

(論文)

ステレオカメラを用いた柔構造物の三次元振動変形測定法

Measurement Method for Three Dimensional Vibration Transformation of Flexible Structure Using High-speed Stereo Camera Technique



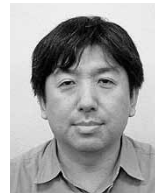
甘中将人*1
Masato KANNAKA



高橋英二*1
Eiji TAKAHASHI



原田朋幸*2
Tomoyuki HARADA



緒方 剛*2
Tsuyoshi OGATA

We have developed a new method of measuring three dimensional transformation of a vibrating object using a high-speed stereo camera technique. This method is applicable to the large displacement of flexible structures that cannot be measured by the conventional method. As a demonstration, we have also developed a prototype comprising two high-speed cameras with a coaxial reflective optical system to measure the coordinates of the marker on the image plane of the respective cameras in real time and a unit that produces three-dimensional spatial coordinates from the aforementioned two plane coordinates. As a result, the prototype was found to have practical measurement accuracy and throughput with a simple operation.

まえがき = 稼働中の機械装置の点検や出荷前の製品検査、研究開発など様々な分野で振動計測が行われるが、振動現象の計測には一般的に、加速度センサやレーザ変位計などの1点を測定対象とするセンサが用いられることが多い¹⁾。一方、近年の高速カメラ技術の発展は著しく、振動する物体を撮影して画像処理することにより、非接触で多点同時に大変位の振動を検出できる²⁾。しかし、このような計測では通常、取得した画像データをフラッシュメモリなどにいったん保存してPCに転送し、座標の算出を行う。このため、記録データ容量の制約から、長時間の連続計測が行えないという欠点がある。

そこで当社では、カメラを用いた測定手法を基本原理とし、高速かつ長時間の測定を可能とする振動計測システムを独自に開発した。本計測システムはまた、空間上の任意の場所に設置することができ、三次元座標検出機能を有する。

本稿では、本計測システムの開発で得られた振動変位の測定手法とともに、実証機による測定結果について報告する。

1. 測定原理

1.1 高速画像処理カメラシステム

本計測システムでは、目標物の振動変位を多数点同時にカメラ画像から計測できるようにするため、撮像素子の情報をクロック遅延なく制御することが可能な回路素子であるFPGA (Field-Programmable Gate Array) を使った画像処理方法を採用した。

一般的なカメラシステムでは、輝度画像を連続的に撮影してコンピュータ上のメモリなどにいったん蓄積し、

測定対象物の座標検知などの画像処理はメモリ上の輝度画像を用いてオフラインで計算処理される。しかし、メガピクセルレベルの画像を長時間連続計測する場合には非常に大きなデータになり、記録できる情報量に限界がある。また、カメラからコンピュータへの転送時間やコンピュータ上での画像処理に時間がかかる。

これに対して筆者らは、カメラユニット内にFPGA素子を持ち、メガピクセル規模の撮像素子を制御して撮像するとともに、同時並列でリアルタイムに画像処理して測定対象物 (画像上の高輝度パターン) の座標位置を取得する高速画像処理カメラシステムを開発してきた (図1)。本高速画像処理カメラシステムは、自動車用タイヤの表面形状パターン判定³⁾、鉄道用のトンネルの形状異常判定⁴⁾などの産業用途への応用として既に使用実績がある。

今回、機械製品の振動計測に同技術を適用し、視野画像内に含まれる輝点を認識して位置座標 (x, y) をリアルタイムに計算する高速画像処理カメラシステムを開発した。開発したカメラシステムは最大24個の輝点を認識し、最大1kHz (測定エリア0.1Mpixel選択時) で動

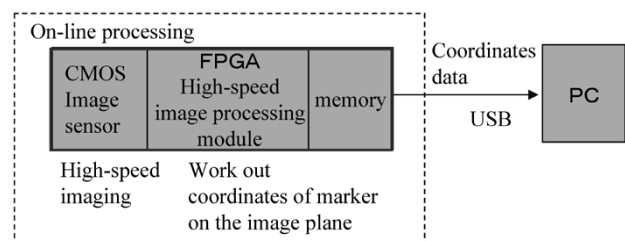


図1 高速カメラを用いた高速画像処理システム
Fig. 1 High-speed signal processing system using high-speed camera

*1 技術開発本部 生産システム研究所 *2 (株)コベルコ科研 エンジニアリングメカニクス事業部

作することができる。

1.2 測定光学系

本測定装置は、測定対象に光線を照射し、サンプル上の特定箇所（マーカー設置部位）で反射した光の座標をカメラによる受光系で求めることが基本原理となる。同光学系をステレオ視方向に2組配置することにより、三次元空間上での座標を知ることができる。

