

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289008

研究課題名(和文) 三次元形状変形ひずみ計測における多数撮像素子と基準面による超高速計測手法の開発

研究課題名(英文) Development of High-speed Measurement Method Using Multi-imaging Sensors and Reference Planes for 3D shape, Deformation and Strain Distribution Measurement

研究代表者

藤垣 元治 (Fujigaki, Motoharu)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40273875

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、構造物の三次元形状や変形、ひずみ分布を超高速で連続的に撮影することで、物体の衝突時や破壊時の挙動が計測できる計測手法を開発した。装置としては、トリガタイミング制御ユニットとカメラユニットの試作を行った。また、三次元状の物体表面に取り付けられた2次元格子パターンの位相解析を精度よく行うために、重み付け位相解析法を提案した。これにより構造物の三次元形状や変形、ひずみ分布を超高速で連続的に撮影するシステムを構築できた。格子パターンを貼付けた高速に回転する円盤の回転角を20マイクロ秒間隔で精度よく計測できた。バウンドするゴムボールの表面の三次元形状とひずみ分布の計測を行うことができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, a high-speed measurement method using multi-imaging sensors and reference planes for 3D shape, deformation and strain distribution measurement was developed. A high-speed trigger control unit and multi-camera unit were prototyped. A weighting phase analysis method (WPAM) to analyze 2D phase accurately was developed. A high-speed measurement system was developed with integration of these devices and software. As the evaluation, two experiments were performed. First, a rotated angle on a high-speed rotated plate was measured at intervals of 20 micro-seconds accurately using the developed system. Second, 3D shape and strain distribution of a bounding rubber ball was measured at intervals of 20 micro-seconds accurately.

研究分野：画像計測

キーワード：高速度撮影 多数カメラ 画像計測 形状変形ひずみ分布計測 サンプリングモアレ法 破壊

1. 研究開始当初の背景

カメラを用いた三次元形状計測や変形計測、ひずみ分布計測の従来手法は、光学系をモデル化して幾何的な位置関係を数式で表す手法である。三次元形状計測においては、格子投影による位相シフト法が分解能がよい手法として注目されている。高速な位相シフトによる三次元形状計測としては、DLP プロジェクタと高速度カメラを用いた計測手法も開発されている。

構造物の破壊時の挙動の計測としては、高価な高速度カメラが用いられている。最近では100万コマ毎秒や1000万コマ毎秒のものが市販されているが、非常に高価なために普及していない。また、複数の撮像素子を組み込んで撮影タイミングをずらして高速度に複数毎の画像を撮影するカメラも開発されているが、同軸の光学系にしているために撮影枚数は数枚に限られる。

2. 研究の目的

本研究では、構造物の三次元形状や変形、ひずみ分布を超高速度で連続的に撮影することで、物体の衝突時や破壊時の挙動が計測できる計測手法を開発する。これまでに基準面を用いるキャリブレーション手法によって、カメラの位置にかかわらずにワールド座標系のみで三次元形状や変位・ひずみ分布を計測する手法を提案してきた。この手法は複数のカメラの位置が異なっても正しく計測ができる。最近の撮像素子は100ナノ秒の時間分解能で電氣的に外部トリガをかけることができる。すなわち複数のカメラを用いて順次撮影位置を切替えることで、高速度に計測を行うことができることになる。上記キャリブレーション方法と組み合わせることで、異なる位置に設置されたカメラで撮影した画像からでも、同じ座標系で三次元形状、変形、ひずみ分布の計測を行うことができるため、超高速度計測が実現できる。本研究では、超高速度に計測が行える計測装置を構築する。

3. 研究の方法

図1に示すように、順次トリガ信号を与えることができるトリガ発生装置とそのトリガ信号を受けて撮影することができる小型カメラユニットを試作する。試作した装置を用いて、高速度計測ができることを実験により示す。

4. 研究成果

(1) トリガタイミング制御ユニットとカメラユニットの試作

図2に示したような多数カメラユニットを試作した。カメラ8個がひとつのコントローラに接続されており、コントローラからパソコンに撮影画像を転送する。また、タイミング制御回路を試作し、図2(a)に示すように配置した。その装置の写真を図3に示す。

