6 自由度産業用マニピュレータを用いた モデルベースド運動制御の実証研究

杉 山 謙一郎* 松 浦 龍 生* 前 田 浩 一*

Experimental Study of Model Based Motion Control for a 6 D.O.F. Industrial Manipulator

Kenichiro Sugiyama*, Ryusei Matsuura* and Hirokazu Mayeda*

The performance indices of the model based motion control are experimentally investigated for a 6 D.O.F. industrial manipulator. Adopting the standardization compensators both in the joint space and the task space, a trajectory control for each direction is examined to evaluate the accuracy and decoupling indices of the model based controls. The frequency response for each direction is also investigated by the spectrum analysis of the step response.

Key Words: Model Based Motion Control, Performance Indices of Control, Experimental Study, Industrial Manipulator, Standardization Compensator

1. 緒 言

マニピュレータの動的制御の手法としてモデルベースド制御がある。この制御は、各リンクが同時に運動することによるリンク間の相互作用や、重力による影響を補償するので、高速・高精度の動的制御や力制御、インピーダンス制御に適している。前田らはこの手法に基づく標準化コントローラによりマニピュレータの動特性を線形標準化非干渉正規化して、その上に運動・力・インピーダンス制御系を設計する多くの利点がある方法を提案している [1] [2]。

これまでモデルベースド運動制御の実験例として An ら [3] や前田ら [4] の報告例があるが 2 自由度または 3 自由度のマニピュレータに対して行われており、高自由度のマニピュレータによる報告例は極めて少ない。また、これらの報告ではモデルベースド制御と各軸の PD 制御を行った際の軌道で比較を行いその有効性を検証した [6] だけにとどまっている。しかしながら、マニピュレータを用いて作業を行う際は運動の精度や応答の速さの性能を知っておく必要があるが、これらの性能指標を詳しく調べた報告は少ない。これらの性能は関節の減速機による摩擦トルクや制御のサンプリング周期等により限界が生じる。そこで、実機でこれらの性能がどこまで実現できるかを検証しておくことは極めて重要である。

本研究では実験対象として 6 自由度産業用小型マニピュレータを用いモデルベースド運動制御系の性能を実験的に調べるこ

とを目的とする。具体的にはまずこのマニピュレータの動特性同定を行いマニピュレータの基礎特性を明らかにした上で関節座標と作業座標における標準化コントローラを構成し各方向への軌道制御を行い目標軌道と比較することで追従精度性能を評価する。それと同時に得られた作業座標系の軌跡が目標軌跡からどれだけはずれていたかを見ることにより非干渉化の性能を検証する。最後にこれらの周波数応答を調べることで応答性能を検証する。また、関節座標制御と作業座標制御の性能比較も行う。

2. モデルベースド制御

2.1 マニピュレータの動特性

マニピュレータの動特性は次のように表すことができる。

$$\tau = \mathbf{M}(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{h}(\theta, \dot{\theta}) \quad (1)$$

ここで τ は関節トルク、 θ は関節角度、 $\mathbf{M}$ は慣性行列、 $\mathbf{h}(\theta, \dot{\theta})$ は遠心力、コリオリ、重力項、摩擦項である。作業座標における手先の位置 $\mathbf{x}$ は θ から $\mathbf{x} = \mathbf{P}(\theta)$ と表され、 $\mathbf{J}$ は $\mathbf{P}(\theta)$ のヤコビ行列である。マニピュレータの動作範囲で $\mathbf{J}(\theta)$ は正則であると仮定し、特異点をもたないものとする。

一般的に $\theta, \dot{\theta}$ (または $\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}$) は関節のエンコーダから測定可能であるとして関節座標制御、作業座標制御ではそれぞれ

$$\tau = \mathbf{M}(\theta)\mathbf{u} + \mathbf{h}(\theta, \dot{\theta}) \quad (2)$$

$$\tau = \mathbf{M}(\theta)\mathbf{J}^{-1}(\theta)[\ddot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{J}}(\theta)\dot{\theta}] + \mathbf{h}(\theta, \dot{\theta}) \quad (3)$$

のような標準化コントローラと呼ばれる前置補償器をおくことと

原稿受付 2001 年 5 月 7 日

*立命館大学理工学部ロボティクス学科

*Dept. of Robotics Ritsumeikan University

する。\$\mathbf{u}\$ は標準化コントローラの入力ベクトルである。式 (2), (3) の計算は逆運動学問題のアルゴリズムによって実時間で計算可能であり式 (1) と式 (2), (3) から

$$\ddot{\theta} = \mathbf{u} \quad (4)$$

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{u} \quad (5)$$

を導くことができる。このことによりサーボコントローラは関節座標あるいは作業座標の各軸方向ごとに、1 入力 1 出力システム

$$G_p(s) = \frac{1}{s^2} \quad (6)$$

について設計すればよいことになる [1] [2].

