

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

浜松 弘・志波 広史*

Dynamics Simulation for Positioning Control of Robot

Hiroshi HAMAMATSU and Hiroshi SHIWA

Abstract

This Paper describes dynamics simulation of the articulated robot. High-speed and accurate positioning of the industrial robot is an important problem by the productivity improvement. However, when the robot operates by a high acceleration, the vibration is generated for the low rigidity arm. And the residual vibration is generated. The dynamic characteristic of the robot is obtained from the experiment for the vibration absorption control. The robot model is composed of the dynamic characteristic. The vibration absorption control simulation is executed by the acceleration feedback in this robot model.

Keywords : *Vibration, Robot, Mechatronics, Simulation*

1. 緒 論

生産性向上のため、産業用ロボット動作の高速高精度化は重要な課題である。しかし、ロボットは高加速度で動作すると、アーム駆動部や関節駆動部が低剛性のため振動が発生する。停止時には残留振動を発生する⁽¹⁾⁽²⁾。このため高速な位置決めが困難である。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ので、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、制御対象である多関節ロボットの動特性を実験モデル解析により把握する。把握した動特性より制御対象モデルを作成し、制御設計を行う。制御対象は、4軸の垂直多関節ロボットである。本ロボットは、アームの剛性が低い低周波数の固有振動数を持ち、停止時に残留振動が発生しやすい構造となっている⁽³⁾。このロボットにおいて位置決め制御シミュレーションを行い、ロボットアーム先端の位置決め時間の短縮を行う。

2. 実 験 装 置

実験に用いる4軸垂直多関節ロボットを図1に示す⁽⁴⁾⁽⁵⁾。本ロボットはグランド側から旋回軸(S軸)、下腕軸(L軸)、上腕軸(U軸)、手首軸(B軸)の4軸から構成され、各関節駆動はACサーボモータで行う。サーボモータには減速機、エンコーダを内蔵している。アーム先端には、加速度センサを取り付け、先端加速度を測定する。

実験装置の全体を図2に示す。コントローラにはハードリアルタイムOSであるRT-Linuxを用い、サンプリング時間0.001[s]を補償する。まず、PC上で関節角度指令を作成する。作成されたモータ角度指令は、RT-Linux上の制御演算によってトルク指令となる。トルク指令を電流で与えることで、サーボモータが回転し、ロボットが動作する仕組みになっている。サーボモータの回転角度は、内蔵されたロータリエンコーダによりカウンタボードを介して、PCに取得する。指令との偏差を計算し、フィードバック制御によりトルク指令を出力する。

