

画像処理技術を応用した三次元動的変位計測システムに関する研究 -実用化のための総合的性能評価-

藤田 聡¹, 古屋 治², 新津 靖³, 御子柴 正⁴, 中野 大輔⁵, 水野 宏樹⁵

¹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)

²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)

³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)

⁴(独) 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)

⁵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 doing research and development of 3-dimensional measurement method using an image processing technique for a measurement of dynamic displacement in shake table test. This measurement system is a very convenient system because it can measure the 3-D dynamic displacement in shake table test in which the several makers are only attached to the surface of an experimental structure. The system therefore is the most suitable measurement system for an evaluation of complex 3-dimensional behavior of test model. Fundamental hardware and software for the measurement system has been constructed until now. The fundamental dynamic measurement accuracy and effectiveness of the measurement system has been also confirmed from several shake table tests. This paper describes the dynamic measurement accuracy in fracturing shake table test using real scale wooden house model, and also summarizes the synthetic performance of the proposed measurement system.

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

1. はじめに

現在, (独) 防災科学技術研究所は, 2005 年の完成予定で大型三次元震動破壊実験施設を建設中である。当該施設は, 実規模構造物の地震時倒壊過程解明のため, 最大搭載質量 1,200[ton], 搭載面積 20×15[m]の振動台テーブルを有し, 水平・鉛直最大速度 200・70[cm/s], および, 水平・鉛直最大変位 ±100・±50[cm]の加振性能を有する。このような実験施設において, 実大規模構造物モデルを用いた地震時終局挙動を三次元的に精度良く計測することは, 従来の接触型計測手法では困難であり, 新たな計測手法の開発が望まれている。

本研究は, 1999 年より光学式モーショ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の研究開発を5年計画で実施してきた^{1)~4)}。

本報では, 研究開発計画の最終年度として実施した計測システムの総合的性能評価とともに, 実規模木造戸建住宅の倒壊実験時における計測結果を示す。

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) 大規模構造物を対象とした振動変位計測
- 2) 三次元計測
- 3) 非接触計測

4) 構造物が崩壊に至るまで cm オーダーの計測精度を保持する

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, 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, 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新しい計測技術である。

2.2 研究開発過程

◆平成11年度【第Ⅰ期-1】

既存の画像処理による動的変位計測システムの技術調査を実施, その問題点を把握し研究目的に適したシステムの基本概念を構築(基本的計測性能予備実験の実施)

◆平成12年度【第Ⅰ期-2】

画像処理による動的変位計測システムの設計・試作(5層せん断型建物モデルを用いた振動計測実験の実施)

◆平成13年度【第Ⅰ期-3】

画像処理による動的変位計測システムの総合的性能評価(倒壊建物モデルを用いた振動計測実験の実施)

◆平成14年度【第Ⅱ期-1】

大型3次元破壊震動実験施設での利用とした前提に装置の改良および実用化に向けた開発(倒立振り・倒壊建物モデルを用いた振動計測実験の実施)

◆平成15年度【第Ⅱ期-2】

大型3次元破壊震動実験施設での利用に向けた計測システムの高度化と総合的性能評価(三次元振動台を用いた総合的性能評価実験・実規模木造戸

2. 3 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^{5) 6)}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関連付けることができる。

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、次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} C_{11}^1 - C_{31}^1 X_{c11}^1 & C_{12}^1 - C_{32}^1 X_{c11}^1 & C_{13}^1 - C_{33}^1 X_{c11}^1 \\ C_{21}^1 - C_{31}^1 Y_{c11}^1 & C_{22}^1 - C_{32}^1 Y_{c11}^1 & C_{23}^1 - C_{33}^1 Y_{c11}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{11}^n - C_{31}^n X_{c11}^n & C_{12}^n - C_{32}^n X_{c11}^n & C_{13}^n - C_{33}^n X_{c11}^n \\ C_{21}^n - C_{31}^n Y_{c11}^n & C_{22}^n - C_{32}^n Y_{c11}^n & C_{23}^n - C_{33}^n Y_{c11}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{c11}^1 - C_{14}^1 \\ Y_{c11}^1 - C_{24}^1 \\ \vdots \\ X_{c11}^n - C_{14}^n \\ Y_{c11}^n - C_{24}^n \end{bmatrix} \quad (1)$$

