

多関節ロボットにおける加速度フィードバックによる振動抑制制御

Vibration Suppression Control using Acceleration of Articulated Robot

正 浜松 弘 (北九州高専)

○ 松尾 勇志 (北九州高専専攻科)

Hiroshi HAMAMATSU, Kitakyushu National College of Technology, Shii, Kokura-minami-ku, Kitakyushu  
 Yushi MATSUO, Kitakyushu National College of Technology

Keywords : Vibration, Control, Articulated Robot

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、製品の生産性向上において、産業用ロボットの動作の高速化や高精度化は常に求められている。しかし、多関節ロボットアームの駆動部や関節部は低剛性であるため、高速稼動すると、動作終了時に残留振動が発生する。そのため、ロボットの高速度・高精度の駆動が困難となる。問題解決には、アームの剛性を高くする方法があるが、高コストのため、振動の発生状況を把握した上で動特性を考慮したモデル化<sup>[1]</sup>・制御設計による解決が有効である。

本研究では、水平姿勢時における多関節ロボットの動作停止時にアーム先端に発生する残留振動抑制を目的とする。水平姿勢では先端部と回転軸との距離が最も長い為、慣性モーメントが最も大きくなる。よって、回転軸にかかる負荷の増加に伴い、残留振動に大きな影響を及ぼす。そのため、この姿勢において研究を行う。

初めに実験モード解析を行ない、制御対象である多関節ロボットの固有振動モードを把握する。本報では、固有振動モードを考慮した制御設計として、アーム先端の加速度を用いたフィードバック制御を行う<sup>[2][3]</sup>。また、制御による残留振動抑制効果について検証実験を行ない、その結果について考察する。

2. 実験装置

本研究で使用する水平姿勢時の垂直多関節ロボットを図1に示す。また、図2に、実験装置のシステム構成を示す。コントローラは、ハードリアルタイム性能を持つRT-LinuxをOSとするPCを用い、サンプリング時間 1[ms]を補償する。制御対象である垂直多関節ロボットは、4軸で構成されており、グラウンド側から回転軸(S軸)、下腕軸(L軸)、上腕軸(U軸)、手首振り軸(B軸)である。回転軸がX-Y平面上で回転し、下腕軸、上腕軸、手首振り軸はX-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、サーボモータにはエンコーダを内蔵している。

ロボット動作は、始めにPCによって動作指令の作成を行い、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り演算を行う。次に演算により算出された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。以上の様なセミクローズドループを構成し、ロボットアームの制御を行う。

3. 制御対象の特性把握

多関節ロボットの固有振動を把握するため、モータ加振実験を行い、伝達関数を測定した。回転軸モータに横揺れ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先端部に取付けた加速度センサで計測した。入力をトルク、出力を加速度とする伝達関数を算出した。図3に、計測値より算出した伝達関数を示す。多関節ロボットの固有振動数は1次振動が9.2Hz、2次振動が26Hzである。ま

