

# モーダル解析を利用したロボットの残留振動低減 Reduction on Residual Vibration of Robot by Use of Modal Analysis

精密工学専攻 12号 加藤 甫  
Hajime Kato

## 1. 緒言

近年、ロボットは工場等の生産現場で生産機械として用いられている。肉体的付加の大きい労働環境でも大きな負荷から作業ミスを生ずる恐れが無く、品質安定の面からロボットが用いられている。生産現場では製造の効率化が求められている。そこで効率を上げるために生産時間を短縮し、生産性を向上させるロボットの高速化が必要となる。しかし、ロボットを高速で稼働させた際に動作によってロボット先端に振動が生じる。この振動が収束するまで時間を有することにより、動作高速化に影響を与えることが問題となっている。

パラレルリンクロボットの振動低減の問題点として次のようなことが挙げられる。まずパラレルリンクロボットはベルトコンベアで流れてくる食品の配列や部品組み立て等に用いられることが想定される。そこで単一方向の動作のみに振動低減を施すのではなく、多方向の動作への振動低減対策が必要となる。また搬送対象を持った際にはロボット先端への質量付加によって、ロボット先端の振動特性が変化することが予想される。このためロボットの周波数応答解析を行い、ロボットの振動特性を把握し、構造変更やアクティブ振動制御による振動低減手法を考案することによってロボットの動作高速化及び精密動作の実現を目指す。

## 2. パラレルリンクロボットの概要

本研究で用いるパラレルリンクロボットを Fig.1 に示す。また、ロボットの動作空間を Fig. 2 に示す。Fig. 2 において、E 点が原点姿勢での位置を表している。実際の生産現場での働きとしてパラレルリンクロボットはベルトコンベアで流れてくる食品をつかんで移動させ配列させることとなる。配列させる対象は疎らになってベルトコンベアから流れてくることや、ベルトコンベアの流れる方向の変化を考慮にいれ、動作空間として A 点から F 点までの動作点を想定している。

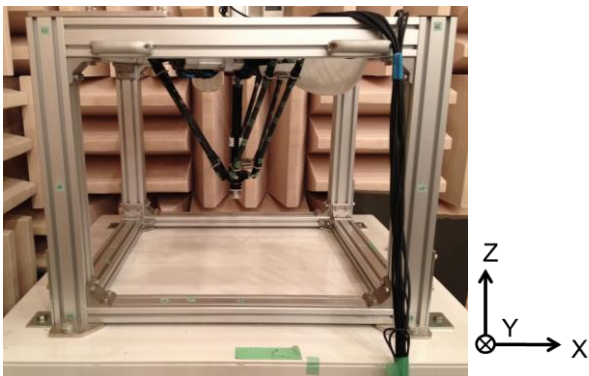


Fig. 1 Parallel link robot

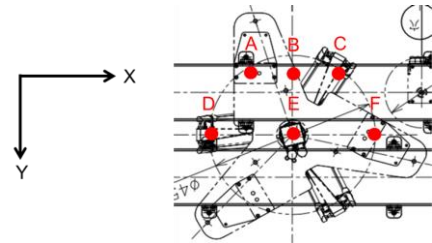


Fig. 2 Ground view

## 3. パラレルリンクロボットの現状

パラレルリンクロボットの動作終了後の残留振動の振動特性を把握するために加振実験による実験モーダル解析を行う。本章以降にロボットの振動モードに着目した振動低減手法を提案する。

### 3.1 ロボットの振動モード

ロボットの動作終了後の残留振動の低減を考えることから動作姿勢で停止させた状態でのロボットの振動モードを測定する。そこで、Fig. 2 における B 点への動作(-Y 方向動作)姿勢で停止させ、この状態でロボット先端を+Y 方向にインパクトハンマーによってハンマリング加振し、3 軸加速度ピックアップによってロボットのアーム、リンク及びロボット先端の計 45 点の X, Y, Z 方向の周波数応答関数(以降、FRF)を測定する。計測した各点の FRF をカーブ・フィットした結果を Fig. 3 に示す。この結果より計測された 21.5Hz, 25.5Hz, 46.5Hz の振動モードを Fig. 4 に示す。各振動モードの最大応答点は、21.5Hz の振動モードではアーム部分、25.5Hz ではリンクの中間部分、46.5Hz ではロボット先端付近となっている。

