

# 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>, 中野 大輔<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工学専攻 (〒101-8456 東京都千代田区神田錦町 2-2)

This study has been examined about a 3-dimensional measurement method suitable for shake table tests, and has proposed the measurement system using image processing. Although this measurement system is based on a simple theory of measurement, it is a very convenient system which only requires to install the markers on the object structure and it can be considered as the most suitable measurement system to evaluate the complex 3-dimensional behavior of the object structure. Fundamental hardware and software in measurement system has been constructed. Moreover, the fundamental dynamic measurement accuracy and effectiveness of the system has been confirmed from the several shake table tests. This paper describes the dynamic measurement accuracy, the effectiveness of the proposed system and the evaluation for practical use from the results of shake table tests.

**Keywords:** 3-dimensional measurement, Dynamic displacement, Image processing, Fracturing process, Shake table test,

### 1. はじめに

近年、我が国における耐震技術の高度化への要求から、従来の小型建物モデルではなく、実大規模建物モデルを用いた地震時終局挙動の解明が注目されている。しかし、このような計測においては今まで良く用いられてきた接触型計測手法では困難である。このため、非接触かつ大変位の計測を可能とする計測システムが望まれている。

本研究では、光学式モーションキャプチャを応用した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。これまでに、計測手法の基本的な計測精度、マーカ認識・カメラパラメータを用いた座標変換に関するソフトの開発、複数カメラを模擬した計測による計測精度などについて実験を実施している<sup>1) 2) 3)</sup>。

本報では、繰り返し倒壊可能な振り子モデルを用いた振動計測実験より、当該計測システムの基本的な動的計測精度や有効性ととも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(特徴点)を設置し、2台以上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、特徴点のカメラ画像上で得られる2次元位置情報をカメラパラメータと呼ばれる座標変換行列を用いて3次元の振動変位として算出している。カメラパラメータ<sup>4) 5)</sup>はカメラの位置、姿勢、画角などのカメラに関するすべての情報が含まれたパラメータで、物体座標系とカメラ画像系を関連付けることによって算出することができる。図1に示す物体座標系の点 $p(x, y, z)$ とカメラ座標系の点 $P(X_c, Y_c, Z_c)$ は、アフィン変換式及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関連付けることができる。

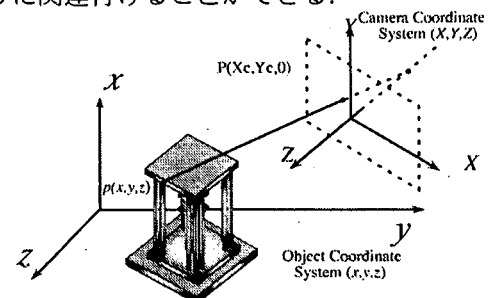


Fig. 1 Relation of object coordinate system and camera Coordinate system

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

$H_c$ 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つのマーカに対して2式が成り立つため、6点以上のマーカ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点のマーカに対して次式が成り立つ。

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

ここで、

$$A = [A_1 \quad A_2 \quad A_3], \quad C = \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ \vdots \\ C_{32} \\ C_{33} \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} Xc_1 \\ Yc_1 \\ \vdots \\ Xc_n \\ Yc_n \end{bmatrix}$$

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。

$$C = (A^T A)^{-1} A^T R \quad (4)$$

計測中に、カメラ位置、方向を変化させない限り、(4)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。理論上1点のマーカを最低2台のカメラで計測する必要がある。一般的には計測精度等の向上、マーカ隠蔽の防止か

ら複数台用いることが多い。このように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。

$$\begin{bmatrix} C_{11}^1 - C_{31}^1 Xc_{11}^1 & C_{12}^1 - C_{32}^1 Xc_{11}^1 & C_{13}^1 - C_{33}^1 Xc_{11}^1 \\ C_{21}^1 - C_{31}^1 Yc_{11}^1 & C_{22}^1 - C_{32}^1 Yc_{11}^1 & C_{23}^1 - C_{33}^1 Yc_{11}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{11}^n - C_{31}^n Xc_{11}^n & C_{12}^n - C_{32}^n Xc_{11}^n & C_{13}^n - C_{33}^n Xc_{11}^n \\ C_{11}^n - C_{31}^n Yc_{11}^n & C_{12}^n - C_{32}^n Yc_{11}^n & C_{13}^n - C_{33}^n Yc_{11}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Xc_{11}^1 - C_{14}^1 \\ Yc_{11}^1 - C_{24}^1 \\ \vdots \\ Xc_{n1}^n - C_{14}^n \\ Yc_{n1}^n - C_{24}^n \end{bmatrix} \quad (5)$$

