

# 画像処理を用いた構造物崩壊過程計測技術に関する研究 -倒壊建物モデルを用いた振動計測実験による計測システムの評価-

藤田 聡<sup>1</sup>, 古屋 治<sup>2</sup>, 新津 靖<sup>3</sup>, 御子柴 正<sup>4</sup>, 山崎寛明<sup>5</sup>

<sup>1</sup>工学博士 東京電機大学教授 工学部機械工学科 (〒101-8456 東京都千代田区神田錦町 2-2)

<sup>2</sup>博士 (工学) 東京都立工業高等専門学校助教授 機械工学科 (〒140-0011 東京都品川区東大井 1-10-40)

<sup>3</sup>工学博士 東京電機大学教授 情報環境学部情報環境デザイン学科 (〒270-1382 千葉県印西市武西学園台 2-1200)

<sup>4</sup>文部科学省防災科学技術研究所総合防災研究部門 (〒305-0006 つくば市天王台 3-1)

<sup>5</sup>東京電機大学大学院工学研究科機械システム工学専攻 (〒101-8456 東京都千代田区神田錦町 2-2)

In order to measure the complicated shapes like a human body or the position and attitude of dynamic object, it is difficult to measure by using measurement method with contact type which has been usually used until now. On the other hand, in the field of medicine and engineering, it is recently desired to develop the system which can handle the measuring object independently on computer by measuring and analyzing quantitatively of three-dimensional shape, position and attitude. In this study, the three-dimensional measurement system using image processing, which can measure the dynamic or static three-dimensional position and attitude of the measuring object without any contact, has been developed. Therefore, the establishment of three-dimensional measurement method suitable for the three-dimensional fracturing test facility in Kobe Pref. will be possible. This study has already carried out some experiments for an evaluation of the fundamental measurement accuracy using multiple cameras, the recognition method of makers on the image processing, the development of software for coordinate transformation from 2D to 3D and so on. In this paper, the dynamic measurement accuracy, the effectiveness of proposed system and the evaluation for practical use, is described from the results of shake table tests in Natl. Res. Inst. for Earth Sci. and Disaster Prevention using collapse building and housing model.

Key Words: Largest shake table, Fracturing process, 3-D measurement method, Non contact measurement

## 1. はじめに

人体のような複雑な形状や建築構造物のような大きな物体の形状計測, もしくは, 動的対象物の位置・姿勢を計測するためには, 従来良く用いられていた接触型計測手法では対応が困難な場合がある。また, 近年, 医学や工学といった分野において, 物体の3次元形状・位置・姿勢をコンピュータ上で定量的に計測・解析し, 独立した物体として扱えるようなシステムが望まれている。

本研究では, 画像処理技術を用いることにより, 計測対象物の大きさや運動の有無に関わらず, その位置, 姿勢を非接触で計測可能な三次元計測手法を研究開発している。これにより, 現在, 建設が行われている大型三次元震動破壊実験施設での大型構造物崩壊現象の計測に適した三次元位置計測技術の確立が可能になる。昨年度までに, 提案する計測手法の基本的計測性能に関しては, 実験を実施し検証している<sup>1) 2)</sup>。本報では, 今年度, 防災科学技術研究所にて実施した鉄骨造倒壊モデルおよび木造戸建住宅を用いた振動計測実験に関して, その結果を示し, 動的計測精度や有効性, および実用化に向けた評価について述べる。

## 2. 計測手法

### 2. 1 計測手法の概要

本研究で提案する計測手法は, モーションキャプチャ技術に代表されるステレオ法を基礎とした画像処理による非接触型三次元計測システムである。当該研究の計測システムにおける研究開発指

針は, 次のようなものである。

- 1) 大規模構造物での振動変位計測
- 2) 三次元計測
- 3) 非接触計測
- 4) cmオーダーの計測精度
- 5) 特殊な実験環境が不要
- 6) 200Hz 程度のサンプリングで 60 秒以上の計測が可能

