443 光学的変位計測技術に関する研究

Study on optical displacement measurement technique

正 藤田 聡 (東京電機大学)

○正 古屋 治 (都立高専)

林 英毅 (東京電機大学・院)

Satoshi FUJITA, Tokyo Denki University, 2-2 Kanda-Nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo
 Osamu FURUYA, Tokyo Metropolitan College of Technology
 Hidetaka HAYASHI, Tokyo Denki University

In recent years, the importance of the fracturing test using the full-scale model is recognized in order to upgrade an earthquake resistant design. It is, moreover, important to develop a new measurement method which can measure a complex three-dimensional behaviour in such fracturing test. This study has been doing research and development of three-dimensional measurement method using an image processing technique for a measurement of dynamic displacement in shake table test without any contact. This paper describes the measurement results of shake table test using actual wooden house model in the largest shake table facilities at E-Defense, and evaluates synthetic measurement performance of the developed measurement system.

Key words: Optical measurement, Image processing, 3D dynamic displacement, Fracturing process, Real scale

A 1. はじめに

実大三次元振動破壊実験では、構造物が破壊に至る過程を解明することが求められているが、従来の接触型変位計では破壊を伴う大規模な変位が生じる振動実験には適さず、新たな変位計測手法の確立が急務である。本研究では、ステレオ法を基礎とし、光学式モーションキャプチャ技術に代表される画像計測法を用いて実大三次元震動破壊実験における非接触型三次元計測・処理システムの確立を目的とする。本報では、提案する計測手法の E-Defense における実大空間での変位計測手法としての有効性を検証した結果を示す。

A 2. 計測システム

図 A1 は、計測システムの構成図である。CCD カメラ 3 台を 1 ユニットとして合計 3 ユニットを使用している。各ユニット間は、同期が取れるようにし、メインコンピュータに接続したトリガーボックスのスイッチにより計測開始をコントロールできるような構成となっている。

A 3. 計測対象

図 A2 は、振動台にテーブルに設置した計測対象となる試験体の状況である。築 30 年の木造住宅 2 棟を加振台上に併設し加振実験が実施された。実験の目的は、旧耐震基準で建てられた木造住宅の耐震性検証実験である。このため、B 棟（右側）には、耐震補強がなされた。両試験体はほぼ同一の形状寸法で、幅 6.5[m]、奥行き 5.5[m]、高さ 7[m] である。

A 4. 計測結果

JR 鷹取波 3 軸フルスケール入力により、耐震補強無し A 棟は、入力後 1.5 秒付近で倒壊した。倒壊状況は、1 階部崩壊であり、2 階部はほぼ残った。本画像計測システムは、この倒壊過程を計測誤差数 2.0 mm 以内で計測できることを確認した。

A 5. おわりに

画像計測システムの開発目標の一つである E-Defense での移築木造住宅の倒壊実験計測から計測性能の総合的検証を行い、本手法の有効性を実証した。

Fig.A1 Measurement system used for the tests

Fig.A2 Measurement object

1. はじめに

構造物の耐震対策は、大地震が多発する我が国にとっては必須の技術である。近年の都市部で生じた地震は、機械、建築、土木といった様々な構造物に被害をもたらした。この耐震技術の高度化の重要性を再認識させた。

2005 年 4 月、兵庫県三木市に世界最大の大規模震動実験施設 E-Defense が完成した。図 1 は、震動台テーブルである。当該震動台は、表 1 に示すように、最大搭載質量 1,200tonf を 20×15m のテーブル上に設置し、神戸実波を再現可能な性能を有している。当該施設では、実規模構造物の破壊／倒壊実験を目的の一つとしているが、このような実大規模試験対象を用いた振動実験において、実験供試体の地震時崩壊過程を三次元的かつ的確に捉えるには、従来用いられてきた接触型／非接触型変位センサーによる測定手法では困難であり新たな計測手法を確立する必要がある。

本研究では、モーションキャプチャー技術に代表される画像処理技術を応用した新しい非接触型動的三次元変位計測システムの研究開発を行っている^{1)～7)}。本手法は、実規模構造物の崩壊過程で生じる大変位を計測できることはもちろん、計測精度に関してもサブピクセルオーダーの計測が可能となる非接触型変位計測手法である。本報では、E-Defense における移築木造試験体の倒壊実験に計測手法を適用した結果より、大計測空間での変位計測手法の有効性を総合的に検証した結果を示す。

Fig.1 Largest shaking table in E-Defense

Table 1 Comparison of specification with large shake table in Japan

Institution (Site)	E-Defense (Hyogo Pref.)	Tadotsu Engineering Laboratory (Kagawa Pref.)	NIED (Ibaraki Pref.)	Ministry of Construction (Ibaraki Pref.)
Max. loading weight (tonf)	1200	1000	500	300
Table size (m)	20×15	15×15	15×14.5	8×8
Shaking direction	3D	2D	1D	3D
Max. acc. (G)	H 0.9 V 1.5	H 1.84 V 0.92	H 0.5	H 2.0 V 1.0
Max. vel. (cm/s)	H 200 V 70	H 75 V 37.5	H 75	H 200 V 100
Max. disp. (cm)	H 100 V 50	H 20 V 10	H 22	H 60 V 30
Completed year	2005	1982	1970 1988 (Upgrade)	1997

