# 高速マルチスレッドアクティブビジョンを用いた実時間振動分布計測

Real-time Vibration Distribution Measurement Using High-speed Multithread Active Vision

李 良 (広島大)正 青山 忠義 (広島大)正 高木 健 (広島大)正 石井 抱 (広島大)梅本 千佳子 (計測リサーチコンサルタント)松田 浩 (長崎大)

Liang LI, Hiroshima University Tadayoshi AOYAMA, Hiroshima University Takeshi TAKAKI, Hiroshima University Idaku ISHII, Hiroshima University Chikako UMEMOTO, Keisoku Research Consultant Co. Hiroshi MATSUDA, Nagasaki University

This study reports the vibration distribution measurement using a galvano-mirror-based high-speed multithread active vision that can switch 500 different views/s. The multithread active vision was worked as 15 virtual cameras operating at 33.3 fps, and the 15 markers attached on a 4-meter-length truss-structure bridge model were simultaneously tracked for vibration distribution measurement. The experimental results show that a single active vision system can observe the deformation of the bridge structure as vibration distribution around 11.3 Hz.

Key Words: High-speed Vision, Active Vision, Multithread Viewpoint Control, Vibration Analysis

## 1 はじめに

橋梁などの大きな構造物の振動分布をビジョンシステムにより 観測する場合、構造物のスケールが大きくなると、一般的に構造 物の共振周波数の低下に伴い、ビジョンシステムに対する高速化 の要求が強いものではなくなる一方で、構造物のスケールに対し て振動変位が相対的に小さいことがほとんどであり、一般的に構 造物の複数の観測点に対する振動変位を1つのカメラで同時に計 測することが困難である。この問題を解決する方法の1つとして、 観測点ごとにカメラを用意することにより、広範囲にわたる多く の視野を同時にカバーした形の振動分布計測が考えられるが、カ メラの物理的な大きさに伴う制限や制御ソフトウェアの複雑化な ど、観測点数に比例したカメラシステムの大規模化による様々な 制約・コストが生じる。もしもカメラ1台のみで、大きな構造物 にある複数の観測点での振動変位を同時に計測可能とした上で、 複数カメラ設置時と同レベルでのビデオ画像撮影や処理が実現で きれば、これらの制約・コストを解消した、効率的なビデオ画像 に基づく構造物振動解析が実現可能となる。

本稿では、この問題を解決するカメラシステムとして、秒間 500 視点を独立に制御可能とすた高速マルチスレッドアクティブ ビジョン [1] を導入し、単一アクティブビジョンによる構造物モ デルの実時間振動分布計測を行った。実際に4m長のトラス構 造の橋梁モデルを用いた振動実験を行い、1台のマルチスレッド アクティブビジョンを仮想的に15台の33.3 fpsカメラシステム として動作させ、橋梁モデル上に添付した15個のマーカーを同 時追跡することにより、加振時において11.3 Hzの共振周波数を 伴う橋梁モデルの振動分布の実時間計測に成功した。

## 2 高速マルチスレッドアクティブビジョン

本稿では、伊藤らが構築したシステム [1] とほぼ同一の構成 からなる高速マルチスレッドアクティブビジョンを振動分布計 測に用いた。導入した高速マルチスレッドアクティブビジョン は、高速ビジョンプラットフォーム IDP-Express [2]、ガルパノ ミラー (6210H, Cambridge Technology)、制御用 PC (Windows 7 Enterprise 64-bit OS, ASUS P7P55D-E ボード, Intel Core i5 760 2.8 GHz CPU, 4GB DDR3 1333Hz メモリ)から構成さ れ、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・チルト角を取得す る AD ボード (Interface, PEX-321216) が搭載されている。



Fig.1 Configuration of Multithread Active Vision

IDP-Express は、カメラヘッド、専用 FPGA 処理ボード、PC で構成され、撮影した 8 ビット 512×512 濃淡画像に対して、専 用 FPGA 処理ボードの FPGA 上への画像処理アルゴリズムの回 路実装等により、最大 2000 fps の実時間画像処理とともに、処理 結果及び入力画像は制御用 PC に記録することが可能である。カ メラヘッドには f = 300 mmの C マウントレンズ (18–300mm F3.5–6.3 DC MACRO OS HSM, Sigma) を搭載した。本稿で は、マーカー重心位置 ( $C_x, C_y$ ) = ( $M_x/M_0, M_y/M_0$ )の高速計 算のために、2 値化した画像 B(x, y)に対する 0 次モーメント 特徴  $M_0 = \sum_{x,y} B(x, y), x$ 及び y 方向の 1 次モーメント 特徴  $M_x = \sum_{x,y} xB(x, y), M_y = \sum_{x,y} yB(x, y)$ を計算する並列回 路を実装し、最大 2000 fps の実時間出力を可能とした。図 1 に システム構成、図 2 にシステム外観を示す。

