

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

藤田 聡¹, 古屋 治², 新津 靖³, 御子柴 正⁴, 相川 慎一郎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講師 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 工学部機械工学科 (〒101-8456 東京都千代田区神田錦町 2-2)

⁴科学技術庁防災科学技術研究所防災総合研究部耐震工学研究室 (〒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システム工学専攻 (〒101-8456 東京都千代田区神田錦町 2-2)

As an experimental approach which evaluates the structural earthquake resistance, shake table tests using scale model or pseudo dynamic tests using partial structural element have been carried out until now. However, some limit occurs for a grasp of the earthquake resistance of the structure in such experiments. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention has constructed a large three-dimensional shake table to evaluate structural fracturing process such as bridge, building, tank, electric power facility, ground and base and underground structure of the real scale in Hyogo Prefect., Japan since 1995. In this study, the research and development of measurement method of non-contact type for measuring the structural fracturing process accurately and three-dimensional in the shake table tests using the real scale model has been carried out. This paper describes the effectiveness of the measurement system from shake table tests using 5-storey building model.

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

1. はじめに

構造物の耐震性を評価する実験手法として、これまで、縮小モデルを用いた振動実験や構造要素を部分的に加力・振動実験するハイブリッド実験などが実施されてきている。しかしながら、このような実験では、構造物の耐震性の把握にある程度の限界が生じる。現在、科学技術庁防災科学技術研究所を中心とし、兵庫県三木市に実規模の橋梁、建築物、タンク、電力施設、地盤・基礎・地中構造物などを振動実験可能な大型三次元振動実験施設の建設が行われている。ここでは、実規模構造物の地震時崩壊過程の解明を目的の一つとして計画が進められている。

本研究では、画像処理を用いた三次元計測手法を検討し、大型構造物崩壊現象計測に適した三次元位置計測技術の研究開発を行っている。昨年度までに、提案した計測手法についての基本的な計測精度、マーカー認識・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¹⁾。本報では、今年度、防災科学技術研究所にて実施した5層建物モデルを用いた振動計測実験に関して、その結果を示し、基本的な動的計測精度や有効性について評価する。

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、図1に示す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。画像処理を用いた計測手法に関しては、現在、受動型と能動型に大別される様々な手法が研究されている。当該研究での計測システ

ムは、

- 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

などの開発指針から検討したものである。本手法は、基本的に加振対象となるモデルに設置した複数のマーカー（計測目標物）を複数台のカメラで計測し、得られたカメラ画像データより、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に高精度にて計測できるシステムである。

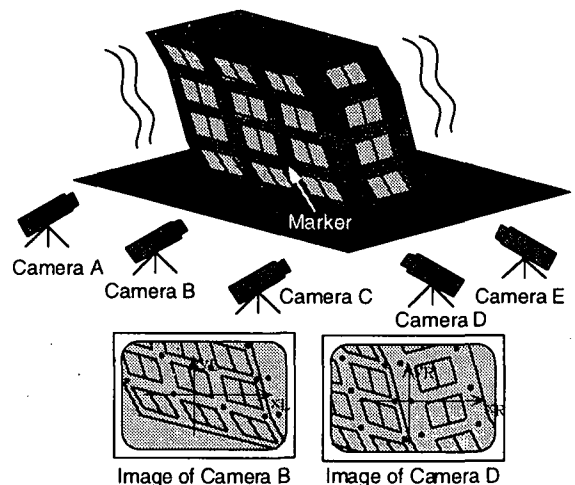


図1 計測手法の概念

2. 2 計測原理

本手法は、計測対象の振動変位を、カメラの2次元画像データより求めるものである。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^{2) 3)}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齊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 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、

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

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

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Cⁿ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、次式のようになる。

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

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三次元座標が得られる。

3. 振動計測実験

3. 1 計測用 CCD カメラ

図2, 3は、実験に用いた計測用 CCD カメラである。本研究では、構造物の地震時崩壊過程を計測する必要があり、構造物の振動変位を高いサンプリング周波数で計測することが望ましい。

基本仕様を表1に示す。表が示すように、性能要求を満たすため、本カメラは、毎秒100, 200フレーム、ハーフサイズであれば毎秒400フレームの高速度撮影が可能である。分解能は、504(水

