

# マルチスレッドアクティブビジョンを用いた 複数振動分布合成に基づくモード解析

青山 忠義<sup>\*1</sup>, 李 良<sup>\*2</sup>, 姜 明俊<sup>\*3</sup>, 高木 健<sup>\*3</sup>, 石井 抱<sup>\*3</sup>, 楊 華<sup>\*4</sup>,  
梅本 千佳子<sup>\*5</sup>, 松田 浩<sup>\*6</sup>, 力石 真<sup>\*7</sup>, 藤原 章正<sup>\*7</sup>

## Modal Analysis Based on Multiple Vibration Distribution Synthesis Method Using Multithread Active Vision

Tadayoshi AOYAMA<sup>\*1</sup>, Liang LI<sup>\*2</sup>, Mingjun JIANG<sup>\*3</sup>, Takeshi TAKAKI<sup>\*3</sup>,  
Idaku ISHII<sup>\*3</sup>, Hua YANG<sup>\*4</sup>, Chikako UMEMOTO<sup>\*5</sup>, Hiroshi MATSUDA<sup>\*6</sup>,  
Makoto CHIKARAISHI<sup>\*7</sup>, and Akimasa FUJIWARA<sup>\*7</sup>

<sup>\*1</sup> Department of Micro-Nano Mechanical Science and Engineering, Nagoya University  
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan

<sup>\*2</sup> Hitachi High-Technologies Corporation  
1-24-14 Nishi-Shinbashi, Minato-ku Tokyo 105-8717, Japan

<sup>\*3</sup> Department of System Cybernetics, Hiroshima University  
1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 789-8527, Japan

<sup>\*4</sup> State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, HUST  
Wuhan, Hubei 430073, China

<sup>\*5</sup> Keisoku Research Consultant Corporation  
1-665-1 Fukuda, Higashi-ku, Hiroshima 732-0029, Japan

<sup>\*6</sup> Graduate School of Engineering, Nagasaki University  
1-14 Bunkyo-cho, Nagasaki 852-8521, Japan

<sup>\*7</sup> Graduate School for International Development and Cooperation, Hiroshima University  
1-5-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 789-8529, Japan

Previously, we proposed a novel vision-based vibration sensing method of large-scale structures based on a concept of a multithread active vision. In this study, we propose a multiple vibration distribution synthesis method for vibration analysis that increases the sampling rate of each observation point in the multithread active vision system, in order to increase the measurement rate of each observation point of the multithread active vision. The proposed method is demonstrated through a high-order modal analysis for a 4-m long truss-structure bridge model, which was impossible to perform in the previous method.

**Key Words** : High-speed vision, multithread viewpoint control, vibration analysis

## 1. は じ め に

橋梁などの建築構造物は交通や強風、地震などの負荷にさらされており、構造物の安全性評価や維持管理

のため、建築構造物のヘルスマonitoring技術の自動化が求められている。建築構造物のヘルスマonitoringでは、構造物の固有振動数やモーダルパラメーターなどを利用する構造物のダイナミック特性に基づく検査法がよく用いられ、構造物のダイナミック特性を導出する振動分布計測が重要な技術となっている [1,2]。これまでに、センサを計測対象に取り付けることを不要とした高フレームレート画像を用いて非接触で構造物の振動変位をオフラインで解析する手法や [3,4]、構造物の振動計測向けの高速ビジョンによる実時間振動解析法が報告されている [5,6]。このような画像ベースの振動分布計測では、カメラ1台の解像度では大型構造物全体の計測と構造物の部分的な微小変位を同時計測するのに不十分であることから、複数のカメラシステムでの振動計測が求められ、複数の計測点に対応した

<sup>\*1</sup> 名古屋大学大学院工学研究科 (〒 464-8603 名古屋市千種区不老町) tadayoshi.aoyama@mac.nagoya-u.ac.jp

<sup>\*2</sup> 日立ハイテクノロジーズ (〒 105-8717 東京都港区西新橋 1-24-14) liang.li.fg@hitachi-hightech.com

