

多関節ロボットの動特性を考慮した振動抑制制御

浜松 弘・志波 広史*

Vibration Suppression Control for Articulated Robot

Hiroshi HAMAMATSU and Hiroshi SHIWA

Abstract

Industrial robots that are installed in manufacturing plants are required to realize high speed and high accuracy motion for productivity improvement. But when these robots work at high acceleration, vibrations are generated in the motor operation and residual vibrations are generated in end of motor operations. We investigate the dynamic characteristic of the robot and design vibration suppression control. It is important the suppression control of the residual vibration that is generated at the end effector of the robot arm. First, the vibration mode is investigated by experimental modal analysis. Next, the residual vibration is compensated by feedback using the acceleration of the end effector of the arm. The effect of the residual vibration suppression is verified by the experiment and achieved by acceleration feedback.

Keywords : *Vibration, Control, Robot, Mechatronics*

1. 緒 論

産業用ロボットは、自動車を始めとした様々な生産工場に導入されている。そのような現場では、生産性向上が求められており、そのために産業用ロボット動作の高速高精度化は必要不可欠である。しかし、ロボットは高加速度で動作すると、アームや関節駆動部が低剛性のため振動が発生する。また停止時には残留振動が発生するため、高速高精度な位置決めが困難となる^[1]。問題の解決には、アームの剛性を高くする方法があるが、高コストとなるため、振動の発生状況を把握した上で制御設計による解決が有効である。

本研究で用いるのは、産業用ロボットに利用されている垂直多関節ロボットである。このロボットはアーム先端部のエンドエフェクタにより様々な作業が可能であり、汎用性が高いという長所がある。しかし、関節駆動部にサーボモータ、減速機が取り付けられているシリアルリンク機構であるため、可搬質量による慣性モーメントの増加や剛性の低下を引き起こす。また、減速機として使用しているハーモニックドライブの構造も剛性の低下に影響している。多関節ロボットは低周波数の固有振動数を持ち、作業動作停止の際、ロボットアーム先端部に残留振動が発生しやすくなる。

本研究では、ロボットアーム先端部に発生する残留振動抑制を目的とする。始めに制御対象である多関節ロボットの実験モード解析を行う。これにより、ロボットの振動モードを把握する。次に振動モードを考慮した制御設計を行う。制御手法として、ロボットアーム先端部の加速度を制御系の速度項へフィードバックする方法^{[2][3]}を用いる。最後に残留振動抑制効果について検証実験を行い、その結果について考察する。

2. 実 験 装 置

本研究で使用される垂直多関節ロボットを Fig.2.1 に示す。本ロボットは、4軸から構成されており、グラウンド側から旋回軸 (S-axis)、下腕軸 (L-axis)、上腕軸 (U-axis)、手首振り軸 (B-axis) である。旋回軸が X-Y 平面上で回転し、下腕軸、上腕軸、手首振り軸は Y-Z 平面上で回転する。各関節駆動部には、サーボモータと減速機を取り付けている。サーボモータにはエンコーダを内蔵しており、これによりモータ回転角度をコントローラに取り込んでいる。コントローラは、OS を RT-Linux とした PC に

DA 変換ボード、エンコーダカウンタボードを組み合わせたものを使用する。

実験装置のシステム構成を Fig.2.2 に示す。コントローラ部では、PC によってロボット動作指令の作成と制御演算を行う。動作指令値、サーボモータのエンコーダ値、制御パラメータを基に制御プログラムによって演算を行う。演算によってトルク出力が算出され、トルク出力に相当する電圧をサーボアンプへ DA ボードを介して送る。サーボアンプでは、電圧に応じた電流制