ここで、本測定装置の基本構成を説明する。一つの光学ユニットは、図2に示すように投光系と受光系を半透鏡を用いて同軸に配置した構成としている。サンプル上にはガラスビーズ分散型反射材を用いて形成した円盤形のマーカーを設置する。この特殊な反射材は、光源の位置によらず入射光を180度折り返す方向へ選択的に光線を反射する特性を持つ。このため、十分な強度を持つ光源光を照射することで背景に対するマーカーのコントラストを高め、背景雑音の極めて少ない画像を得ることができる。マーカーはカメラ画像上で直径5~10pixelの大きさになるよう、カメラ光学系の拡大率に合わせた大きさのものを使用する。

さらに図3に示すように、本測定装置では上記構成による光学ユニットを2組用い、2方向から測定対象物を測定視野に納める形でステレオ視配置を構成している。

1.3 座標の算出

上記の光学系により取得した輝度画像を用いて測定点の座標を計算する流れは二つに分かれる。

第一に、各カメラで撮影した画像から、視野平面における見掛け上の位置座標をカメラごとに算出する。カメ

ラ座標系を基準としたマーカーの座標 m を式(1)で定義する。

$$m \equiv \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot K_i)}{\sum_{i=1}^n K_i}, \frac{\sum_{i=1}^n (y_i \cdot K_i)}{\sum_{i=1}^n K_i} \right] \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 (x_i, y_i) は i 番目の画素の座標、 K_i は i 番目の画素の輝度である。式(1)は画像座標上で輝度重心を示しており、画像上のマーカー像の位置をsub-pixel単位の分解能で算出することができる(図4参照)。

第二に、2台のカメラの視野平面における位置座標から、三次元空間上の位置座標を算出する。カメラの撮像フレームごとの画像に対して上記の動作を実行し、サンプルの変位を空間座標変位の時間変化として出力する。ここで、三次元空間上の座標 $M(X, Y, Z)$ と各カメラの画像平面に投影された座標 $m_1(x_1, y_1)$, $m_2(x_2, y_2)$ との関係(図5(2)参照)は、つぎの関係で記述される。

$$s_1 m_1 = A_1 [R_1 | t_1] M \dots\dots\dots (2)$$

$$s_2 m_2 = A_2 [R_2 | t_2] M \dots\dots\dots (3)$$

s は任意の倍率、 A はカメラ固有の内部光学系の歪みを表す行列、 $[R|t]$ は並進 t ・回転 R の同次変換によりカメラの姿勢を表す行列である。これらは図5(1)のようにあらかじめ座標基準として設置したキャリブレーションパターンの撮影画像から決定される係数である。ここでは代表的なキャリブレーション方法であり、複数の平面上の座標が既知の格子点を利用するZhangの方法⁵⁾を用いて決定した。