<sup>\*3</sup> 広島大学大学院工学研究科 (〒 789-8527 広島市 鏡山 1-4-1) m-jiang@robotics.hiroshima-u.ac.jp, takaki@robotics.hiroshima-u.ac.jp, iishii@robotics.hiroshima-u.ac.jp

<sup>\*4</sup> 华中科技大学 (〒 430073 中華人民共和国湖北省武漢市洪山区) huayang@hust.edu.cn

<sup>\*5</sup> 計測リサーチコンサルタント (〒 732-0029 広島市東区福田 1-665-1) chikakoh@krcnet.co.jp

<sup>\*6</sup> 長崎大学大学院工学研究科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14) matsuda@nagasaki-u.ac.jp

<sup>\*7</sup> 広島大学大学院国際協力研究科 (〒 789-8529 広島市鏡山 1-5-1) chikaraishim@hiroshima-u.ac.jp, afujiw@hiroshima-u.ac.jp

カメラの設置の困難さや複数のカメラネットワークを制御するソフトウェアの複雑化などの問題点があった。

我々は、1台のカメラで大型構造物の振動分布を計測するマルチスレッドアクティブビジョンに基づく振動計測法を提案したが [7], このシステムでは計測対象に設置された全ての観測点を同時に走査していたため、各観測点の計測レートが必ずしも十分でなく、振動解析に必要な計測データの時間密度が満たされない場合もあった。さらに、マーカーとして貼られた再帰性反射材の位置を得るために複数の強力な照明が必要とされた。

本研究では、マルチスレッドアクティブビジョンを用いた振動解析において、各計測点の計測レートを向上させるための複数振動分布合成法を提案する。さらに、コーナーキューブをマーカーとして使用することで、1つの照明のみを必要とする新たなマルチスレッドアクティブビジョンシステムの構築を行い、4mの橋梁モデルに対して、各計測点の計測レートを3.75倍に高めた振動分布計測実験を行う。従来のマルチスレッドアクティブビジョンでは不可能であった高次のモード解析実験を通して、提案手法と構築システムの有効性を検証する。

## 2. マルチスレッドアクティブビジョンシステム

本研究では、我々が構築した従来システム [7] をベースに高速マルチスレッドアクティブビジョンシステムを構築した。構築したシステムは、マーカーとしてコーナーキューブを使用することで、従来は複数台必要であった照明を1台のみで計測を可能とする。図1に構築したシステムの外観を示す。マルチスレッドアクティブビジョンシステムは、高速ビジョンプラットフォーム IDP-Express [8], ガルバノミラー (6210H, Cambridge Technology), 制御用 PC (Windows 7 Enterprise 64-bit OS, ASUS P7P55D-E board, Intel Core i5 760 2.8 GHz CPU, 4-GB DDR3 1333-Hz memory) で構成されている。制御用 PC にはガルバノミラーへの制御指令を送る DA ボード (Interface, PEX-340416), ミラーのパン・チル

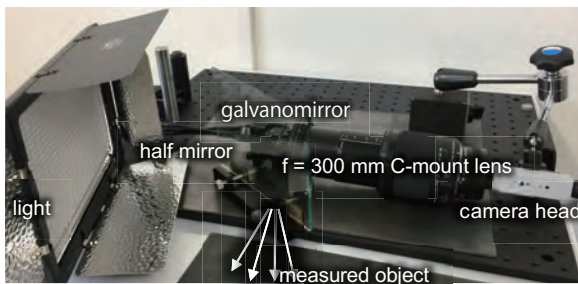


Fig. 1 Overview of the Multithread Active Vision

ト角を取得する AD ボード (Interface, PEX-321216) が搭載されている。観測点の振動イメージを得るため、10 mm のコーナキューブ (PS974M, Thorlabs) が観測点に取り付けられている。設置された全てのコーナーキューブの反射光をカメラヘッドを通して取得するため、図1に示すように 128 mm×178 mm サイズのハーフミラーが照明の前に設置され、コーナーキューブの振動変位は LED 照明下で計測される。