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 マーカ認識方法

本計測手法では、任意のしきい値を用いてカメラ画面上からマーカ部分の画素を抽出し、それらの輝度を重さとして考え、その重心を求めることでその中心位置を算出している。この場合、輝度の微妙な変化も変位として認識できるため、サブピクセルの精度を持たすことができる。

#### 3.2 検証実験内容及び結果

これまでの計測実験の傾向では、サブピクセル範囲の精度はマーカを認識する画素数に大きく影響されることが確認されていることから、本計測手法を用いた場合における最適マーカ認識数を調べる実験を行った。実験は高速度CCDカメラ1台を用いて行い、カメラから正面にむかって15m離れた状態で、マーカをカメラ画面上のx方向に0.143(pixel/frame)の速さで等速駆動させ、マーカ

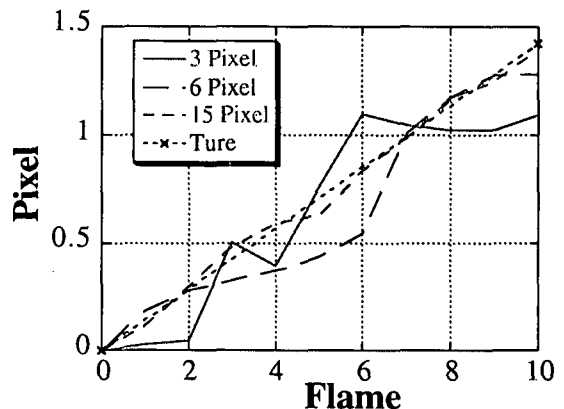


Fig. 2 Accuracy experiment result

の追従の様子を調べた。ここでカメラレンズの F 値を変えることで、認識する画素数を約 3 画素 6 画素,15 画素に変化させた。またマーカ認識時におけるしきい値を 75 とする。実験の結果を図 2 に示す。マーカ認識が 3, 6 画素時に比べて、15 画素認識時の結果はほぼ等速に近い追従を示している。これはマーカの変位時における輝度の変化が各画素において異なるため、重心法で中心位置を求める場合、ある程度の画素を認識することで輝度の変化が平均化し、良好な結果が得られたものと考えられる。

### 3. 3 マーカ

今回、上述のような実験結果、およびこれまでの振動実験結果より計測で使用するマーカを改良した。現在、計測実験を実施している防災科学技術研究所振動台での計測時ではマーカとカメラは約 15m 程度の距離を持つが、この場合、使用するカメラの画面上において縦方向 40 (mm / Pixel), 横方向 20 (mm / Pixel) 以上の分解能となる。また LED の強い光の指向性から、カメラ画面上に射影されるマーカの面積部分に集中して輝度を放つ。そこで新型マーカは計測半球状のケースの直径を従来の 38mm から 70mm に変更し、装備する LED の数を 17 個に増やした。電源には 6V リチウム電池を用いて約 90 分の発光が可能である。また電源の ON,OFF はリモコンスイッチで行い、作業の効率化を図った。

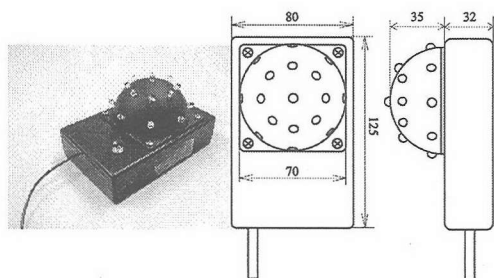


Fig. 3 LED maker used for the test (New type)