式(2), (3)に式(1)で決定した座標 m_1, m_2 を与え、連立方程式を解くことで座標 M を算出する。

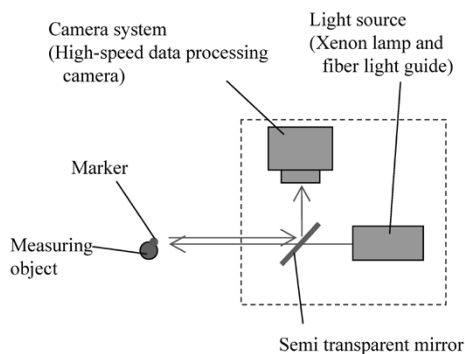


図2 光学ユニット単体の構成
Fig.2 Set-up of single optical unit

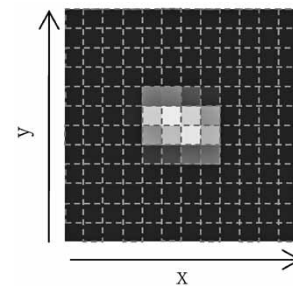


図4 マーカー像の輝度分布
Fig.4 Brightness distribution of marker image

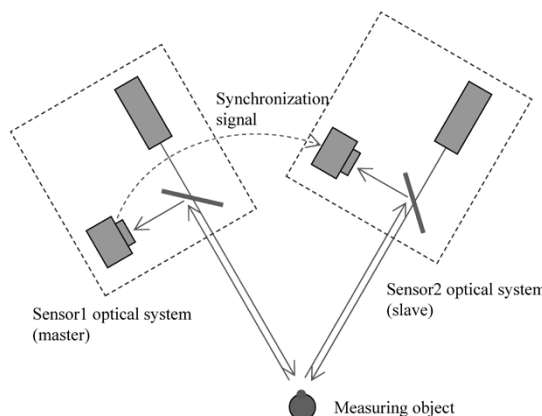


図3 光学系全体の構成
Fig.3 Set-up of the whole optical system

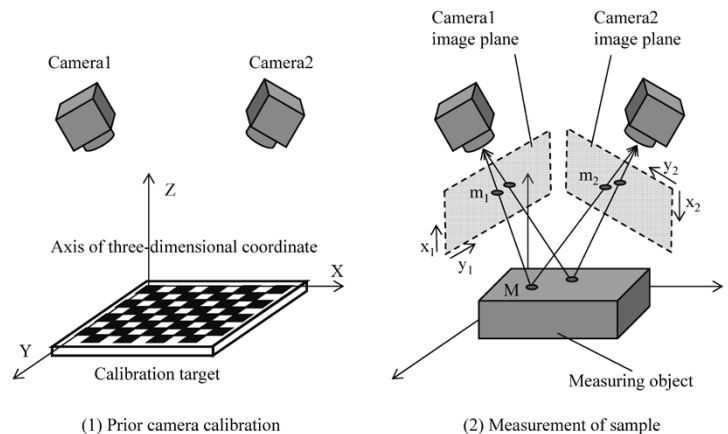


図5 2台のカメラ画像からの三次元座標の算出
Fig.5 Calculation of three-dimensional coordinate by two camera coordinates

なお、カメラ内部の高速画像処理でリアルタイム処理していったメモリに蓄積するのは、第一の計算処理過程の結果であるカメラの視野平面におけるマーカの位置座標である。この時点で画像情報から座標情報へ変換されデータ量が軽減されたものになっているため、メモリ上のデータをコンピュータへ転送して計算する負荷は小さく、即時処理が可能である。

2. 振動測定装置の作成

提案手法の測定性能を明らかにするために、試作機を製作して検証した。製作した試作機の外観を図6に示す。本試作機の測定系は、投光系と受光系による同軸光学系を一体の光学ユニットとしてまとめ、これらを2個持つ構成となっている。

2個の光学ユニットは、サンプル形状や測定目的によってサンプルを視野に収める空間上の任意の2箇所に配置できる。この際に格子状のキャリブレーションパターンを描画した平面ターゲットを測定し、それぞれの光学ユニットの姿勢情報を取得することができる。

投光系の光源には100Wメタルハライドランプを用い、これを光ファイバライトガイドで導光する構成である。このため、通常の屋内照明環境下でも十分なコントラストを得ることができる。

2個の光学ユニットのうち一方をmaster側、他方をslave側とし、masterの測定トリガ信号をslave側へ入力することにより、互いに0.1ms以下で同期した撮像を可能にした。

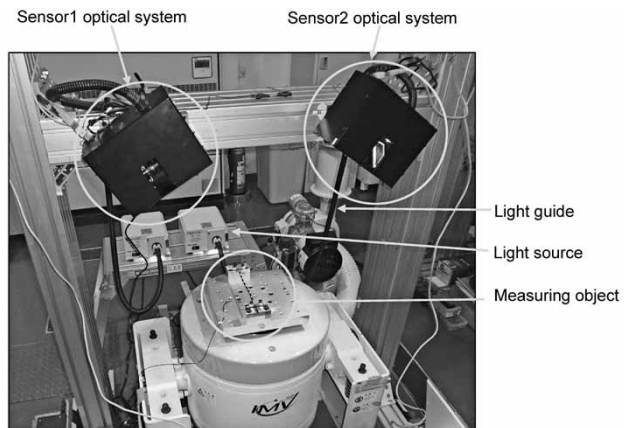


図6 試作機の外観
Fig. 6 Appearance of prototype

表1 試作機の動作性能
Table 1 Specification of prototype

Pixel resolution(※1)	0.27mm/pixel		
Measurement resolution (※1)(※2)	0.05mm		
Visual field size (for example)	600×200 pixel	800×280 pixel	1,000×750 pixel
Sampling frequency	1,000 fps	600 fps	200 fps
Maximum measurement point number	24 point		
Continuous sampling number of times (※3)	max.600k		
Calculation time	<30 s		

(※1) in case of reference distance(350 mm)

(※2) measurement resolution of height direction in case of reference position(symmetrical position 60 deg.)