2. 画像処理を用いた三次元動的変位計測手法

2. 1 画像計測システム 図 2 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。このような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。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。

図 3 は、計測用特徴点として使用したマーカである。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 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、複雑な構造の試験対象や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。

図 4 は、計測システムの構成図である。CCD カメラ 3 台を 1 ユニットとして合計 3 ユニットを使用している。各ユニット間は、同期が取れるようにし、メインコンピュータに接続したトリガーボックスのスイッチにより計測開始をコントロールできるような構成となっている。

Fig.2 High speed CCD camera used for the shake table test

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 次元位置情報を座標変換行列 (カメラパラメータ^{8) 9)}) により 3 次元振動変位に算出する。カメラパラメータはカメラの位置、姿勢、画角などのカメラに関するすべての情報を含んでおり、物体座標系とカメラ画像系を関連付けるものである。また、カメラ画面上で

の特徴点は、特徴点が画面上で有する輝度値を重さと仮定し、重心法より画面上での2次元位置を推定する。この画面上より得られた特徴点の2次元座標位置座標を前述のカメラパラメータを用いて物体座標へと変換することで計測対象物の三次元動変形量を求める。

Fig.3 Marker used for the shake table tests

Fig.4 Present measurement system

2. 3 基本計測性能 図5 (a)は、図3 (a)のマーカを使用した場合の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。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。計測距離と計測誤差の関係を求めた結果が図5 (b)である。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傾向にある。しかしながら、想定している計測距離 20m程度までは、15mm 以下の計測精度で三次元動変位を計測可能となることが確認された。また、この精度は、計測用 CCD カメラに設置するズームレンズ、計測データの波形処理により飛躍的に改善されることも確認している。

3. 計測対象

図6は、振動台にテーブルに設置した試験体の状況である。実験で使用した試験体は兵庫県明石市で実際に住宅として使用されていた木造住宅を振動実験のために移築したものである。両試験体はほぼ同じ構造の2棟であり、一方の試験体は移築したものをそのまま使用し、もう一方は移築したものに耐震補強を施している。耐震補強を行わなかった方を A 棟、耐震補強を行った方を B 棟

棟とした。試験体 A 棟を図7 (a)に、試験体 B 棟を同図 (b)に示す。両試験体はほぼ同一の構造であり、各試験体形状は、約 5.5[m]、横、約 6.5[m]、高さ、約 7[m]である。

(a)

(b)

Fig.5 Measuring accuracy by the measurement distance and recognition pixels

4. 計測方法

マーカ配置を図7に示す。両試験体にそれぞれ17個設置し、さらに、テーブル上に5個配置した。今回の試験では、各試験体の4面の動的挙動を計測することを目的としたが、後述するカメラ配置に対応するため、背面を除く3面にカメラに向かって配置されるよう、設置治具を介して設置した。また、1層、2層、屋根部の挙動を計測できるよう配置されている。

図8は、計測カメラの配置状況を示したものである。試験体の倒壊過程を含む動的挙動を4面で計測できるよう配置されている。特に、中心位置に配置したカメラから左右対称にカメラを配置することで、計測空間を同様に設定し両試験体の計測精度を同等とした。

入力波は、JR 鷹取波 3 軸フルスケールである。

5. 計測結果

図9は、実験後の状況である。図が、示すように、無補強のA棟は、2層部を残し、1層部が崩壊したが、B棟は、耐震補強により倒壊を真逃れている。図10にA棟の計測結果、図11にB棟の計測結果を示す。結果は、両図とも、上から、入力変位、入力の画像計測結果、測定差異、側面頂部、側面中層部である。また、左列から、X、Y、Z方向である。さらに、表2および3に、試験時の計測精度を検証した結果を示す。対象としたマ

一カは、試験体基礎部に設置したものであり、振動台計測情報から得られる入力変位と比較することで、計測時の精度を検証可能である。

計測結果より、耐震補強を施していない A 棟は 12[s] 付近で倒壊していることが分かる。A 棟基礎部に取り付けたマーカ M13 の変位計測結果を見ると、試験体が倒壊した 12.5[s] 付近から計測が不可能になっている。これは、試験体 A 棟の倒壊により崩壊した試験体部材により、マーカ M13 が遮蔽されたためと思われる。また、A 棟中層部に設置したマーカ M8 についても、同様に時刻 12.5[s] 付近で計測不可能となった。これは、試験体 A 等の倒壊に伴い、マーカ M8 が破壊され消灯したためである。

