。図3の数値は1画素に対応し、各画素の濃度レベル(0~16)を16進数表示(0~F)で表してある。

## 5. 解 析

### 5.1 標識の検出

デジタル画像を適当な濃度レベルで白(0), 黒(1)に2値化し、標識の形を検出する。黒い枠をつけた白い円板なら、'1'で囲まれた'0'の円形の領域を検出し、この領域の重心座標を求め、標識の座標とする。標識は一定の大きさを持つので、この操作により位置が画素の大きさの数分の1の分解能で検出できる。

運動の追跡は、通常の振動実験などの場合あまり変位が大きくないので標識どうしが画像

上でつながったりすることはない。したがって、ある時間ステップにおける位置は直前のステップにおける位置の近傍を探すことにより検出できる。つまり、各標識の初期位置の座標を指定すれば、自動的に位置の変化をたどっていくことができる。

しかし、変位が大きく標識どうしが画像上でつながることがある場合には、標識の区別ができなくなる。また標識が分離しているときでも、画像のノイズにより追跡ができなくなることがある。そこで汎用計算機システムのディスプレイ端末を用いて、適宜人が指示を与えながら処理を進めるマンマシンシステムを作成した。

## 5.2 時間軸補正

画像上のビデオタイマを読み取ることにより、各画面の時刻を得ることができる。ビデオタイマの各数字は7ストローク表示なので、マッチングにより容易に読み取ることができる。しかし数字の変わり目などではパターンが乱れるので、読み取り不能となる。そういうところでは前後の値から推定しなければならなかった。

こうして得た時刻データにより、標識の座標値の時系列をリサンプリングし、等時間間隔上の時系列に変換した。

## 5.3 空間座標への変換

ビデオ画像上の座標を3次元実空間における座標に変換するには透視投影の手法が適用できる(ROGERS他, 1976)。

TVカメラの歪を無視すると、ビデオ画像は3次元実空間の透視投影である。今、任意の1点の実空間座標を $(x, y, z)$ 、そのビデオ画像上の対応点の座標を $(x^*, y^*)$ とすると(図4)、 $(x, y, z)$ と $(x^*, y^*)$ との間には

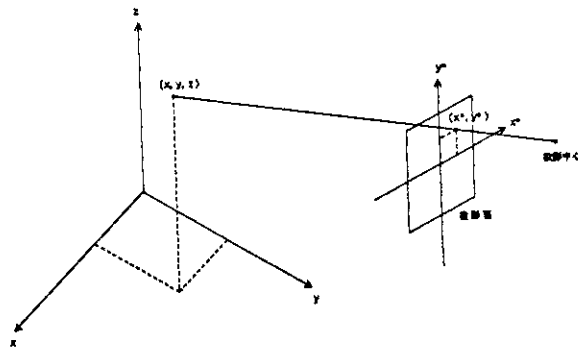


図4 透視投影

Fig.4 Perspective projection

$$\begin{cases} T_{11}x + T_{21}y + T_{31}z + T_{41} - T_{14}xy^* - T_{24}yx^* - T_{34}zx^* - x^* = 0 \\ T_{12}x + T_{22}y + T_{32}z + T_{42} - T_{14}xy^* - T_{24}yx^* - T_{34}zx^* - y^* = 0 \end{cases} \quad (1)$$

の関係がある。ここで $T_{ij}$ は3次元同次座標に対する一般の透視変換の変換行列の要素である。透視投影の場合独立な要素の数は11個で、カメラの位置と方向により決まる定数である。

(1)式を $T_{ij}$ に対する決定方程式とみたとき、11個の変数に対する二つの関係であるから、一平面上にない6以上の点について $(x, y, z)$ と $(x^*, y^*)$ の実測値の組が与えられれば最小2乗法により $T_{ij}$ が求まる。実際には実測値は測定誤差を含むから、できるだけ多くの点のデータを用いたほうが $T_{ij}$ の決定精度はよくなる。