た、1次と2次振動は逆位相になっている。

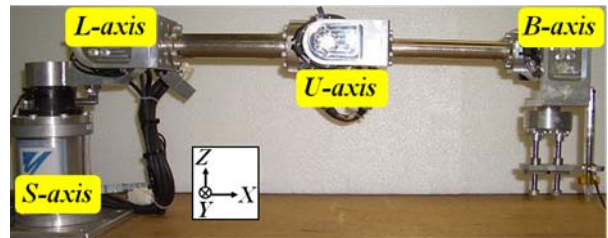


Fig.1 Horizontal posture of the articulated robot

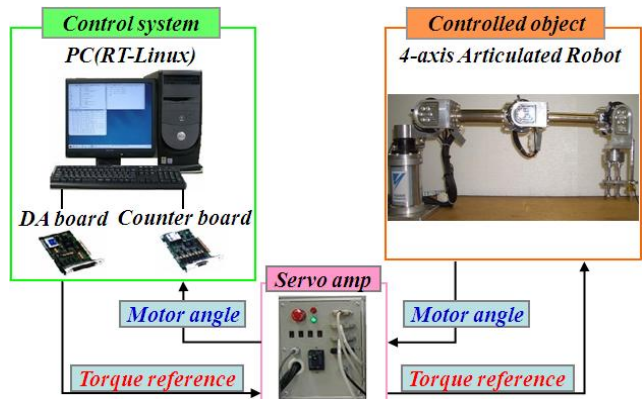


Fig.2 Experimental setup

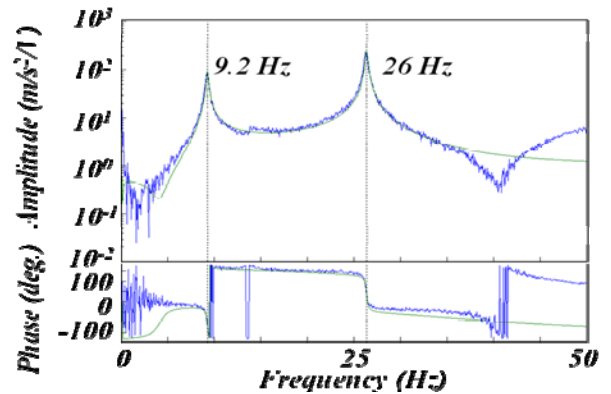


Fig.3 Transfer function (Experimental value)

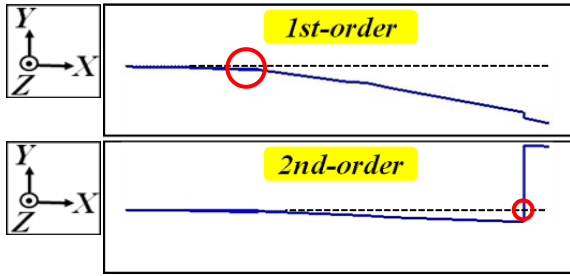


Fig.4 Vibration mode

図4に固有振動モードを示す。算出した伝達関数の振幅と位相より、多関節ロボットの1, 2次モードにおける固有振動モードを算出した。図は多関節ロボットをZ軸方向から見た時のY軸方向の固有振動モードを示している。図4の1次モードでは、丸部に示す部分から振幅が増大しており、モード変曲点となっている。これより、下腕軸の接続部品の剛性が弱いことがわかる。しかし、Y軸方向に振動しているだけなので、旋回軸モータで可制御である。また、図4の2次モードには、丸部に示す部分に振幅が0となる点である節が存在することがわかる。さらに、モード形状を検証することにより、アーム部にねじれが発生していることがわかる。ねじれは旋回軸モータで不可制御である。以上により、振動モード解析を行うことにより、旋回軸モータでは、1次振動モードは可制御、2次振動モードは不可制御であることがわかった。

#### 4. 制御実験

図5にロボット制御システムのブロック線図を示す。 $K_p$ :位置ループゲイン、 $K_v$ :速度ループゲイン、 $T_i$ :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)を用いる。P-PI制御は、回転角度と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)、角速度の偏差に対しては比例積分制御(PI制御)を行う。各関節に対し、セミクロズドループを構成している。

図6にP-PI制御に、水平姿勢時のロボットを駆動した場合のアーム先端加速度応答を示す。動作指令は、旋回軸30°旋回である。0.4[s]までは動作時応答、0.4[s]以降が動作停止後、アーム先端に発生する残留振動応答である。図6より、残留振動周波数は約9Hzと約26Hzの2種類が混在していることが分かる。約9Hzで1次固有振動数と、約26Hzで2次固有振動数と一致しており、これらに起因して残留振動が発生していることが分かる。

次に、加速度フィードバック制御による残留振動抑制効果の検証実験を行った。モータの制御系は、従来のP-PI制御を用いた。図5中の $K_a$ は、加速度フィードバックゲインである。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、フルクロズドループを構成した。動作指令は、旋回軸モータ30°旋回である。加速度センサを3章で述べた2次モードの節に取り付け、2次振動モードを不可観測にする。そして、P-PI制御の速度項へフィードバックする。これにより、フィードバック信号に含まれる2次振動モードを遮断する。以上のような、機械的フィルタリングを用いて加速度フィードバック駆動実験を行った。また、フィードバックゲインは0.02に設定した。図7に補償後のアーム先端加速度応答を示す。0[s]~0.4[s]がモータ駆動中の応答、0.4[s]以降が残留振動の応答である。

