

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24246071

研究課題名(和文) 実時間モード解析を用いたダイナミクスベースド画像検査法

研究課題名(英文) Dynamics-based Visual Inspection Using Real-time Modal Analysis

研究代表者

石井 抱 (ISHII, IDAKU)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40282686

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、音声周波数レベルの振動分布を実時間計測し、共振周波数やモード波形等の対象固有の振動モード特性を画像特徴量として用いるダイナミクスベースド画像検査法の概念を提案し、その高速実時間化に向けた理論・アルゴリズムの体系化を行った。実際に画像処理、モード解析、構造欠陥認識などの一連の処理を動作可能とする10000fps高速ビジョンをセンシングハードウェアとして開発し、高速ビジョンを用いた部材レベルでの動作試験における亀裂検出から、構造物モデルに対する振動モニタリングの事例を通して、モード解析技術と高速画像処理・認識を融合した実時間ダイナミクスベースド画像検査法の有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：This study proposed a concept of dynamics-based visual inspection for verifying dynamics properties of a vibrating object such as resonant frequencies and mode shapes, and systematically organized its theory and algorithm for real-time operation. We developed a high-speed vision system that can simultaneously operate image processing, modal analysis, and defect identification at 10000 fps as a sensing hardware for dynamics-based visual inspection, in which modal analysis technology and real-time high-speed vision technology are harmonized. Its effectiveness was demonstrated by showing several experimental results in crack detection in material-level test and in vibration monitoring for structure model.

by showing

研究分野：計測工学

キーワード：計測システム 画像情報処理 振動解析 情報センシング

1. 研究開始当初の背景

モード解析法は、構造物の動的特性を知る振動解析ツールとして知られ、近年では橋梁等の大規模構造物のビジョンベースモード解析が報告されているが、大規模行列に対する特異値分解等に多大な計算量を要し、オフラインでのスポット解析に限定されていた。モード解析法は、各種分野でのスポット構造診断ツールとして重用される反面、実時間かつ長時間でのセンシングが求められる検査場面では用いられていない。一方で研究代表者らは、1000fps レベルで動作する高速ビジョンの研究をハードウェア・ソフトウェア両面から進めると同時に、人間の目で見ることが難しい音声周波数レベルの振動分布のモード解析に基づくダイナミックセンシングの研究を進めてきた。これらの知見・ノウハウを基に、実時間モード解析に基づくダイナミクスベース画像検査法のさらなる高度化を実現するべく、本申請を着想するに至った。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らが持つ高速ビジョンの研究実績を基に、音声周波数レベルの振動分布を実時間計測し、共振周波数やモード波形等の対象固有の振動モード特性を画像特徴量として用いるダイナミクスベース画像検査法の概念を提案し、その高速実時間化に向けた理論・アルゴリズムの体系化を行う。実際に画像処理、モード解析、構造欠陥認識などの一連の処理を動作可能とする10000fps 高速ビジョンをセンシングハードウェアとして開発し、高速ビジョンを用いた部材レベルでの動作試験における亀裂検出から、構造物モデルに対する振動モニタリングの事例を通して、モード解析技術と高速画像処理・認識を融合した実時間ダイナミクスベース画像検査法の有効性を示す。

3. 研究の方法

本研究では、対象固有の振動モード特性を画像特徴量として用いるダイナミクスベース画像検査法の提案を行い、その計測理論・アルゴリズムの体系化を行った上で、これらの処理を集積化した高速ビジョンハードウェアに基づく実時間ダイナミクスベース画像検査技術の有効性を、実システム上での動作検証を通して示す。具体的には、以下の項目の研究を行った。

- ① ダイナミクスベース画像検査法の計測原理・アルゴリズム体系の構築
- ② 実時間ダイナミクスベース画像検査のための10000fps 高速ビジョンの開発
- ③ 電子スペckルパタン干渉法に基づく部材レベルでの構造物試験
- ④ 大規模構造物モデルを用いたストラクチャヘルスモニタリング試験