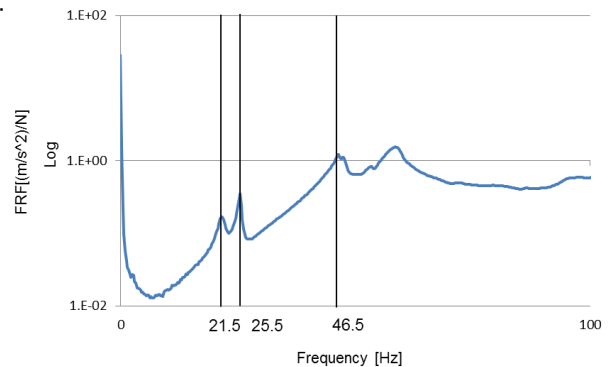


Fig. 3 Summed FRF

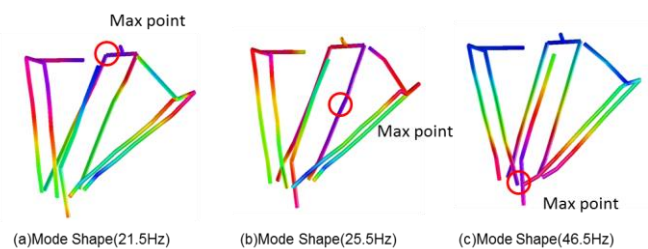


Fig. 4 Mode shape

Fig. 2 に示すようにロボットは複数点への移動することを考慮に入れることから異なる移動点として F 点(+X 方向)へ移動した際の動作姿勢でロボット先端を+X 方向にハンマリング加振した際のロボット先端の FRF(X,Y,Z 方向)を測定した. このときのロボット先端の FRF(X,Y,Z 方向)と B 点の姿勢のロボット先端の FRF(X,Y,Z 方向)を比較した結果を Fig.5 に示す. B 点における Y 方向の FRF と F 点における X 方向の FRF 入れ替わっているような結果が見られることから, 基準となる 1 点の動作姿勢での振動特性を計測すれば異なる動作姿勢での振動特性を極座標的に変換することで各々の動作点の姿勢での振動特性を予測することができる.

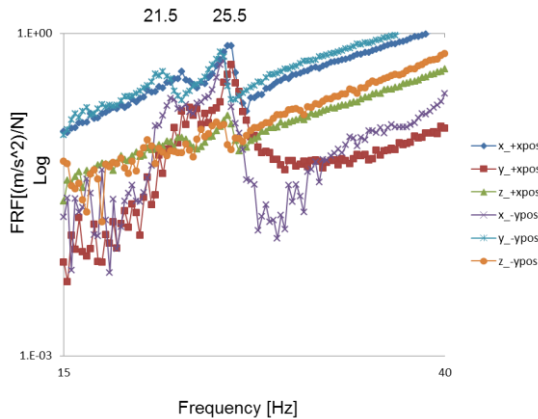


Fig. 5 Hand FRF (-Y VS. +X position)

### 3.2 問題となる残留振動

実際にパラレルリンクロボットが生産現場で食品を持って移動させるピック&プレースという動作での停止後の残留振動を測定する. 動作速度であるが, ピック&プレースの 1 往復の動作を 1 分間に 180 往復する 180cpm といった速度で動作する. 実験で残留振動を測定する際には, Fig. 6 に示すように, 原点姿勢から動作点への片道分のさらに半分の地点から動作開始する動作経路となっている. 動作終了以降の残留振動を計測する手法を Fig. 6 に示す. 残留振動の測定方法として, ロボットの動作開始から終了までのロボット先端の加速度応答を加速度ピックアップによって振動を測定する. 動作速度 180cpm の場合, 動作開始から停止地点に移動するまで 0.129s かかる. よって加速度時間応答の立ち上がりから 0.129s 以降が残留振動であると見なす. 0.129s 以降の約 2 秒間の加速度時間応答だけを抽出し, 高速フーリエ変換(以降, FFT)し周波数変換を行う. 角周波数を  $\omega$  として加速度周波数応答に  $-\omega^2$  をかけることによって加速度周波数応答から変位周波数応答へと変換する. さらに変位周波数応答から逆高速フーリエ変換(以降, IFFT)することで変位時間応答に変換する. 本研究ではこの変位時間応答を低減させることを目指していく.