モデルベース制御 [3] あるいは計算トルク法は本質的にはマニピュレータの運動を実時間でシミュレートすることにより線形化補償制御を行っているものと考えられる。この方法はマニピュレータの動特性モデルが必要とされるものの、制御系設計が非常に合理的かつ厳密に行えるという特長がある。本稿の制御法はこの方法の一変形であり、標準化コントローラによりマニピュレータの動特性を陽に線形、非干渉、正準化しておき、その上にサーボ補償制御則を設計するという 2 段階に分けた見通しのよい方法である。

2.2 運動制御則

運動制御を行うために式 (6) の制御対象に対して、Fig. 1 に示す制御系を構成する。ただし、\$\theta_d(s)\$, \$\mathbf{x}_d(s)\$, \$\eta_i(s)\$, \$\eta_o(s)\$ は、それぞれ各関節軸の目標角度、作業座標の目標位置、入力外乱、観測ノイズとする。また、Fig. 1 で示した \$P_t(s)\$, \$P_f(s)\$ はそれぞれ、

$$P_t(s) = C_{pi} \quad (7)$$

$$P_f(s) = C_{vi}s + C_{pi} \quad (8)$$

とする。ここで \$C_{vi}\$, \$C_{pi}\$ はそれぞれ速度フィードバックゲイン、位置フィードバックゲインとする。

関節座標制御では入力 \$\mathbf{u}\$ は次のようにする。

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}_1 \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_2 \mathbf{e} \quad (9)$$

$$\dot{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \vdots \\ \dot{e}_5 \\ \dot{e}_6 \end{bmatrix}, \mathbf{e} = \begin{bmatrix} \theta_{d1} - \theta_1 \\ \theta_{d2} - \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_{d5} - \theta_5 \\ \theta_{d6} - \theta_6 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

Fig. 1 The block diagram of motion control

$$\mathbf{K}_1 = \text{diag}[C_{v1}, \dots, C_{v6}], \mathbf{K}_2 = \text{diag}[C_{p1}, \dots, C_{p6}] \quad (11)$$

また、作業座標制御においては入力 \$\mathbf{u}\$ は次のようにする。

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}_1 \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_2 \mathbf{e}_t \quad (12)$$

$$\dot{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix}, \mathbf{e}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_d - \mathbf{p} \\ \frac{1}{2}(\mathbf{n} \times \mathbf{n}_d + \mathbf{s} \times \mathbf{s}_d + \mathbf{a} \times \mathbf{a}_d) \end{bmatrix} \quad (13)$$

ただし、

- \$\dot{\mathbf{p}}\$: マニピュレータの手先の並進速度ベクトル
- \$\mathbf{p}_d\$: マニピュレータの手先に対する目標位置ベクトル
- \$\mathbf{p}\$: マニピュレータの手先位置ベクトル
- \$\boldsymbol{\omega}\$: マニピュレータの手先に対する実際の角速度ベクトル
- \$\mathbf{n}_d\$: 目標手先座標系の単位法線ベクトル
- \$\mathbf{s}_d\$: 目標手先座標系の単位スライドベクトル
- \$\mathbf{a}_d\$: 目標手先座標系の単位アプローチベクトル
- \$\mathbf{n}\$: 手先座標系の単位法線ベクトル
- \$\mathbf{s}\$: 手先座標系の単位スライドベクトル
- \$\mathbf{a}\$: 手先座標系の単位アプローチベクトル

$$\mathbf{K}_1 = \text{diag}[C_{v1}, \dots, C_{v6}], \mathbf{K}_2 = \text{diag}[C_{p1}, \dots, C_{p6}] \quad (14)$$

