

## モーションキャプチャによる振動可視化とその応用

青柳大志・須田高史・坂田知昭  
岩沢知幸・黒崎紘史\*・新井宏章\*

Development of visualization method for vibration with Motion Capture System  
and exploring its application.

Hiroshi AOYAGI, Takashi SUDA, Tomoaki SAKATA, Tomoyuki IWASAWA,  
Hirofumi KUROSAKI, Hiroaki ARAI

機械や装置の振動について、モーションキャプチャの適用限界を評価した。従来から使用されている加速度検出器（ピックアップ）と比較して、同時多点3次元運動を計測できるなどの利点をもつとされている。本研究では群馬産業技術センターで導入したモーションキャプチャについてその測定精度を明らかにし、振動可視化における利用可能範囲を明確にすることを試みた。また、振動以外の物体の運動について、中小企業ニーズを想定した応用分野における適用性について検討した。

キーワード：モーションキャプチャ、画像、非接触、振動、可視化

Motion capture system has some advantages for measuring vibration, as opposed to the traditional accelerometer measurement such as measuring much more points of three dimensional motion at the same time, and so on. In this study, we evaluate the system's accuracy and its limitation when measuring vibration, especially in vibration test. In addition, we explore its application such as human motion or carrier system in factory.

Keywords : Motion capture, image, non-contact, vibration, visualization

### 1 はじめに

群馬産業技術センターでは平成30年度の試験分析高度化研究<sup>1)</sup>において、実稼働振動可視化技術の構築に関する研究を実施した。この研究では、機械や装置の振動試験や運転中の状態を想定し、破損に至る振動を可視化することを目的として行ったものである。この方法では従来から用いられている加速度検出器（以下、ピックアップ）を使用した。以下のような欠点がある。

- ・同時に計測可能な点数が、フロントエンドのチャンネル数に依存する
- ・3軸ピックアップを使用する場合、1点当たり3チャンネル使用するため同時に測定できる点数がさらに限られる
- ・物体表面にピックアップを設置するため、設置面の方向に依存した座標軸の回転など

の後処理が必要である

- ・ケーブル長が限られるため、あまり広範囲の計測は同時にできない

これらの欠点は、フロントエンドやピックアップの増設、ケーブルの中継などで対策できるが、前2点については高額な費用、3点目についてはノイズの点で限界が生じうる。そのため一般にピックアップによる、特に多点の計測は段取りや後処理に手間と時間がかかるものと認識されている。

一方、モーションキャプチャ（以下、MoCap）は画像により物体の運動を測定することができる特性をもち、上記ピックアップの欠点を大幅に克服できる可能性がある。群馬産業技術センターでは平成30年度末にモーションキャプチャを導入しており、本研究でその測定精度を定量的に把握し、振動試験における利用可能範囲を明確化する。また、巷で見られているよう

表 1. モーションキャプチャの概要

OptiTrack PrimeX 22	
仕様	スペック
解像度	2,048 X 1,088 pixel
フレームレート	30-360 fps
シャッタースピード	0.01-2.5 ms
レンズ(標準)	6.8 mm F#1.6 水平/垂直視野角 79/49°
フィルタ	850 nm IR バンドパス
光源(LED)	850 nm IR
データ入出力	GigE / PoE (1000 BASE-T)
電源	PoE or PoE+
重量	1,260 g

にモーションキャプチャは人の動きなどに利用されている。群馬県内企業のニーズに照らし合わせると、熟練作業員の動作など、人の感覚に依存した暗黙知の定量的可視化、および人材育成への活用が考えられる。そこで上記の測定精度を前提として応用可能な範囲について検討したが、紙面の都合上、精度の定量化について主に述べる。