次に、ビデオ画像座標 $(x^*, y^*)$ から実空間座標 $(x, y, z)$ への変換は、再び(1)によると、(1)は3個の変数 $x, y, z$ に対する2個の関係式であるから、一般に $x, y, z$ が独立に変化するとき、すなわち3次元動的動きをするときは、2組のビデオ座標が必要である。2つのビデオ画像があるとそれぞれに対して(1)により2つの関係が得られるから、合わせて4個の連立1次方程式が得られ、最小2乗法の意味で解けて $x, y, z$ が求まる。ただし $x, y, z$ のうちの一つ以上が固定のときは、一つのビデオ画像だけから残りの変数の値が求まる。

## 7. 応 用 例

今回は、次の4つの耐震実験においてビデオ画像処理による動変位計測を行った。

### 7.1 可動載荷物を持つ3層骨組モデルの振動実験

写真1に示すような振動時にスリップする可能性のある鉄製ブロックを各層に載せた3層骨組モデルの振動実験において、振動台、各層の床および載荷物の変位を求めた。モデルのおよその大きさは幅40 cm、奥行40 cm、高さ130 cmで載荷物固定時の固有振動数は1次: 3.2 Hz, 2次: 9.1 Hz, 3次: 13.5 Hzである。このモデルを2次元(水平1方向+垂直)小型振動台により加振した。

標識としては写真1に見えるような、中を白、外枠を黒で塗った円板を用い、振動台(①)各層の柱頭部(②, ④, ⑥: 床とはほぼ同じ動きをすると考えられる。)、および載荷物(③, ⑤, ⑦)に取りつけた。

運動はほぼ2次元的であるとして1台のTVカメラにより正面から撮影し、2次元の変位を検出した。

標識位置の検出は、標識の内側の白い部分と黒い枠の境界を検出し、境界で囲まれた領域

注) 柱の断面は30 mm × 6 mm

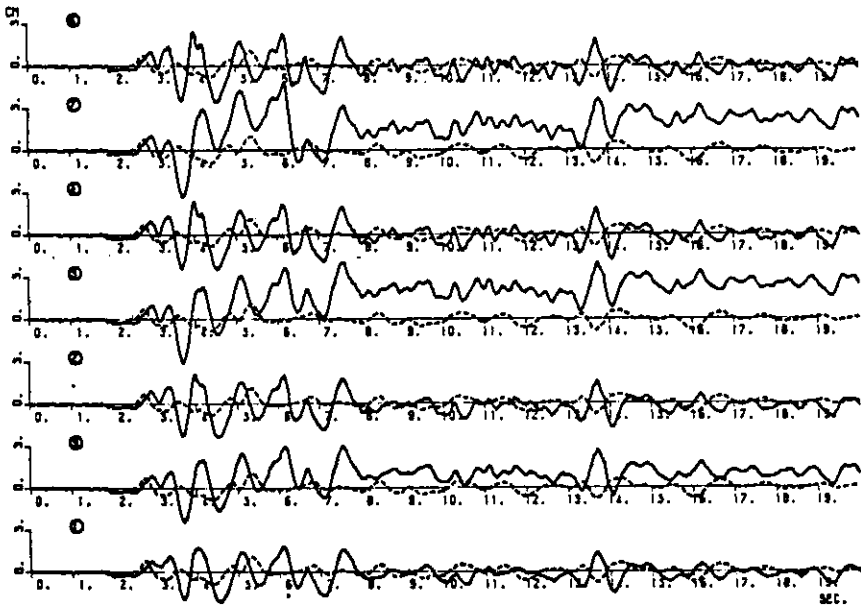


図5 三層骨組モデルの各標識位置で検出された変位(実線:水平成分, 点線:垂直成分, 図中の番号は写真1の標識番号に対応)

Fig.5 Detected displacements on three-storied frame  
(rigid line:horizontal component, dotted line:vertical component)