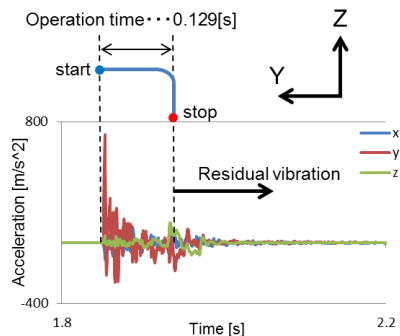


Fig. 6 Acceleration from start to stop (-Y motion)

## 4. 動吸振器による残留振動低減

本章ではロボットに構造変更を施すことで問題となる残留振動を低減することができるか確認を行う. 構造変更の手法としてロボットの振動モードに着目した動吸振器を取り付けることにする. 動吸振器とは振動制御技術の一つである. 振動を抑制したい機械系の固有振動数と同じ固有振動数を持つ動吸振器を取り付け, 共振による振動エネルギーを吸収することにより機械系そのものの振動を低減させる装置である.

### 4.1 振動モードに着目した動吸振器の設計

まず-Y 方向への動作をした際のロボットの先端の残留振動が動吸振器によって低減できるか確認を行った. 設置する動吸振器の共振周波数であるが, 3 章で計測したロボットの 21.5Hz 振動モードと 25.5Hz の振動モードに着目しそれぞれの周波数と一致する 21.5Hz と 25.5Hz の共振周波数を持つ動吸振器を作成した. 21.5Hz の動吸振器であるが 200g の鉄の重りにバネで構成されている. 25.5Hz の動吸振器はアクリル棒の先端に鉄具を取り付けた片持ち梁の構造となっている. 続いて作成した動吸振器の設置個所であるが, Fig. 4 の 21.5Hz の振動モードの最大応答点にあたる 3 本ある内の 1 本のアームの回転部分に 21.5Hz の動吸振器を設置した. また, 25.5Hz の振動モードより, 6 本あるリンクの内の 1 本の中間位置にある最大応答点に 25.5Hz の動吸振器を設置した. このとき 46.5Hz の振動モードであるが, ロボットの実稼働時の残留振動の変位周波数応答において 46.5Hz の応答は 21.5Hz と 25.5Hz の応答に比べて小さくなることから構造変更の対象から外すことにする. 動吸振器を取り付けたロボットのセットアップを Fig. 7 に示す.

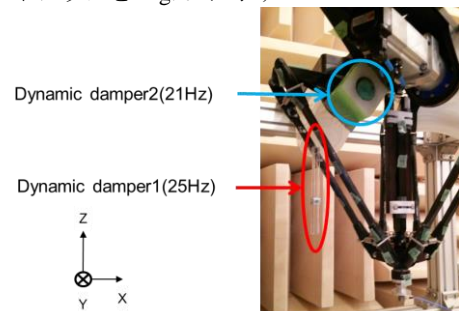


Fig. 7 Experience setup

### 4.2 動吸振器による振動低減効果の確認

動吸振器を取り付け, ロボットを-Y 方向に動作させた際のロボット先端の残留振動を先端に取り付けた加速度ピックアップで計測し, 動吸振器を取り付ける前後でのロボット先端の Y 方向の残留振動の比較をしたものを Fig. 8 に示す. 評価基準として 0.1mm 以内に収束する時間が短縮されていれば低減効果があるとす. Fig. 8 より制振後では振幅が抑えられ 0.1s あたりで 0.1mm 以内に収束しているため整定時間が短縮されていることから低減効果が確認された.

しかし, この設置した動吸振器は Y 方向に動作した際の応答を下げるように方向付けされていることから X 方向に動作した際には低減効果は得られず, 逆に励振する結果となった. パラレルリンクロボットは多方向に動作するため単一方向動作のみ低減できる動吸振器では不十分であると結論づける. 作業空間によってはロボットに取り付けを行った動吸振器がベルトコンベアやフレームなどの障害物と衝突して事故を引き起こしてしまうといった恐れがあるため振動低減手法としては不適切である.