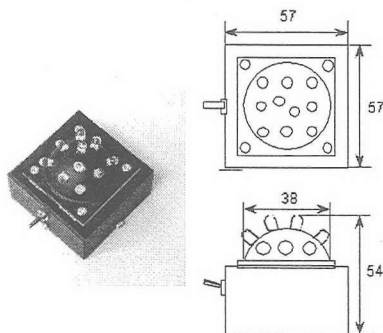
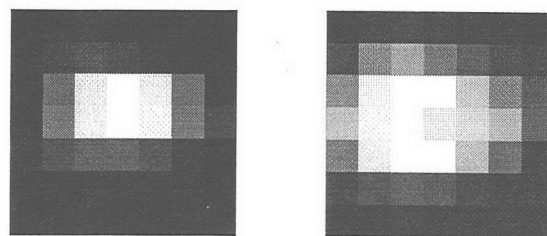
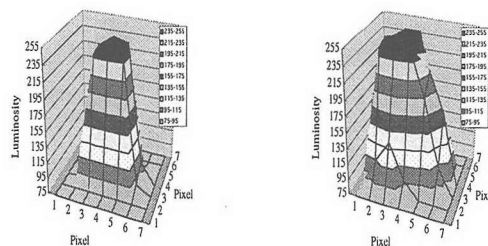


Fig. 4 LED maker used for the test (Old type)



Old Maker  
New Maker  
Fig. 5 LED maker on Image



Old Maker  
New Maker

Fig. 6 Luminescence characteristic of makers

また、それぞれマーカのカメラ画面上における輝度分布を図 5, 図 6 に示す。新型マーカが旧型マーカに比べて広い範囲で輝度が存在していることが確認できる。

### 3. 1 計測用 CCD カメラ

図 7 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 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) × 241 (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。

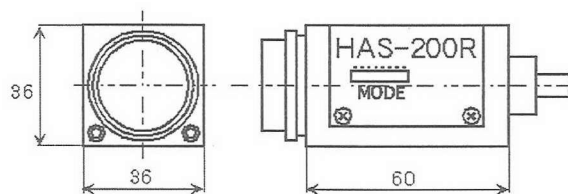


Fig. 7 High speed CCD camera used for the test

Table 1 CCD camera spec

撮影方式	専用固体イメージセンサ
分解能	504(H)×241(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

#### 4. 鉄骨造倒壊モデルを用いた計測実験

##### 4.1 計測対象

図8は、振動計測実験に用いた幅0.7[m]×奥行き0.7[m]×高さ1.8[m]の鉄骨造倒壊モデルである。本モデルは1層部(32kg)、2層部(21kg)から成り、各固有振動数は1次0.7Hz、2次1.5Hzである。各層は鋼棒で支持され、大入力振動実験時には鋼棒の降伏点を超え、徐々にモデルが倒壊する仕組みとなっている。また、倒壊モデルの周囲に倒立振子の挙動を示すポールを8台設置した。高さは0.6~1.0m、固有振動数は0.6~0.9Hzである。

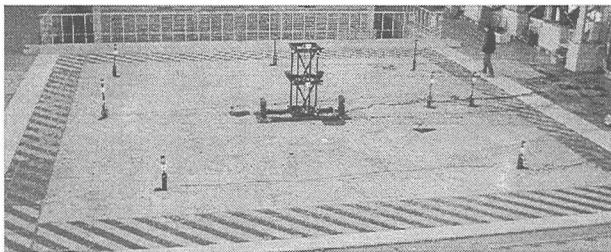


Fig. 8 Collapse model used for the shake table test

##### 4.2 計測および実験方法

実験供試体へのマーカの設置状況は、試験体に7点、各ポールに1点ずつ、振動台テーブルに2点の合計17点である。なお、マーカ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9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、高速度CCDカメラ3台を1ユニットとして、計測対象に対して振動台実験施設1階右側及び2階左側、また2階中心部に1ユニットずつ合計3ユニット配置した。カメラは、1階に1.4[m]、2階に6[m]の高さで設置され、物体座標原点からの直線距離は、11[m]~18[m]程度である。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。また、試験体の各層間及びポールの回転軸部分に回転角度計を設置し、時刻歴で求まる角度から幾何学的に各変位を算出し、画像計測結果との比較を行った。今回の実験では、この回転角度計により得られた計測結果を画像計測結果に対する正解値として使用し、回転角度計計測結果と画像計測結果の差を計測誤差とした。