## 3. 複数振動分布合成に基づく検査法

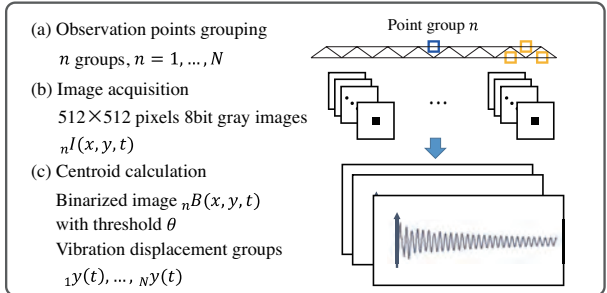
本研究では、大型構造物のダイナミクス特性の変化を観測するため、大型構造物のダイナミクス特性の急激な変化が起こらないと仮定し、複数振動分布合成に基づくダイナミクスベース検査法を提案する。提案手法は、各計測点の低いサンプリングレートによる従来不可能であった高次のモードパラメータを推定することを可能とする。提案するアルゴリズムは以下の通りであり、その概要を図2にまとめる。

### (1) 画像処理による振動変位計測

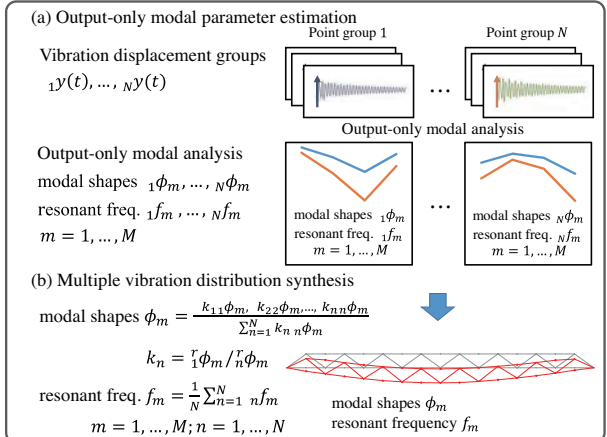
#### (a) 計測点のグルーピング

計測対象物における全ての計測点  $i (1, \dots, l)$  を振動

#### (1) Vision-based vibration displacement measurement



#### (2) Dynamics estimation



#### (3) Inspection

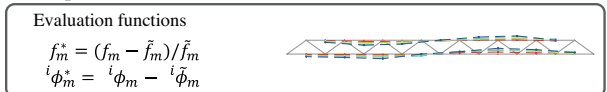


Fig. 2 Flowchart of implemented algorithm

変位合成のための基準点  $r$  を含めた複数のグループ  $n$  ( $1, \dots, N$ ) に分ける。

(b) 画像の取得

1 ms を視線制御, 1 ms を露光時間とした 2 ms を各計測点の画像取得間隔  $\tau$  として設定し, ビジョンシステムにより  $\tau$  ms 毎に各計測点の  $512 \times 512$  画素画像  ${}^i I(x, y, t)$  を取得する。

(c) 計測点の座標計算

以下に示す各計測点の中心座標計算により, 計測グループ内における各計測点の振動変位  ${}^i y(t)$  を導出する。

$${}^i y(t) = \frac{\sum_{x,y} y^i B(x, y, t)}{\sum_{x,y} B(x, y, t)}. \quad (1)$$

ここで,  ${}^i B(x, y, t)$  は閾値を  $\theta$  とした  ${}^i I(x, y, t)$  の 2 値化画像である。さらに, 計測グループ  $n$  における振動分布として, 各計測点の振動変位を以下のようにまとめる。

$${}^n y(t) = [{}^1 y(t), \dots, {}^l y(t)]^T. \quad (2)$$

## (2) ダイナミクス推定

(a) モーダルパラメータ推定

計測グループ  $n$  のモーダルパラメータは出力データのみを必要とする SSI-CPAST アルゴリズムを用いて行う [5]。計測グループ  $n$  における  $m$  次の共振周波数  ${}^n f_m$ ,  $m$  次のモード波形  ${}^n \alpha_m$  を推定する。