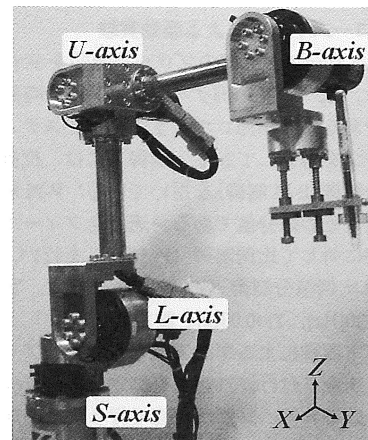


Fig 2.1 4-axis articulated robot

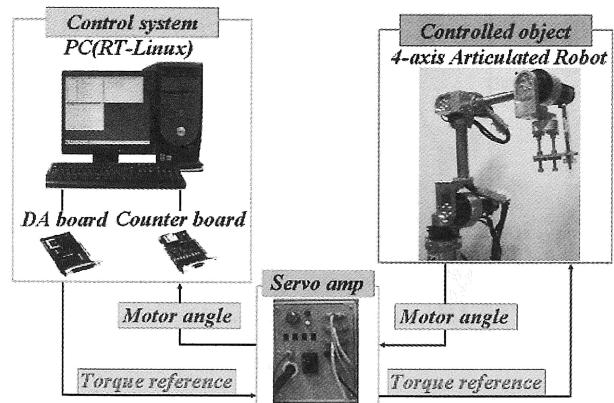


Fig 2.2 Experimental setup

*専攻科制御工学専攻修了(現 九州工業大学大学院生命体工学研究科)

御を行い、多関節ロボットのサーボモータを動作させる。動作時のモータ回転角度はエンコーダで読み取り、サーボアンプを介して、カウンタボードよりPCへ取り込む。

3. 実験モード解析

多関節ロボットの固有振動数を把握するため、モータ加振実験を行い、伝達関数を算出した。旋回軸モータにランダム波トルク入力を与え加振し、ロボットに発生する振動を加速度センサで測定する。測定した振動データは、周波数分析器に送信され、入力をランダム波トルク入力、出力を加速度とした伝達関数が算出される。Fig.3.1 に周波数分析器が算出した伝達関数を示す。これはアーム先端の加速度を応答とする伝達関数である。振幅に共振ピークが3つあり、これより多関節ロボットの固有振動数は、1次9.3Hz、2次が24.8Hz、3次が35.2Hzである。

4. 制御実験

4.1 動作指令

Fig.4.1 に制御実験で使用する動作指令を示す。動作指令は、旋回軸モータを30[°]回転させるモータ位置指令である。高加速度での駆動を想定し、加速時間0.05[s]、最高角速度2.62[rad/s]に設定した。目標位置到達時間は0.252[s]である。本研究では、目標位置到達時間0.252[s]以降、多関節ロボットに発生する挙動を残留振動とする。

4.2 セミクローズド制御による駆動実験

Fig.4.2にセミクローズド制御のブロック線図を示す^{[4][5]}。 K_p ：位置比例ゲイン、 K_v ：速度比例ゲイン、 T_i ：積分時間、 K_T ：トルク変換定数である。多関節ロボットの動作システムは、セミクローズドループを構成しており、制御系には、位置の比例、速度の比例積分制御(P-PI制御)を用いている。P-PI制御では、モータ回転角度とその微分値である角速度をフィードバックし、回転角度の偏差に対して比例制御(P制御)を行い、角速度の偏差に対しては比例積分制御(PI制御)を行う。実験では、 $K_p=20[1/s]$ 、 $K_v=20[Hz]$ 、 $T_i=0.03[s]$ と設定した。

セミクローズド制御による駆動実験を行った。アームの先端に加速度センサを取り付け、加速度を測定した。Fig.4.3に加速度応答を示す。応答特性の評価は変位で行うため、加速度応答