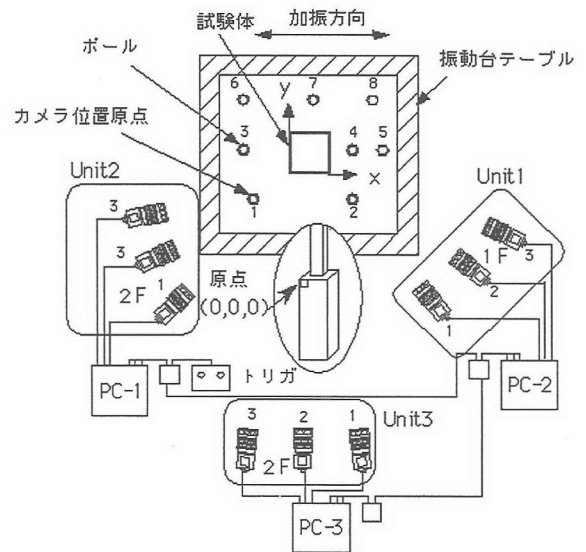


Fig. 9 Instrumental layout for The measurement system

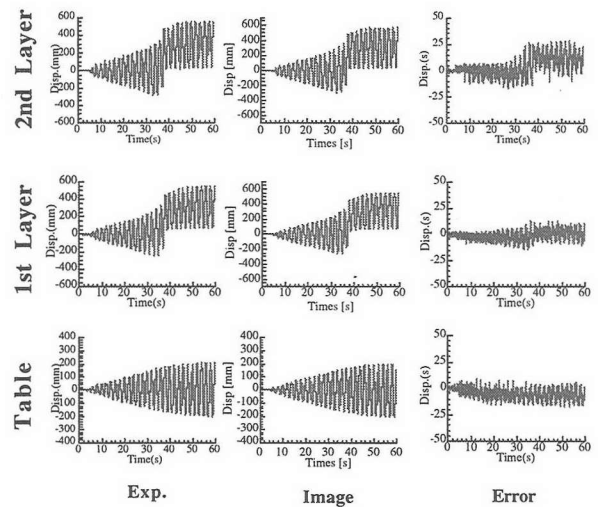


Fig. 10 Measurement result of structure model (Sinusoidal wave 0.5Hz 50gal)

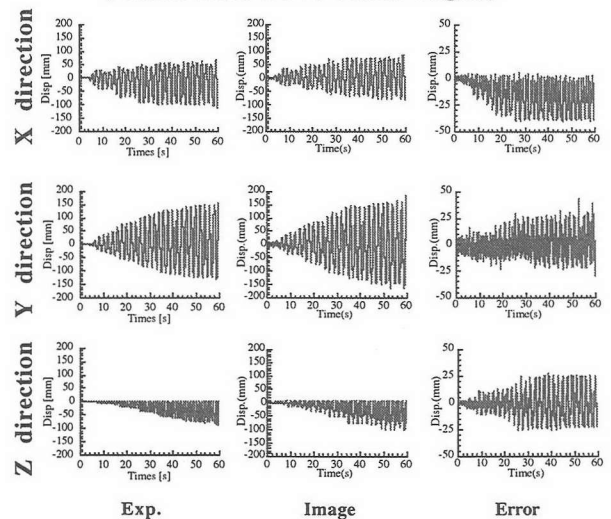


Fig. 11 Measurement result of pole (Sinusoidal wave 0.5Hz 50gal)

### 4.3 振動計測実験結果

図 10 は、定常波 0.5Hz(50gal), 図 12 は Hachinohe EW (400gal)で行った加振実験結果である。図において、左列が回転角度計のデータをもとに算出された計測結果 (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), 右列が角度計を用いた計測結果を正值とした場合の画像計測結果との差 (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、上から 2 層部, 1 層部, 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。図 11, 13 は x 軸に対して 30 度傾けて設置したボールの x,y,z 方向の計測結果である。なお、計測結果は図 9 における Unit3 のカメラ配置で計測したデータであり、データのサンプリング