(b) 振動分布の合成

各計測グループの振動分布を合成し, 計測対象全体のモーダルパラメータを推定する。

対象物全体の共振周波数は以下のように生成する。

$$f_m = \sum_{n=1}^N {}^n f_m / N \quad (m = 1, \dots, M). \quad (3)$$

対象物全体のモード波形  $\phi_m = [{}^1 \phi_m, \dots, {}^l \phi_m]$  は以下のように生成する。

$$\phi_m = \frac{k_{11} \phi_m, k_{22} \phi_m, \dots, k_{NN} \phi_m}{\sum_{n=1}^N k_{nn} \phi_m} \quad (m = 1, \dots, M; \quad n = 1, \dots, N). \quad (4)$$

ここで,  $k_n = {}^r_1 \phi_m / {}^r_n \phi_m$ , ( $m = 1, \dots, M; \quad n = 1, \dots, N$ ) は正規化された  ${}^n \phi_m$  の係数を表す。

## (3) 計測対象の評価・検査

対象物全体の共振周波数とモード波形に基づき, 以下の評価関数を用いることで, 対象物の損傷を検出する。

$$f_m^* = (f_m - \tilde{f}_m) / \tilde{f}_m \quad (m = 1, \dots, M), \quad (5)$$

$${}^i \phi_m^* = {}^i \phi_m - {}^i \tilde{\phi}_m \quad (m = 1, \dots, M; \quad i = 1, \dots, l). \quad (6)$$

ここで,  $\tilde{f}_m$  および  $\tilde{\phi}_m = [{}^1 \tilde{\phi}_m, \dots, {}^l \tilde{\phi}_m]$  は  $m$  次の正常な共振周波数とモード波形をそれぞれ表す。 $\tilde{f}_m$  および  $\tilde{\phi}_m$  は, 計測時の共振周波数とモード波形をそれぞれ表す。なお,  $\phi_m^* = [{}^1 \phi_m^*, \dots, {}^l \phi_m^*]$  は, 損傷の場所と度合いを示す評価関数ベクトルとなる。

## 4. 実験

### 4.1 実験環境

図 3 に示すように人間が両手で計測対象を叩くことにより振動を与える加振を複数回繰り返し, 振動分布合成に基づくモード解析実験を行った。本実験では図 4 に示すトラス構造の橋梁モデルを計測対象として使用し, 6 枚の  $500 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ,  $3.1 \text{ kg}$  の鉄板が共振周波数を調整するために取り付けられている。カメラから橋梁モデルの中心までの距離は  $5.5 \text{ m}$  であり,  $5.5 \text{ m}$  先で 1 画素が  $0.286 \text{ mm}$ ,  $512 \times 512$  画素画像が  $146 \times 146 \text{ mm}$  の範囲に相当する。橋梁モデルのカメラ側上下弦材 15 本 (上 7 本, 下 8 本) の中間点に図 5 に示すような  $10 \text{ mm}$  のコーナーキューブが (PS974M, Thorlabs) が取り付けられている。 $128 \text{ mm} \times 178 \text{ mm}$  のハーフミラーが LED 照明の前に設置され, 全てのコーナーキューブの反射光がカメラヘッドに入射することで, 15 点の振動分布が 1 台の LED 照明下で計測される。一般的に建築構造物のヘルスマonitoring には加速度センサを用いた FFT 解析やモード解析が行われることから [9], 比較検証のための振動計測システム (PV-85, UV-15, Lion) をコーナーキューブと同位置に設置した。

本実験では, 全ての計測点を図 6 に示すような 5 つのグループに分けた。各グループは基準点 12 を含めた 4 つの計測点から構成されており, マルチスレッド