とする。

3. システム構成

3.1 実験システム構成

本研究では、6 自由度小型開リンク機構マニピュレータ JS-2 (川崎重工業製: 最大可搬重量 2 [kg]) を使用した。このマニピュレータには同期型ブラシレス AC サーボモータ、フルアソリユートタイプの高分解能エンコーダ (1/8,192 [rev/puls]) が取り付けられている。コントローラはモデルベース制御のために別途開発したものであり、モータは電流指令で制御でされ、また出力された電流値が直接検出できるようになっている。コントローラ内部にはメイン CPU (i486) と非線形フィードバック補償の計算を行う 32bit 浮動小数点 DSP (TI 社製 TMS320C32) ボードが搭載されている。Fig. 2 に実験システムの構成を示す。また Table 1 に今回 JS-2 に搭載されているモータの諸元を示す。

Fig. 2 The manipulator system

Table 1 The specification for the motor of the each joint

	Unit	Joint 1,2	Joint 3	Joint 4-6
Rated Output	[W]	80	50	30
Rated Torque	[Nm]	0.25	0.16	0.095
Electrical Time Constant	[ms]	0.9	0.68	0.6
Mechanical Time Constant	[ms]	3.0	1.8	2.8

3.2 動特性モデル同定

標準化コントローラの計算にはマニピュレータの動特性モデルが必要となる。本研究ではマニピュレータの動特性モデルの推定法を逐次・同時混合同定法 [7] [8] により推定をした。これは試験運動で特定の組のパラメータや駆動系のパラメータを推定でき推定値を精度よく求めることのできる逐次同定の利点とパラメータ推定に対して短時間かつ簡単に行える同時同定法の利点を組み合わせた同定法である。特に本研究で使用したマニピュレータの関節軸はハーモニックドライブによる減速器を有する機構となっており、動特性モデルの推定やマニピュレータを制御する際にはこの減速器による摩擦の影響を大きく受ける事になる。そこでここでは動特性モデルにおける摩擦要素であるクーロン摩擦係数、粘性摩擦係数の測定を逐次同定法により行いこれらの値を基にして他のパラメータを推定する逐次・同時混合同定法によるマニピュレータの動特性モデルを示す。なお、マニピュレータの減速比 K は式 (15) である。

$$K = \begin{pmatrix} \frac{1}{120} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{200} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{160} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{55}{2914} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{50} \cdot \frac{55}{2914} & \frac{1}{100} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{147}{3125} \cdot \frac{55}{2914} & -\frac{6}{125} \cdot \frac{1}{100} & \frac{3}{125} \end{pmatrix} \quad (15)$$

3.2.1 静止試験

静止試験はマニピュレータの一つの軸を適当な姿勢で静止させ、そのときの角度と釣り合いトルクを測定し重力項とクーロン静止摩擦係数を求める試験法である。このときの力の釣り合いの式は

$$\tau_m = K^t G(\theta_m) + f_s \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_m) \quad (16)$$

であり、 $K^t G$ 、 f_s はそれぞれ重力項、クーロン静止摩擦係数である。ここでマニピュレータが静止状態にあるときに、第 J_i 軸に正のトルクを徐々に加えていきマニピュレータが動き始めるときの値を τ_{mi}^+ 、反対に負のトルクを加えていきマニピュレータが動き始めるときの値を τ_{mi}^- とするとクーロン静止摩擦係数は次式で求まる。

$$f_{si} = \frac{\tau_{mi}^+ - \tau_{mi}^-}{2} \quad (17)$$

また式 (16) を成立させるトルク τ_{mi} は次式のようになり、

$$\tau_{mi} = \frac{\tau_{mi}^+ + \tau_{mi}^-}{2} \quad (18)$$

この値を用いて重力項 $K^t G(\theta)$ も得ることができる。Fig. 3 に例として 3 軸のクーロン静止摩擦係数を、Table 2 には各軸のクーロン静止摩擦係数の平均値を示す。

Fig. 3 The measured value of coulomb static friction torque on Joint3**Table 2** The measured value of coulomb static friction torque in the joints

Joint 1	Joint 2	Joint 3	Joint 4	Joint 5	Joint 6
0.1117	0.1439	0.0450	0.0316	0.0619	0.0520

unit[Nm]

Fig. 4 The constant angular velocity test on Joint3

3.2.2 等角速度試験

等角速度試験は、各関節に適当なトルクを加え等角速度運動になったときの角速度から、粘性摩擦係数とクーロン動摩擦係数を求める試験法であり、このときの運動方程式は以下のようになる。

$$\tau_m - K^t G(\theta) = B \dot{\theta}_m + f_c \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_m). \quad (19)$$