本手法は, 基本的に計測対象となる実験モデルに複数のマーカー (特徴点) を設置し, 複数台のカメラで計測する。得られたカメラ画像データより, 特徴点を画像処理により認識し, 構造物の崩壊過程解明において不可欠な変位計測を行うものである。本手法は, 計測対象にマーカーを設置するだけという非常に簡便なものであるにも関わらず, 計測対象の複雑な振動挙動を三次元的かつ高精度に計測可能なシステムである。

### 2. 2 計測原理

本手法は, 計測対象の3次元の振動変位をカメラ画像上で得られる特徴点の2次元位置情報より求める。このため, 二次元のカメラ画像座標系から三次元の物体座標系への座標変換が必要となる。この座標変換を行う上で, カメラパラメータ<sup>3) 4)</sup>と呼ばれる変換行列を用いて処理を実施する。基本的に, 任意のカメラ方向, カメラ位置より計測対象を計測する場合の画像は, 三次元アフィン変換を用いて表現可能である。

一台のカメラを用いて計測する場合, 物体の座標系 $(x, y, z)$ とカメラ画像座標系 $(X_c, Y_c)$ との関係は, 移動と回転を含むアフィン変換式, および透視変換式をそれぞれ斉次座標表示した式を用いて次式

のように求まる。

$$[HcXc, HcYc, 1] = [x, y, z, 1] \begin{bmatrix} C_{11} & C_{21} & C_{31} \\ C_{12} & C_{22} & C_{32} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} \end{bmatrix} \quad (1)$$

上式右辺の C 行列がカメラパラメータと呼ばれる座標変換マトリクスである。また、上式より  $Hc$  を消去すると、次の 2 式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} C_{11}x + C_{12}y + C_{13}z + C_{14} - C_{31}xXc \\ - C_{32}yXc - C_{33}zXc = C_{34}Xc \\ C_{21}x + C_{22}y + C_{23}z + C_{24} - C_{31}xYc \\ - C_{32}yYc - C_{33}zYc = C_{34}Yc \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

このように、1つのマーカーに対して 2 式が成り立つため、6 点以上のマーカーが計測対象に設置されていれば、12 個の未知数で構成される (1) 式右辺のカメラパラメータを基本的に決定することができる。一般に、6 個以上の  $n$  点のマーカーに対して次式が成り立つ。

$$AC = R \quad (3)$$

ここで、

$$A = [A_1 \ A_2 \ A_3]$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ \vdots \\ C_{32} \\ C_{33} \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} Xc_1 \\ Yc_1 \\ \vdots \\ Xc_n \\ Yc_n \end{bmatrix}$$

ただし、

$$A_1 = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix},$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} -x_1Xc_1 & -y_1Xc_1 & -z_1Xc_1 \\ -x_1Yc_1 & -y_1Yc_1 & -z_1Yc_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -x_nXc_n & -y_nXc_n & -z_nXc_n \\ -x_nYc_n & -y_nYc_n & -z_nYc_n \end{bmatrix}$$

最終的に最小二乗法を用いて、次式の関係より

カメラパラメータを決定する。

$$A^T AC = A^T R \quad (3)$$

計測中に、カメラ位置、方向を変化させない限り、(3)式により得られるカメラパラメータで座標変換を行うことが可能となる。

実際の計測では、1点のマーカーを複数台のカメラで計測し、計測精度等の向上をはかる必要がある。このような  $n$  台のカメラを用いて計測する場合、 $n$  番目のカメラパラメータを  $C^n$  とすると、 $n$  台のカメラを用いた任意のマーカーの座標変換式は、次式ようになる。

$$\begin{bmatrix} C_{11}^1 - C_{31}^1 Xc_{11}^1 & C_{12}^1 - C_{32}^1 Xc_{11}^1 & C_{13}^1 - C_{33}^1 Xc_{11}^1 \\ C_{21}^1 - C_{31}^1 Yc_{11}^1 & C_{22}^1 - C_{32}^1 Yc_{11}^1 & C_{23}^1 - C_{33}^1 Yc_{11}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{11}^n - C_{31}^n Xc_{11}^n & C_{12}^n - C_{32}^n Xc_{11}^n & C_{13}^n - C_{33}^n Xc_{11}^n \\ C_{21}^n - C_{31}^n Yc_{11}^n & C_{22}^n - C_{32}^n Yc_{11}^n & C_{23}^n - C_{33}^n Yc_{11}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Xc_{11}^1 - C_{14}^1 \\ Yc_{11}^1 - C_{24}^1 \\ \vdots \\ Xc_{n1}^n - C_{14}^n \\ Yc_{n1}^n - C_{24}^n \end{bmatrix} \quad (4)$$

