

1. 緒論

産業用ロボットは、自動車を始めとした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、ロボットの作業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。また動作停止時には、アーム先端に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。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制御設計による解決が有効である。

本研究では、動作停止時にアーム先端に発生する残留振動の抑制を目的とする。実験モード解析により、制御対象である多関節ロボットの振動モードを把握し、振動モードを考慮した制御設計を行う。また、補償による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

図1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、グランド側から旋回軸(S軸)、下腕軸(L軸)、上腕軸(U軸)、手首振り軸(B軸)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、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。

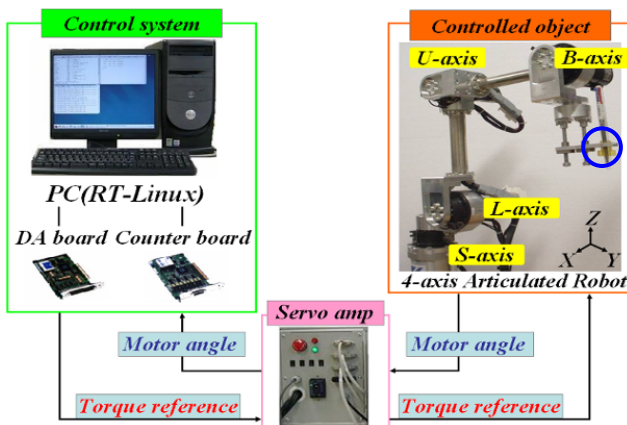


Fig.1 Experimental setup

3. 実験モード解析

実験モード解析により、多関節ロボットの動特性解析を行った。始めに加振実験を行い、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計測する。図2に、計測値より周波数分析器が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次が9.3Hz、2次が24.8Hz、3次が35.2Hzであった。図3に振動モードを示す。ロボットを上面(Z軸方向)から見たX軸方向の振動モードである。これより、1次モードは上腕軸の接続部、2、3次モードは下腕軸の接続部の剛性が弱いため、振幅が増大していることが分かる。また、2、3次モードには、丸部に示すように、節が存在することが分かる。

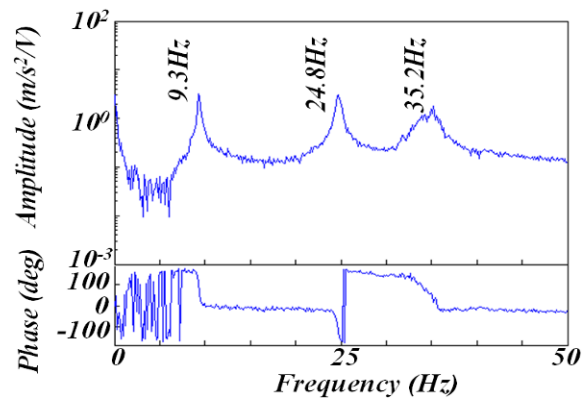


Fig.2 Transfer function

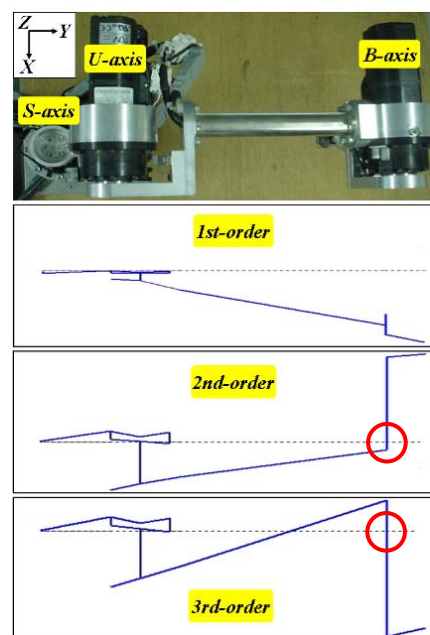


Fig.3 Natural vibration mode shape

#### 4. 制御実験

図4にロボット制御システムのブロック線図を示す<sup>[1]</sup>。  $K_p$  : 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, セミクローズドループを構成している。

図5にP-PI 制御により, 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  $30^\circ$  旋回である。0.25[s]までは動作時応答, 0.25[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。残留振動周波数は約9Hzで, 1次固有振動数と一致しており, これに起因して残留振動が発生していることが分かる。