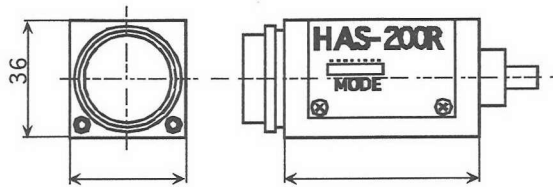


図2 実験に用いた CCD カメラ

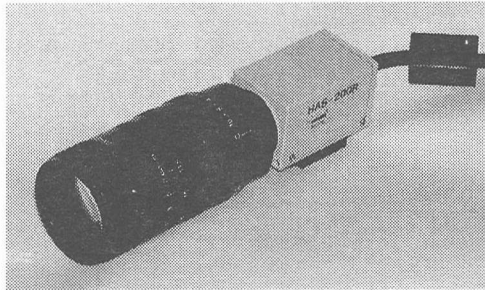


図3 実験に用いた CCD カメラ

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。最低被写体照度は 10LUX と通常の CCD カメラと同程度の感度を持ち、強い照明を使用できない被写体の撮影にも適している。シャッターは 1/200~1/10000sec をディップスイッチで設定することが可能で、1 フレーム単位でシャッターが切られるので、1 フレーム内でのシャッター時刻差による画像の歪みなどは生じないのも利点である。レンズマウントは C マウントであり、市販のレンズが使用可能である。今回は CANON TV ZOOM LENS (11.5-69mm, 1:1.4) を使用した。

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

3. 2 マーカー

本実験で使用したマーカーを図4に示す。本マーカーは、図のように本体上部に赤色 LED を 5 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、大型構造物が試験対象となるような場合には極めて有効である。また、周囲 4 個の 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。

3. 3 計測対象

図5は実験に用いた 5 層せん断型建物モデルである。最下層 (床) から 4 層までの各層を 1055[kg], 5 層を 782[kg], 振動台への固定用治具 1417[kg] とし総重量 7446[kg], 総高さ 3580 [mm]の鉄骨造である。柱脚部材としてはばね鋼材を用い各層間を 4 本の柱で支えるモデルとした。建物モデルの各次固有振動数は、1 次 2.85[Hz], 2 次 8.25[Hz], 3 次 12.8[Hz], 4 次 16.15[Hz], 5 次 18.3[Hz] である。また、この建物モデルは 1 層から 5 層まで全て等しい剛性、減衰を有するものとして設計、製作されている。

3. 4 計測および実験方法

図6に実験供試体、および振動台へのマーカーの設置状況例を示す。マーカーは図が示すように各層側面中央部に 3 個ずつ設置した。さらに、振動台テーブル上に 4 個、合計 19 個のマーカーで計測を行った。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。