上式の  $x, y, z$  を求めることにより、2次元の画像座標から計測対象の 3次元座標が得られる。

### 3. 三次元振動変位計測システム

#### 3.1 計測用 CCD カメラ

図 1 は、実験に用いた計測用 CCD カメラである。基本仕様を表 1 に示す。本カメラは、毎秒 100, 200

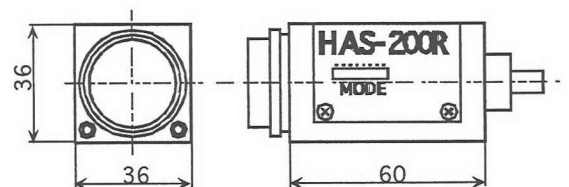
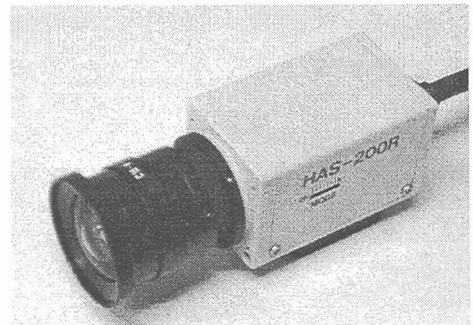


図 1 実験に用いた CCD カメラ

フレーム、ハーフサイズで毎秒 400 フレームの高速撮影が可能である。分解能は、504（水平）× 242（鉛直）である。また、小形軽量サイズのため、どのような場所にも容易に取り付けることが可能である。

表 1 実験に用いたカメラの基本仕様

|         |                           |
|---------|---------------------------|
| 撮影方式    | 専用固体イメージセンサ               |
| 分解能     | 504(H)×242(V)             |
| 撮影速度    | 200FPS(full)/400FPS(half) |
| 有効検出面積  | 約4.9mm(H)×3.69mm (V)      |
| セル駆動CLK | 31.815MHz                 |
| 最低被写体照度 | 10lux                     |
| S/N比    | 45dB以上                    |

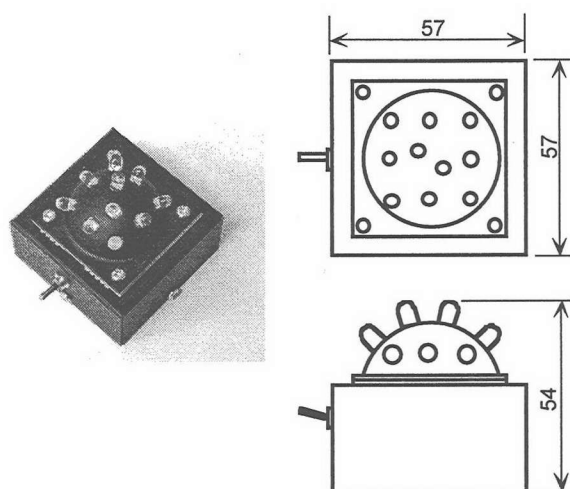


図 2 マーカー（特徴点）

### 3. 2 マーカー

本実験で使用したマーカーを図 2 に示す。本マーカーは、図のように本体上部に赤色 LED を 10 個配置し、内蔵した 9[V]電池を電源として発光するものである。構造的にコードレスとなるため、任意の位置に配線を考慮することなく設置することが可能であり、大型の試験対象が大変形するような場合には極めて有効である。また、周囲の LED を傾けた配置にすることで、実験中に計測対象がある程度傾きを持った場合でも画像上でのマーカー認識が可能になるよう設計されている。