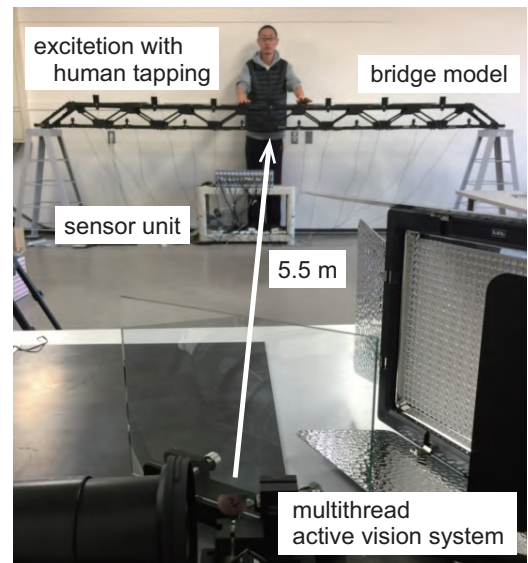


Fig. 3 Experimental Setup

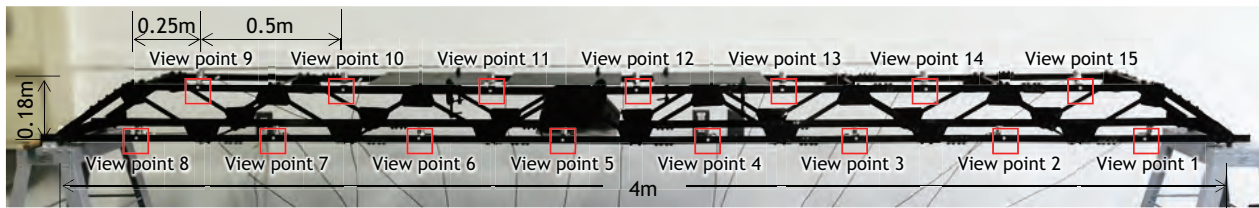


Fig. 4 Truss-structure Bridge Model

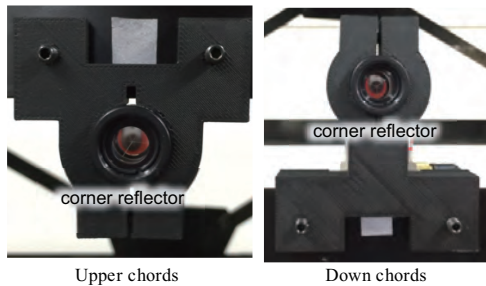


Fig. 5 Corner reflectors

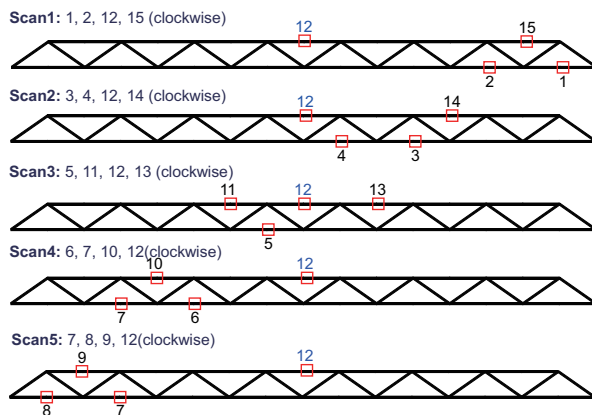


Fig. 6 Scan pattern

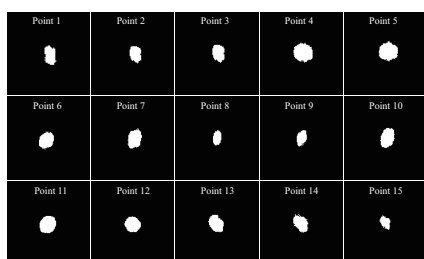


Fig. 7 Binarized images of the captured images for corner reflectors

アクティブビジョンの視線は 2 ms ごとに時計回りに変更され、各計測点の画像が撮影される。

**4.2 マルチスレッドアクティブビジョンシステムの評価** 本小節では、構築システムの安定性と信頼性の評価を 4m 大のトラス構造橋梁モデルのモード解析を通して検証する。

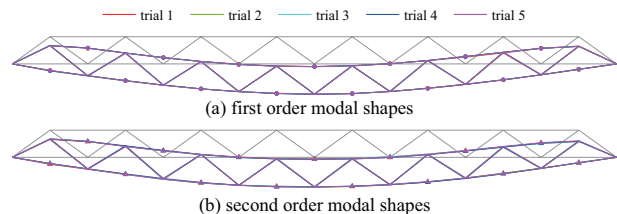


Fig. 8 Modal Shapes of the Bridge Model

**4.2.1 システムの安定性評価** 提案システムの安定性を評価するため、提案した複数振動分布合成に基づくモード解析実験を 5 回試行した。図 7 は構築システムにより取得した各計測点の二値化画像を示す。モード解析実験 1 試行ごとに図 6 に示す 5 つのグループに対する走査がそれぞれ行われる。表 1 は各試行における 1 次および 2 次の共振周波数を示し、各試行により得られた共振周波数の値は近い値となっているのが確認できる。表内の AVE および SD は 5 試行の解析で得られた共振周波数の平均値と標準偏差を表しており、SD/AVE が 1% よりも大幅に小さな値となっており、提案システムが安定して共振周波数を推定できることがわかる。

図 8 に 5 試行の解析で得られた 1 次および 2 次のモード波形を示し、図 9 に各計測点におけるモード波形の標準偏差を示す。1 次モード、2 次モードともに標準偏差は非常に小さな値となっており、提案システムにより安定してモード波形が得られることが確認できる。