ここで B 、 f_c はそれぞれ粘性摩擦係数、クーロン動摩擦係数である。重力項 $K^t G(\theta)$ は静止試験より求められているので、式 (19) より粘性摩擦係数とクーロン動摩擦係数を推定することができる。Fig. 4 に 3 軸の等角速度運動試験の結果を示す。ここで直線の勾配が粘性摩擦係数、Y 軸切片がクーロン動摩擦係数に相当するが、正方向と負方向が異なっているためこれらの推定値は平均値を採用している。

3.2.3 逐次・同時混合同定

混合同定法は静止試験、等角速度試験より推定した摩擦に関するパラメータを固定値として残りのパラメータを全関節軸を同時に角加速度運動試験により求める推定法である。Table 3

Table 3 The dynamic model parameters by the compound identification

Parameter	Value	Parameter	Value
J_{z1}	2.812	R_{x2}	4.107
J_{z2}	4.620	R_{x3}	3.705×10^{-2}
J_{z3}	1.896×10^{-1}	R_{x4}	4.566×10^{-3}
J_{z4}	-1.906×10^{-3}	R_{x5}	-1.666×10^{-2}
J_{z5}	-2.303×10^{-2}	R_{x6}	5.702×10^{-3}
J_{z6}	-2.514×10^{-3}		
J_{x-y2}	-1.074	R_{y2}	6.327×10^{-3}
J_{x-y3}	3.206×10^{-1}	R_{y3}	-1.321
J_{x-y4}	-4.549×10^{-2}	R_{y4}	5.444×10^{-3}
J_{x-y5}	3.838×10^{-3}	R_{y5}	-1.013×10^{-1}
J_{x-y6}	6.598×10^{-3}	R_{y6}	-2.191×10^{-4}
			[kgm]
J_{xy2}	-4.563×10^{-2}	j_{a3}	3.475×10^{-5}
J_{xy3}	1.030×10^{-2}	j_{a4}	9.164×10^{-6}
J_{xy4}	-1.507×10^{-2}	j_{a5}	5.319×10^{-5}
J_{xy5}	4.762×10^{-3}	j_{a6}	5.535×10^{-5}
J_{xy6}	-4.010×10^{-3}		
			[kgm ²]
J_{xz2}	3.851×10^{-2}	b_1	3.856×10^{-4}
J_{xz3}	2.775×10^{-2}	b_2	1.796×10^{-4}
J_{xz4}	-2.913×10^{-3}	b_3	1.182×10^{-4}
J_{xz5}	1.097×10^{-2}	b_4	2.094×10^{-4}
J_{xz6}	1.861×10^{-3}	b_5	1.554×10^{-4}
		b_6	3.881×10^{-4}
			[Nms]
J_{yz2}	-2.376×10^{-1}	f_{c1}	9.856×10^{-2}
J_{yz3}	-3.389×10^{-3}	f_{c2}	1.086×10^{-1}
J_{yz4}	-1.027×10^{-2}	f_{c3}	3.795×10^{-2}
J_{yz5}	8.809×10^{-4}	f_{c4}	2.280×10^{-2}
J_{yz6}	3.288×10^{-3}	f_{c5}	6.812×10^{-2}
	[kgm ²]	f_{c6}	3.612×10^{-2}
			[Nm]

にこの推定方法により推定した動特性モデルを示す。ここで、 J , R , j で表されるパラメータはそれぞれリンクの二次モーメント、一次モーメント、モータ電機子の慣性イナーシャに関する基底パラメータであり、 b , f_c で表されるパラメータは各関節の伝達機構の粘性摩擦係数、クーロン動摩擦力で式 (19) の B , f_c の成分である。これらのパラメータの詳細については文献 [7] [8] を参照されたい。

4. 運動制御性能の検証実験

本章では運動制御の性能指標となる軌道制御における目標軌道に対する追従精度、非干渉化の性能、周波数応答性能のそれぞれの項目について実験を行いその性能を示す。以下の実験では、制御則式 (9), (12) の K_1 , K_2 はサーボ補償された各二次系の固有周波数 ω_n ができるだけ大きくなるように、また減衰係数 ζ は 0.9~1.3 の間になるよう調整した。なお標準化コントローラの実時間計算を含むサーボ補償のサンプリングタイムは 2.3 [ms] である。