## 4. 振動計測実験

本報では、2つの振動計測実験を実施している。一つは、鉄骨造倒壊モデルを用いた振動計測実験、もう一つは戸建住宅を用いた倒壊計測実験である。

### 4. 1 鉄骨造倒壊モデルを用いた計測実験

#### 4. 1. 1 計測対象

図 3 は、振動計測実験に用いた倒壊モデルである。総重量約 10,800[kgf]、幅 4.2[m]×奥行き 4.2[m]×高さ 5.0 [m]の鉄骨造である。本モデルは、大きく質量部、脚部、および着座台から構成されている。質量部と脚部および基礎部は、ユニバーサルジョイントでそれぞれ結合されている。実験時のモデルの挙動は、次のようにわけることができる。

- 1) 静止時：質量部は、質量部下部に設けられた支持板と、モデル中央に立ち上がる球面支持部の球面を任意の荷重で支持板に押しつけることで支持されている。
- 2) 小入力振動実験時：球面と支持板間の摩擦力

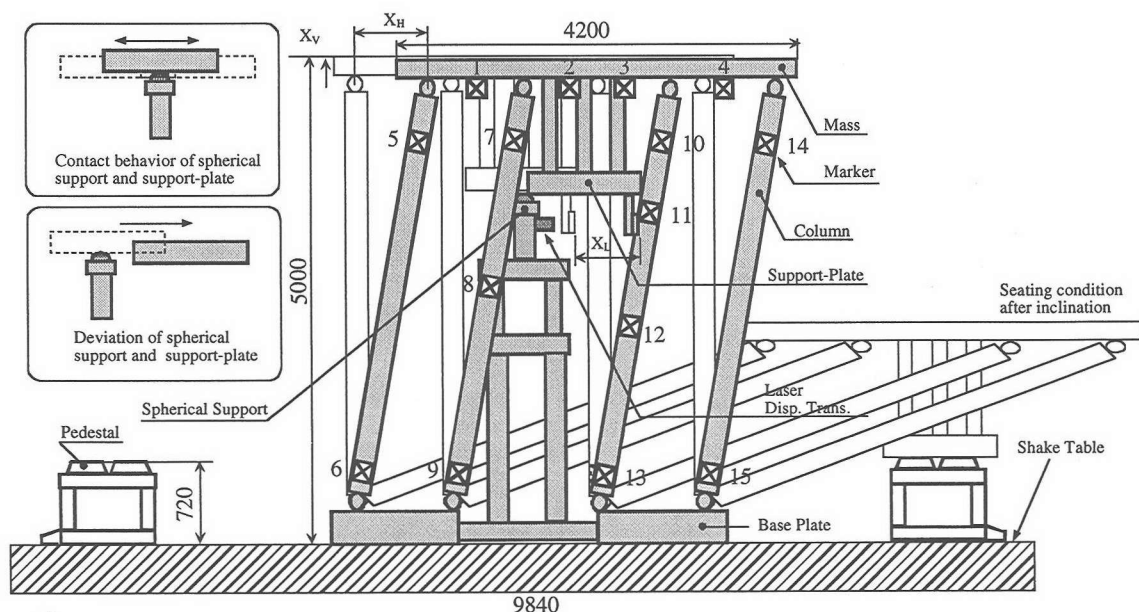


図 3 倒壊モデル

により、質量部は滑らず、基礎部との相対変形運動は無い。

- 3) 中入力振動実験時：球面と支持板間の摩擦力よりも質量部の慣性力が大きくなり、球面支持部上を支持板が滑る。これにより、質量部は、基礎部との相対変形運動を生じる。ただし、質量の変位は、支持板と球面支持とが接触運動する範囲内である。
- 4) 大入力振動実験時：球面支持部上を支持板が滑り、基礎部との相対変形運動を生じる。さらに、質量の変位は、支持板と球面支持とが接触運動する範囲を超え、支持板が球面支持部から離れる。これにより、モデルは、支持力を無くし、着座台に支持板が着座するまで大きく傾く。