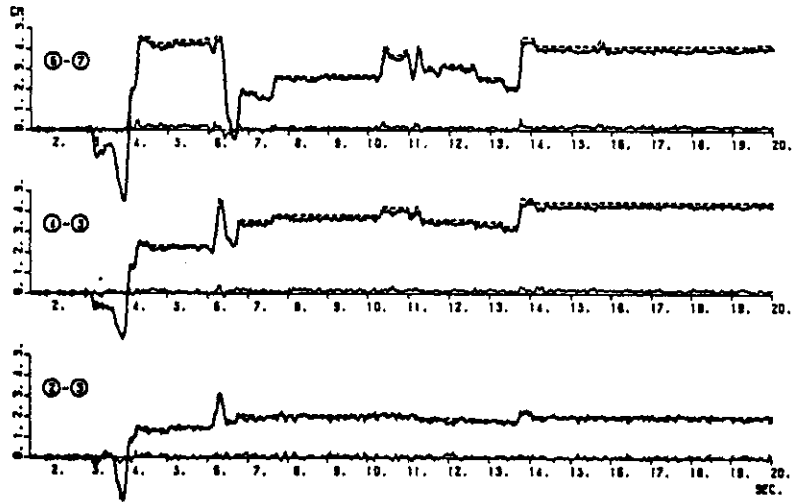


図6 三層骨組モデル載荷物のスリップ変位(太線:TV計測変位より求めた値, 点線:接触変位計による値, 細線:両者の偏差)

Fig.6 Relative displacement of weights on three-storied frame  
(thick line:by video, dotted line:by potentiometer, narrow line:difference)



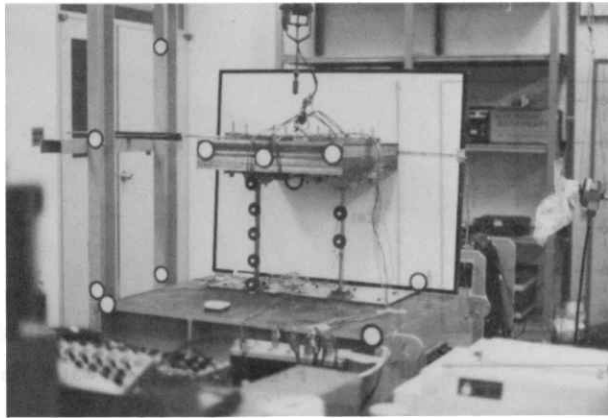


写真2 門型ラーメンモデルの振動実験

Photo.2 One story steel frame

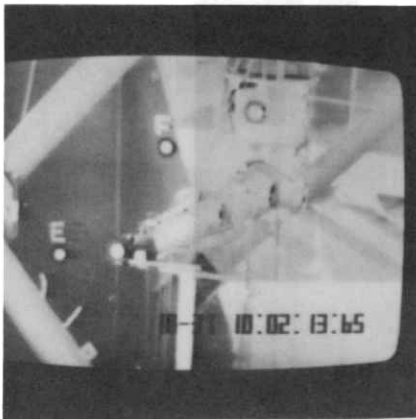


写真3 マニプレータの振動実験(ビデオ再成画像)

Photo.3 Video image of manipulator

の重心座標を求め標識の位置とした。図5はエルセントロ地震波(2次元)により加振したときの各標識の検出された変位である。

またこの実験では、同時に各層載荷物のスリップ変位(載荷物変位-床変位)を接触変位計で測定しており、ビデオ計測により求めた測定値との比較を行った。結果は図6に示すように全体のふれ幅約80mmに対し、両者の差は最大で2.5mm, 2乗平均で1.5mmであった。

測定精度に対する要求は、測定の対象や目的により異なるが、一般の耐震実験ではこの程度の誤差で変位が検出できれば、十分実用的であると考えられる。なお、ビデオ計測による変位波形に含まれる高周波成分は画像処理の過程におけるノイズと考えられる。