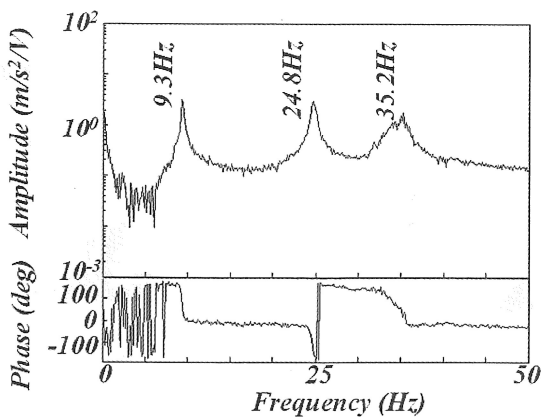


Fig 3.1 Transfer function (Measuring point: Tip of arm)

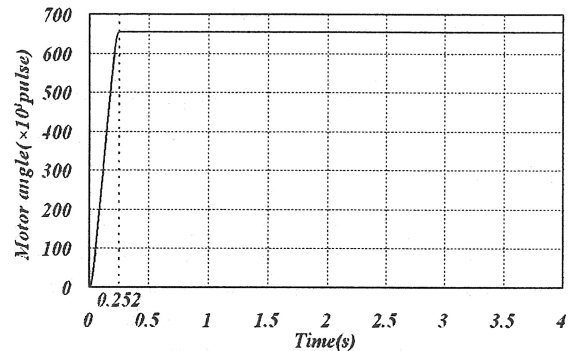


Fig 4.1 Motor position reference

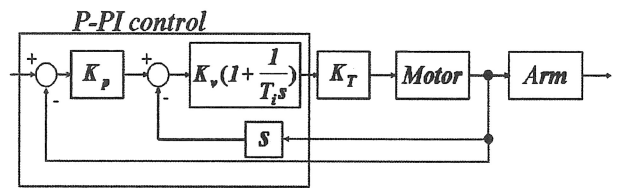


Fig 4.2 Block diagram of semi closed control

の残留振動成分に着目し、変位換算を行う。換算には、式(4.1)に示す近似換算式を用いた。

$$\dot{x} = \frac{\ddot{x}}{-\omega^2} \tag{4.1}$$

式(4.1)の近似換算式は、単振動の式を用いて導出した。単振動の変位 x は、振幅を A 、固有振動数を ω とすると、

$$x = A \sin \omega t \tag{4.2}$$

となる。式(4.2)を2階微分することにより、単振動の加速度 \ddot{x} は、

$$\ddot{x} = -A\omega^2 \sin \omega t \tag{4.3}$$

となる。これより変位は、式(4.1)のように表すことができる。式(4.1)より、最大片振幅は-5.37[mm]となる。

Fig.4.3より、セミクローズド制御時の残留振動周波数は約9Hzである。これは、実験モード解析により得られた多関節ロボットの1次固有振動数と一致する。よって残留振動は、1次振動モードに起因して発生している。

4.3 フルクローズド制御による駆動実験

Fig.4.3の応答は、2次遅れ系の応答で近似できる。Fig.4.4に2

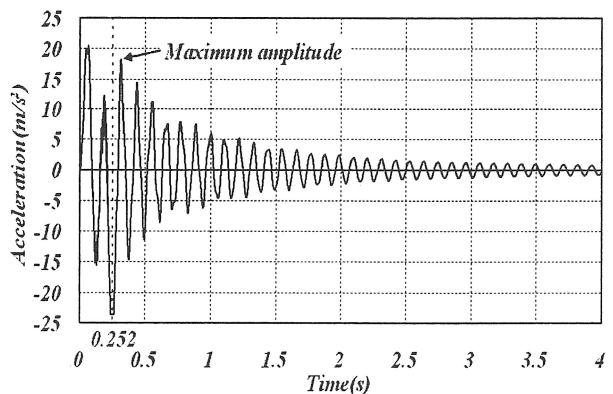


Fig 4.3 Acceleration of arm

次遅れ系のブロック線図を示す。2 次遅れ系では、減衰の効果は減衰比 ζ によって支配される。よって系の減衰比を増加させることが、多関節ロボットの振動抑制に効果を発揮する。そこで加速度をフィードバックすることで、減衰比を増加させる。この方法は、入出力が速度の項に対して加速度のフィードバックを行い、系の減衰比を増加させる方法である^{[2][6]}。以下にその理論を示す。2 次遅れ系の伝達関数は式(4.4)のように表される。