本モデルは、基本的に複数回の倒壊実験が可能のように設計されている。なお、今回の実験では3)までの運動を対象とし、4)に関しては実施しなかった。

#### 4. 1. 2 計測および実験方法

実験供試体へのマーカーの設置状況は、図4に示すように、正面に15点、右側面に8点、左側面に8点、振動台テーブルに6点の合計37点を設置した。なお、マーカーの物体座標系における三次元物体座標は空間測器を用いてあらかじめ測定した。図5は、実験時の計測対象と計測用カメラの位置関係を示したものである。図が示すように、3台1ユニットとした高速度 CCD カメラを合計6台使い、計測対象に対して右および左斜めに1ユニットずつ配置した。カメラは、高さ1.65[m]、物体座標原点からの直線距離にして11[m]~16[m]程度の位置に配置されている。なお、計測時には、照明および自然光の影響を低減させることを目的として、カメラレンズに赤外線フィルターを設置した。

入力波は、正弦波とし、実験供試体の加振状態

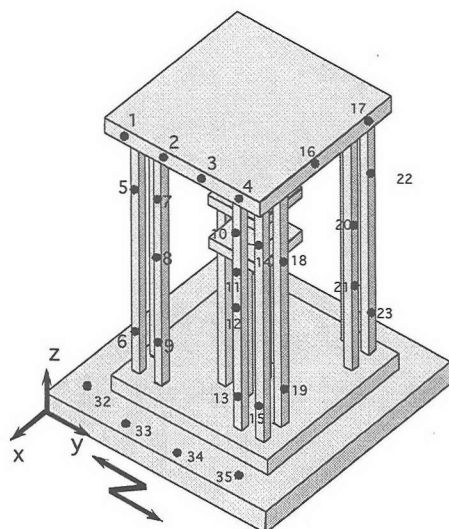


図4 マーカーの設置状況

が、2) および3) になるような入力レベルを選択して加振した。

#### 4. 1. 3 振動計測実験結果

図6、7は、振動計測実験結果の一例である。図6は、先の加振状態2)にあたる、加振周波数0.1[Hz]、加振振幅200[mm]の正弦波加振実験結果、図7は、先の加振状態3)にあたる、加振周波数1.0[Hz]、30[Gal]の正弦波加振実験結果である。図は、左列がレーザー変位計での測定結果を各マーカー設置位置にあわせて算出した結果