トリガ発生回路は、1  $\mu$ s 単位で任意のタイミングでトリガ信号を発生できるようにした。また、計測対象の現象をセンサーで検出して、その信号を元にしてトリガ信号発生が開始するようにした。トリガ発生回路の評価として、図4に示すように、トリガ出力信号の波形の確認を行った。1  $\mu$ s ごとに精度よくトリガ信号が出力されていることが確認できた。

多数カメラユニットは、8台の白黒 CMOS カメラが取り付けられており、個々のカメラごとに外部トリガ入力端子があり、それぞれ任意のタイミングで露光が開始できるようになっている。パソコンとは USB で接続され露光時間は接続するパソコンから設定可能となっている。

また、図3に示す装置を用いて、400 rps で高速回転する円盤を撮影することによって、20 ms ごとの間隔で撮影を行い、円盤の回転角度の計測ができていることも確認した。

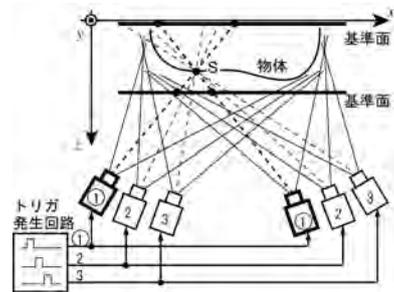
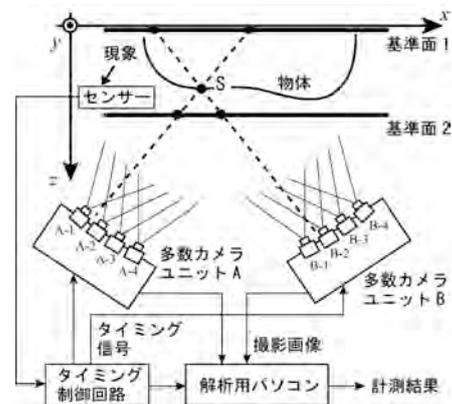
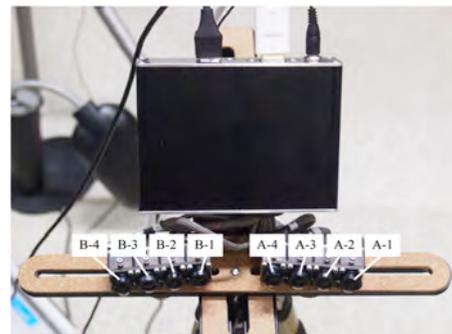


図1 複数のカメラを用いた計測装置



(a) ブロック図



(b) 多数カメラユニットの写真

図2 試作した多数カメラユニット

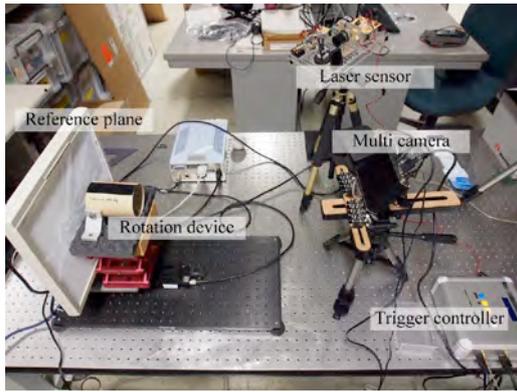


図3 試作した実験システム

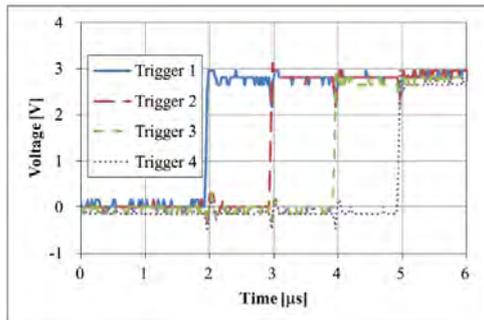


図4 トリガタイミング制御ユニットの評価

(2) 重み付け位相解析法の提案

格子パターンの位相解析精度を向上させるために、新しい位相解析アルゴリズムとして、重み付け位相解析法を提案した。従来のサンプリングモアレ法は、同じ画像の中で格子のピッチが大きく変化すると、位相解析精度が低下するという問題があった。