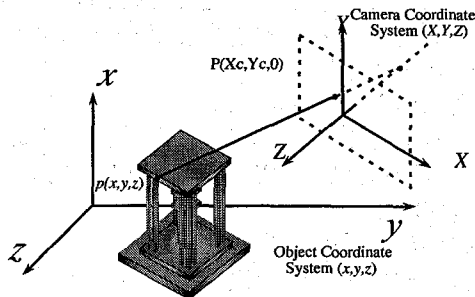


Fig. 1 Relation of object coordinate system and camera coordinate system

2. 4 マーカ認識方法

本計測手法では、図2に示すように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各画素の輝度値を重さとして考えることで重心位置算出法により中心位置を推定している。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。特徴点の $g \times h$ 画像上における x および y 方向位置座標は次式により求まる。

$$x = \frac{\sum_{s=1}^{ie} \sum_{p=1}^h c(i, p) s}{\sum_{s=1}^{ie} \sum_{p=1}^h c(i, p)} \quad (2)$$

$$y = \frac{\sum_{s=1}^{ie} \sum_{p=1}^g c(p, j) s}{\sum_{s=1}^{ie} \sum_{p=1}^g c(p, j)} \quad (3)$$

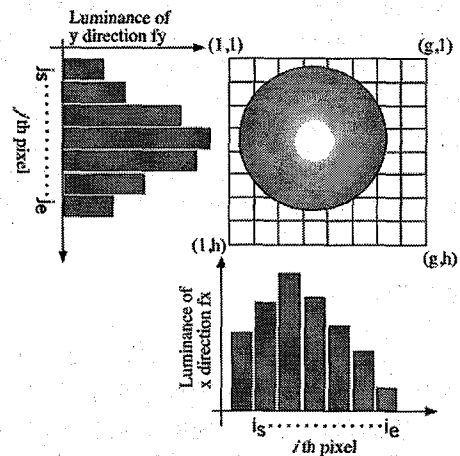


Fig.2 Marker recognition method on two-dimensional camera image

3. 三次元振動変位計測システム

3. 1 計測用 CCD カメラ

図3は、計測用 CCD カメラである。本体の形状は、 $36 \times 36 \times 60$ [mm]である。本カメラは、毎秒 200 フレーム、ハーフサイズで毎秒 400 フレームまでの撮影が可能である。分解能は、504 (水平) $\times$ 241 (鉛直) 画素であり、近年のデジタルカメラと比較すると分解能はあまり高くないが、先に示す重心算出法を適用した2次元画像上での中心位置推定法によりサブピクセルオーダの計測を可能としている。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。

3. 2 マーカ

図4は、計測用特徴点として使用するマーカである。本マーカは、計測距離が 15m 程度になることを想定し、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よう設計されたものである。また、図が示すように直径 70mm の半球体表面に 17 個の各 LED を面垂直になるように設置した。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遠

隔操作が可能となる仕様である。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、設置可能であり、大型の試験対象が大変位するような場合には極めて有効である。

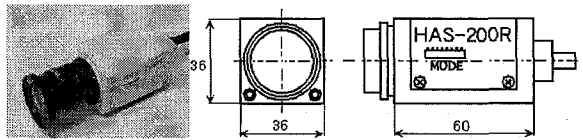


Fig. 3 High speed CCD camera used for the test

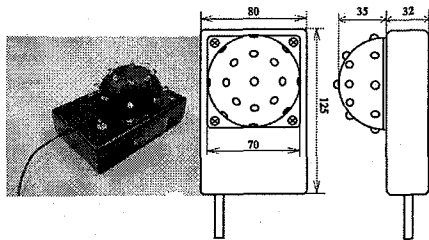


Fig. 4 LED maker used for the test

4. 総合的計測性能調査実験

計測システムの総合的性能評価を目的として、次の5項目の評価実験を実施した。

- Case I: 回転挙動に対する計測精度
- Case II: カメラ間距離に対する計測精度
- Case III: カメラ間角度に対する計測精度
- Case IV: 計測距離とマーカ認識画素数
- Case V: 計測距離と計測精度

4. 1 計測対象

図5は、総合的性能評価実験に用いた鉄骨造実験モデルである。寸法形状は、 $3.0^W \times 3.0^D \times 4.0^H$ [m]であり、総重量は、 $3,080$ [kg]である。固有振動数は、約 50 [Hz]であり剛体として扱った。このため、振動台情報より得られる振動台テーブルの位置情報をもとに幾何学的な関係から試験体各位置の動変位を算出可能となる。