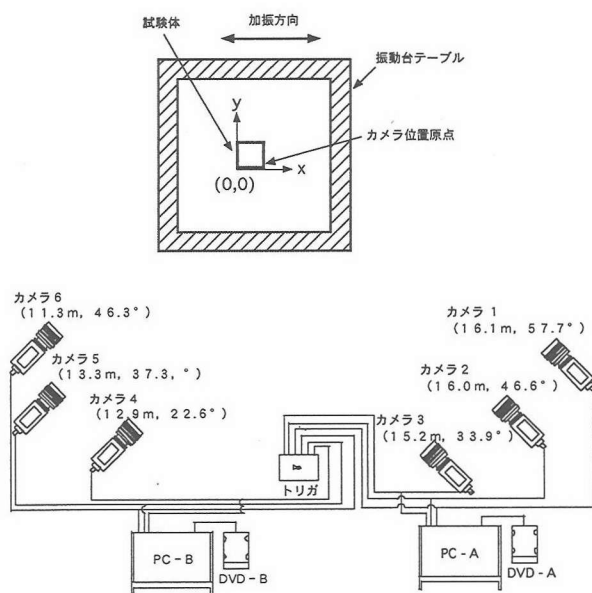


図5 試検体と計測カメラの位置関係

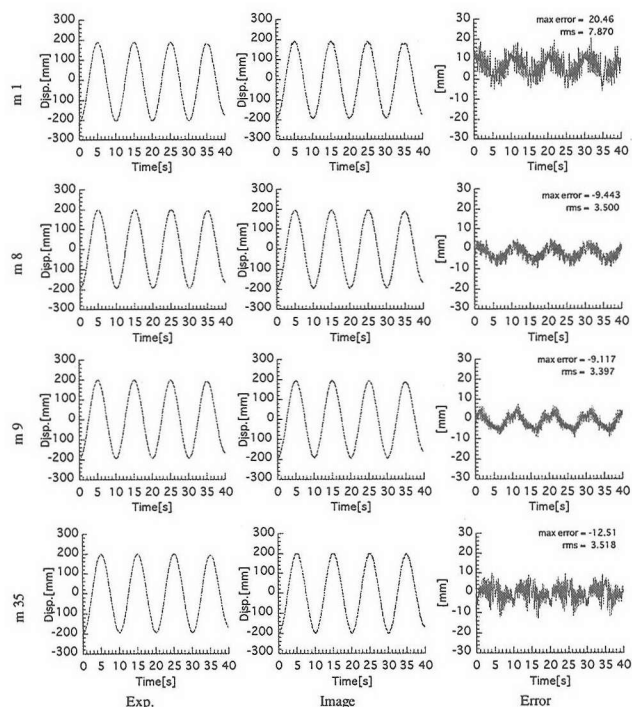


図6 計測結果比較 (0.1 Hz, 200 mm, 右 Unit)

(Exp.), 中列が二次元画像座標から物体座標系の三次元座標に変換した画像計測結果 (Image), 右列がレーザー変位計計測と画像計測との差 (Error) であり, 実験計測中での両計測の誤差を示したものである。また, 図は, 上から質量部, 脚部上部, 脚部中部, 振動台テーブルの計測結果である。各計測値は, 振動台テーブル変位を含んだ絶対変位を示したものである。なお, データのサンプリングは100Hzである。

結果が示すように, 画像計測結果とレーザー変位計計測結果での波形は, 非常に良好な一致が得られていることが視覚的にわかる。特に, 実験 B の結果で示されているように, 質量部が大きく変形するような挙動に関しても精度良くその動的位  
置情報が得られることを示している。また, 破壊実験時に重要になると考えられる計測最大値での両計測結果の比較を表2に示す。表が示すように, 最大値に関しては, 質量部がドリフトする実験 B の脚部および振動台テーブルにおいて, 35%程度の計測誤差を示しものの, 他の計測結果では数%程度の計測誤差となり, 本計測システムが非常に高い計測精度を有していると評価できる。計測時間中の計測誤差を, 表3にまとめる。変位計測と画像計測との差の時刻歴波形に着目すると, 最大計測誤差は, 計測距離が16m程度離れている状況において, 最大二十数mmになるが, rms値で評価した場合, 数mmの誤差で計測できていることが示されている。

次に, 表3は, 側面側にあるマーカーについての計測結果についても示しているが, 結果より, 実験 B において若干計測精度が低下するものの,

基本的には, 計測精度に大きな差を生じず, 位置情報を計測する上では, 十分な精度で計測できると考えられる。

計測誤差に関しては, カメラパラメータに使用する特徴点の選択方法, カメラ配置方法, 計測対象とマーカーの大きさの関係, などの問題が複合した形で現れているものであり, 計測精度の向上に関しては, 現在も検討中である。しかしながら, 基本的に, このような大型の計測対象が, 大変形を生じるような実験においても数[mm]の計測誤差で, その位置情報を計測できることを確認し, 三次元震動破壊実験施設において十分使用可能な計測システムであると考えられる。

表2 計測最大値の比較

| 入力波                             | 計測位置       | 最大値<br>(変位計)<br>[mm] | 最大値<br>(画像)<br>[mm] | 誤差<br>[mm] | 誤差率<br>[%] |
|---------------------------------|------------|----------------------|---------------------|------------|------------|
| 正弦波<br>0.1Hz<br>200mm<br>(実験 A) | 質量部<br>m1  | 194.6                | 199.7               | 5.1        | 2.6        |
|                                 | 脚部<br>m8   | 196.1                | 193.9               | 2.2        | 1.1        |
|                                 | 脚部<br>m9   | 200.7                | 194.1               | 6.6        | 3.4        |
|                                 | 振動台<br>m35 | 196.8                | 199.2               | 2.4        | 1.2        |
| 正弦波<br>1Hz<br>30gal<br>(実験 B)   | 質量部<br>m1  | 167.6                | 168.9               | 1.3        | 0.70       |
|                                 | 脚部<br>m8   | 103.5                | 97.3                | 6.2        | 6.4        |
|                                 | 脚部<br>m9   | 19.6                 | 14.4                | 5.2        | 36.1       |
|                                 | 振動台<br>m35 | 15.4                 | 11.5                | 3.9        | 33.9       |