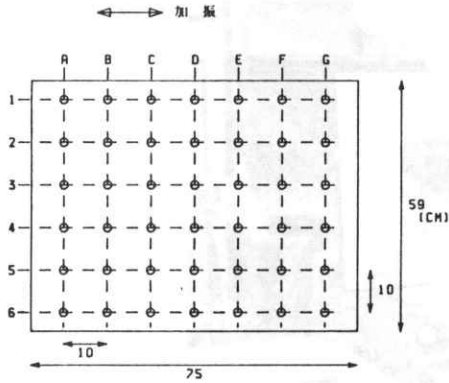


図 7 水槽の水平内断面および標識の配置

Fig.7 Targets on water surface

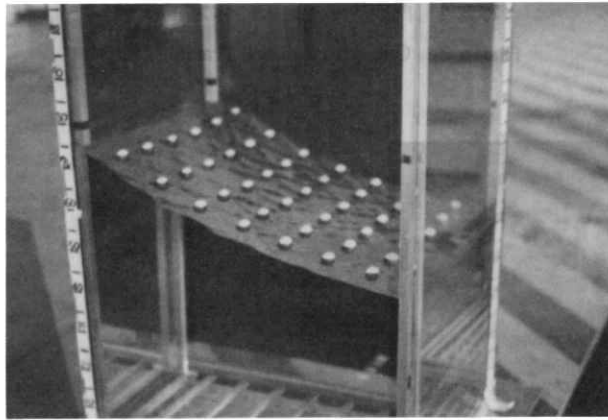


写真 4 水槽の振動実験

Photo.4 Oscillating water tank

### 7.2 門型鉄骨ラーメンモデルの破壊実験

2次元小型振動台による鉄骨ラーメンモデル(写真2)の破壊実験を2台のTVカメラにより撮影し、3次元変位を求めた。この実験においては標識として7.1と同様の円板の他に発光ダイオードを用いた。またこの場合にも2つの点で接触変位計により変位を測定しており(水平成分のみ)、両者はよく一致したことが確かめられた(箕輪)。

### 7.3 マニプレータの振動実験

大型振動台による原子力プラント用マニプレータの振動実験においてマニプレータ各部の動変位を求めた(写真3)。マニプレータは全長6mあり測定精度を考慮すると1台のカメラで全体を撮るのは無理だったので、全体を二つの部分に分け、3次元変位を求めるためそれぞれを2台のTVカメラで撮影した。求められたマニプレータ先端付近および上部キャリア