**4.2.2 システムの信頼性評価** 表 2 および図 10 (a) は提案システムおよび振動計測システムから得られた共振周波数とモード波形をそれぞれ示す。我々のシステムにより推定されたモーダルパラメータは 500 Hz で得られる振動計測システムから導出された解析結果と極めて近い値となっていることが確認できる。図 10 (b) は提案システムと振動計測システム間の 1 次のモーダルパラメータの評価関数  $\phi_1^*$  の偏差を表している。偏差は極めて小さく、複数振動分布合成に基づいた提案システムにより得られる解析結果は、既存の振動計測システムの解析結果と同様の値が得られることが確認できる。

Table 1 Resonant Frequency of the Bridge Model

	trial 1	trial 2	trial 3	trial 4	trial 5	AVE	SD	SD/AVE
1st	10.56	10.59	10.60	10.60	10.58	10.58	0.015	0.14%
2nd	15.91	15.91	15.92	15.89	10.88	15.90	0.014	0.09%

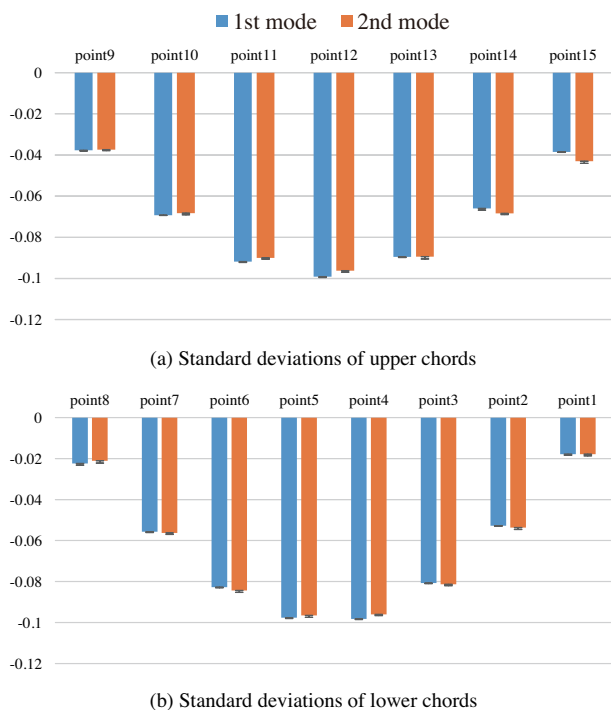


Fig. 9 Standard Deviation of the Modal Shape Information at Each Observation Point

Table 2 Comparison of Resonant Frequencies between the Multithread Active Vision and the Indicator Unit

	Multithread active vision	Indicator unit
1st	10.584	10.582
2nd	15.902	15.960

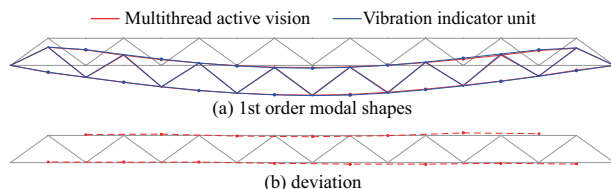


Fig. 10 Comparison of modal analysis results between the multithread active vision and the vibration indicator unit