表3 特徴点の位置に関する計測精度の比較

| 入力波                   | 計測面 | 計測位置     | 最大誤差<br>[mm] | rms<br>[mm] |
|-----------------------|-----|----------|--------------|-------------|
| 正弦波<br>0.1Hz<br>200mm | 正面  | 質量部(m1)  | 20.5         | 7.8         |
|                       |     | 脚部(m8)   | 9.4          | 3.5         |
|                       |     | 脚部(m9)   | 9.1          | 3.4         |
|                       |     | 振動台(m35) | 12.5         | 3.5         |
|                       | 側面  | 脚部下(m19) | 15.9         | 5.9         |
| 正弦波<br>1Hz<br>30gal   | 正面  | 脚部下(m20) | 15.8         | 6.4         |
|                       |     | 質量部(m1)  | 12.8         | 3.6         |
|                       |     | 脚部(m8)   | 7.1          | 2.4         |
|                       | 側面  | 脚部(m9)   | 5.6          | 1.9         |
|                       |     | 振動台(m35) | 6.6          | 2.9         |
|                       | 側面  | 脚部下(m19) | 23.5         | 9.4         |
|                       |     | 脚部下(m20) | 8.5          | 4.0         |

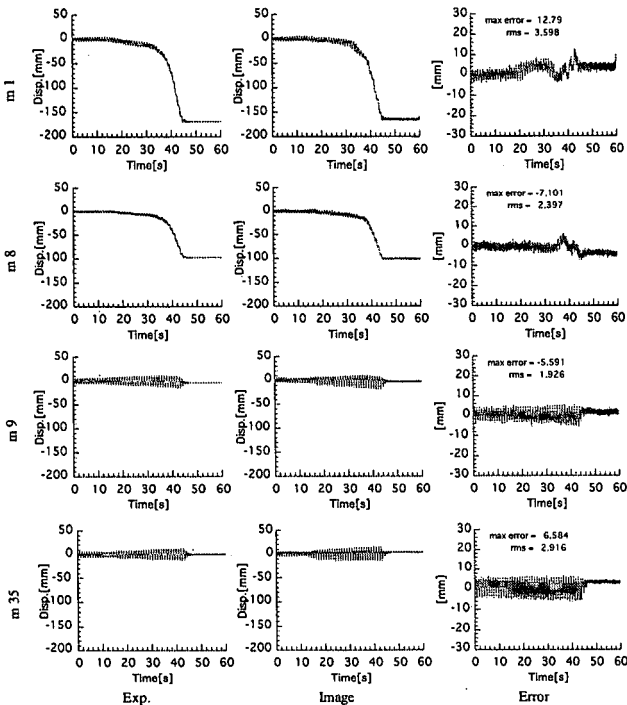


図7 計測結果比較 (1.0 Hz, 30Gal, 右 Unit)

4. 2 木造戸建住宅モデルを用いた計測実験

4. 2. 1 計測および実験方法

図8は, 計測対象とした木造戸建住宅である。形状は, 幅 6[m]×奥行き 6[m]×高さ 7.6[m]である。本実験では, 特徴点を計測対象に正面に 31 点, 左側面に 9 点, 右側面に 10 点, 振動台テーブ

ルに4点、合計54点設置した。

図9は、計測対象と計測用カメラの位置関係を示したものである。本実験では、3台1ユニットとした高速度 CCD カメラを、1階に1ユニット、振動台制御室2階に1ユニット配置した。カメラと試験対象原点とは、1階で12~15[m]、2階で17~18[m]となった。

入力波は、JMS 神戸 NS 波 90Kine である。

#### 4. 2. 2 振動計測実験結果

図10は、木造戸建住宅倒壊実験を計測した結果である。結果は、2階の2つの窓枠に着目してまとめ、対象としたマーカーは、左窓枠の11、13番、右窓枠の18、21番、および右窓枠の右側壁面の23、24、28番の合計7点である。結果が示すように、計測したマーカーの軌跡より、戸建住宅の倒壊する状況が良く計測できている。1階部の倒壊に伴い、2階部が1階部を押しつぶした際に生じた2階部のバウンドを画像計測結果は、詳細にとらえている。今回の実験では、倒壊後のマーカー位置を正確に計測できなかったため、計測精度の検証は困難であるが、結果より、1階および2階から計測した各マーカーの軌跡にほとんど計測差がないことから、これまでの実験同様、良好な精度で計測できていると考えられる。