4. 研究成果

- ① ダイナミクスベース画像検査法の計測原理・アルゴリズム体系の構築
振動分布計測に向けた輝度勾配ベース特

徴追跡法として、a)オプティカルフロー法、b)特徴点追跡法を高速ビジョンに実装した。

特徴点抽出の高速実時間実現のために、(a)並列回路実装による輝度勾配に基づく Harris コーナー検出の高速化、(b)追跡すべき特徴点数の選択、(c)フレーム間画像変化が微小という高速ビジョンの特性に基づく対応点探索領域の局所化を導入した特徴点追跡アルゴリズムを提案し、一部機能を高速ビジョン IDP Express の FPGA 上に並列回路実装することにより、(a)の特徴点抽出を 512×512 画像に対して 2000fps、(b),(c)も含めた形で 300 点以上の特徴点追跡を行った場合でも 500fps で実時間動作することを確認した。図1にカメラを動かした形で大学キャンパスを撮影した場合の入力画像・特徴点抽出画像列を示す。

フロー速度に合わせ適切なフレーム間隔の画像対を選択により、計測可能な速度範囲及び計測精度が向上したフレームストラドリングオプティカルフロー法を提案した。輝度勾配インテグラルイメージ計算の導入や GPU での並列処理化により、対象に特徴点がない場合でも輝度勾配の時空間変化から、全ての画素におけるフローを実時間計算するフルピクセルオプティカルフローシステムを実現し、時速 100km の高速運動対象に対する実時間速度分布計測を可能とした。

高速画像処理に対応する形で、対象の振動特性を求めるモード解析についても高速化アルゴリズムの検討を行った。研究代表者らは、未知の加振入力下での出力のみから、振動特性を推定する出力オンリーモード解析の高速化アルゴリズムとして SSI-CPAST 法を提案した。

最初に SSI アルゴリズムについて説明する。慣性/粘性/剛性行列で表される自由振動系

$$M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx = 0 \quad (1)$$

を想定し、上式の振動系に関する離散時間状態方程式の状態遷移行列A、出力行列Cの推定により、ダイナミクス推定する確率的部分空間同定法(SSI)を高速化したものである。

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k, \quad y_k = Cx_k \quad (2)$$

x_k は状態変数、 y_k は可観測な出力、 w_k は加振入力としての零平均の白色ノイズである。

複数出力ベクトル y_k から構成される Hankel 行列 Y_k を考え、ベクトル x_k, w_k に対する Hankel 行列 X_k, W_k を用いて式(1)の状態方程式を以下に置き換えた上で、その観測行列 Γ_k の列ベクトルが張る部分空間と Y_k の列ベクトルが張る部分空間が等価なことを用いて、観測行列 Γ_k を推定する。

$$Y_k = \Gamma_k X_k + G_k W_k \quad (3)$$

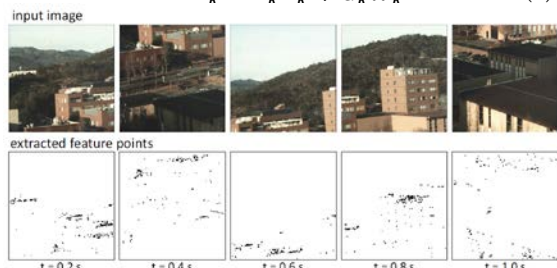


図1 実時間特徴点抽出・追跡の様子

SSI アルゴリズムでは、 Y_k の列ベクトルが張る部分空間を特異値分解等により抽出することで、観測行列 Γ_k を出力ベクトル y_k から計算可能とし、状態遷移行列 A 、出力行列 C は観測行列 Γ_k との以下の関係から推定可能となる。

$$\Gamma_k = [C \ CA \ CA^2 \ \dots \ CX^{u-1}]^T \quad (4)$$

SSI アルゴリズムでは、状態遷移行列 A 、出力行列 C から、共振周波数、減衰係数、モード波形等のモード特性が最終的に計算できる一方で、大規模な Hankel 行列に対して特異値分解を適用すると、計算量が非常に大きくなり、オンライン実装が非常に難しいものとなる。