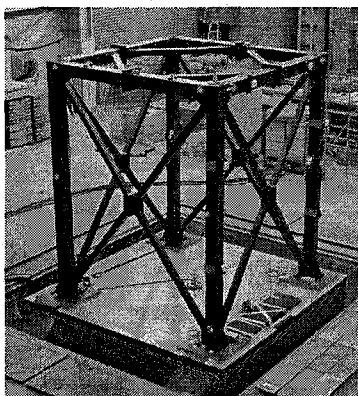


Fig.5 Experimental object used for the test

4. 2 計測および実験方法

今回の実験では、試験体上面を含め合計 22 個のマーカを設置した。なお、マーカの三次元位置座標は、あらかじめ空間測器を用いて計測し、座標変換行列を求めている。

図6, 7は、計測用 CCD カメラの配置状況である。図6のように CCD カメラは、試験体周りに配置されている。図6のカメラ配置では、カメラ No.2 および No.3 を 2 階に設置し、それ以外を 1 階に設置した。また、基本的にカメラ No.1, No.4 および No.5 は、試験体前面を、カメラ No.7, No.8 および No.9 は、試験体左側面を、カメラ No.6 は、両面計測とした。また、カメラ No.1, No.4, No.5 および No.6 は、カメラ間距離に対する計測精度実験 (Case II) のため、カメラ間距離が、3, 5, 7, 8, 12, 15 [m] になるように配置され、図7に示すカメラ配置 (Case III) では、カメラ間の角度が、20, 45, 60, 75, 90, 135, 180 $^{\circ}$ になるように設置されている。

実験は、東急建設技術研究所の三次元振動台を用いて実施した。振動台テーブル寸法は 4×4 [m]、搭載質量は最大 50 [ton] である。今回の実験では、入力波として、各種正弦波や神戸地震 JR 鷹取波 (最大加速度 X 方向: 741 [Gal], Y 方向 624 [Gal]) 等を用いた。なお、サンプリング周波数は、100 および 200 [Hz] とした。実験結果は、基本的にマーカ No.3 と No.4 の計測結果の平均値を用いてまとめた。

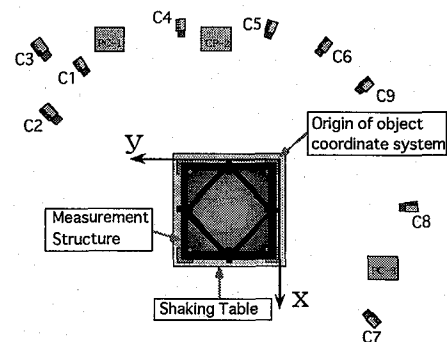


Fig.6 The layout condition of CCD cameras in Case I, II, IV and V

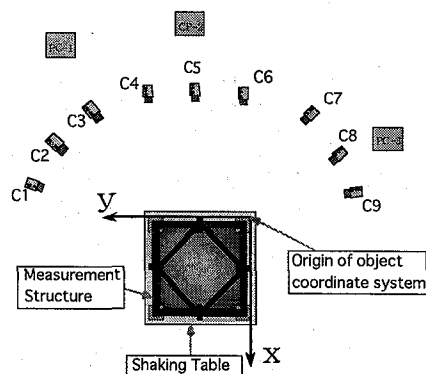


Fig.7 The layout condition of CCD cameras in Case III

4. 3 実験結果

4. 3. 1 Case I 実験結果

図 8 は、実験供試体に X 方向 : 0.5[Hz], $\pm 2.8^\circ$, Y 方向 : 0.55[Hz], $\pm 4.0^\circ$ の回転挙動を生じるような正弦波を入力した際のマーカ No.3 の計測結果例である。左列は、振動台テーブル情報より幾何学的にマーカの位置情報を求めた結果であり、画像計測結果の比較対象である。中列は、画像計測結果、右列は、左列と中列との差分を示したものであり、計測誤差として扱った。また、図は、上から X, Y および Z 方向の計測結果である。

加振結果として、供試体は、X, Y および Z 方向で最大 80, 170, 50[mm] 程度の変位量となったが、表 1 が示すように、最大で 10[mm] 程度の計測誤差となり良好な計測結果が示された。このような回転挙動は、倒壊実験において供試体の倒壊過程の初期段階で現れるものと思われるが、本手法によりそのような三次元挙動を精度良く計測できることを確認した。