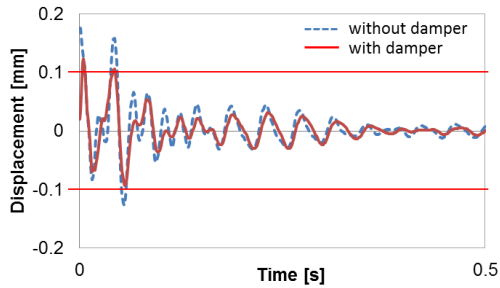


Fig. 8 Residual vibration Y of dynamic damper (-Y motion)

## 5. アクティブ制振手法による振動低減

本章ではロボット停止後に生じている残留振動をロボットの動作で低減を行うアクティブ制振の提案をする。アクティブ制振では動吸振器のように機構を変更させる必要がなくなることから作業空間での障害物との衝突の恐れがなくなる。また、単一方向の動作での残留振動だけでなく多方向の動作の残留振動に対応することができる。さらには、パラレルリンクロボットが搬送対象物を把持した際の質量付加による振動特性の変化にも対応できる。

### 5.1 制振動作の考え方

3章で示したように各方向の動作姿勢における振動特性は極座標的に変換できると考える。そこで基準の動作として振動を抑制する XYZ の各方向における制振動作をそれぞれ、 $x_o, y_o, z_o$  とする。このとき Fig.9 に示すように各方向を Z 軸回りに  $\theta$  だけ回転したような位置に動作方向が変わった場合式(1)~(3)によって制振動作を変更することで多方向の動作における残留振動の低減に適応できると考える。このとき、原点姿勢から -Y 方向、Fig.2 における B 点への動作の残留振動を打ち消す制振動作を基準制振動作  $x_o, y_o, z_o$  とした。

$$x_{act} = x_o \cos\theta - y_o \sin\theta \quad (1)$$

$$y_{act} = x_o \sin\theta + y_o \cos\theta \quad (2)$$

$$z_{act} = z_o \quad (3)$$

$x_o, y_o, z_o$ : 基準点での制振動作

$x_{act}, y_{act}, z_{act}$ : 各動作位置での制振動作

また、搬送対象物を持った際にロボット先端の振動特性は質量付加によって変化することが予想される。そこで、ロボット 1 次モードの等価質量  $M$ 、等価剛性  $k$  を用いた簡易モデルから質量を付加した際の制振波形の倍率を変化させる。振動モデルの初期条件(初速度と初期位置)及び剛性  $k$  が一定の場合、付加質量が  $\Delta m$  だけ加わると質量付加前の応答の振幅と時間軸に倍率  $\sqrt{(M + \Delta m)/M}$  を掛けることで、元の応答から質量付加後の応答に一致することができる。このことを利用し、Fig.10 に示すように制振波形も同様に基準の制振動作に倍率を掛けることで、質量付加後の残留振動を低減できるか確認を行う。