提案する SSI-CPAST 法は、この問題を解決するために、大規模行列の特異値分解計算を避ける再帰的部分空間同定法の高速アルゴリズムの一つである CPAST 法を用い、SSI を高速化する方法である。CPAST 法は、次式により出力ベクトル η_k により計測される次の状態信号 ξ_k

$$\eta_k = D\xi_k + v_k \quad (5)$$

について、正規直交部分空間の基底行列 O_k に対し、忘却係数 β を用いた次の拘束条件付き最小化問題を考え、解となる基底行列 O_k を再帰的な更新則により求める方法である。

$$\min_o J(O_k) = \sum_{i=1}^k \beta^{k-i} \|\eta_i - O_k h_k\| \quad (6)$$

$$\text{subject to } O_k^T O_k = I$$

D はステアリング行列、 v_k は零平均の白色ノイズ、 $h_k = O_{k-1}^T \eta_k$ は時刻 $k-1$ の O_{k-1} により圧縮された η_k に関するデータである。

SSI-CPAST 法では、SSI アルゴリズムの式(3)における Hankel 行列 Y_k の列ベクトルに関する方程式と CPAST 法の式(5)が類似することを利用して、式(5)の η_k 、 ξ_k を状態方程式(式(2))の状態ベクトル x_k 及び Hankel 行列 Y_k の列ベクトルに置き換えた上で CPAST 法を適用することにより、SSI アルゴリズムを加速するものである。SSI-CPAST アルゴリズムでは、観測行列 Γ_k の列ベクトルが張る部分空間と追跡される部分空間 O_k が等価であることを利用し、最終的に共振周波数、減衰係数、モード波形等のモード特性が計測可能となる。

アルゴリズムの処理時間は、計測点数 l 、推定モード特性の最高次元数 M 、SSI-CPAST アルゴリズムの各種パラメータ(ウィンドウの長さ τ 、忘却係数 β 、推定クオリティを表す u, v)等に依存する。高速ビジョンに対応した形で、SSI-CPAST 法を用いた実時間モード解析が可能かを確認するために、汎用コンピュータ(Intel Core2 Quad Q9300 bulk CPU, 4GB メモリ)上での計算時間を確認した。 $M=3$ 、 $\tau=100$ 、 $\beta=0.99$ 、 $u=20$ 、 $v=2000$ で計算した場合、計測点数 l を変化させた場合の計算時間を図 2 に示す。計算時間は点数に比例する形で増加し、2000fps(=2kHz)での計測データに対し、計測点数を 20 点以下に抑えたと 0.5ms 毎にモード特性の実時間出力を確認した。モード特性は必ずしも高フレームレート出力する