#### 5. おわりに

本研究では、大型三次元震動破壊実験施設での使用を前提として、モーションキャプチャ技術に代表される画像処置を用いた非接触三次元計測手法を検討している。本報では、鉄骨造倒壊モデルおよび木造戸建住宅モデルを用いた振動実験より、本研究で提案する画像処理を用いた計測手法の動的計測精度や有効性、実用化に対する評価等について検討した。

結果として、基本的には、計測対象を含む実験空間での3次元位置を数 mm、少なくとも数 cm 程度の誤差で計測可能であることを確認した。これにより、本研究で提案する計測手法は、大型三次元震動破壊実験施設に十分適した手法であると考えられる。

今後は、さらなる精度向上を目的として、カメラ配置パターンの検討、カメラパラメータ用特徴点の選択方法、特徴点の計測データの補完などに関する計測システムの高度化を検討する。また、計測した値からリアルタイムで物体座標を算出し、3Dグラフィックスで表示するシステムの構築に関しても進めていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 藤田聡, 他5名, 「大規模破壊実験における計測・処理手法の高度化」, 第1回 構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.65-70, 2000.

- 2) 藤田聡, 他5名, 「大規模破壊実験における計測・処理手法の高度化」, 第2回 構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.77-82, 2001.
- 3) 谷口慶治, 画像処理工学, 共立出版, 1996.
- 4) 井口征二: 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.

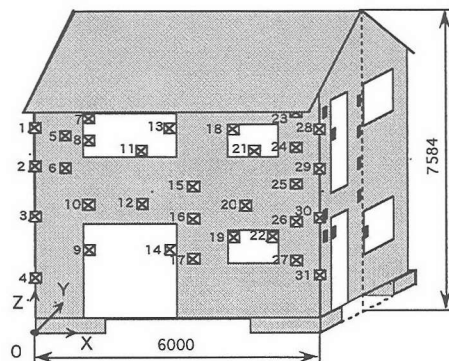


図8 計測対象の木造戸建住宅

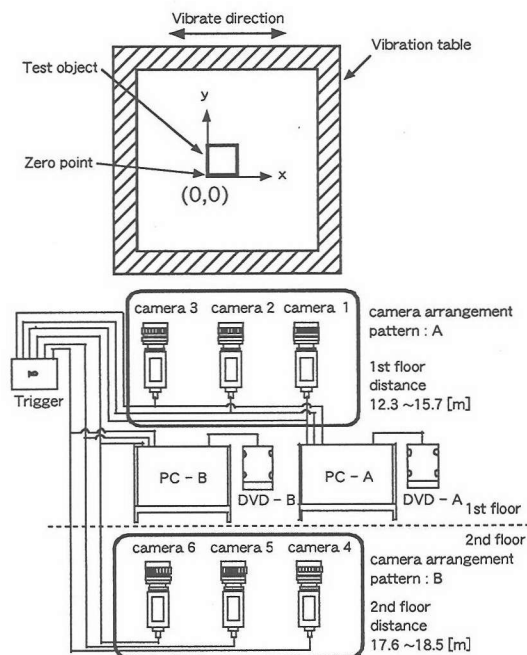


図9 試験体と計測カメラの位置関係

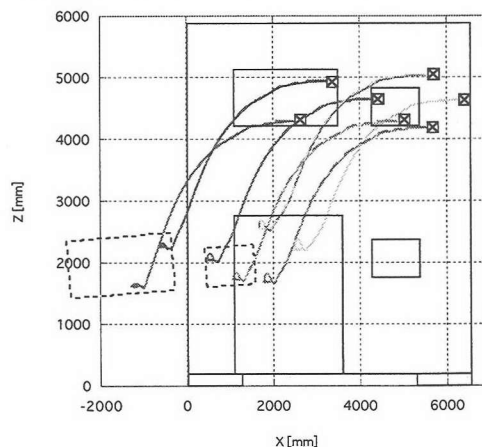


図10 戸建住宅計測実験結果例