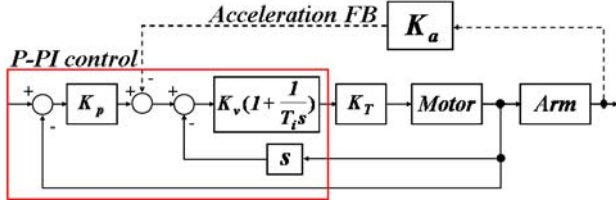


Fig.4 Block diagram of robot control system

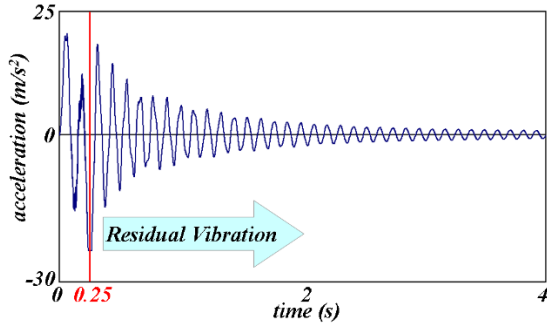


Fig.5 Acceleration of arm

図5の応答は, 2次遅れ系の応答で近似できる。2次遅れ系では, 減衰比の増加により, 振動抑制の効果をj得ることができる。そこで本研究では, 図4に破線で示すように, アームの加速度を制御系の速度項へフィードバックする手法<sup>[2]</sup>を用いた。図4中の  $K_a$  はフィードバックゲインである。フィードバック後の系の伝達関数を求める。式(1)にフィードバック前の2次遅れ系の伝達関数を示す。  $\zeta$  : 減衰比,  $\omega_n$  : 固有振動数である。

$$G_b(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

速度項へフィードバックする加速度は,

$$H(s) = K_a s \quad (2)$$

したがって, 式(1), (2)よりフィードバック後の系の伝達関数は,

$$G_a(s) = \frac{G_b(s)}{1 + G_b(s)H(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_c\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

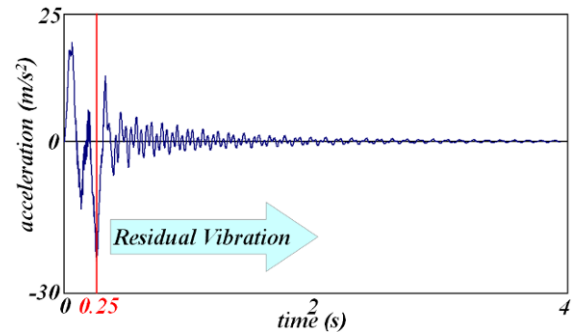
ただし,

$$\zeta_c = \zeta + \frac{K_a\omega_n}{2} \quad (4)$$

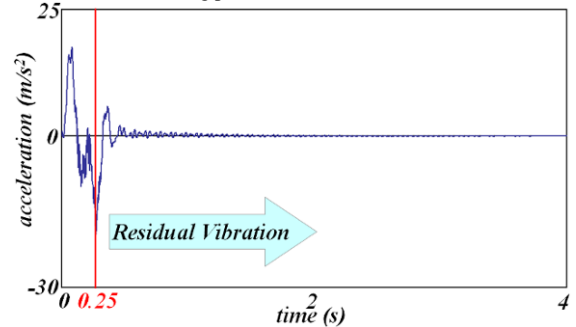
式(4)は, フィードバック後の系の減衰比である。これより, フィードバック後の減衰比が増加していることが分かる。

加速度フィードバックを適用した実験システムを構築し, 残留振動抑制効果の検証実験を行った。制御系は従来の P-PI 制御を用いた。また, フィードバックゲインは 0.02 に設定した。動作指令は, 旋回軸  $30^\circ$  旋回である。図1中の丸部に加速度センサを取り付け, P-PI 制御の速度項へフィードバックする。この際, 加速度センサより出力される信号は, 直流成分や高次の周波数でノイズを含むため, オペアンプを用いたバンドパス回路により, 信号処理を行っている。さらに, 出力信号が小さいため, 反転増幅回路により 25 倍に増幅し, AD ボードを用いてコントローラである PC に取り込んでいる。

図6(a)に動作結果を示す。0.25[s]以降が残留振動である。残留振動の最大振幅(片振幅)は, フィードバック前より約30%低減した。また残留振動周波数は, 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。ここで, 多関節ロボットの振動モードに着目する。コロケーション<sup>[3]</sup>が不成立であるため, 図3に示すように, アーム先端では, 1次振動モードと2次振動モードが逆相となる。よって, 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, 残留振動の特性が2次振動モードに変化した。そこで, 2次振動モードを抑制するために, モードの節を利用する。3章で述べたように, 2次振動モードにはアーム先端に節が存在する。このアーム先端の節に, 加速度センサの取り付け位置を変更し, 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。フィードバックゲインは0.05に設定した。図6(b)に動作結果を示す。残留振動の最大振幅(片振幅)は, フィードバック前より約68%低減した。また, センサ位置変更前と比較すると, 約55%低減した。



(a) Measuring point at the end effector of the arm



(b) Measuring point at the nodal point

Fig.6 Acceleration of arm (with acceleration feedback)

#### 5. 結論

- (1) 多関節ロボットの実験モード解析により, 固有振動数, 固有振動モードを把握し, 残留振動発生原因となる動特性を把握した。
- (2) 制御系の速度項へ加速度フィードバックを行い, 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30%低減し, 残留振動抑制の効果をj得た。しかし, 残留振動は, 多関節ロボットの2次振動モードで励振した。
- (3) アーム先端に存在する2次振動モードの節に, 加速度センサを設置し, 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68%, センサ位置変更前より約55%低減し, 残留振動抑制のさらなる効果をj得た。

#### 参考文献

- [1] 浜松・志波, 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, 日本機械学会講演論文集, No.088-1, (2008)pp.239-240.
- [2] Futami・Kyura・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] 背戸・吉田・野波・原, 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)68-665, (1991)pp.355-363.