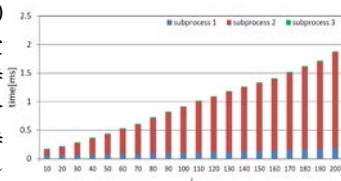


図2 SSI-CPAST 法の計算時間

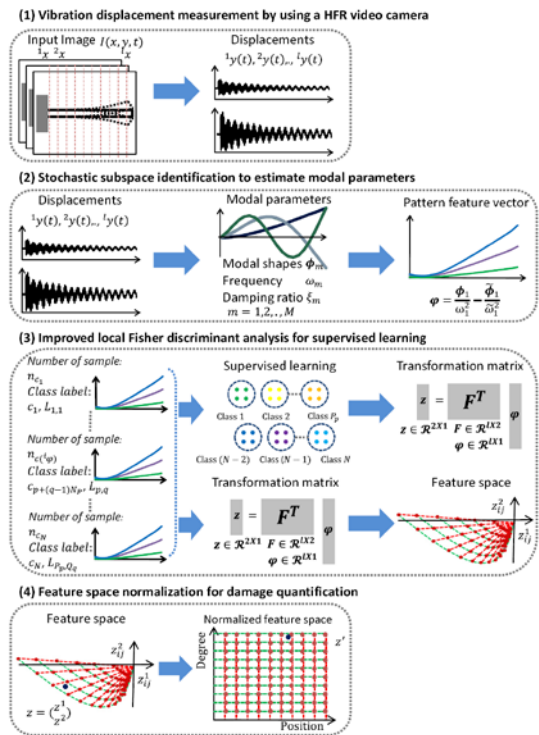


図3 Modal Radar 法

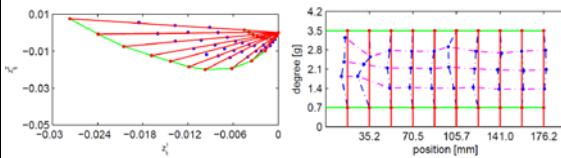


図4 ダメージ定量化された特徴空間例

必要がなく、出力間隔の間引きにより、より多くの計測点数による実時間モード推定が可能となる。

振動対象から推定されたモード特性に基づき、クラックや荷重等のダメージの大きさ・位置を定量化する構造物欠陥パターン認識法として、Modal Radar 法を提案した。提案手法では、ダメージの大きさ・位置に対して非線形に変化するモード特性に対し、改良型局所 Fisher 判別分析(LFDA)による教師付き学習により、ダメージの大きさ・位置が線形出力される特徴空間を構築することにより、構造物のダメージの定量化を可能にした。

先に述べた画像処理部分や SCI-CPAST 法等によるモード解析部分も含めた形でのフローチャートを図 3 に、鉄製片持ち梁に対し、荷重をダメージとして与えたとき、ダメージが定量化された特徴空間例を図 4 に示す。これ以外の定量化手法として、多方向モード解析法についても提案を行ったが、これについては次小節で説明する。

② 実時間ダイナミクスベースド画像検査のための 10000fps 高速ビジョンの開発

振動対象の三次元形状計測のために、10000 fps 実時間ステレオ計測を行う高速ビジョンを実現した。高速ビジョンハードウェアは、2 台の高速カメラヘッドと接続可能な IDP Express を使い、専用ボード上の FPGA(Xilinx XC3S5000)にモーメント特徴回路を実装し、10000fps で取得された左右 512×96 画像の列方向重心分布を実時間計算し、出力を PC (ASUSTeK P5E mother board、

Intel® Core i7 2.9GHz CPU, 4GB メモリ, 2×16 lane PCI2.0 -e buses)上でステレオ処理することにより、ビーム形状の対象の三次元変位分布を 10000 fps で実時間計測可能とした。図 5 にステレオ高速ビジョンを用いてビーム状対象を計測する実験環境を示す。対象には径 0.98mm、長さ 160mm の鉄製片持ち梁を用いた。