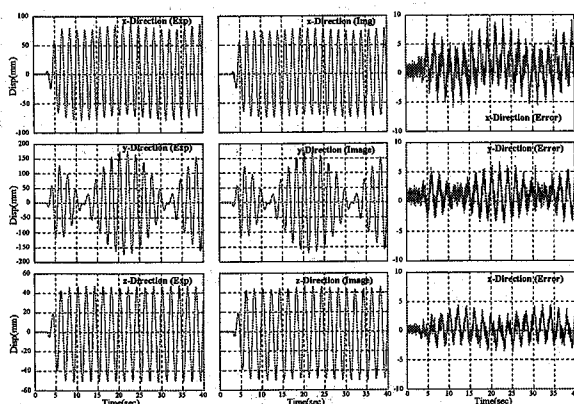


Fig.8 The comparison with the measurement results on the time history in Case I

Table 1 Maximum and RMS error in Case I

Direction	Max. error [mm]	RMS error [mm]	Error at max. disp. [mm]
X	9.4	2.8	9.2
Y	6.7	2.0	6.1
Z	4.5	1.5	1.9

4. 3. 2 Case II 実験結果

図 9 は、カメラ間距離と計測精度の関係である。今回検討したカメラ間距離は、3~15[m] である。横軸にカメラ間距離、縦軸に計測中の最大誤差を示す。入力波は、加振周波数 0.2[Hz], X, Y, Z 方向に 0.5, 0.2, 0.1[m] 振幅の正弦波である。

結果が示すように、今回実施したカメラ間距離の範囲では計測精度に大きな差を生じないことが示された。この定性的な傾向は、計測方向に依存せず共通である。このため、基本的に 3[m] 以上のカメラ間距離を採ることにより安定した精度で計

測が実施できることを確認した。

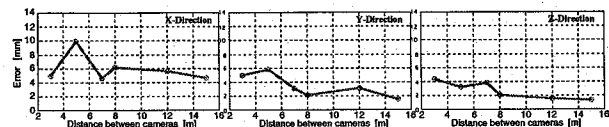


Fig.9 The measuring accuracy by the distance between cameras

4. 3. 3 Case III 実験結果

図 10 は、カメラ間角度と計測精度の関係を調査した結果である。カメラ間角度は、先に述べたように 20~180[°] である。入力波は、Case II 実験時と同様である。横軸がカメラ間距離、縦軸は最大計測誤差である。計測精度は、カメラ間距離により異なることが示された。並進方向を示す X 方向計測精度は、カメラ間角度が狭くなるに従いカメラ間距離が縮まるため低下する傾向にある。また、奥行き方向を示す Y 方向計測精度は、カメラ間角度が大きくなるに従って低下する。これは、カメラ間角度が大きくなるに従ってカメラ画面上でのマーカの移動画素数が小さくなるためである。なお、上下方向の計測精度は、カメラ間角度に依存せず安定した計測精度が得られている。このため、CCD カメラ設置条件としては、カメラ間角度を 45 から 135[°] 程度に採ることが望ましいことを確認した。

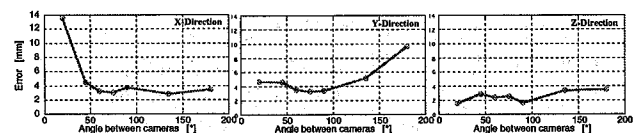


Fig.10 The measuring accuracy by the angle between cameras

4. 3. 4 Case IV 実験結果

図 11(a) は、計測距離とカメラ画面上でのマーカの認識画素数の関係である。図は、静的実験および動的実験より得られた結果から構成されている。白抜きのプロットは、静的実験結果である。本実験では、カメラ位置を固定して、マーカの位置を直線的に 5[m] から 55[m] まで 5[m] 毎に遠ざけたときに CCD カメラ画面上で認識されるマーカの画素数を調査した。また、黒塗りのプロットは、X 方向加振実験より得られた結果である。加振波は、加振周波数 0.2[Hz], 加振振幅 50[mm] の正弦波である。ここでは、同様の加振実験をカメラの F 値を三段階に変化させることで、計測距離を仮想的に変化させた。

結果が示すように、マーカのカメラ画面上での認識画素数は、計測距離に対して指数関数的に減少する。また、静的実験と動的実験で得られた傾向は一致しており、F 値の変化により計測距離を仮想的に変化させることができていないことが示されている。

本結果を基に、計測距離と計測誤差の関係を求

めた結果が図 11(b)である。結果が示すように、計測距離の増大にともない計測誤差は線形倍に増加する。これまでの実験で、安定して 15[mm]以下の計測誤差になるためには、マーカがカメラ画面上で約 15 画素以上の認識画素数になることが望ましいことが確認されていた。本結果は、動の実験よりその傾向を検証したものであり、結果として、安定して良好な計測精度を得るためには、20[m]程度までの計測距離で計測することが望ましいことを確認した。