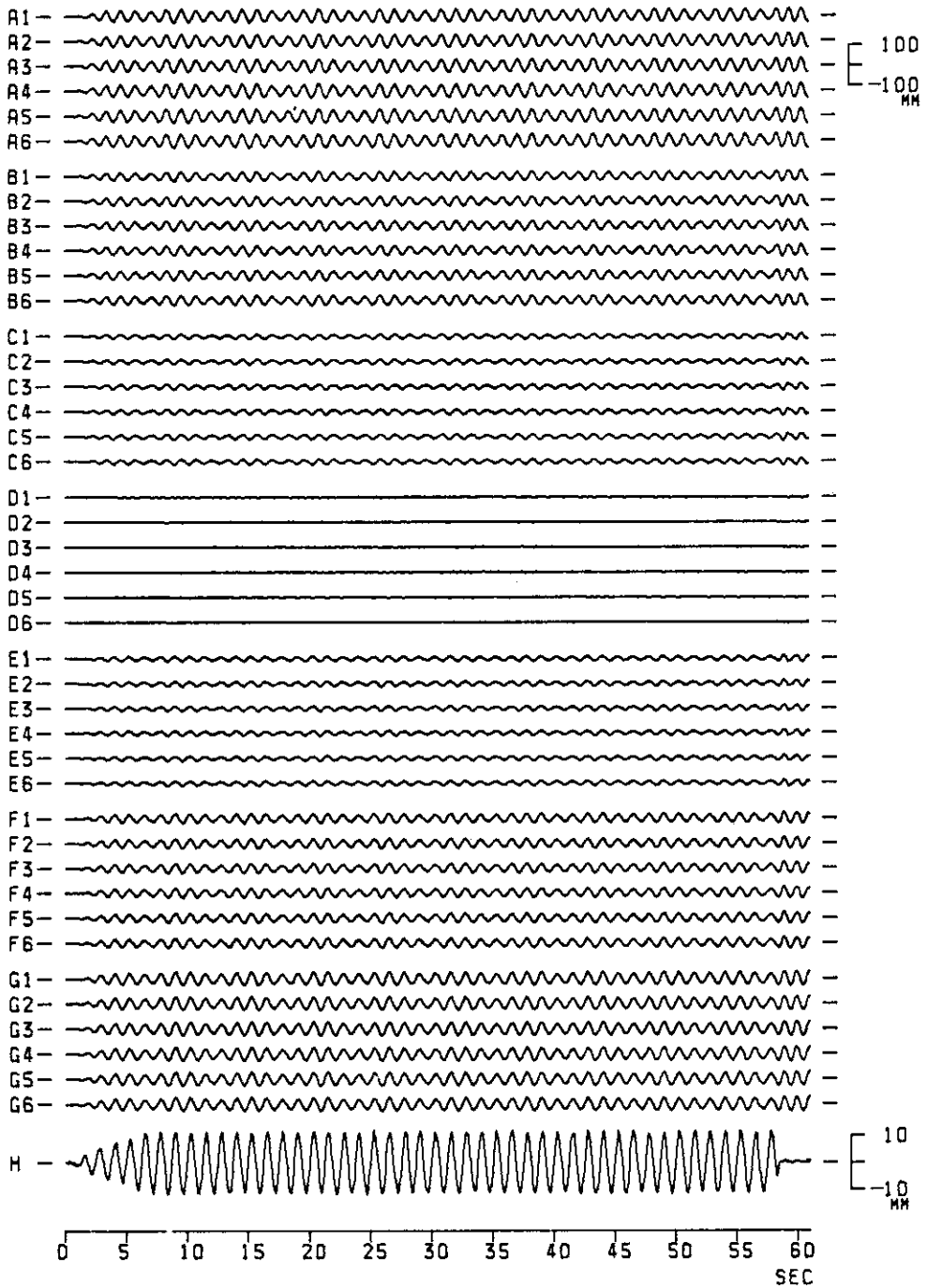


図8 加振1)に対する検出された標識の鉛直変位および水槽変位  
 Fig.8 Detected vertical displacement of targets and oscillation of tank, experiment 1