画像検査を行うためのフローチャートを図 6 に示す。ここでは SSI-CPAST 法を用いた実時間多

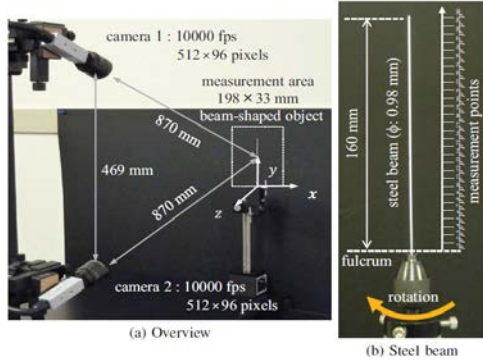


図5 ステレオ高速ビジョンによる振動計測

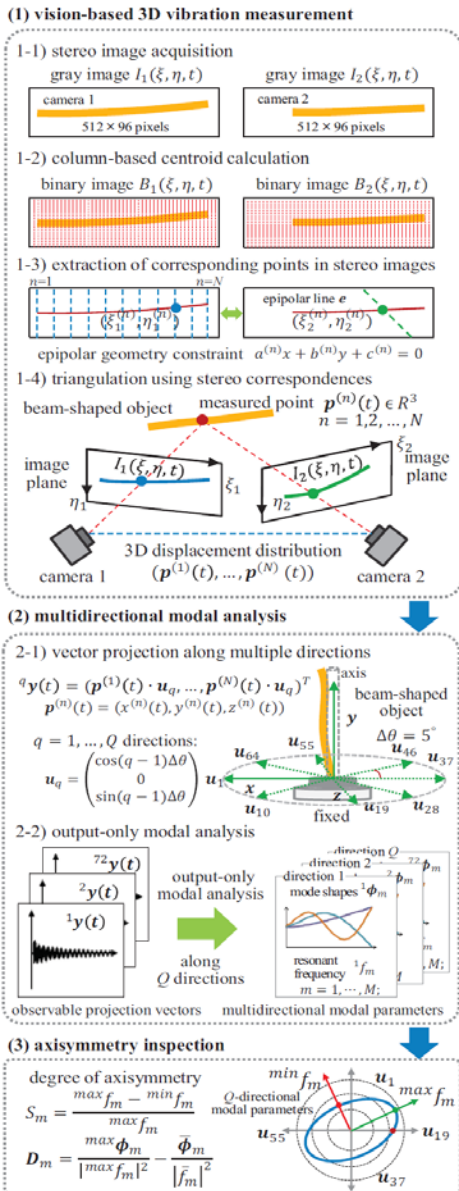


図6 多方向モード解析を用いた画像検査

方向モード解析を提案し、クラック等に伴う振動特性変化を定量化した。多方向モード解析法は、片持ち梁の振動成分が、梁と同一方向の振動は非常に小さく、垂直方向(2次元)が支配的なことを用い、梁の軸回りの複数方向に対し、三次元変位分布を射影したそれぞれの振動成分に対しモード解析を行い、共振周波数やモード特性等における方向依存性を定量化する手法である。

本実験では、計測された片持ち梁の三次元分布から 30 計測点を等間隔に選択し、72 方向(5度間隔)に対する振動射影成分に対し、実時間多方向モード解析を行った。SSI-CPAST 法のパラメータは、0,1ms 間隔の計測データに対し、 $M=2$, $\tau=100$, $\beta=0.99$, $u=60$, $v=6000$ で行い、これらの解析を 40ms 毎に実時間出力した。

手により異なる位置・強さで加振(T1,T2,T3,T4,T5,T6)を与えた場合、72 方向の 1/2 次モード共振周波数分布/モード波形の計測結果を図 7 に示す。異なる加振入力でも、1 次 26.7Hz, 2 次 168.0Hz を中心としたほぼ同じ周波数分布が得られ、1/2 次モード波形も軸対称な形で同一な波形分布が得られ、入力に対してロバストに同一ダイナミクス特性が実時間同定されている。

異なる位置・大きさのクラックがある鉄製片持ち梁 (NC(クラックなし), C1(20mm,10%), C2(20mm,20%), C3(20mm,30%), C4(80mm,30%), C5(120mm,30%)) に対する加振実験を行った。()内の 20, 80, 120mm は梁根元からクラックまでの距離、10, 20, 30%は径に対するクラック深さを示す。NC, C1-3 に対する 72 方向の 1/2 次モード共振周波数分布を図 8 に示す。NC, C1-3 の比較結果から、クラック度合いにより共振周波数が低下、特にクラックがある方向に低下することがわかる。NC, C1-6 について、共振周波数の最大/最小方向の 1 次モード波形の差分による非対称性検査を行ったところ、クラック位置・程度に応じて、振動ダメージを実時間定量化可能なことも確認した。

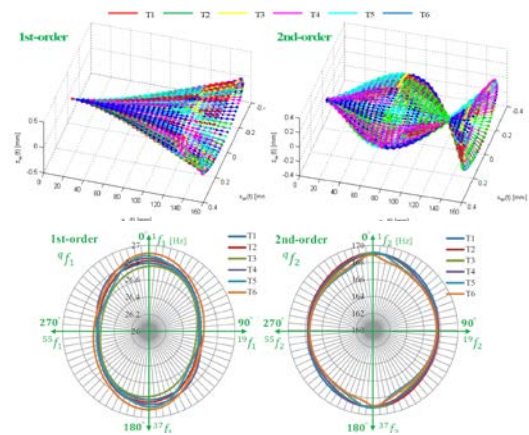


図7 72方向共振周波数・モード波形

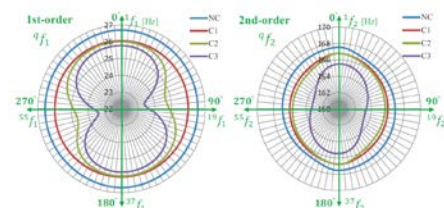


図8 72方向共振周波数(クラックあり)