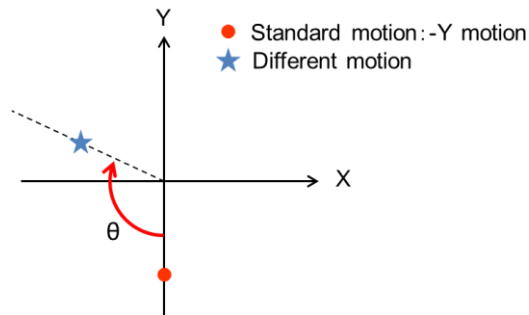


Fig.9 Change method of vibration control

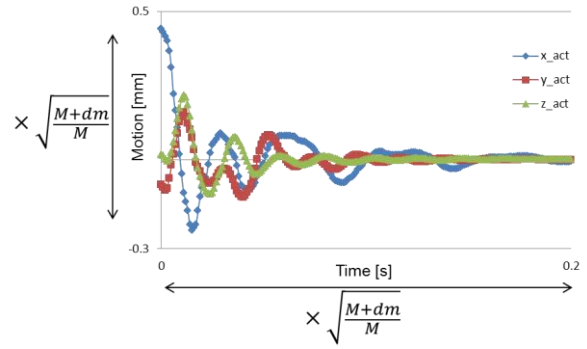


Fig.10 Predictive vibration control with addition mass

### 5.2 逆方向動作による制振

単純に動作終了後の残留振動と逆向きに動作させることで振動を打ち消せるのではないかと考え、振動と逆向きに動かす制振動作波形を Fig.11 に示す。この制振動作をロボットの動作終了後と同時に動作させ振動低減できるか確認した。ロボットの先端に加速度ピックアップを取り付け、2 回積分して変位に変換させた結果を制振前と制振後の Y 方向の応答を比較したものを Fig.12 に示す。制振前と比べて、制振後は出だしの応答を抑えることができ、最大振幅は小さくなっていることが分かる。しかし出だしの応答を抑えた後で 0.1s 付近で振動が励起されていることが確認できる。評価基準として、0.1mm 以内に収束する時間が短縮されているかを制振前後で比較すると制振後の方が制振前より収束する時間が長くなっていることが分かる。この一度収まった振動が励起される要因として振動は最初の 1, 2 周期で低減できていて 3 周期目での制振動作が余計な動作をしているものと考えられる。

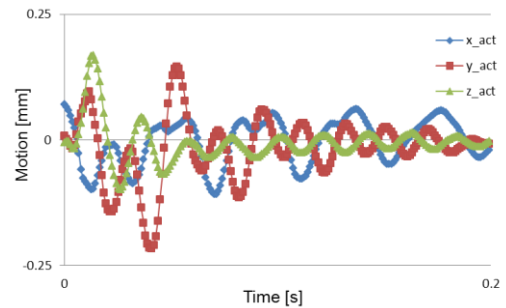


Fig.11 Opposite vibration control

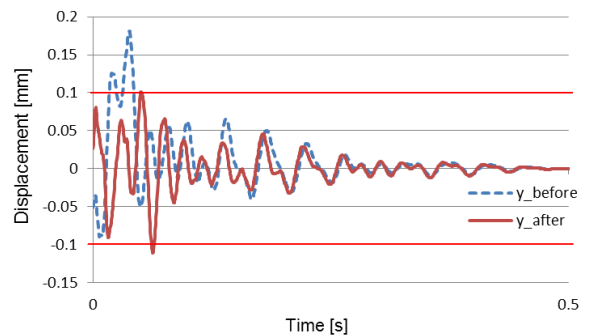


Fig.12 Residual vibration Y of vibration control

### 5.3 3 周期で減衰しきる制振波形での制振

3 周期目の動作が励振していることから、3 周期目では振幅が 0 に収束するように減衰を掛けた制振波形を Fig.13 に示す。同様に -Y 方向への動作終了後にこの制振動作をさせることで残留振動が低減できるか確認を行った。制振前後のロボット先端の残留振動の Y 方向を比較したものを Fig.14 に示す。

す。Fig.14 より、制振前後で比較して、応答の出だしから抑えることができ、終始 0.1mm 以内に収めることができていることからこの3周期で減衰する制振波形は振動低減の効果が得られることが確認できた。Fig.13 に示す制振波形を基準制振波形とし、この制振波形を極座標変換することで動作方向の変更に対応させる。また倍率を変化させることで物を持った際の振動特性の変化に対応させることとする。