そこで、注目点の周囲の輝度値に重みを掛け算して足し合わせた値を元にして位相値を求める手法を提案した。

図5に重み付け位相解析法の概念図を示す。注目画素 $(x, y)$ の左右の輝度分布を示す。 $N$ を基準ピッチとし、注目画素の前後 $N$ 画素について、幅 $N$ 画素の重み分布を $w(k)$ とする。この重み分布は、三角波または余弦波、またはその中間的な波形とする。図5は、 $N$ が4の場合の図である。式(1)に示すように、注目点の前後の輝度 $I(x+k, y)$ に重み $w(k)$ を掛け算した値から注目点の位相 $\theta(x, y)$ が得られることになる。

$$\theta(x, y) = \arg\left( \sum_{k=-(N-1)}^{N-1} w(k) I(x+k, y) \exp(-i2\pi k / N) \right) \quad (1)$$

2次元格子を斜め方向から撮影した場合、図6に示すようにピッチが大きく異なる画像が撮影される。図6は4mmピッチの2次元格子を斜め30度から撮影して得られた画像である。ここに0.1mmずつの変位を与え、得

られた画像に対してサンプリングモアレ法を用いて位相解析を行うと、図7(a)に示すように、画像の右側部分で大きな誤差が発生する。一方、重み付け位相解析法を用いると図7(b)のように誤差を小さくすることができた。

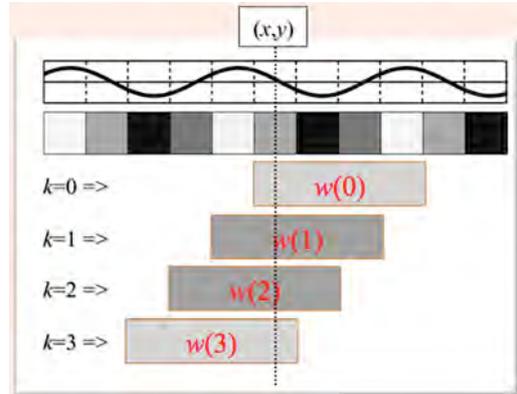


図5 重み付け位相解析法の概念図

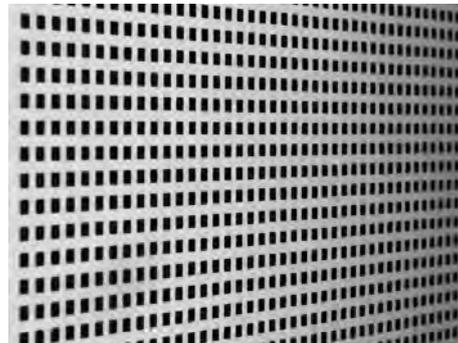
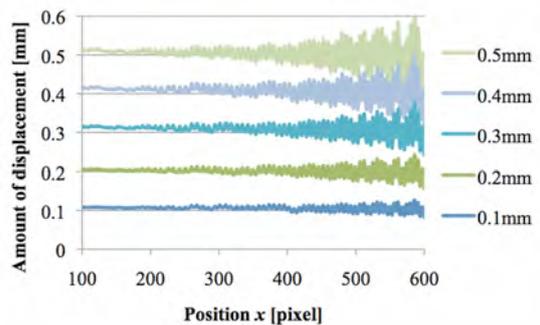
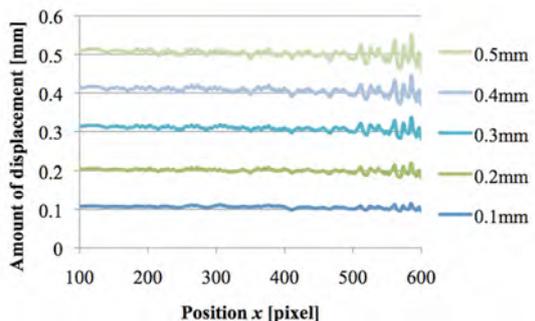