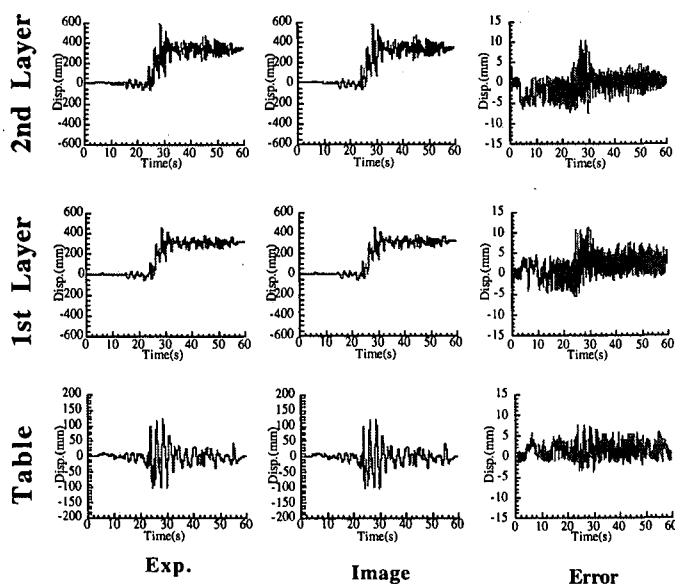


Fig. 12 Measurement result (Hachinohe EW 400gal)

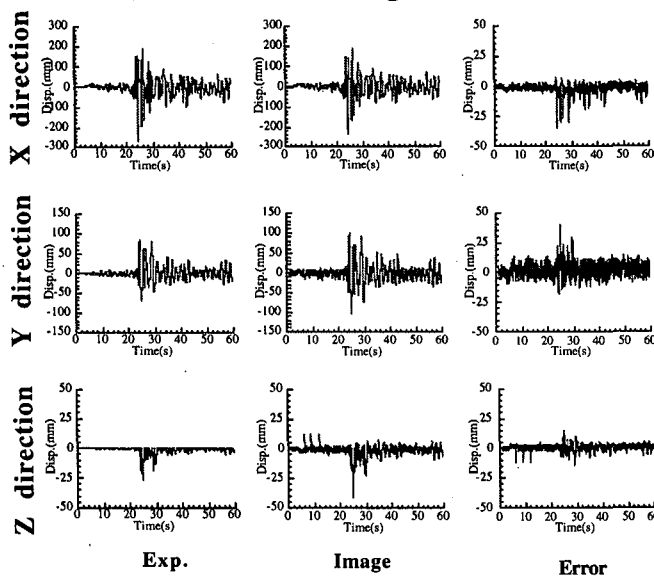


Fig. 13 Measurement result (Constant wave 0.5Hz 50gal)

は 100Hz である。

結果が示すように、画像計測結果と回転角度計を用いた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。いずれの実験でも各層を支える鋼棒が降伏し、試験体が横に大きく傾くような挙動を確実にとらえていることがわかる。それぞれの加振実験における各ユニットの計測精度の最大誤差及び、RMS の一覧を表 2, 3 に示す。ユニットによって数 cm 最大誤差が生じているものの、およそ 1cm 程度もしくは数 mm 程度であり、本計測システムが高い動的変位計測精度を有していることがわかる。

Table 2 Measurement result list (Sinusoidal wave 0.5Hz 50gal)

Unit	計測位置	最大誤差 [mm]	RMS [mm]
Unit 1	2 層部	-26.68	6.60
	1 層部	-14.20	12.97
	振動台	-17.00	6.85
Unit 2	2 層部	16.90	5.17
	1 層部	15.89	4.61
	振動台	-13.63	4.02
Unit 3	2 層部	9.36	2.74
	1 層部	-12.42	5.13
	振動台	8.93	2.67

Table 3 Measurement result list (Hachinohe EW 400gal)

Unit	計測位置	最大誤差 [mm]	RMS [mm]
Unit 1	2 層部	18.31	4.21
	1 層部	10.90	3.36
	振動台	-10.71	2.68
Unit 2	2 層部	15.15	5.50
	1 層部	12.2	2.78
	振動台	-8.06	2.07
Unit 3	2 層部	10.84	2.22
	1 層部	13.9	4.30
	振動台	5.60	1.15

### 4.4 カメラ間におけるデータ補間

構造物の崩壊実験などを計測する場合、計測対象の崩壊にともない、破壊した構造物の一部などが計測対象に設置したマーカを計測画面上から消失させる場合がある。また、計測カメラに対して大きく計測対象が傾いた場合、計測平面に対して解像度が低下し誤差を生じる。こうした場合、問題となる Unit の計測データに対して、他の Unit の計測データを用い、データの補間を行う必要がある。