③ 電子スペckルパタン干渉法に基づく部材レベルでの構造物試験

電子スペckルパタン干渉に基づく実時間サブ μ m微小振動分布計測を行った。図9の赤色半導体レーザー(波長 632.8nm)



図9 スペckル干渉実験装置

を用いたスペckル干渉パタン発生装置を構築し、振動する表面粗さのある平面部材上の干渉パタンの速度分布をオプティカルフロー機能が実装された高速ビジョンの実時間推定により、微小振動分布計測を実現した。オプティカルフローは512×256画像に対し4000 fpsで実行した。

300×200×5mmのステンレスプレートについて、対称プレート(クラック(中心))、非対称プレート(クラック(右))に対する実時間振動分布計測を行った。光学系のパタン投影範囲制限から、径20mm前後範囲での振動分布計測となった。図10に撮影画像及びオプティカルフロー画像例を示す。図11にプレート左側・右側における速度分布の平均値の時間変化及び振動周波数解析結果を示す。対称プレートではクラック左側、右側のピーク周波数が110Hz前後といった同レベルなのに対し、非対称プレートでは左右70Hz、110Hz前後と異なり、クラック位置に伴い振動分布に大きな差が生じたことが確認された。オプティカルフロー機能と電子スペckルパタン干渉法の組み合わせにより、音声周波数レベルの振動分布の変化に対する実時間検出が可能となった。

④ 大規模構造物モデルを用いたストラクチャヘルスマonitoring試験

大型構造物の振動遠隔計測に向けた高速ビジョンとして、1) 2台カメラヘッドが接続可能な専用ボードを同一PCに4枚接続し、最大8台のカメラに対し500 fps実時間追跡を行う多眼高速ビジョン、2) ガルバノミラーを高速視点切替装置として高速ビジョンと連動させ、1台で500視点制御するマルチスレッド高速アクティブビジョンを構築し、橋梁モデルを用いた振動試験を実施した。

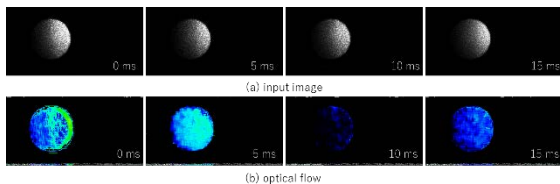


図10 入力画像/オプティカルフロー

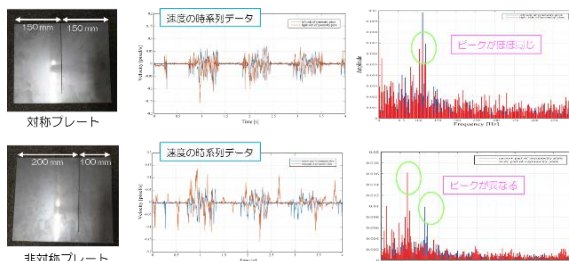


図11 対称/非対称プレートの振動計測結果

1)の多眼高速ビジョンを用いた振動試験結果を示す。実験に用いた橋梁モデルは、上下弦材にL-15×25×25×1.2mmの平面アルミ部材、斜材及び左右部材にFB-15×2mmの平面アルミ材を組み合わせた、長さ4m、高さ0.18m、奥行き0.3mのワーレントラス構造である。1.5m先に設置した5台のカメラを用い、図12のように橋梁モデルの5点のマーカ重心位置を計測した。橋梁モデルの1次共振周波数に対応した18.2Hzのピーク周波数が計測された一方で、計測点数が5点のみなことから、モード波形は詳細なダイナミクス変化を捉えることが難しいことがわかった。