## 2 モーションキャプチャ

本研究で使用した群馬産業技術センターが保有するシステム (Acuity 社 (旧 OptiTrack 社) 製) の概要を表 1 及び図 1 に示す。いくつかの機種の中で最大のフレームレートであり、画素 (ピクセル) 数も上位の機種である。測定精度は別の機種による例であるが、平均  $15 \mu\text{m}$  ~  $20 \mu\text{m}$  とされている<sup>2)</sup>。カメラ全面に設置された LED から赤外光を放射する。運動を追跡したい対象物表面に球体の赤外線マーカーを設置し、その反射光を複数台のカメラで追跡することによって運動を追跡する。センターで保有するカメラは 4 台である。最大のフレームレートが 360 fps、すなわち 360 Hz となっているため、分析可能な振動の周波数はサンプリング定理により 180 Hz 以下に限定される。システムは PC の専用ソフトで制御を行い、取得したデータは後処理で分析する。

## 3 精度の定量的把握

### 3. 1 精度の検証手法

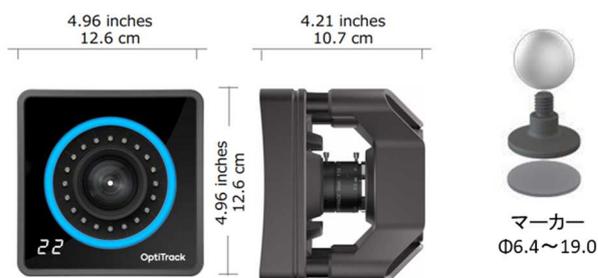


図 1. カメラ及びマーカー

モーションキャプチャ (以下、MoCap) を物体の振動に適用する際の精度を定量的に評価するため、振動試験機を用いて精度の検証を行った。その際、精度の基準として 1D レーザ変位センサ (Keyence 社製、LK-G150) を用いた。センター所有機器の中で、変位を最も正確に測定できるためである。MoCap の精度は、ある振動条件で加振させた振動台の動きを MoCap とレーザ変位センサで同期計測し、比較することで行う。精度検証するに当たって MoCap の測定精度に影響すると思われる要因と水準を表 2 に示す。大別して加振条件と撮影条件に分けられ、以下主だった注意点について述べる。加振条件のうち、振幅と周波数は振動試験機のスペック上、周波数を増加させると加振可能な振幅が低下するため同時に変更した。またカメラ配置は、図 2 に示すように対象物に対してカメラ 4 台を直線または直交で配置することを意味する。キャリブレーション品質は、計測前に行うキャリブレーションのレベルで、Poor が最低、Exceptional が最高である。表では記載していないが、測定中に残差 (Residual、キャリブレーションの質の指標) もモニタしており、別途この値も記録した。残差はキャリブレーションをした後もカメラ自身の位置ずれや気温の変化などによって悪化するため、実験中に残差に大きな変化がないことを確認しながら行った。サンプリング周波数は MoCap とレーザ変位センサを比較可能な最大周波数 256 Hz で固定し、1 条件での計測時間は約 2 分 (時間データ長

表 2. 精度検証の要因と水準

要因	パラメータ	水準
加振条件	振幅 mmp-p, 周波数 Hz	10, 5/4, 25/2, 50/1, 100
	加振方向	水平/垂直
	マーカーサイズ	Φ6.4/12.7/19.0
撮影条件	カメラ配置	直線/直交
	キャリブレーション品質	Poor/Exceptional

サンプリング周波数 256Hz, 約2分間測定



図 2. 実験

33,000 点程度)、カメラとマーカー間の距離は 1~1.3m で固定した。このような計測を、表 2 のパラメータ水準の全組み合わせ 96 条件について実施し、それぞれの要因の傾向把握を試みた。なお、MoCap 用マーカーは 4 つ設置し、ソフトで計算されるそれらの重心 (Rigid Body) の位置変化をレーザの結果と比較した。

### 3. 2 実験結果

計測結果の 1 例を図 3 に示す。横軸が時間、縦軸が変位量に相当する。レーザと MoCap で変位を重ねると、各時刻で両者に差があることが分かる。ここでは、レーザの変位を基準とした誤差 (Difference) を全時刻について算出し得られた分布の例を図 4 に示す。誤差の大きさ (中央値: 各グラフの太い横線) は 0.2mm 以上で、加振振幅が小さく (周波数が高く) になると誤差が大きくなることが分かる。また明瞭とは言えないが、マーカーサイズが小さくなると誤差のばらつきが大きくなるようである。他のパラメータについても検討して得られた知見を以下に示す。