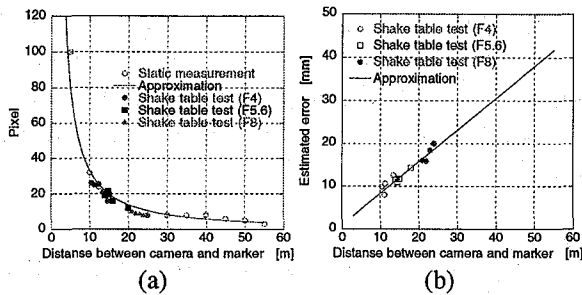


Fig.11 Measuring accuracy by the measurement distance and recognition pixel

4. 3. 5 Case V 実験結果

図 12 は、J R 鷹取波用いて三次元加振した際の計測結果である。結果は、図 8 と同様の配列である。また、表 2 に計測誤差をまとめる。結果が示すように Y および Z 方向の計測でスパイク状の計測誤差が見受けられるが、基本的には、10[mm]以下の計測精度となった。この結果は、先に示した計測距離と計測誤差の関係が有効であることを再び示すものである。結果として、実際の構造物倒壊実験時で実施されると考えられる 3 次元加振実験時では、今回設定した計測環境を適用することで良好な計測精度が得られると考えられる。

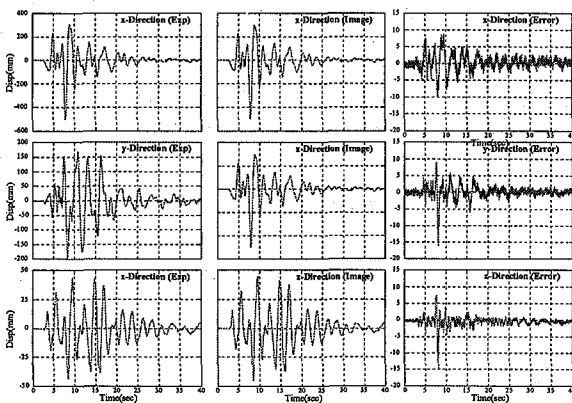


Fig.12 The comparison with the measurement results of the shake table

Direction	Max. error [mm]	RMS error [mm]	Error at max. disp. [mm]
X	9.6	2.2	7.1
Y	16.3	1.9	4.7
Z	14.8	1.5	1.2

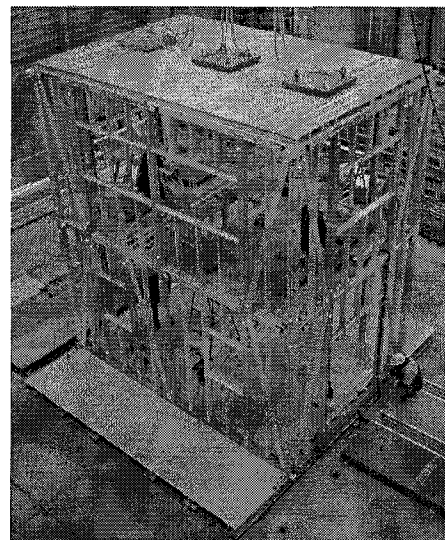
5. 実規模木造戸建住宅倒壊実験

5.1 計測対象

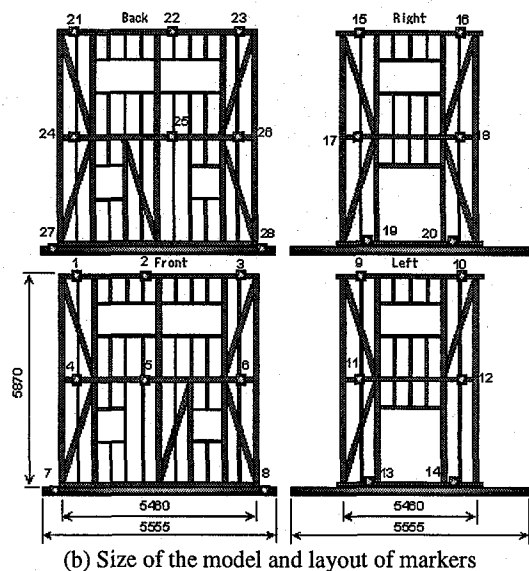
図 13 は、実験に用いた実規模木造戸建住宅である。固有振動数及び減衰係数を表 3 に示す。形状は $3.64^W \times 5.45^D \times 5.82^H$ [m] の 2 層建物である。また当該モデルは、1980 年耐震基準改正以前の仕様となっており 1979 年公庫木造住宅工事共通証書に準ずるものである。