これに対し、2)のマルチスレッド高速アクティブビジョンは、視点あたりの計測レートは低下するものの、1台で複数視点を観測可能な利点を持つ。500視点/秒の視点切替機能を持つマルチスレッド高速ビジョンを15台の33.3fps仮想カメラとして機能させ、橋梁モデルに添付された15個のマーカ重心位置を実時間計測した。図13に実験環境及び橋梁モデルC1-5(C1:荷重3枚、C2:荷重4枚、C3:荷重6枚、C4:一部プレート間のネジを外す、C5:荷重3枚)を示す。C1-3は荷重を中心に、C5は左に配置した。C1試験について、視点毎の同期ずれのスプライン補正後の振動分布の時間変化を図14に示す。この振動分布に対し、モード解析を行った結果を図15に示す。

荷重が大きくなるC1,C2,C3の順に11.14, 10.42, 9.95と共振周波数が低下する一方で、モード波形には大きな違いはなかった。荷重位置違うC1とC5は、共振周波数は11.14, 11.75HzとややC1が低くなる一方で、モード波形に違いが発生した。プレート固定を一部外したC4は他に比べ、共振周波数が非常に低下し、モード波形もダメージ位置に変化が現れ、橋梁モデルのダイナミクス特性が大きく変化したことがわかる。これらの値は加速度計を用いた振動解析結果とほぼ一致するとともに、ストラクチャヘルスマonitoringに向けた常時振動モード計測に向けた実時間かつ長時間動作の確認を行い、実時間ダイナミクスベースド画像検査の有効性を示した。



図12 橋梁モデル及び多眼高速ビジョン

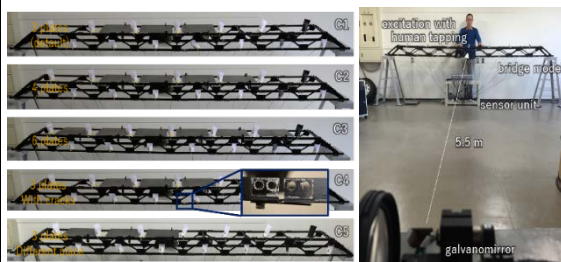


図13 マルチスレッド高速ビジョンを用いた振動試験

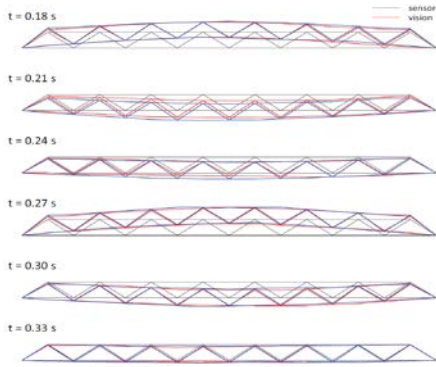


図 14 橋梁モデルの振動分布計測結果 (C1)