(※3) in case of maximum measurement point number(24 point)

試作機の動作性能を表1に示す。使用するカメラの受光面サイズは1 Mpixelである。この中で分析対象とする測定領域を任意の長方形で設定できる。サンプリング周波数は分析対象領域の大きさとほぼ逆比例の関係にあり、たとえば600×200画素の領域を分析対象とする場合は1 kHzのサンプリング周波数、1,000×750画素の領域を分析対象とする場合は0.2kHzのサンプリング周波数となる。同時にサンプリングできる測定対象の数は最大24個である。測定対象はあらかじめ操作画面に表示される画像上で目標にマーキングし、番号付けを行うことで指定する。連続測定できるサンプリング回数は60万回であり、これは1 kHzでサンプリングした場合600秒間にあたる。サンプリングが終了したあと、コンピュータへの座標データ転送および三次元空間上の座標の算出処理を行い、空間座標としての測定結果を出力する。

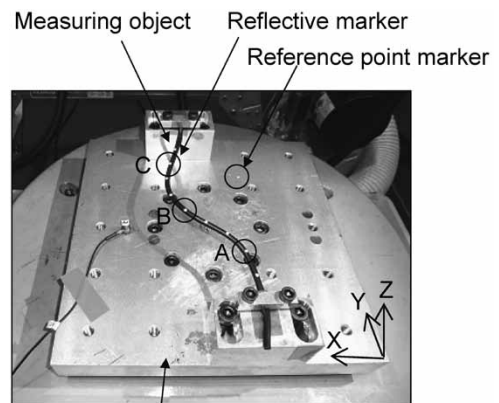
本試作機を用いて1 kHzで600秒間サンプリングした場合、転送される座標データのサイズは約60Mbyteである。これに対し、従来法のように画像データを直接転送する場合には、7秒間のサンプリングでデータサイズが1 Gbyteを超えるため、通常は数秒以下のサンプリング時間が採用される。このように、今回開発したシステムは長時間の連続計測を可能としている。

3. 試作機による振動測定結果

開発した試作機を用い、実際の振動物体を対象に変位を計測した。測定対象に振動変位を与えるため、汎用型振動試験装置を用いた。本試験装置は上面のステージに対して最大加速度30Gの鉛直方向の振動を与えることができる。センサユニットをサンプル設置面上方に開き角度60度、距離450mmの位置に対称に配置した状態で測定を行った。サンプリング周波数は500Hzとした。

銅線の周囲をポリ塩化ビニル材で被覆された長さ250mm、直径5 mmのケーブルをサンプルとして準備した。このサンプルの両端をステージ上に固定した。固定点間距離は180mmである(図7)。

最初に振動振幅の計測精度を検証した。検証用測定対象として、ほぼ剛体的に振動するサンプルステージ面の1箇所に設置した反射マーカを用いた。振動試験装置に



Sample stage of vibratory testing equipment

図7 振動計測用サンプルの設置状態

Fig. 7 Set-up of measuring object for vibration test

は、振幅0.5mm、振動数10.0Hzの振動を与えた。測定対象の振動変位の計測結果を図8に示す。同図に併せて表示している振動装置の指令波形とよく一致していることが確認できる。同図に示す両者の差分結果から、ノイズを含む誤差は0.05mm以下となることがわかる。これは、本測定視野条件における画素分解能(0.6mm/pixel)の約10分の1であり、原理的に見積もられる分解能に対して妥当な測定精度が得られたことが確認できる。

つぎにケーブルの測定結果を図9に示す。ケーブル上にはマーカを最大24箇所設置可能であるが、ここではケーブルの形状を把握するために9箇所を設置した。ケーブルを設置したステージをケーブルの固有振動数35Hz、振幅0.5mmで振動させた。ケーブルの長手方向であるY軸と、高さ方向であるZ軸とで構成される平面上に、各マーカの座標を表示した。ここではサンプルステージ面に設置したマーカを基準変位とし、測定された空間上の座標変位からこれを差し引くことで、サンプルステージに対するケーブルの相対高さ(振動変形)を求めている。振動周期内の5つの時刻の測定結果を同グラフに重ねたところ、ケーブルの変形が捉えられており、時刻ごとの変動の様子が確認できる。