$$G_b(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.4)$$

速度の微分値が加速度となるので、フィードバックする加速度は式(4.5)となる。

$$H(s) = K_a s \quad (4.5)$$

K_a は加速度フィードバックゲインである。

よって Fig4.4 の開ループ伝達関数は次のように求めることができる。

$$G_a(s) = \frac{G_b(s)}{1 + G_b(s)H(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_c\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.6)$$

ただし、

$$\zeta_c = \zeta + \frac{K_a\omega_n}{2} \quad (4.7)$$

式(4.7)は加速度フィードバック後の系における減衰比である。これより加速度フィードバック後の減衰比は加速度フィードバック前よりも増加していることがわかる。

Fig4.5 にフルクロード制御のブロック線図を示す。 K_a は加速度フィードバックゲインである。式(4.7)の理論を用い、ロボットアームに発生する加速度を、P-PI 制御の速度項へフィードバックし、フルクロードループを構成した。Fig4.6 にシステム構成を示す。ロボットアームに取り付けた加速度センサより、加速度が電圧信号として出力される。この電圧信号は非常に小さく、また直流成分や高次の周波数でノイズを含むため、信号処理を行う必要がある。

Fig4.7 に信号処理回路図を示す。使用したオペアンプは、4 回路入り J-FET 入力オペアンプ NJM084D である。回路は加速度センサ、ボルテージフォロア回路、ハイパスフィルタ回路、ローパスフィルタ回路、反転増幅回路により構成されている。以下にそれぞれの回路の役割を述べる。

ボルテージフォロアは、バッファ回路として使用している。Fig4.9 に抵抗による分圧を示す。出力抵抗 R_o の回路の信号電圧 V_s を、入力抵抗 R_I の回路へ入力する場合、入力側の回路に伝わる電圧 V_I は、式(4.8)のように抵抗分圧される。