図6 解析対象の格子画像



(a) サンプリングモアレ法の場合



(b) 重み付け位相解析法の場合

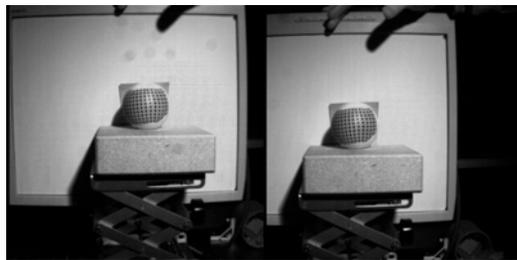
図7 サンプリングモアレ法と重み付け位相解析法による変位計測結果の比較

(3) 高速現象への適用と評価

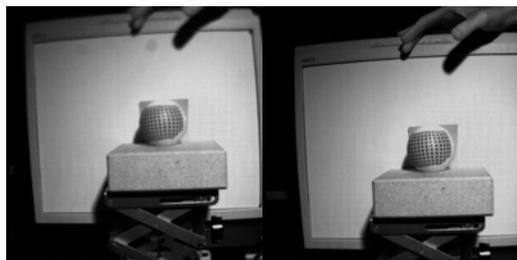
図2に示す試作したトリガタイミング制御ユニットと多数カメラユニットを用いて、高速撮影実験を行った。図8に、テニスボールを支えている手を離して自由落下を行い、下のコルクに衝突した際における撮影画像を示す。撮影は  $20\ \mu\text{s}$  ごとに行った。これによって得られた撮影画像を用いて、それぞれの時刻における3次元形状を解析し、また、テニスボール自由落下後の撮影開始  $0\ \mu\text{s}$  における3次元形状を変形前としたときの  $20\ \mu\text{s}$ ,  $40\ \mu\text{s}$ ,  $60\ \mu\text{s}$  それぞれの時刻における最大主ひずみおよび最小主ひずみを解析した結果を図9に示す。計測結果から、最大主ひずみおよび最小主ひずみが時系列ごとに変化していることが確認できた。



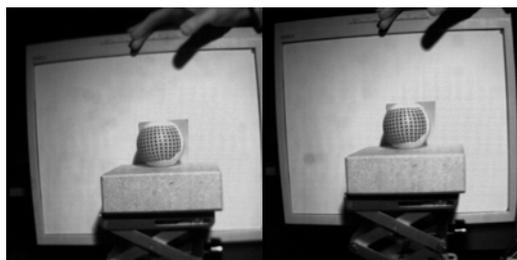
(a) A-1 ( $0\ \mu\text{s}$ ) (b) A-2 ( $20\ \mu\text{s}$ )



(c) A-3 ( $40\ \mu\text{s}$ ) (d) A-4 ( $60\ \mu\text{s}$ )



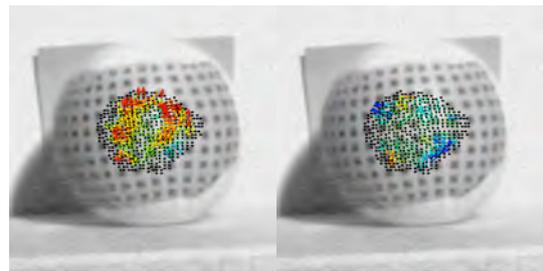
(e) B-1 ( $0\ \mu\text{s}$ ) (f) B-2 ( $20\ \mu\text{s}$ )



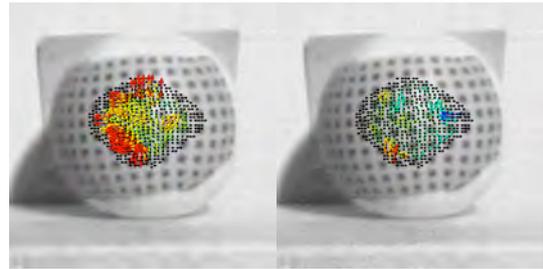
(g) B-3 ( $40\ \mu\text{s}$ ) (h) B-4 ( $60\ \mu\text{s}$ )

図8 テニスボール自由落下後の衝突時を複

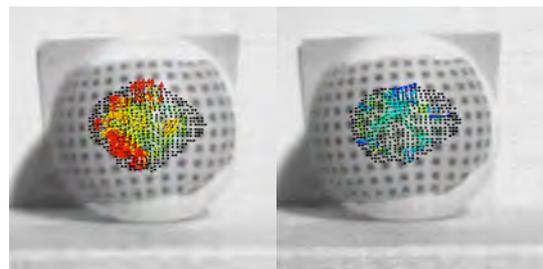
数カメラによって撮影した画像



(a)  $20\ \mu\text{s}$  (最大) (b)  $20\ \mu\text{s}$  (最小)