4.1 追従精度・非干渉化

作業空間において直線軌道制御を行い、目標軌道の運動方向成分に対する応答の誤差を見ることにより追従精度を評価する。また、目標軌跡からの応答軌跡のずれを見ることにより非干渉化の性能を評価する。実験は原点から 1 軸方向 (X 軸方向, Y 軸方向, Z 軸方向), 2 軸同時方向 (XY 軸方向, YZ 軸方向,

(a) X axis direction trajectory control

(b) XYZ axis direction trajectory control

————— Desired trajectory
 - - - - - Joint space control
 Task space control

Fig. 5 Comparison of desired trajectory and trajectories by model based control in the task space and joint space

XZ 軸方向), 3 軸同時方向 (XYZ 軸方向) に直線軌道制御を行い、その応答を評価することを関節座標制御と作業座標制御について行った。これは、式 (9), (12) におけるサーボ補償の違いによる性能の比較を行うためである。以下の実験で使用した軌道は作業座標における始点・終点の位置、速度の条件から三次補間によって軌道を生成したもので 5 [cm] を 0.5 [s] で移動し加減速の時間は 0.2 [s] としており等速区間は 0.1 [s] でこのときの速度は約 0.166 [m/s] となっている。またこのときの手の姿勢は一定に保つように制御している。

代表例として 1 軸方向 (X 軸) の位置応答と 3 軸同時方向 (XYZ 軸方向) の軌跡を **Fig. 7** に示す。また、追従精度の評価として、運動方向成分の誤差の絶対値の最大値と時間平均値を **Table 4** に示す。非干渉化の性能評価としては、1 軸方向軌道制御について、運動方向以外の成分の絶対値の最大値と時間平均値を **Table 5** に示す。なお関節座標制御の結果は直線軌道に対して逆運動学問題を解き関節目標で与えたときの結果である。

追従精度の性能としては 1 軸方向の運動が関節座標制御で最大で 175 [μ m], 平均で 150 [μ m], 作業座標制御では最大で 300 [μ m], 平均で 285 [μ m] の誤差となった。また複数軸同時

Table 4 The accuracy for the desired value by each control

Control direction		Joint space			Task space		
		X	Y	Z	X	Y	Z
X [μm]	Ave	85	***	***	125	***	***
	Max	105	***	***	165	***	***
Y [μm]	Ave	***	150	***	***	285	***
	Max	***	175	***	***	300	***
Z [μm]	Ave	***	***	40	***	***	40
	Max	***	***	80	***	***	110
XY [μm]	Ave	20	40	***	70	150	***
	Max	35	80	***	110	215	***
XZ [μm]	Ave	110	***	20	170	***	170
	Max	155	***	40	205	***	210
YZ [μm]	Ave	***	50	165	***	340	200
	Max	***	80	190	***	435	300
XYZ [μm]	Ave	90	100	130	150	550	250
	Max	100	145	170	195	600	290

Table 5 The performance of the non-intervention by each control

Control direction		Joint space			Task space		
		X	Y	Z	X	Y	Z
X [μm]	Ave	***	0	107	***	10	78
	Max	***	0	170	***	15	250
Y [μm]	Ave	53	***	63	62	***	75
	Max	130	***	170	240	***	230
Z [μm]	Ave	56	10	***	71	229	***
	Max	120	15	***	210	420	***

運動も含めた誤差は関節座標制御で最大で 190 [μm]、平均で 165 [μm]、作業座標制御では最大 600 [μm]、平均で 550 [μm] の誤差となった。また非干渉化の精度としては、関節座標制御では最大で 170 [μm]、平均で 107 [μm]、作業座標制御では最大で 420 [μm]、平均では 229 [μm] の干渉が見られた。各性能評価において誤差が最大となるのは制御開始時に多く見られたが、これは制御開始時における入力に対する応答の遅れが出ているためである。

全体的な傾向としては追従精度・非干渉化の性能とも関節軸制御の方が誤差は小さい結果となっている。これは作業座標制御では式 (3) においてヤコビ行列の計算を行っているため、関節角度、角速度誤差の影響であると考えられる。また、パラメータ調整において関節座標制御では各関節ごとにパラメータを調整できるが作業座標制御では各作業軸方向に対してパラメータを調整することになり、十分にフィードバックゲインをあげられないことも誤差が大きく出た原因であると思われる。特に第 1 関節に関係する運動ではモータの出力が上げられないことが、このような結果が出た原因であると考えられる。