$$V_I = \frac{R_I}{R_o + R_I} V_s \quad (4.8)$$

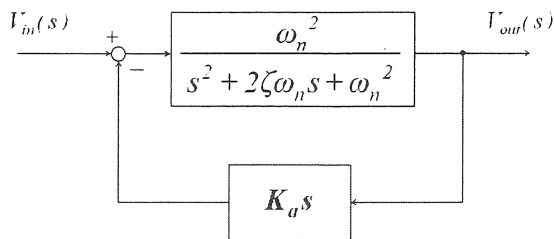


Fig 4.4 Acceleration feedback of 2nd-order system

したがって、出力電圧を正しく伝えるためには、次の条件のいずれかを満たす必要がある。

$$R_o \cong 0, R_I \cong \infty, R_o \ll R_I \quad (4.9)$$

ボルテージフォロアは、入力抵抗が非常に大きく、出力抵抗は非常に小さいため、式(4.9)の条件を満たし、回路間に電圧を正しく伝えることができる^[7]。

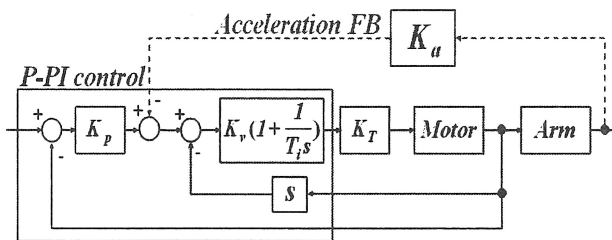


Fig 4.5 Block diagram of full closed control

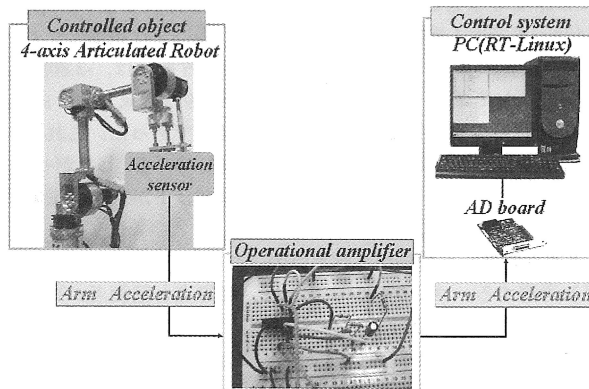


Fig 4.6 Experimental setup

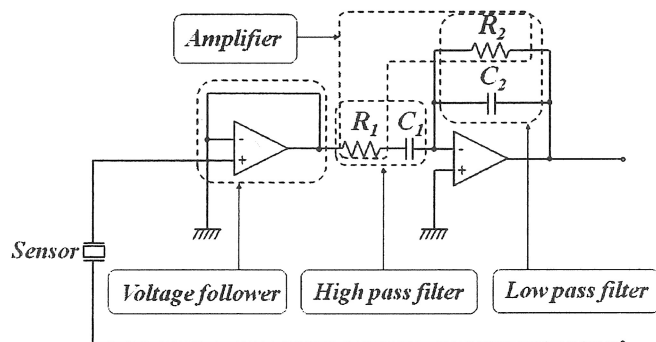


Fig 4.7 Operational amplifier

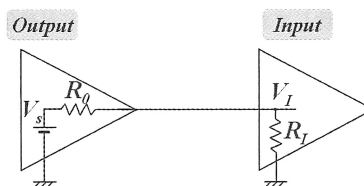


Fig 4.9 Voltage divided by resistance^[7]

次にフィルタ回路について述べる。ハイパスフィルタは電圧信号の直流成分を、ローパスフィルタは高次の周波数におけるノイズを遮断するために使用する。ハイパスフィルタのカットオフ周波数は、多関節ロボットの1次固有振動数より低く、ローパスフィルタのカットオフ周波数は、3次固有振動数よりも高い値に設定した。

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.10)$$

式(4.10)より、ハイパスカットオフ周波数は1.59Hz、ローパスカットオフ周波数は63.7Hzに設定した。また、フィルタリングした電圧信号は、反転増幅回路の抵抗比 R_2/R_1 によって増幅され、増幅率は25倍に設定した。以上より、 $R_1=1k\Omega$ 、 $R_2=25k\Omega$ 、 $C_1=100\mu F$ 、 $C_2=0.1\mu F$ に設定した。

信号処理後の電圧信号は、ADボードにより、コントローラであるPCへ取り込まれる。

フルクローズド制御による駆動実験を行った。アーム先端に加速度センサを取り付け、速度項に対して加速度フィードバックを行う。フィードバックゲインは0.02に設定した。Fig4.10に加速度応答を示す。残留振動の周波数特性を、0.252[s]~0.408[s]までは1次振動モード、0.408[s]以降は2次振動モードとして、変位換算を行った。残留振動の最大片振幅は、-3.80[mm]であり、セミクローズド制御時より、約29%低減した。また、0.408[s]以降の残留振動周波数は、約25Hzであった。これは、多関節ロボットの2次固有振動数と一致している。したがって、加速度フィードバックにより、多関節ロボットが、2次振動モードで励振されたことがわかった。