ガルバノミラーは、パン方向、チルト方向の2つのミラーによ リ、2自由度の視線方向を制御可能とし、PC に搭載された DA ボードからのアナログ電圧指令を専用コントローラに与えること により、パン方向、チルト方向のミラーともに -20~20 度の角 度範囲で制御可能である。パン方向、チルト方向のミラーの大き さは、それぞれ 17.5 mm<sup>2</sup>、10.2 mm<sup>2</sup> である。なお導入したガ ルバノミラーは、1ms 間でミラーの角度を 10 度の範囲であれば 制御できることを確認している。

本稿では、1 ms を視線制御、1 ms を露光・処理時間としたフ



Fig.4 Truss-structure Bridge Model



Fig.2 Overview of Multithread Active Vision



High-speed Multithread Active Vision

Fig.3 Multithread Viewpoint Control

レーム間隔2msを最小スレッド単位時間と考え、500視点/秒の 視線スレッドを図3のように15個の仮想カメラタスクに割り当 てた視線マルチスレッド処理により、単一アクティブビジョンを 15台の33.3 fps 仮想カメラとして機能させた。

## 3 実験に用いた橋梁モデルと実験設定

本稿で振動実験に用いた橋梁モデルは図4で示すトラス構造 である。上下弦材にL-25×25×1.2 mmのL型アルミ部材、斜 材及び左右を接続する部材にFB-15×2 mmの平面アルミ部材を 組み合わせ、長さ4m、高さ0.18m、奥行き0.3mのワーレン トラス構造であり、大きさ500×300mm、質量18.1 kgの鉄板 を3枚をモデル上部に加載して実験を行った。カメラから橋梁 モデルの中心までの距離は5.5mであり、5.5m先で1画素が 0.286mm、512×512画像が146×146mm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





Fig.5 Pan and Tilt Angles in 15-viewpoint Switching

に 10×10 mm 矩形の再帰性反射マーカーを添付し、6 個のメタ ルハライド照明下における橋梁モデル上の 15 点の振動分布を計 測するものとした。また比較データの取得のために、垂直方向の 加速度を計測する 15 個の圧電式ピックアップ (PV-87、リオン) をマーカーと同一位置になるように上下部材に装着し、振動分布 を振動計ユニット (UV-15、リオン)を介して取得可能とした。

本稿では、高速マルチスレッドアクティブビジョンの視点方向 をマーカー番号 1 1 … に対応する形で、時  $2 \dots 15$ 計回りの順に 2 ms 毎に切り替え、各マーカーの画像が 30 ms 毎 に取得できるものとした。1 8 及び 9 15 の視点移 ... ... 動時には、パン方向 4.64 度、8 9 及び 15 1の視点移動時に はパン方向 2.32 度、チルト方向 1.66 度に動かしている。図 5 に 高速マルチスレッドアクティブビジョンのパン・チルト角度の軌 跡、図 6 に橋梁モデル静止時における 2 ms 間隔にキャプチャさ れた入力画像列を示す。図6の撮影では、視点位置がわかるよう にマーカー横にマーカー番号をつけたシールを橋梁モデルに貼付 した。図 5 では、フレーム間隔 2 ms の間に、視点移動が 1 ms 以内で終了した上でパン・チルト角が1ms以上静止し、1msの 露光時間中に視点が移動しないことがわかる。また橋梁モデルに 貼付した15個のマーカー位置に対応した形で、パン・チルト角 度が正しく制御されていることがわかる。図 6 では、2 ms 毎に 視点移動順に対応する形で視点移動によるモーションブラー等を 伴うことなく、視点位置が切り替わった画像が取得できている。 橋梁モデル静止時に2ms毎の視点移動を行った場合、視点毎の 入力画像から計算されたマーカー位置は±0.1 度以内といった1 画素以内の誤差で計測できることを確認している。

#### 4 実験

橋梁モデルに対して、図7のように人間が両手で橋梁モデルを 叩くことにより振動を与える加振実験を行った。15個のマーカー に対応した計測点に対し、高速マルチスレッドアクティブビジョ

<b>18</b> -	2.	8.	<b>A</b> .	5.
t = 0.000 s	t = 0.002 s	t = 0.004 s	t = 0.006 s	t = 0.008 s
6	<b>0</b> #	6]•	9	10-
t = 0.010 s	t = 0.012 s	t = 0.014 s	t = 0.016 s	t = 0.018 s
<b>m</b> =	2	L3 =	= <b>1</b> 9	15 -