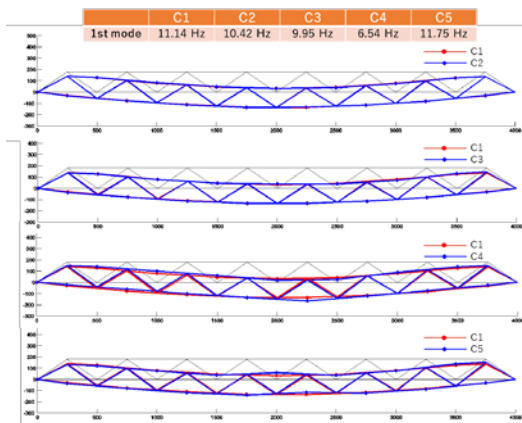


図 15 橋梁モデルの1次モード波形

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)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Q.Gu, S Raut, K.Okumura, T.Aoyama, T.Takaki, I.Ishii, Real-Time Image Mosaicing System Using a High-Frame-Rate Video Sequence, J Robot Mechat, 27(1), 12-23 (2015) (査読有) doi 10.20965/jrm.2015.p0012
- ② J.Chen, Q.Gu, T.Aoyama, T.Takaki, I.Ishii, Blink-Spot Projection Method for Fast Three-Dimensional Shape Measurement, J Robot Mechat, 27(4), 430-443 (2015) (査読有) doi 10.20965/jrm.2015.p0430
- ③ 森上, 中山, 高木, 石井, 4ピンホール視点変換アイリスを用いた単眼ステレオ計測, 日本機械学会論文集, 80(819), DR0322 (2014) (査読有) doi 10.1299/transjsme.2014dr0322
- ④ Y.Liu, H.Gao, Q.Gu, T.Aoyama, T.Takaki, I.Ishii, High-Frame-Rate Structured Light 3-D Vision for Fast Moving Objects, J Robot Mechat, 26(3), 311-320 (2014) (査読有) doi 10.20965/jrm.2015.p0311
- ⑤ H.Yang, Q.Gu, T.Aoyama, T.Takaki, I.Ishii, Dynamics-Based Stereo Visual Inspection Using Multidimensional Modal Analysis, IEEE Sensors J, 13(12), 4831-4843 (2013) (査読有) doi 10.1109/JSEN.2013.2276620
- ⑥ Q.Gu, T.Takaki, I.Ishii, Fast FPGA-Based Multi-Object Feature Extraction, IEEE Trans Circ Sys Video Tech, 23(1), 30-45 (2013) (査読有) doi 10.1109/TCSVT.2012.2202195
- ⑦ 小原, 高木, 石井, 振動ベース画像特徴量を用いた高速ターゲットトラッキング, 日本機械学会論文集 C, 78(788), 1143-1153 (2012) (査読有) doi 10.1299/kikaic.78.1143

- ⑧ L.Chen, T.Takaki, I.Ishii, Accuracy of Gradient-Based Optical Flow Estimation in High-Frame-Rate Video Analysis, IEICE Trans Info Sys, E95-D(4), 1130-1141 (2012) (査読有) doi 10.1587/transinf.E95.D.1130 [学会発表] (計 8 件)

- ① 趙, 中村, 颯, 青山, 高木, 石井, 時速 100 km の運動対称を計測する実時間オプティカルフローシステム, ROBOMECH2015 (みやこめっせ(京都), 2015.5.19)
- ② 伊藤, 楊, 颯, 青山, 高木, 石井, 25 台の仮想パンチルトカメラ制御を可能とする高速マルチスレッドアクティブビジョンシステム, ROBOMECH2015 (みやこめっせ(京都), 2015.5.19)
- ③ J.Chen, T.Yamamoto, T.Aoyama, T.Takaki, I.Ishii, Simultaneous Projection Mapping Using High-Frame-Rate Depth Vision, ICRA2014 (香港(中国), 2014. 6.4)
- ④ Y.Liu, H.Gao, Q.Gu, T.Aoyama, T.Takaki, I.Ishii, A Fast 3-D Shape Measurement Method for Moving Object, PIC2014 (上海(中国), 2014.5.18)
- ⑤ 中村, 石井, 高木, 青山, GPU ベース高速オプティカルフローシステム, ROBOMECH13 (つくば国際会議場(つくば), 2013.5.25)
- ⑥ K.Okumura, S.Raut, Q.Gu, T.Aoyama, T.Takaki, I.Ishii, Real-Time Feature-Based Video Mosaicing at 500fps, IROS2013 (東京ビッグサイト(東京), 2013.11.7)
- ⑦ F.Kimura, T.Yamamoto, S.Toyama, S.Suyama, N.Yoshikawa, I.Ishii, H.Yamamoto, Estimation of Effective Refractive Index Difference in a Liquid-crystal Prism from Interference Fringes Observed with a High Speed Camera, 2nd DHIP (徳島大学(徳島), 2012.11.20)
- ⑧ H.Yang, T.Takaki, I.Ishii, Real-time Multidirectional Modal Parameter Estimation of Beam-shaped Objects Using High-speed Stereo Vision, IEEE Sensors 2012 (台北(台湾), 2012.10.29)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井 抱 (ISHII IDAKU)
 広島大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号: 40282686

(2) 研究分担者

高木 健 (TAKAKI TAKESHI)
 広島大学・工学研究院・准教授
 研究者番号: 80452605 (平成 25 年度～)

青山 忠義 (AOYAMA TADAYOSHI)

広島大学・工学研究院・助教

研究者番号: 00569337

山本 紹嗣 (HIROTSUGU YAMAMOTO)

宇都宮大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 00284315

(3) 連携研究者

特になし