### 4.3 橋梁モデルに対するモード解析

本小節では、我々のシステムがダイナミクス特性の変化を検出可能かを評価するため、複数の負荷条件が設定され

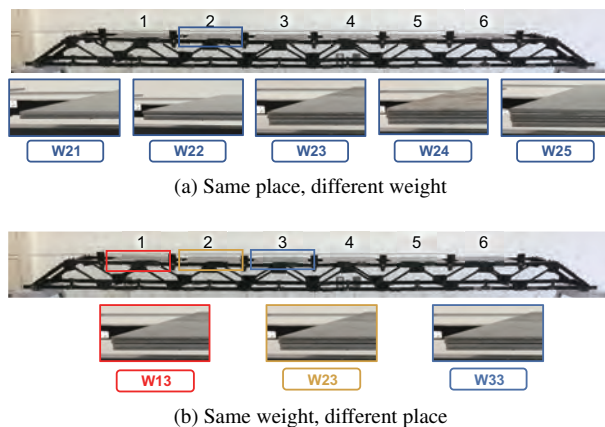


Fig. 11 Bridge model with multiple loads

た橋梁モデルに対する検査実験を行う。図 11 は複数の負荷が設定された橋梁モデルである。6 枚の鉄板が均一に設置された橋梁モデルを通常の負荷状態として定義する。条件 W21, W22, W23, W24, W25 ( $W_{xy}$  は, x: プレート位置, y: プレート枚数を表す) は, 図 11 (a) に示すように 1~5 枚のプレートが同一位置に設置されている。条件 W13, W23, W33 は, 図 11 (b) に示すように 3 枚のプレートが位置 1, 2, 3 にそれぞれ設置されている。

表 3 は, 複数の負荷条件下の橋梁モデルに対する 1 次および 2 次の共振周波数と評価関数を表している。条件 W21~W25 では, 同一位置に異なった負荷がかかっており, 負荷が増加するにつれて 1 次および 2 次の共振周波数が減少している。条件 W13~W33 では, 異なった位置に同一負荷がかかっており, 負荷のかかる位置が橋梁の中心から遠ざかるにつれ, 1 次および 2 次の共振周波数が増加している。

図 12 (a) および (b) は異なった負荷条件における橋梁モデルの 1 次および 2 次のモード波形を表す。  $\phi_m$  ( $m = 1, 2$ ) は, 複数振動分布合成に基づき SSI-CFAST アルゴリズムにより導出した。図 12 (a), (b) から分かるように, 微小であるものの, W21~W25 および W13~W33 に対するモード波形の変化が見られた。図 12 (c) は 3 節で述べた評価関数ベクトルを表している。この結果から無負荷の橋梁モデルと複数の負荷条件の偏差が確認できる。同一位置における異なった負荷の条件 W21~W25 では, 偏差の大きさが負荷の大きさに対応して大きくなること分かる。同一負荷で異なっ

Table 3 Resonant Frequencies with Different Loads

(a) resonant frequencies

	W21	W22	W23	W24	W25	W13	W23	W33	no load (NL)
1st	10.1	9.5	9.1	8.8	8.4	9.9	9.1	8.6	10.6
2nd	15.4	14.9	14.6	14.2	13.7	15.2	14.6	14.9	15.9

(b) evaluation functions

	W21	W22	W23	W24	W25	W13	W23	W33
1st	-5.1%	-10.3%	-14.1%	-16.5%	-20.6%	-6.5%	-14.1%	-18.7%
2nd	-3.5%	-6.6%	-8.3%	-10.8%	-13.8%	-4.2%	-8.3%	10.8%