Fig.6 Input Images with No Excitation



Fig.7 Experimental Scene

ンの撮影画像から計算された 3.6 s 間の y 座標値の時間変化を、 振動計ユニットにより計測レート 2000 Hz で同時計測された振 動変位の時間変化との比較とともに、図 8 に示す。いずれのデー タも、橋梁モデル静止時の計測点の y 座標値を 0 とした。高速 マルチスレッドアクティブビジョンによる計測結果は、1 計測点 あたり 33.3 Hz の計測レートであり、振動計ユニットの 2000 Hz の計測レートでの結果に比べ、時間密度は必ずしも十分ではない ものの、1 台の高速マルチスレッドアクティブビジョンのみで、 振動計ユニットによる計測結果と同様に、15 点の計測点におけ る最大振幅 1.5 mm、中心周波数 11 Hz 前後で橋梁モデルが減衰 振動している様子が確認できる。

次に橋梁モデルの周波数応答を調べるために、図8の計測デー タに対してFFT解析を行った結果を図9に示す。(a)は高速マル チスレッドアクティブビジョン、(b)は振動計ユニットの計測デー タについて、いずれも15点の計測点の振動変位に対してFFT 解析した結果である。(a)、(b)のいずれも、15点の全ての計測 点においてピーク周波数11.3 Hzが検出され、高速マルチスレッ ドアクティブビジョンによる計測データにより、振動計ユニット での計測データの場合と同じように、橋梁モデルが持つ11.3 Hz の共振周波数特性が検出できたことがわかる。

図 10 に、高速マルチスレッドアクティブビジョンに計測され



Fig.8 Vibration Displacements at 15 Points



Fig.9 Frequency Response of Bridge Model

た 15 点の計測点の振動変位に基づき、加振後の 0.15 s 間にわた る橋梁モデル形状の時間変化を図示する。比較のために、振動計 ユニットの計測データにより計算された橋梁モデル形状をあわせ て図示した。また、垂直方向の振動変位を強調するために縦方向 の倍率を 80 倍に拡大表示した。図 10(a) は、高速マルチスレッ ドアクティブビジョンにおける 15 点の計測点に対する撮影時刻 の同期ずれを考慮せずに橋梁モデル形状を表示したものであり、 振動計ユニットの計測データとは全く異なる形状となり、物理的 にありえない形状変化があるように観測されている。これは、高 速マルチスレッドアクティブビジョンでは、計測点位置がフレー ム間隔  $\tau = 2$  ms 毎に時間的に逐次更新され、時刻  $t_k$ における i 番目の計測点の y 座標値を

$${}^{i}Y(t_{k}) = {}^{i}y(t_{k} - i\tau) \quad (i = 1, \cdots, 15)$$

とする場合、15 点の計測点の y 座標値を全て計測終了までに 30 ms を必要とし、30 ms 間での計測点の走査順番に依存した同 期ずれが生じたためと考えられる。

図 10(b) は、これらの同期ずれに伴う問題を解決するために、 以下に示す7区間を用いた3次スプライン補間

$$\tilde{y}_i(t) = \text{Spline}(Y_i(t_{k-3}), Y_i(t_{k-2}), Y_i(t_{k-1}), Y_i(t_k), 
Y_i(t_{k+1}), Y_i(t_{k+2}), y_i(Y_{k+3}))$$

により、時刻 t において 15 点の計測点で仮想的に同時計測され たものとして補正された y 座標値  $\tilde{y}_i(t)$  を用いて、橋梁モデル形 状を表示したものである。図 10(b)の補正された橋梁モデル形状 は、(a)で見られた物理的にありえない形状変化が観測されるこ とはなく、振動計ユニットの計測データにより計算された橋梁モ デル形状の時間変化と一致することがわかる。

#### 5 おわりに

本稿では、15 台の 33.3 fps ビジョンとして仮想的に機能する ガルバノミラーを用いた高速マルチスレッドアクティブビジョン を用いて、単一カメラからの画像のみではカバーすることが難し かった広範囲にわたる大構造物の振動分布を実時間計測可能とし



(b) with calibration

Fig.10 Spatio-temporal Deformation of Bridge Model

たシステムを構築し、実際に、4m 大のトラス構造を持つ橋梁モ デルに対して振動実験を行い、中心周波数11.3Hz で振動する橋 梁モデルの振動分布を単一アクティブビジョンシステムで捉える ことに成功した。今後は、高速マルチスレッドアクティブビジョ ンの撮像感度や計測精度・範囲の向上を目指すとともに、振動分 布のモード解析を中心とした振動解析の実時間高速化、さらには 実フィールドにおける橋梁を始めとした社会インフラ構造物のモ ニタリングシステムとしての応用展開を目指していく。

#### References

- [1] 伊藤ら: 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,日本機械学会 ROBOMECH'15 講 演論文集, 2A1-T06, 2015.
- [2] I.Ishii, et al.: 2000 fps real-time vision system with high framerate video recording, Proc. ICRA, 1536-1541, 2010.