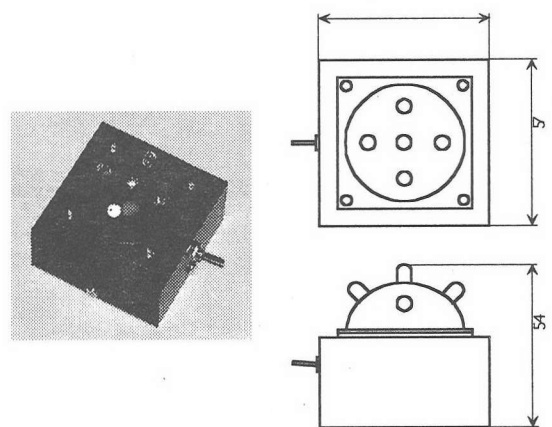


図4 実験に用いたマーカー

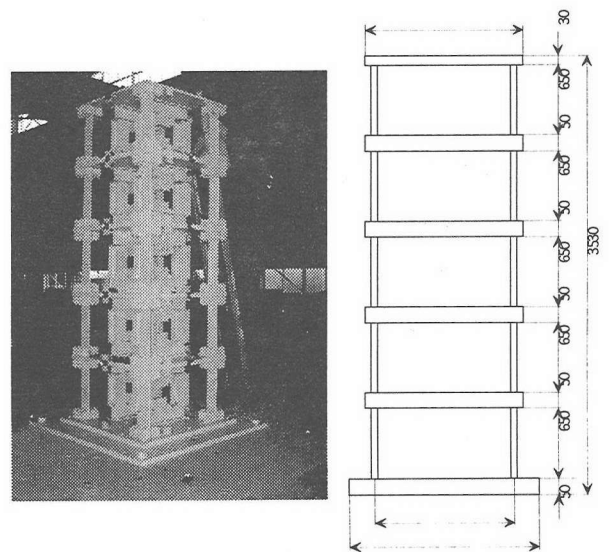


図5 計測対象の建物モデル

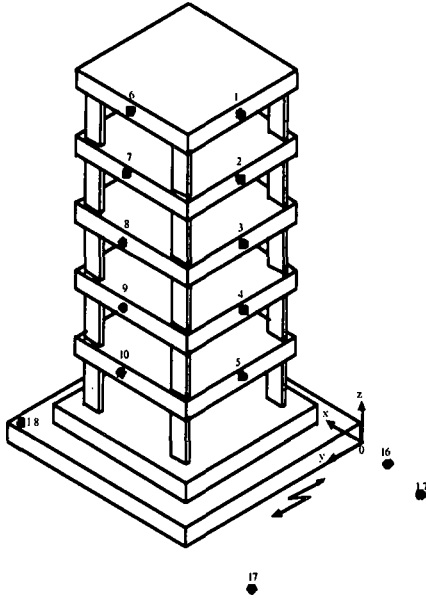


図6 マーカーの設置状況例

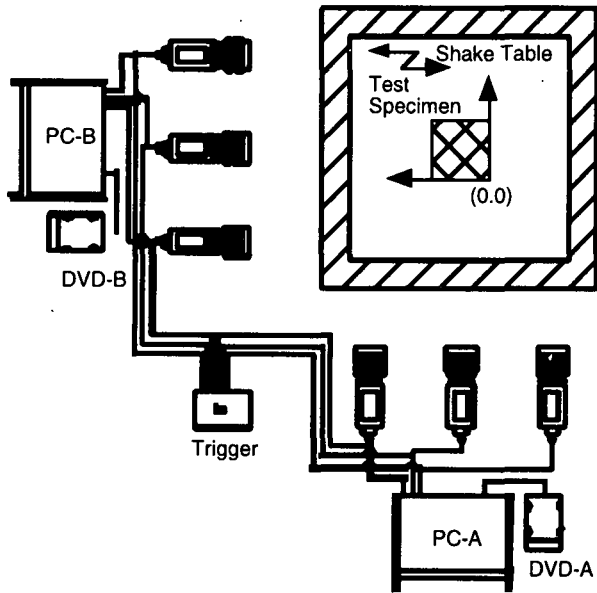


図7 実験計測系統図

今回の実験の画像計測システムを図7に示す。高速 CCD カメラを合計6台使い、高速度カメラは3台1ユニットとして図が示すように加振方向に対してカメラ視線を直交方向 PC-A (カメラ配置 A) と、同一方向 PC-B (カメラ配置 B) に配置した。2種類のカメラ配置に関しては、一般にカメラ画像を用いた計測では、光軸方向に対して縦横方向よりも奥行き方向の動きを捉えることが不得意であるとされることを実際の振動計測実験より検証するためである。なお、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、配置A側で17 m程度、配置B側で15 m程度の位置に配置されている。

入力波は、正弦波および代表的な実地震波である。表2に実験に用いた地震波を示す。実験では実地震波の最大加速度を基に入力レベルを線形倍した人工地震波により加振した。

表2 実験項目

No.	項目	入力波	計測時間
1	正弦波	1[Hz], ±30[mm]	50 sec
2	地震波	Hachinohe EW 50[gal]	70 sec
3		Kobe NS 70[gal]	70 sec
4		Taft NS 250[gal]	70 sec
5		EL Centro NS 45[gal]	70 sec
6		EL Centro NS 250gal]	70 sec

4. 振動計測実験結果

図8, 9は、カメラ配置Aでの振動計測実験結果の一例である。図8は、加振周波数1Hz, 加振振幅30mmの正弦波加振実験結果、図9は、EL Centro NS 250gal 入力時の加振実験の計測結果である。図は、左列が変位計での測定結果 (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2層と4層での計測結果を除く、5層, 3層, 1層, 振動台テーブルのそれぞれの絶対変位を示したものであり、各層の計測値は、振動台テーブル変位を含んだものである。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、画像計測結果と変位計計測結果での波形は、非常によく一致していることが視覚的にわかる。右列に示す計測中での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17m程度離れている状況において、正弦波加振時で5mm程度、地震波加振時で6mm程度となった。また、破壊実験時に重要となる最大値での、両計測結果を比較したものを表3に示す。表が示すように、最大値に関しては、各計測結果ともに数%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ことを再度確認できる。