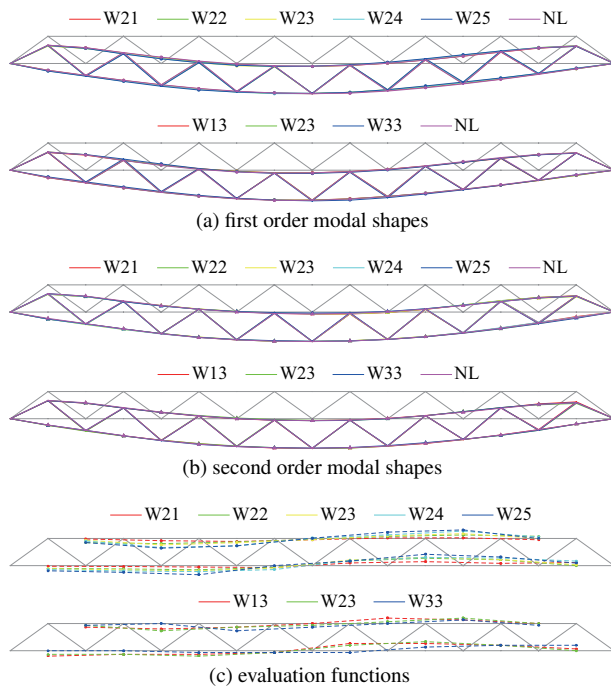


Fig. 12 Modal shapes and evaluation functions with multiple loads

た位置に負荷がかかる条件 W13~W33 では、負荷位置が中央から遠ざかるにつれ偏差の大きさは小さくなる分、偏差の凹面が負荷の位置によって変化することが分かる。

以上の結果から、提案システムは橋梁にかかる負荷に対応したモーダルパラメータの変化を導出し、橋梁モデルのダイナミクス特性を推定することが可能であることが確認できた。

## 5. おわりに

本稿では、画像処理ベースの高次モード解析を可能とするマルチスレッドアクティブビジョンの計測レートを増加させる複数振動分布合成法を提案した。4 m のトラス構造橋梁モデルに対する振動計測実験を行い、従来のシステムおよび手法では不可能であった高周波

な 2 次モード解析を通して、提案手法および構築した計測システムの検証を行った。実際の建築構造物への応用などが今後の課題である。

## 参考文献

- (1) M. Palacz and M. Krawczuk, "Vibration parameters for damage detection in structures", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.249(2002), pp.999-1010.
- (2) L. Hermans, H. V. der Auweraer, and L. Mevel, "Health monitoring and detection of a fatigue problem of a sports car", *Proceedings of the 17th SEM International Modal Analysis Conference*, (1999), pp.42-48.
- (3) J. G. Chen, N. Wadhwa, Y. J. Cha, F. Durand, W. T. Freeman, and O. Buyukozturk, "Modal identification of simple structures with high-speed vision using motion magnification", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.345(2015), pp.58-71.
- (4) J. Morlier and G. Michon, "Virtual vibration measurement using klt motion tracking algorithm", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.132, No.1(2010), pp.011003-011011.
- (5) H. Yang, Q. Gu, T. Aoyama, T. Takaki, and I. Ishii, "Dynamics-based stereo visual inspection using multidimensional modal analysis", *IEEE Sensors Journal*, Vol.13, No.12(2013), pp.4831-4843.
- (6) D. Zhang, J. Guo, X. Lei, and C. Zhu, "A high-speed vision-based sensor for dynamic vibration analysis using fast motion extraction algorithms", *Sensors*, Vol.16, No.4(2016), p.572.
- (7) T. Aoyama, L. Li, M. Jiang, K. Inoue, T. Takaki, I. Ishii, H. Yang, C. Umemoto, H. Matsuda, M. Chikaraishi and A. Fujiwara, "Vibration Sensing of a Bridge Model Using a Multithread Active Vision System", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. (To appear)
- (8) I. Ishii, T. Tatebe, Q. Gu, Y. Moriue, T. Takaki, and K. Tajima, "2000 fps Real-time Vision System with High-frame-rate Video Recording", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2010), pp.536-1541.
- (9) J. P. Lynch and K. J. Loh, "A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring", *The Shock and Vibration Digest*, Vol.38, No.2(2006), pp.91-128.