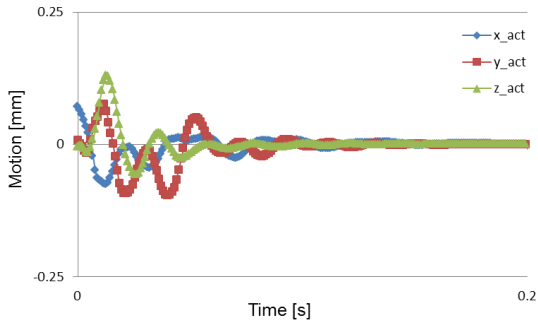


Fig.13 Damped vibration control

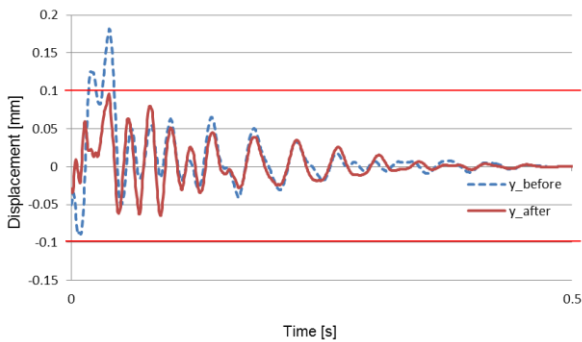


Fig. 14 Residual vibration Y of damped vibration control

#### 5.4 X 方向移動における制振

ロボットを原点姿勢から-Y 方向へ移動させていたが、異なる動作点ということで+X へ移動させた際の残留振動を基準の制振動作となる Fig.13 に示した制振動作を Fig.10 の考えのもとで X 方向と Y 方向を入れ替えた動作で低減することができるか確認を行う。制振方法は-Y 方向移動時と同様で動作終了後に制振動作をさせるものとなっている。制振前後のロボット先端の X 方向の残留振動を比較したものを Fig.15 に示す。Fig.15 より制振前の 0.05s で 0.1mm を超えていた応答が制振後には抑えられていることから低減効果が得られていることがわかる。よって動作方向が変わった際には基準動作からの極座標変換を制振動作にも適用することで異なる動作方向にも対応することができることが確認された。

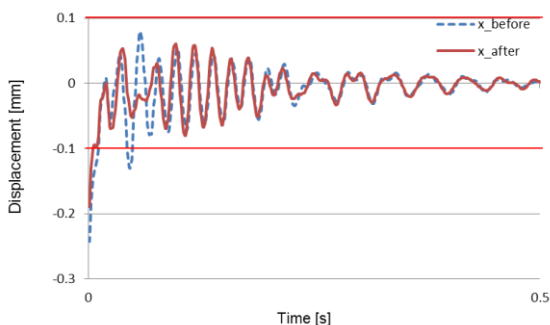


Fig.15 Residual vibration X (-X motion)

#### 5.5 質量付加した際(-Y 方向動作)の制振

ロボットが物を持った状態を模擬するためにロボット先端に 200g の鉛テープを巻き付け、-Y 方向へ移動した際の残留振動の低減を行う。制振波形として、Fig.10 の基準制振動作のロボットの 21.5Hz の等価質量 0.587kg、付加質量 200g より質量付加後の予測制振動作波形に合わせる倍率として振幅及び時間に 1.16 倍かけたものを用いる。この予測制振動作を動作終了後に動作させ、振動低減効果が得られるか確認を行う。質量付加での制振前後のロボット先端の Y 方向の残留振動を比較したものを Fig.16 に示す。Fig.16 より、制振前後と比較し、制振後では 0.1mm 付近への減衰を早めることができていることが分かる。

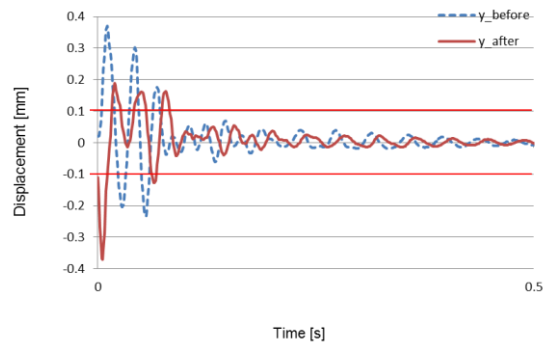


Fig. 16 Residual vibration Y of vibration control (-Y motion with addition mass)

## 6. 研究成果

- (1) パラレルリンクロボットの振動特性を把握した。
- (2) パラレルリンクロボットの実稼働時の姿勢における振動モードに着目した動吸振器による単一方向動作の残留振動の変化が確認できた。
- (3) アクティブ制振制御によってロボットの実稼働時の残留振動の変化を確認できた。
- (4) アクティブ制振制御においてロボットの動作方向が変わっても制振動作も同様に变换することで制振効果が得られることが確認できた。また、ロボット先端に質量が付加された際に基準動作に付加された分だけ倍率を掛けることで残留振動の変化にも対応できることが確認できた。
- (5) 本研究で提案した動吸振器による構造変更とアクティブ制振制御によりパラレルリンクロボットの実稼働時の残留振動低減効果が得られ、振動低減手法の有用性を示した。

#### 参考文献

- (1) 大久保信行, “機械のモーダル・アナリシス”, 中央大学出版部, (1982).
- (2) 原田博之, 他, “振動抑制を考慮した直角座標型フレキシブルアームの位置制御”, 日本機械学会論文誌 C 編, 67 巻, 661 号, “44-49”, (2001).
- (3) 長松昭男, “モード解析入門” 株式会社コロナ社, (1993).