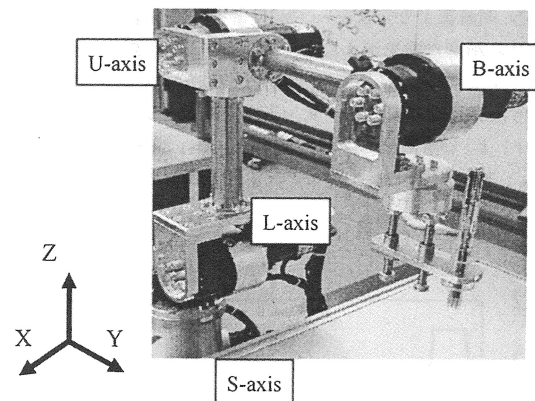


Fig.1 4-axis articulated robot

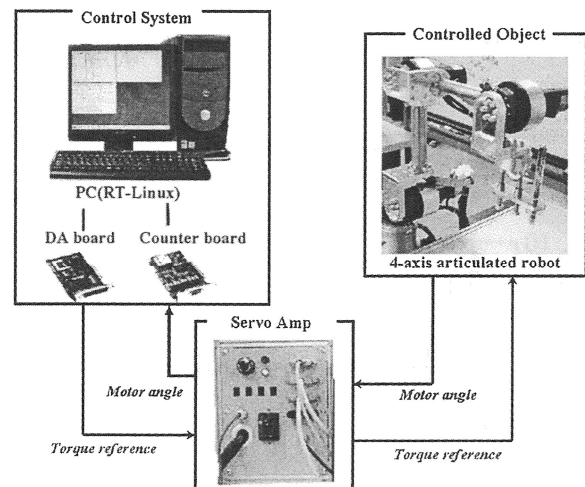


Fig.2 Experimental setup

3. モデル化

ロボットの特性をモデル化するために、動作実験を行った。与えたモータ速度指令を図3に示す。動作時におけるアーム先端のX軸方向の加速度応答を図4に示す。動作は、図1に示す初期姿勢より、S軸をZ軸回りに30° 旋回させている。位置決め終了の0.4s以降残留振動が発生している。主な周波数数は8.2Hzである。また、固有振動数を把握するため、伝達関数を測定した。伝達関数を図5に示す。力を入力とし、アーム加速度を出力とする伝達関数である。アーム先端の旋回方向に加速度計を設置し、アーム先端をインパルス加振している。固有振動数は、9.1Hz、24.8Hz、35.2Hzにあり、図4の残留振動周波数は、1次の固有振動数に起因して発生していることがわかる。残留振動周波数8.2Hzと1次固有振動数9.1Hzが一致していないのは、伝達関数測定をモータ固定で行っているためである。さらにロボットの加振点を変えて伝達関数を測定し、モーダル解析により固有振動モードを算出した。1次～3次の固有振動モードを図6に示す。写真はアームを上側(Z方向)からみたものを示し、振動モードは写真の方向からみた旋回(X軸)方向の振動モードである。1次については、U軸部分に変曲点があり、剛性が弱いことがわかる。2次と3次は、B軸部分に変曲点がある。周波数より、1次モードが残留振動に支配的であるため、制御設計の制御対象モデルはモータとアームを慣性とする2慣性系でモデル化する。2慣性系モデルを図7に示す。ここで、 J_m : モータを含む旋回軸の慣性モーメント、 J_a : Uアームより先の慣性モーメント、 k : U軸アームの結合部剛性、 c : 減衰定数、 R : 減速比、 θ_m : モータ回転角、 θ_a : アーム回転角、 T_m : モータトルクである。