2次振動モードで励振された原因について、コロケーション^[8]より考察する。コロケーションとは、制御点と観測点と同じ、または非常に近い位置であることを言い、コロケーションが成立する場合、制御対象の振動モードは全て同相となる。一方、Fig3.1の伝達関数の位相に着目すると、1次振動モードと2次振動モードは、逆相であることがわかる。これは、旋回軸駆動によるアーム先端制御の場合、制御点が旋回軸、観測点がアーム先端となり、コロケーションは成立しないためである。したがって、加速度フィードバックにより、1次振動モードは抑制されるが、2次振動モードは励振された。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 実験モード解析により、多関節ロボットの固有振動数は、1次が9.3Hz、2次が24.8Hz、3次が35.2Hzであった。また、2、3次振動モードには、アーム先端に節が存在することがわかった。
- (2) セミクローズド制御による駆動実験の結果、最大片振幅は-5.73[mm]であった。また、多関節ロボットのアーム先端に発生する残留振動周波数は、多関節ロボットの1次固有振動数と一致しており、1次振動モードが残留振動発生に最も起因していることがわかった。
- (3) 残留振動の特性が、2次系の振動特性であることより、制御系の速度項に対する加速度フィードバックを行った。加速度フィードバックを適用したフルクローズド制御による駆動実験を行った。アーム先端に加速度センサを取り付け、加速度フィードバックを行った場合、最大片振幅は

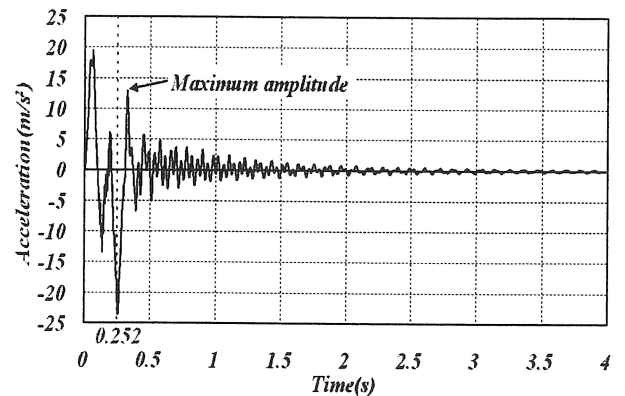


Fig 4.10 Acceleration of arm

-3.80[mm]であり、セミクローズド制御時より、約29%低減した。しかし、0.408[s]以降の残留振動周波数は、多関節ロボットの2次固有振動数と一致しており、残留振動が2次振動モードで励振されることがわかった。

- (4) 制御点が旋回軸、観測点がアーム先端の場合、1、2次振動モードは、アーム先端で逆相となるため、加速度フィードバックにより、2次振動モードが励振されることがわかった。

文献

- [1] 武居直行・岩越邦男・坂口正道・古荘純次, 二慣性系におけるトルク・加速度フィードバックに関する考察, 日本機械学会第7回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, No.01-6, (2001)pp.304-307.
- [2] Shigeru Futami・Nobuhiro Kyura・Shujiro Hara, Vibration Absorption Control of Industrial Robots by Acceleration Feedback, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL.IE-30, No.3, (1983)pp.299-305.
- [3] 浜松弘・志波広史, 多関節ロボットの動特性を考慮した振動抑制制御, 日本機械学会九州支部第62期総会講演会, No.098-1, (2009)pp.133-134.
- [4] 浜松弘・志波広史, 多関節ロボットの動特性を考慮した位置決め制御シミュレーション, 日本機械学会九州支部第61期総会講演会, No.088-1, (2008)pp.239-240.
- [5] 浜松弘・志波広史, 多関節ロボットの動特性を考慮した位置決め制御シミュレーション, 北九州工業高等専門学校研究報告, 第42号, (2009)pp.43-46.
- [6] 此上一也・松永三郎・澤田弘崇・上野浩史・小田光茂, 大型柔軟ロボットアームの操作時振動抑制実験, 日本航空宇宙学会論文集 56-652, (2008)pp.195-202.
- [7] 清水当編, ECB(Electronics & Computer for Beginners) No.2, CQ出版株式会社, (1999)pp.32-65.
- [8] 背戸一登・吉田和夫・野波健蔵・原文雄, 振動と運動の制御における最近のトピックス, 日本機械学会論文集(C編)57-534, (1991)pp.355-363.

(2009年10月7日 受理)