昨年度、同程度の形状寸法を有する実規模木造試験体の倒壊実験を実施したが、その際、試験体とカメラ間距離は、15[m] で最大誤差がおおよそ 10[mm] 前後であった。今回の実験では試験体とカメラ間の距離が 25 [m] 程度となるが最大誤差は 20[mm] 前後である。これはカメラ・マーカ間の距離と、カメラの分解能に関係がある。カメラ・マーカ間の距離が 15[m] の場合に比べ、カメラ・マーカ間の距離が 25[m] の場合は光点が 1 画素当たり移動した場合の距離が約 1.7 倍の値となる。この分解能と計測精度の関係から、実験の前段階で図 5 に示した結果より 20[mm] 程度の誤差になると想定していた。試験体 A 棟基礎部の最大計測誤差は計測可能時刻のみで考えると、X 軸方向で 19.3[mm]、Y 軸方向で 19.3[mm]、Z 軸方向で 7.7[mm] であり、想定した計測性能が示された。また、試験体 B 棟基礎部に設置したマーカ M33 の計測誤差は、時刻 11[s] から 20[s] において、計測誤差の増大が見られ、X 軸方向最大誤差 26.8[mm]、Y 軸方向最大誤差 30.3[mm]、Z 軸方向最大誤差 8.9[mm] となっている。これは、試験体 A 棟の倒壊時のモルタル壁崩壊に伴い舞い上がった粉塵により、マーカからの光が拡散し、認識画素数が減少したためである。粉塵が今回の発生量より多い場合、光を完全に遮断してしまうことも考えられるため、試験対象に向かって送風するなど何らかの対策が求められる。

倒壊挙動の計測という点では、4[m] 以上の変位計測が大規模計測空間において可能であることが実証された。

以上より、倒壊挙動の計測が可能である本計測システムは開発目標の一つである実大三次元震動破壊実験施設のような大規模な空間での計測に十分な性能を持ち合わせていると判断できる。

Fig.6 Placement condition of test specimens on shaking table

(a) A type house without reinforcement

(b) B type house with reinforcement

Fig.7 Placement condition of markers on test specimens

Fig.8 CCD camera placement

Fig.9 A type house after shaking table test

Fig.10 Measurement result of fracturing process in A type house

Table 2 Maximum measurement difference in A type house

Marker No.	Direction	Max. Error [mm]	RMS of Error [mm]	Error at Max. Disp.[mm]
M13	X	19.3	5.8	14.3
	Y	19.3	4.1	12.5
	Z	7.7	2.6	0.70

Fig.11 Measurement result of fracturing process in B type house

Table 3 Maximum measurement difference in B type house

Marker No.	Direction	Max. Error [mm]	RMS of Error [mm]	Error at Max. Disp.[mm]
M33	X	26.8	7.0	7.4
	Y	30.3	6.0	14.1
	Z	8.9	2.9	0.30

6. 結論

本研究では、モーションキャプチャー技術に代表される画像処理技術を応用した新しい非接触型動的三次元変位計測システムの研究開発を行い、研究目標の一つである、大型三次元震動破壊実験施設 E-Defense での移築試験体の倒壊過程を計測することで、計測システムの有効性を検証した。その結果、これまでに実施してきた実験から想定される計測精度で大計測空間での実規模構造物の倒壊過程を計測可能であることを実証した。

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「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。また、戸建住宅の倒壊実験は文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト「木造建物実験」(研究開発代表者:坂本功 防災科学技術研究所客員研究員, 東京大学教授)の一環として実施されたものである。関係各位に深甚なる謝意を表する。

参考文献

- (1) Fujita S., Furuya O., Niitsu Y., Mikoshiba T., Aikawa S., Fujimura S., 'Study on Measurement Method for Structural Fracturing and Breakdown Process in Shake Table Tests', PVP-Vo. 402-2 Seismic Engineering, pp. 225-230, July 2000.
- (2) Fujita S., Furuya O., Niitsu Y., Mikoshiba T., Aikawa S., Study on Measurement Method for Structural Fracturing Process in Shake Table Tests using Image Processing ', PVP-Vo. 428-1 Seismic Engineering, pp. 167-172, July 2001.
- (3) Fujita S., Furuya O., Niitsu Y., Mikoshiba T., Yamazaki H., Study on 3-D Measurement Method for Structural Dynamic Displacement in Shake Table Tests using Image Processing, PVP-Vo. 445-1 Seismic Engineering, pp.35-41, August 2002.
- (4) Fujita S., Furuya O., Niitsu Y., Mikoshiba T., Nakano D., Study on 3-D Measurement Method using Image Processing Technique for Dynamic Displacement in Shake Table Tests, PVP-Vo. 466 Seismic Engineering, pp.1-7, July 2003
- (5) Fujita S., Furuya O., Niitsu Y., Mikoshiba T., Nakano D., Research and Development of Measurement Method for Structural Fracturing Process in Shake Table Tests using Image Processing Technique, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.126 No.1, pp.115-121, Feb. 2004.
- (6) Fujita S., Furuya O., Niitsu Y., Study on 3-D measurement method in shake table tests using image processing technique (1st report, verification of synthetic performance of the measurement system), PVP-Vol.486-1, Seismic Engineering, pp.169-174, July 2004.
- (7) Fujita S., Furuya O., Mikoshiba T., Study on 3-D measurement method in shake table tests using image processing technique (2nd report, Measurement accuracy in actual fracturing test using full scale wooden house model), PVP-Vol.486-1, Seismic Engineering, pp.175-180, July 2004.
- (8) 井口征二: 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- (9) 谷口慶治: 画像処理工学, 共立出版, 1996.