Table 3 Basic specification of test model (Type 1)

	Natural frequency (Hz)	Damping ratio (%)
X direction	2.49	1.8
Y direction	1.98	2.7



(a) Exterior of wooden house model



(b) Size of the model and layout of markers

Fig.13 Wooden house model used for the shake table test

5.2 計測及び実験方法

図 14 に実験時のカメラ配置状況を示す。カメラは試験体の各面を少なくとも 2 台で撮らえられる

ように設置し、物体座標原点からの直線距離にして6[m]~17[m]程度の位置に配置されている。

5.3 計測結果

図15は、実験モデルの倒壊過程を示した物であり、また、図16は、倒壊過程を画像計測した結果である。左列より、X、Y、Z方向、上段に2層部層間変位、下段に1層部層間変位を示す。さらに、下段には、巻取型変位計から得られた結果も併記した。当該実験では、最終的に試験対象の戸建て住宅は倒壊に至ったが、本計測手法により、従来の接触型変位計では計測が困難である倒壊過程時に生じる大変形量を十分実用に供し得る精度で計測できることを明らかにした。

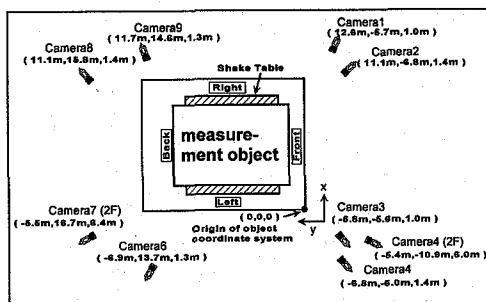


Fig.14 The layout condition of CCD cameras

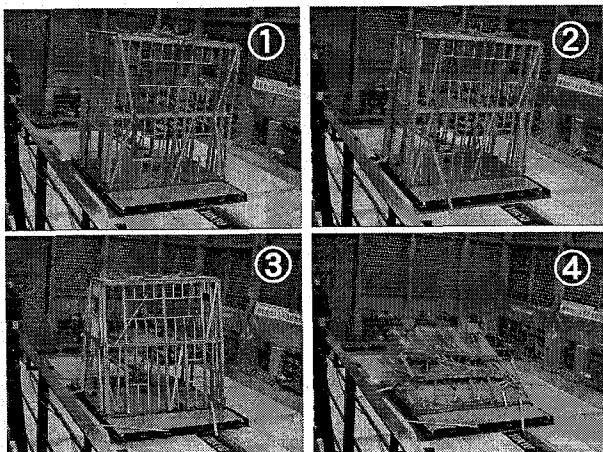


Fig.15 Fracturing process of two-story wooden house model

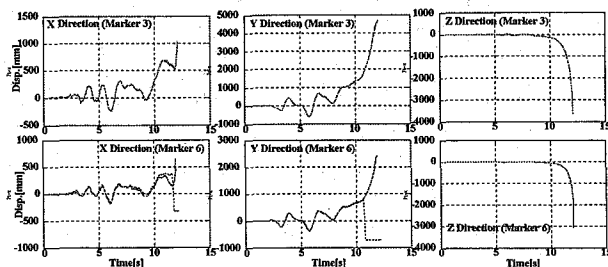


Fig.16 The comparison with the measurement results of the superstructure

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理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、計測システムの総合的性能評価とともに、実規模木造戸建住宅の倒壊実験時における計測結果を示した。

結果として、計測対象を含む計測空間での3次元動的変形をサブピクセルオーダで計測可能な性能を有することを確認し、また、計測システムとしての総合的な性能評価より、計測機器の計測精度や基本的な設置方法等に関してまとめた。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おける構造物の倒壊過程を計測する上で十分適した性能を有する手法であることを確認した。

謝辞

本研究の一部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、木造戸建住宅倒壊実験は、東京大学教授 坂本功先生を代表とする木造建物実験プロジェクトの一部として実施されたものであり、プロジェクト関係各位、東急建設豊嶋氏、三輪氏に深甚なる謝意を表する。

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, 「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 -倒壊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-」, 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) 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 -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-」, 第4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, 2003.
- 5) 谷口慶治, 画像処理工学, 共立出版, 1996.
- 6) 井口征二: 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.