結果より、残留振動の最大振幅(片振幅)は、フィードバック前より約10%低減した。また、整定時間をモータの位置決め終了時から、

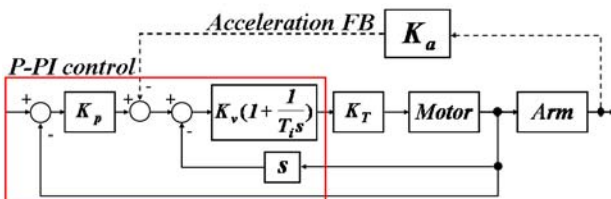


Fig.5 Block diagram of robot control system

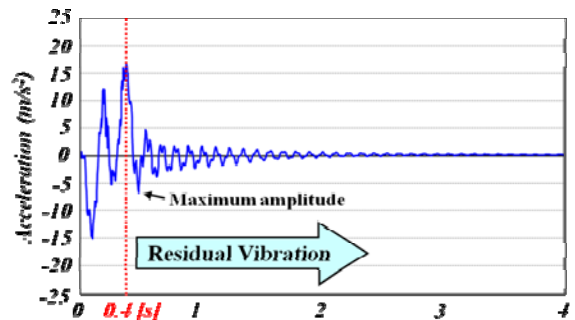


Fig.6 Acceleration of arm (Experimental value)

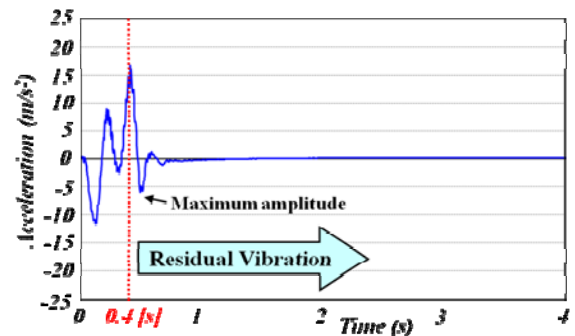


Fig.7 Acceleration of arm (with feedback compensation)

振幅が最大振幅の5%になるまでと定義すると、フィードバック前が1.8[s]、後が0.5[s]となり、約72%低減した。以上により、残留振動抑制の効果を得た。

#### 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、水平姿勢時の多関節ロボットの固有振動数は、1次が9.2Hz、2次が26Hzであった。また、固有振動モードより2次振動モードには、ロボットアームに振幅が0となる点である節が存在することが分かった。
- (2) セミクロズド制御による駆動実験の結果、水平姿勢時の多関節ロボットの先端に発生する残留振動周波数は、同姿勢時のロボットの1次・2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分かった。
- (3) 加速度フィードバック制御を適用したフルクロズド制御による駆動実験を行った。2次振動モードの節に加速度センサを設置し、機械的フィルタリングにより2次振動モードを遮断して制御系の速度項へ加速度フィードバック駆動実験を行った結果、残留振動の最大振幅(片振幅)は、フィードバック前より約10%低減した。また、整定時間をモータの位置決め終了時から振幅が最大振幅の5%になるまでと定義すると、フィードバック前が1.8[s]、後が0.5[s]となり、約72%低減した。

#### 参考文献

- [1] 浜松弘, 松尾勇志, 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(SEAD22)講演論文集, No.10-252 pp.378-379 (2010.05.19)
- [2] SIGERU FUTAMI, NOBUHIRO KYURA, SHUJIRO HARA, Vibration Absorption Control of Industrial Robots by Acceleration Feedback, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL.IE-30, NO.3, AUGUST 1983, pp.299-305
- [3] MARUSHITA Yoshihiro, IKEDA Hidetoshi, SUGIE Hiroshi (Mitsubishi Electric Corp., Hyogo, JPN), Vibration Suppression Control using the Load-side Acceleration Feedback, Annu Conf IEEE Ind Electron Soc, Vol.33rd Vol.2 pp.810-815 (2007)