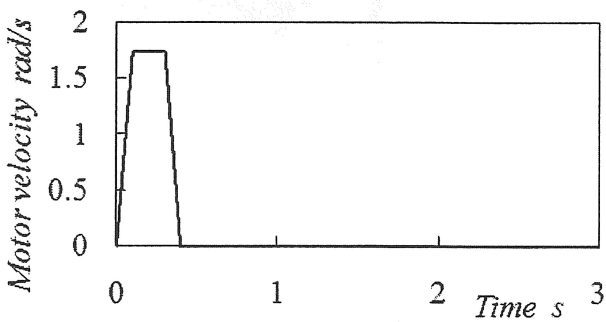


Fig.3 Motor velocity

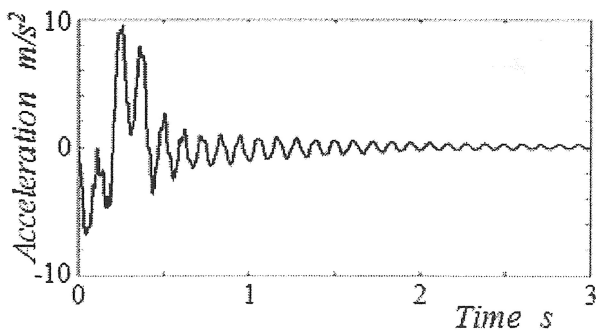


Fig.4 Acceleration of arm

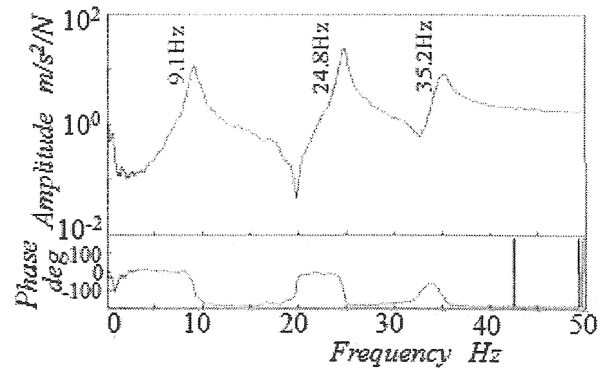


Fig.5 Transfer function

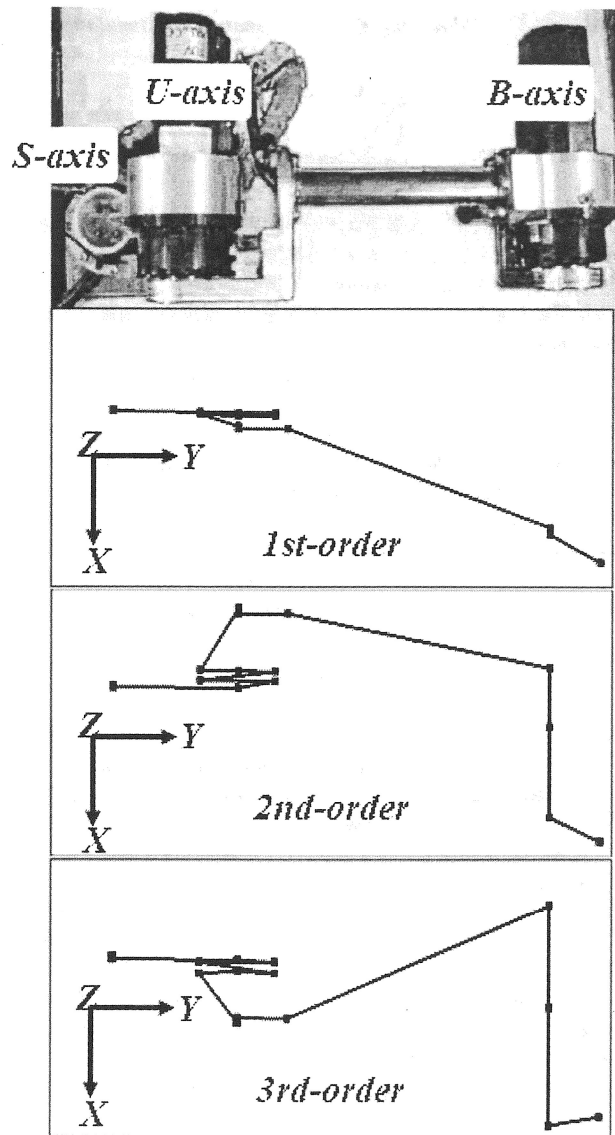


Fig.6 Vibration mode

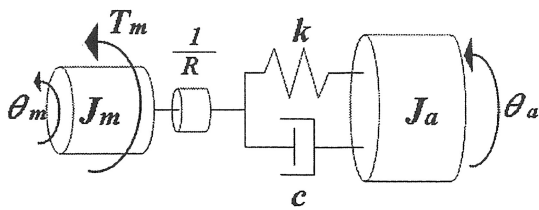


Fig. 7 Two-inertia model

本モデルの運動方程式は、

$$J_m \ddot{\theta}_m = T_m - \frac{1}{R} c \left(\frac{\dot{\theta}_m}{R} - \dot{\theta}_a \right) - \frac{1}{R} k \left(\frac{\theta_m}{R} - \theta_a \right)$$

$$J_a \ddot{\theta}_a = -c \left(\dot{\theta}_a - \frac{\dot{\theta}_m}{R} \right) - k \left(\theta_a - \frac{\theta_m}{R} \right)$$

である。

4. シミュレーション

モデル化した2慣性系を用いてシミュレーションを行う。モータ制御系は、位置の比例(P)、速度の比例積分(PI)制御を用いる。この場合のブロック線図を図8に示す。\$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。振動の抑制には、アーム加速度のモータトルクへのフィードバック制御を行う。加速度信号を、残留振動の情報として利用する。加速度フィードバックゲインを\$K\$とする。シミュレーションに用いたパラメータ値を表1に示す。P-PI制御時と加速度フィードバック付加時のアームの加速度応答を図9に示す。P-PI制御時の加速度の振動発生周波数は8.8Hzであり、図4の実測値と一致していることから、2慣性系でのモデル化が有効である。アームの加速度をフィードバックすることにより、発生振動の振幅は低減する傾向にある。さらに、モデルのモータ軸を30度旋回する図3の指令を入力し、位置決め制御シミュレーションを行った。結果を図10に示す。0.4sで位置決め指令が完了する。加速度フィードバックにより、残留振動が抑制されている。位置決め指令完了より、位置決め完了までの時間が2sから1.5sに25%短縮された。

Table 1 Parameters

K_p	position loop gain	20
K_v	velocity loop gain	125
T_i	integral time	0.03
K_t	torque constant	2.4×10^{-5}
J_m	moment of inertia of motor	2.2×10^{-6}
R	reduction ratio	120
k	rigidity	265
c	damping constant	2.4×10^{-5}
J_a	moment of inertia of arm	8.1×10^{-2}
K	feedback gain	4.2×10^{-3}