(c)  $40\ \mu\text{s}$  (最大) (d)  $40\ \mu\text{s}$  (最小)



(e)  $60\ \mu\text{s}$  (最大) (f)  $60\ \mu\text{s}$  (最小)

図9 計測結果 (最大主ひずみと最小主ひずみの分布)

(4) まとめ

本研究により、トリガタイミング制御ユニットとカメラユニットの試作を行った。また、三次元状の物体表面に取り付けられた2次元格子パターン有位相解析を精度よく行うために、重み付け位相解析法を提案した。これにより構造物の三次元形状や変形、ひずみ分布を超高速で連続的に撮影するシステムを構築できた。

破壊現象への適用については、今後、構築した試験装置を用いて実施する予定である。

また、構築したカメラを格子投影による三次元計測手法に適用するために、電気的なスイッチングで高速に位相シフトを行うことができるライン状LEDデバイスに適用するための準備を行った。ライン状LEDデバイスの点灯位置の切り替えと、カメラの撮影を同期させることで、超高速な三次元形状計測を行うことができる。これについては今後引き続き実験を行っていく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

〔学会発表〕(計7件)

(1) 藤垣元治, 吉川隆章, 村田頼信, 重み付け位相シフト法による回転するタイヤの動的ひずみ分布計測, 第3回サンプリングモアレ法による構造物の計測技術に関する研究会講演資料, 13-15, (2015.8.10). (東京都)

(2) Fujigaki, M., Yoshikawa, T., Murata, Y., Prototype of High-speed Camera Switching System for 3D Shape and Strain Measurement, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences (ICCES'15), (2015.7.22). (Reno, USA)

(3) 藤垣元治, 吉川隆章, 村田頼信, 位相解析による三次元形状・変位・ひずみ計測用高速撮影システムの試作, 第20回知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, 170-173, (2015.7.10). (東京都)

(4) 藤垣元治, 村田頼信, 吉川隆章, 重み付け位相解析法を用いた回転するタイヤの動的形状・ひずみ分布計測, 日本非破壊検査協会平成26年度第2回応力・ひずみ測定部門講演会資料, 19-22(2014.9.27). (鳥取県鳥取市)

(5) Yoshikawa, T., Tomita, D., Fujigaki, M. and Murata, Y., Structural Deformation Measurement Using Weighting Phase Analysis Method, Abstract of 16th International Conference on Experimental Mechanics(ICEM16), (2014.7). (Cambridge, UK)

(6) 吉川隆章, 藤垣元治, 村田頼信, 重み付け位相解析法による二次元格子の位相解析速度の向上, 第2回サンプリングモアレ法による構造物の計測技術に関する研究会講演資料, 30-31(2014.3.24). (大阪府大阪市)

(7) 吉川隆章, 藤垣元治, 村田頼信, 二次元平滑化処理を用いた重み付け位相解析法の系統的誤差の軽減, 第45回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム講演論文集, 7-12(2014.1.24). (大阪府大阪市)

〔産業財産権〕

○出願状況(計2件)

名称: 多数カメラによる高速度計測方法および装置

発明者: 藤垣元治, 吉川隆章

権利者: 藤垣元治

種類: 特許

番号: 特願 2015-160211

出願年月日: 2015年8月14日

国内外の別: 国内

名称: 重み付けを用いた格子画像の位相解析方法

発明者: 藤垣元治, 吉川隆章

権利者: 藤垣元治

種類: 特許

番号: 特願 2014-28830

出願年月日: 2014年2月18日

国内外の別: 国内

○取得状況(計1件)

名称: 重み付けを用いた格子画像の位相解析方法

発明者: 藤垣元治, 吉川隆章

権利者: 藤垣元治

種類: 特許

番号: 特許第 5795095

取得年月日: 2015年8月21日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤垣 元治 (Fujigaki Motoharu)

福井大学大学院・工学研究科・教授

研究者番号: 40273875

(2)研究分担者

村田 頼信 (Murata Yorinobu)

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号: 50283958