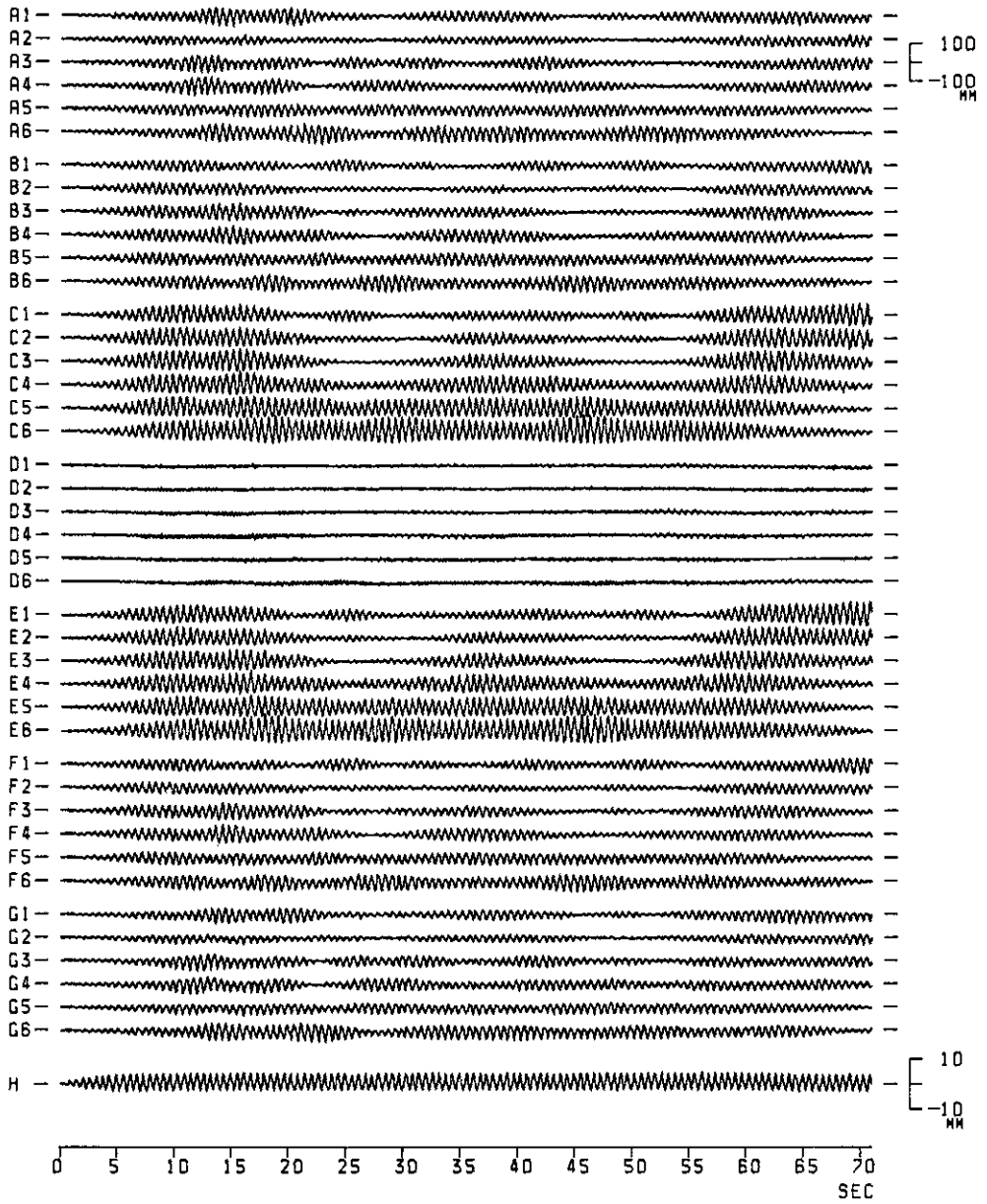


図9 加振Ⅱ)に対する検出された標識の鉛直変位および水槽変位

Fig.9 Detected vertical displacement of targets and oscillation of tank, experiment 2