図 14 は、倒壊モデル背後に設置されたボールの X 方向計測結果である。図中、左列上から回転角度計により得られた正解値, Unit2, Unit3 の計測

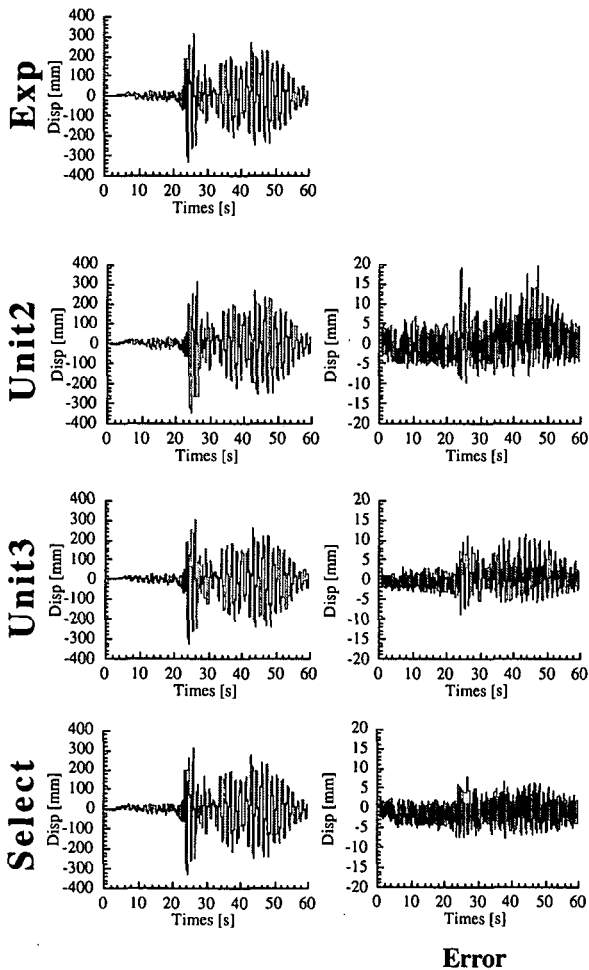


Fig. 14 Measurement result of structure model using selected camera

Table 4 Measurement result of structure model using selected camera

	最大誤差 [mm]	RMS [mm]
Unit2	19.47	3.91
Unit3	11.33	2.78
Select	7.80	2.28

結果、そして、今回検討した異なる Unit 間でカメラを混合した計測結果である。ここでは、Unit2 のカメラの中で計測対象の動的変形量に対する分解能が最も低下するカメラを除いた2台と、ほぼ計測平面に対して正面に設置した Unit3 のカメラ1台を混合し、新しい Unit を組み、計測データの精度向上を検討した結果である。なお、右列は、計測誤差を示している。

結果が示すように、カメラ混合を行って得られた計測結果は、表4にも示されるように、それぞれの Unit で計測された結果よりも精度が向上していることがわかる。このように、計測対象に対して適正なカメラを選択することにより、マーカの消失に対応できるばかりでなく、計測精度の向上がはかれるものと思われる。

## 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、倒壊モデルおよび逆振り子モデルを用いた振動計測実験より、本研究で提案する画像処理を用いた計測手法の三次元的計測精度や計測システムの有効性などに対して検討した。

結果として、計測対象を含む計測空間での三次元的変形を基本的に数 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。また、実際の構造物崩壊実験において生じると考えられるマーカの計測画面上からの消失等への対応として、Unit を超えたカメラ混合を行うことで、マーカの消失に対応できるばかりでなく、計測精度の向上も十分期待できることを確認した。

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ついても進めていく予定である。

## 謝辞

本研究は科学技術振興調整費による総合研究「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の一環として「大規模破壊実験のための振動台加振手法および計測処理技術の高度化研究」のテーマで実施されたものである。また、本研究を実施するにあたりご協力を頂いたパイプロシステム 倉林浩氏に深く感謝の意を表す。

## 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, 「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」, 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.111-116, 2001.
- 3) 藤田聡, 他5名, 「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」, 第3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.101-106, 2002.
- 4) 谷口慶治, 画像処理工学, 共立出版, 1996.
- 5) 井口征二: 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.