次に、表4は、本手法のような画像処理を用いた計測法において一般に困難とされるカメラ視線を加振方向と一致させたカメラ配置での計測結果についてまとめたものである。結果より、地震波加振時において若干計測精度が低下するものの、今回の実験では計測精度に大きな差は生じなかった。カメラ配置と計測精度に関しては、計測実験時の実験環境が大きく依存すると思われるため、本実験結果のみより評価することは困難であるが、本システムでは、基本的に大差なく良好な精度で計測できるものと考えられる。なお、カメラ配置Bの5層に関しては、計測環境の関係で、計測す

ることができなかった。

5. おわりに

本報では、5層建物モデルを用いた振動計測実験から、本研究で開発を行っている画像処理を用いた計測手法の基本的な動的計測精度や有効性について検討した。結果として、17m 程度離れた距離から、建物モデルの絶対変位を数 mm 程度の誤差範囲で計測可能であることが示され、本研究が目的とする構造物の崩壊過程を計測する手法として十分な精度を有することを確認した。しかしながら、計測処理ソフト、マーカー、画像データの保存速度等、実用化には、まだ多くの改善項目がある。今後は、構造物の崩壊過程での大変位を対象として、動的計測精度、計測範囲等について検討を実施する予定である。

表3 計測最大値の比較

入力波	位置	最大値 (変位計) [mm]	最大値 (画像) [mm]	誤差 [mm]	誤差率 [%]
正弦波 1Hz 30mm	5階	35.8	36.9	1.1	3.1
	3階	34.9	36.3	1.4	4.0
	1階	32.0	33.4	1.4	4.4
	振動台	30.1	32.3	2.2	7.3
El Centr o NS 250gal	5階	95.8	98.2	2.4	2.5
	3階	90.9	93.5	2.6	2.9
	1階	85.7	84.5	1.2	1.4
	振動台	79.9	80.5	0.6	0.75

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) 谷口慶治, 画像処理工学, 共立出版, 1996.
- 3) 井口征二: 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.

表4 カメラ配置による計測精度の比較

入力波	カメラ	位置	最大誤差 [mm]	rms [mm]
正弦波 1Hz 30mm	配置A	5階	3.337	0.923
		3階	3.363	1.077
		1階	1.946	1.242
		振動台	4.662	1.795
	配置B	5階	—	—
		3階	4.432	1.420
		1階	2.919	0.933
		振動台	3.430	0.871
El Centro NS 250gal	配置A	5階	5.937	1.287
		3階	2.224	0.497
		1階	3.990	0.952
		振動台	5.252	1.742
	配置B	5階	—	—
		3階	6.559	1.654
		1階	5.285	1.384
		振動台	4.169	1.795