の変位記録はマニプレータ本体の動的変位量や関節部の残留変位を評価するのに用いられた。

#### 7.4 水槽の振動実験

水槽の振動実験において、水面の鉛直変位を測った。用いた水槽の水平内断面を図7に示

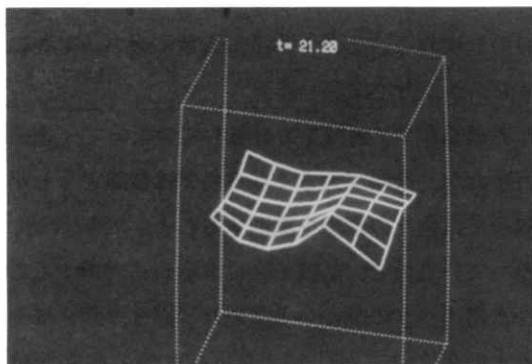


写真5 水面変位のグラフィック表示、動画の一面面

Photo.5 Analyzed motion of water surface

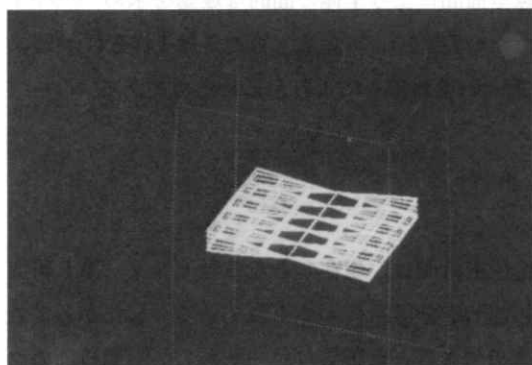


写真6 加振ⅰ)による代表的振動モード

Photo.6 Typical mode of water surface sloshing at experiment 1

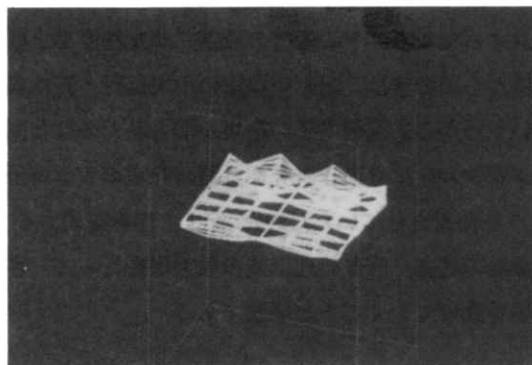


写真7 加振ⅱ)による代表的振動モード

Photo.7 Typical mode of water surface sloshing at experiment 2

す。この水槽に水を60 cmの深さに入れ、水面に図7に示す配置で標識として白い発泡スチロールのボールを浮べた。ボールは鉛直方向のみに動くように中心に糸を通し上下に強く張って水槽に対して固定した(写真4)。

加振は水槽の長辺方向に水平1次元で、次の二つの入力について測定を行った。

- i) 振動数0.8 Hz, 振幅10 mmの正弦波
- ii) 振動数1.7 Hz, 振幅3 mmの正弦波

振動数はそれぞれスロッシング(液面揺動)の1次および2次の共振振動数に近い値である。この場合、標識の動きは2次元なのでTVカメラ1台で撮影した。

この実験では、水面の振幅が小さいうちは各標識がTV画像上で分離していたので、標識の認識と運動の追跡は5.1に述べた方法で行えたが、振幅が大きくなる所では標識どうしが画像上でつながる部分が現れた。そういう場所では個々の標識を識別することができないが、この場合変位はほぼ周期的であることが分かっているので、前後の変位波形から内挿することにより推定した。また、水槽自体の変位を水槽のへりの動きから求めた。図8、図9にそれぞれi)およびii)の加振に対する検出された水面変位(A1~G6)、および水槽の水平変位(H)を示す。

また、検出された標識点の水面変位から線型補間により全体の面的な運動を求め、グラフィックディスプレイ上に投影して動画を作成した(写真5)。写真6、写真7はそれぞれi)およびii)の入力に対する代表的な振動モードを動画の重ね書きにより示したものである。

## 8. おわりに

われわれのTVカメラを用いた3次元動的位置計測は、現在のところ当センター第2研究部耐震実験室で行われている振動実験の変位計測を目的につくられている。したがってこのシステムがそのまま一般の位置計測にも適用できるとは限らない。しかし、画像処理のソフトウェア等システムの一部の変更により、他の種類の位置計測にも応用できるものと思われる。

今回の応用例の振動実験では、供試体に対するTVカメラの位置の設定、測定精度を上げるための標識の工夫などの構造力学的な立場からの考察は、耐震実験室の小川信行、箕輪親宏両主任研究官が担当した。ここに掲げたいくつかの応用例でよい結果が得られたのは共同研究の成果である。また、ビデオ画像のデジタル化には第4研究部計測研究室の大倉博研究員の開発したApple ベーシックコンパイラを使用させていただいた。記して謝意を表す。

今後、ビデオ入力装置等のハードウェア機能の拡充、画像処理機能の強化化を行って、さらに測定精度を上げること、および応用の場を拡げていくことが課題である。

参 考 文 献

- 1) 金沢一男他(1979):半導体センサによる2次元座標検出方式, テレビジョン学会技術報告55-2, 27-32.
- 2) 箕輪親宏(1985):水平, 上下2方向振動台による一層鉄骨フレームの破壊実験, 国立防災科学技術センター研究報告第34号, 59-71.
- 3) 増田隆広他(1984):2台のカメラによる3次元位罫の計測法, 日本機械学会講演論文集No.8, 40-3, 25-27.
- 4) 中根和郎(1976):土石流解析への16mm撮影機の利用, 国立防災科学技術センター研究報告第16号, 83-96.
- 5) D. F. Rogers 他(1976):コンピュータグラフィクス(訳), 日刊工業新聞社.

(1985年4月1日 原稿受理)