図10は、全マーカの振動変位をX-Y-Zの三次元空間座標上に表示したものである。35Hzと二次の固有振動数である90Hzの結果を示す。振動による変位成分を強調

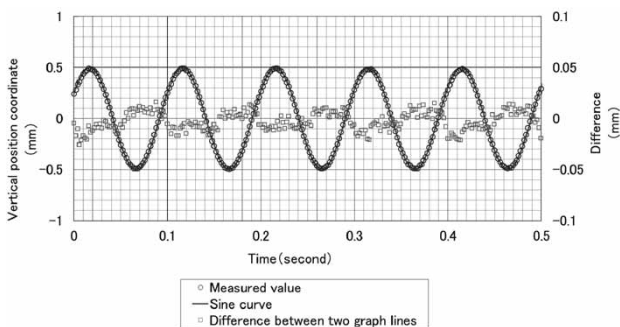


図8 振動試験装置の振動変位測定結果

Fig. 8 Measurement results of vibration displacement of vibratory testing equipment

Two-dimensional display (Y-Z)

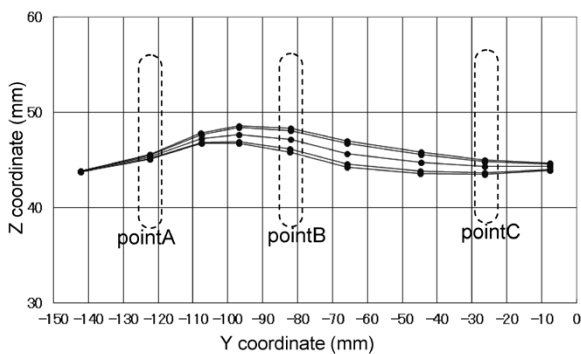


図9 ケーブルの振動変形(加振周波数: 35Hz)

Fig. 9 Measurement results of vibration transformation of cable (Frequency of vibration = 35Hz)

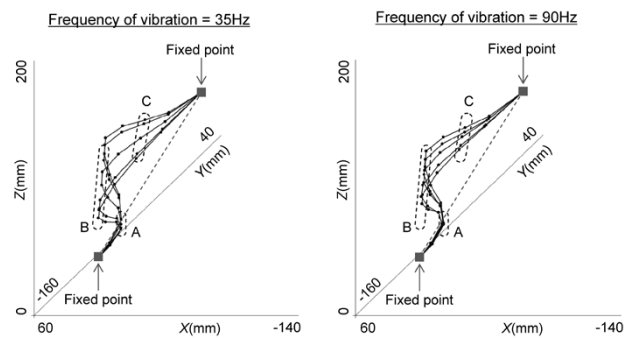


図10 ケーブルの三次元振動変位測定結果

Fig.10 Measurement results of three dimensional displacement of vibrating cable

するため、振動中心からの変位を20倍に拡大して表示した。加振周波数35Hzではケーブル全体が鉛直方向に変位する単純な一次の固有振動が見られる。これに対して加振周波数90HzではpointA周辺部は変位せず、pointB、pointC周辺部が鉛直方向に変位していることから、ケーブルの固定点を結ぶ直線を軸としてケーブルが回転する振動モードが生じたことがわかる。

このように、本測定装置で振動モードの変化を十分に捉えられ、振動条件下での詳細な挙動分析が可能であった。

むすび = 高速カメラにステレオカメラの原理を適用し、測定対象の立体的な振動変形を測定する手法を開発した。本測定手法に基づいて製作した試作機により、長さ250mmのケーブルを対象に、その固有振動数である35Hz、90Hzで加振した時の振動変位を分解能0.05mmで計測できることを実証し、振動モードの変化を捉えられることを示した。

本測定装置は、測定終了と同時に測定対象(最大24点)の空間座標データを保持しているため、測定現場において測定終了直後に結果を分析することが可能である。また、二つのセンサユニットを空間上の任意の場所に設置でき、測定対象との距離、視野拡大率などの光学条件を変更することで視野と分解能を選択可能であるという自由度を有する。

今後、これらの特長を生かし、振動試験装置上のサンプルの微小振動だけでなく、車載用電子基板上の実装ケーブルや各種機械製品自体の振動の計測、土木建築構造物における大変位低周波成分の測定など、多様な測定ニーズに適用できるよう改良を加えていく所存である。

参考文献

- 1) 前川 晃ほか. 日本機械学会論文集C編. 2012, Vol.78, No.794, p.3552-3556.
- 2) 矢崎 忍ほか. 国立防災科学技術センター研究速報. 1985, No.68, p.1-15.
- 3) 高橋英二ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.2, p.62-66.
- 4) 高橋英二ほか. 計測自動制御学会論文集. 2012, Vol.48, No.12, p.863-871.
- 5) Z. Zhang et al. Proc. ARPA96. 1996, p.1007-1012.