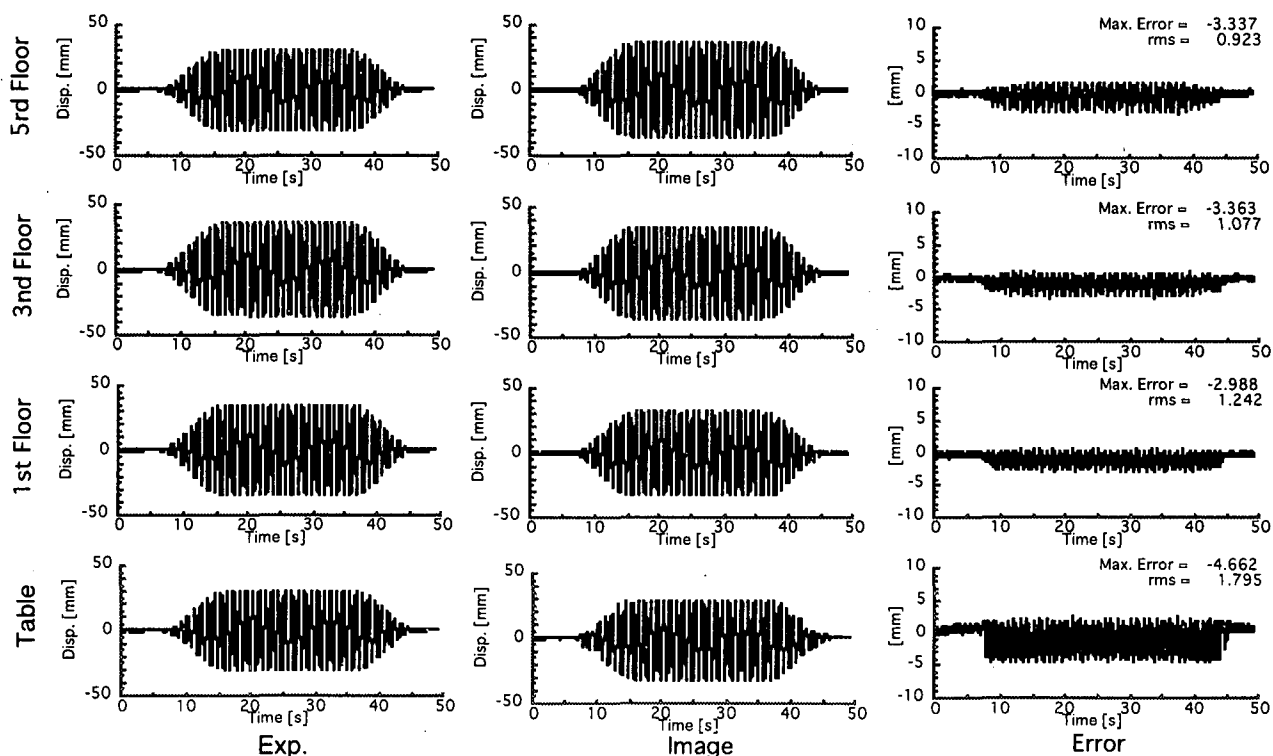


図8 計測結果例 (正弦波 1Hz 30mm) : カメラ配置A

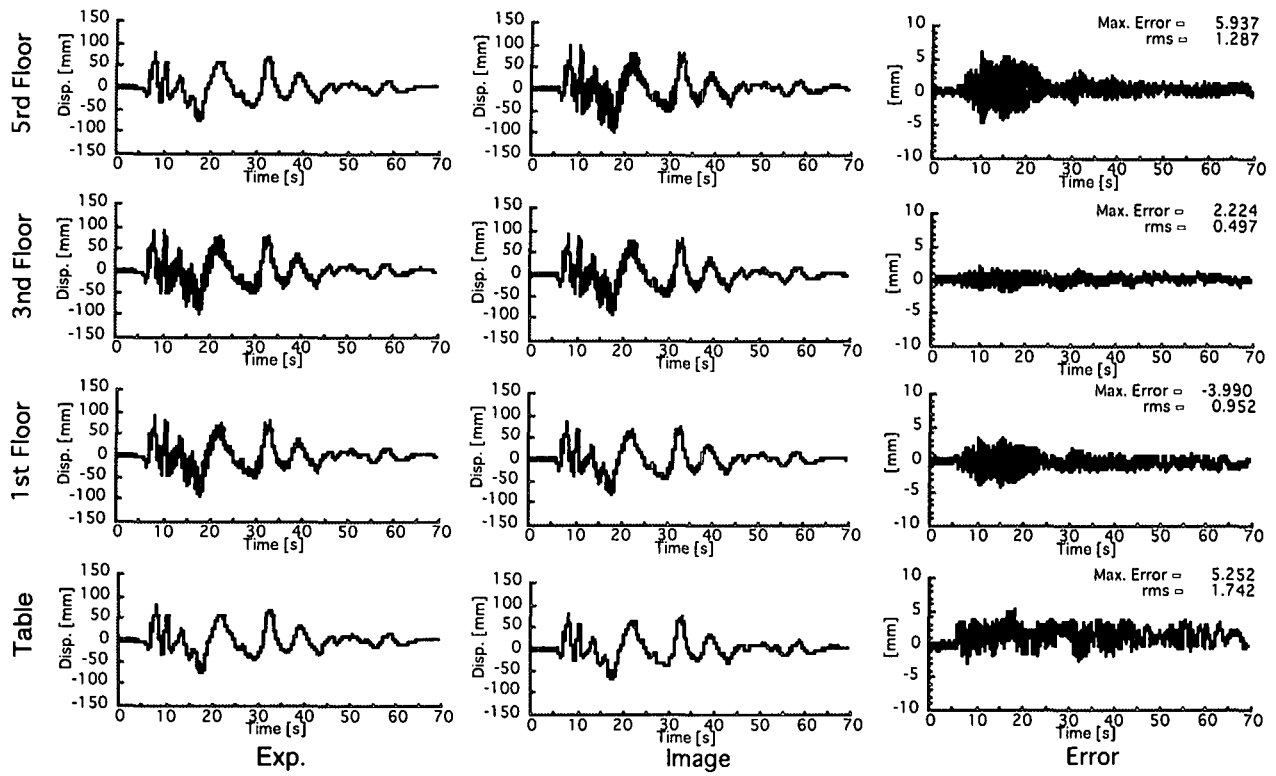


図9 計測結果例 (El Centro NS 波 250gal) : カメラ配置A