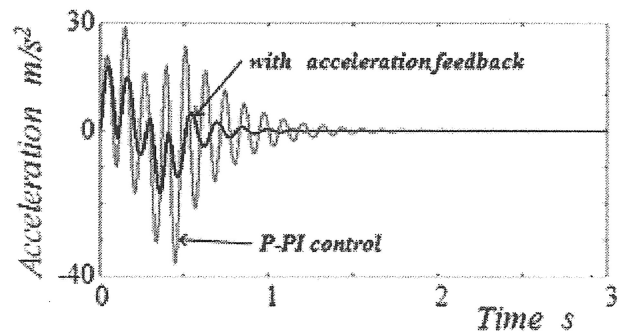


Fig. 9 Accelerations of arm

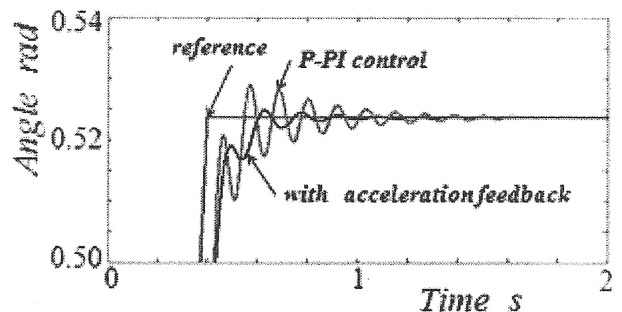


Fig. 10 Responses of position control

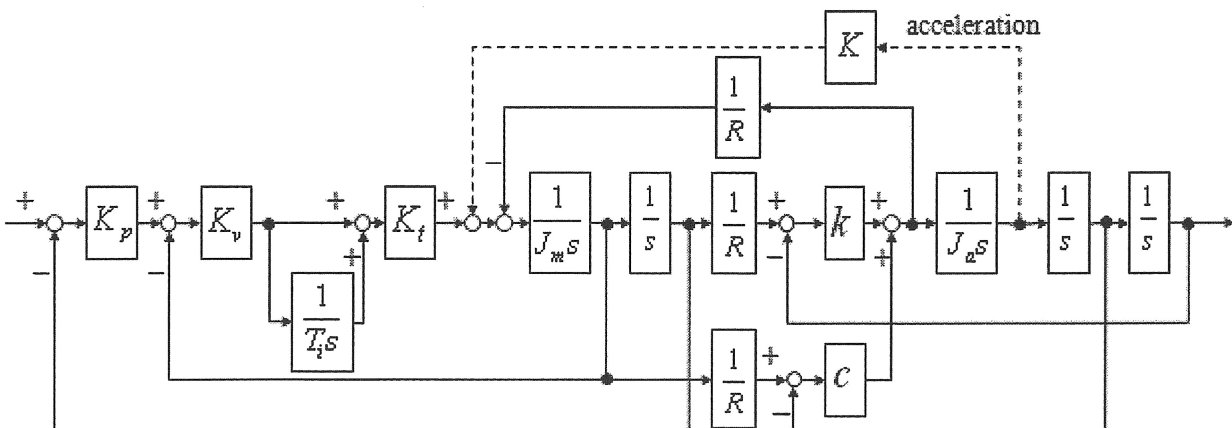


Fig. 8 Block diagram of system

5. 結 論

多関節ロボットの動特性を実験モーダル解析により把握し、モデルの作成と制御設計から得られた結論を以下に示す。

- 1) ロボットのモーダル解析により、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) 動特性よりロボットの2慣性系モデルを作成した。加速度応答の実測により、作成したモデルを検証した。
- 3) アーム加速度をモータトルクにフィードバックすることにより、残留振動低減し、位置決め時間の短縮をシミュレーションで検証した。

文 献

- (1) FUTAMI S., KYURA N., HARA S., Vibration Absorption Control of Industrial Robots by Acceleration Feedback, IEEE trans. Industrial Electronics, Vol.IE-30, No.3, 1983, pp.299-305.
- (2) 浜松弘・内田裕和, 加速度フィードバックによるベルト駆動ロボットの振動抑制制御, 日本機械学会講演論文集, No.078-1, (2007)pp.277-278.
- (3) 浜松弘・上野大志, 移動平均法を用いた多関節ロボットの動作指令生成, 日本機械学会講演論文集, No.078-1, (2007)pp.257-258.
- (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, 日本機械学会講演論文集, No.088-1, (2008)pp.239-240.
- (5) 安川情報システム(株)ホームページ, <http://www.yaskinet.co.jp/product/type/cae/robot/index.html>

(2008年10月6日 受理)