- ・キャリブレーション品質 Poor/Exceptional による誤差の違いは見られない。
- ・垂直方向の振動の方が水平方向より誤差のばらつきが大きい。
- ・カメラ配置は直交配置の方が直線配置よりばらつきが大きい。

以上は時間領域で比較した場合であるが、周波数領域では片振幅で平均して 0.025 mm、標準

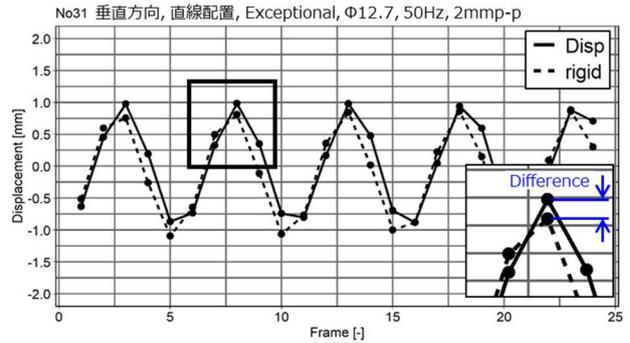


図 3. 測定例 (横軸: 時間、縦軸: 変位)

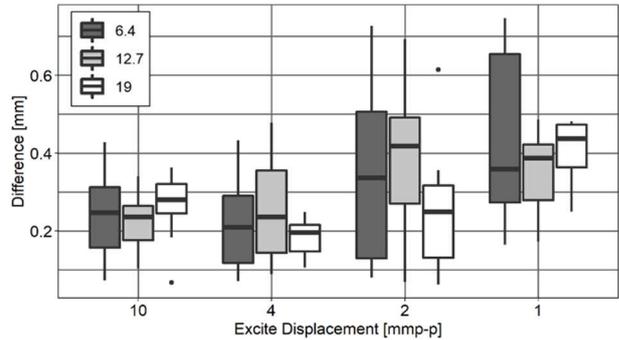


図 4. 加振振幅とマーカーサイズの関係

偏差 0.087 mm であった。全条件での最小、最大で見ると -0.235 mm, 0.328 mm の誤差が出る場合があった。以上の結果を考慮し、振動の可視化におけるモーションキャプチャ適用の目安として、本研究では振幅 2mmp-p 以上、100Hz 以下と考える。図 5 に、センターの振動試験機スペック上における適用範囲を示す。もちろん、計測に必要な精度は目的に応じて異なるため、その妥当性については適宜検討する必要があることは言うまでもない。

## 4 応用分野

以上の結果から、モーションキャプチャは振

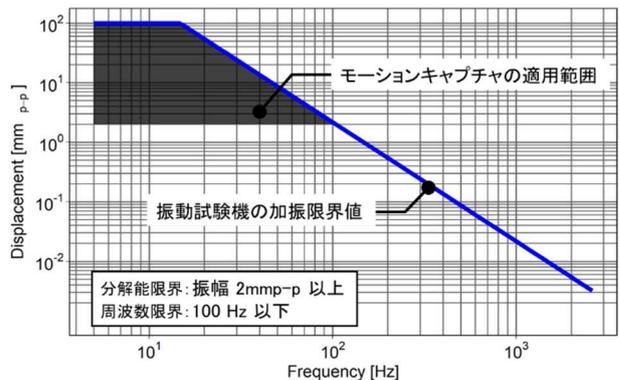


図 5. モーションキャプチャの適用範囲

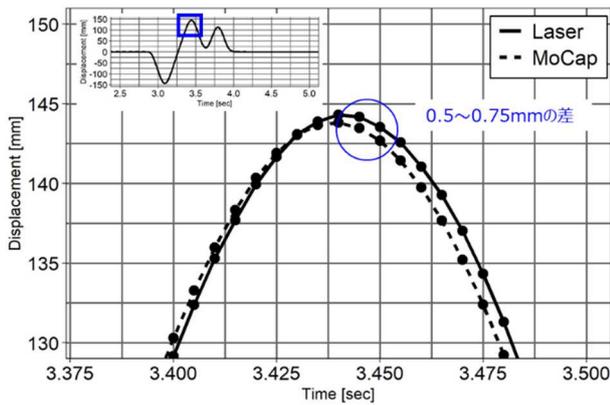


図 6. モーションキャプチャの適用範囲

動試験と比較して大きな変位を伴い、かつ現象の時間スケールが長い過渡運動に向くと云える（衝撃など瞬間的な現象は困難）。本研究では群馬県内中小企業のニーズを反映する分野として、以下の動作を検討した。

- ・搬送機構など機械的な運動
- ・工場などにおける作業動作

機械的な運動と人の動作では運動の次元（1次元,2次元,3次元）及び動作の再現性の点で、後者の方が計測、分析ともに難易度が高い。そこで本研究では以下の3ステップで検証を進めることとした。

1. 直動シリンダの1次元運動
2. 搬送機構の3次元運動
3. 人の3次元運動

2については群馬県企業の協力の下で実施したが、機密のため1と3について概要を報告する。

#### 4. 1 直動シリンダの1次元過渡運動

実験はいくつかの条件で行ったが、その中で最大の速度 1000 mm/s での実施例を図 6 に示す。MoCap の妥当性は振動の場合と同様に1次元レーザ変位センサを基準とし、可動部にマーカーを設置して実施した。その結果、図に示すように最大 0.5~0.75mm の差が生じることが分かった。全体のストローク (150mm) に比べると 0.5%に過ぎないことから、この程度の変位量および速度の運動であれば十分に把握できることが確認できた。

#### 4. 2 人の3次元過渡運動

より複雑かつ再現性が低い人の運動について、けん玉の動作を例に計測を試みた。けん玉を採用した理由は誰にでもイメージすることができるためであるが、この試みの本来の目的

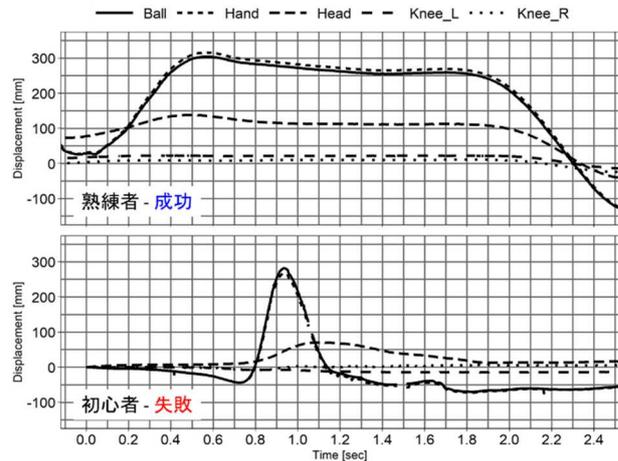


図 7. 熟練者と初心者の動作の比較

は熟練作業者の技術を数値化し、いわゆる”コツ”を言語化することによって人材育成を促進することにある。熟練者による「膝、手、頭部の動作にコツがある」というひと言からそれぞれにマーカーを固定して計測した。熟練者と初心者でそれぞれの動きを比較した結果を図 7 に示す。熟練者は各部の動きが安定しており、頭と手が連動している一方、両膝はほぼ静止していることが分かる。また、頭と手の間隔が小さいことも見て取れる。

以上の検討から、他の動作についても”コツ”を定量化する見通しが得られたが、技術として構築するための課題もまた把握することができた。下記にそれを示し、結びとしたい。

- ・図 7 初心者の結果に見られる途切れのように、マーカーが死角に入ることによってデータが途切れる事象に対する対策
- ・3次元運動を関節の動きや姿勢などのように人が分かる表現に変換するノウハウ
- ・視線方向や重心のかけ方など、動作を表す他の物理量と組み合わせることによるより詳細な運動の分析手法の構築

#### 参考文献

- 1)青柳 大志ほか, 群馬県立産業技術センター研究報告 平成 30 年度, 「実稼働振動可視化技術の構築」(2017).
- 2)OptiTrack の品質, <https://www.acuity-inc.co.jp/pickups/knowhow/docs/20171122/>