4.2 周波数応答

各関節座標・作業座標軸方向の周波数応答特性を応答の速さを指標とする追従性能と式 (9)、(12) より設定した理論上の応答特性に対して摩擦やその他の外乱要因に対しどの程度まで合致するかを指標とする追従精度に分けて評価する。実際には関節座標制御では各軸のステップ応答を、作業座標制御では X 軸方向、Y 軸方向、Z 軸方向のステップ応答をスペクトル解析した周波数特性より評価を行った。またサーボ補償のサンプリングタイムの違いが各性能に与える影響を調べるためにサンプリング

Table 6 The limit and accuracy frequencies of the joint space control

Sampling Time	Joint No	1	2	3	4	5	6
2.3 [ms]	limit	3	3	4	9	5	7
	accuracy	9	9	10	9	10	10
4 [ms]	limit	3	3	4	4	3.8	6
	accuracy	6	6	8	6	6	7

unit [Hz]

Table 7 The accuracy frequencies of the task space control

Sampling Time	Control direction	X	Y	Z
2.3 [ms]	limit	3	3	3
	accuracy	8	9	9
4 [ms]	limit	2.3	3	2.8
	accuracy	6	7	7

unit [Hz]

Fig. 6 The input-output relationships for step signal of Joint 3

タイムを 4 [ms] に設定して同様の実験を行った。ただしこの実験ではステップ関数状の目標値を入力していることからサーボアンプの入力制限にかからない範囲で速度・位置のフィードバックゲインを調整し評価したものである。追従性能の限界を実験により得られた応答特性に対してバンド幅を用いて評価をした。また追従精度の限界についてはシミュレーションによる応答特性に対して実験により得られた応答特性がゲインならば 1 [dB]、位相ならば 5 [deg] 異なる点を応答性能の限界として評価した。サンプリングタイムを 2.3 [ms] と 4 [ms] に設定したときの各関節軸と各作業座標軸の追従性能・精度の結果について **Table 6**, **Table 7** に示す。また応答特性の代表例として **Fig. 6**, **Fig. 7** に第 3 関節軸の応答特性を、**Fig. 8**, **Fig. 9** に X 軸方向の応答特性を示す。

関節座標制御では各軸によってばらつきはあるがサンプリングタイムが 2.3 [ms] のときには 3~9 [Hz] まで、サンプリングタイムが 4 [ms] のときは 3~6 [Hz] まで追従できており、その精度としてはサンプリングタイムが 2.3 [ms] のときには 9~10 [Hz]、サンプリングタイムが 4 [ms] のときは 6~8 [Hz] となっている。追従性能に関しては速度・位置フィードバックゲインを大きく設定することができるためにサンプリングタイムが短い方がより追従限界が高く、また応答精度に関しても速度・位置のフィー

Fig. 7 The frequency response of Joint3

Fig. 8 The input-output relationships in x axis for step signal

Fig. 9 The frequency response in x axis

ドバックゲインが大きいほうが誤差精度の高い制御を行うことができ、スペクトル解析を行う際の出力データである出力の軌道において、過渡応答・定常誤差・振動といった誤差が少なく

なり、よりシミュレーション結果に近い値が出るためであると考えられる。

次に作業座標制御では、同様にサンプリングタイムが 2.3 [ms] の時は各軸方向とも 3 [Hz] までサンプリングタイムが 4 [ms] の時は 2.3~3 [Hz] まで追従できており、その精度はサンプリングタイムが 2.3 [ms] のときでは 8~9 [Hz], サンプリングタイムが 4 [ms] のときは 6~7 [Hz] となっている。関節軸制御に比べると若干性能が落ちるが、これはある作業軸方向に制御するときの一つの関節軸だけではなく複数の関節軸が動いた結果作業座標軸方向に移動するということを考慮すれば妥当な結果といえる。各関節の総合的な動きである作業座標制御での応答性能は各関節軸の応答性を考慮に入れ、応答性の悪い関節軸と同程度の応答性が結果として出ていると思われる。

5. 結 言

6 自由度産業用マニピュレータにモデルベースド制御を適用し、追従精度・非干渉化・周波数応答性能の各性能指標を実験的に検証した。また、関節座標制御と作業座標制御の性能の比較も行った。これらはマニピュレータに作業をさせる場合に考慮すべき要因であり、かつ力・インピーダンス制御のベースとなるものである。運動制御性能の限界は減速器の摩擦に対処するため、速度・位置フィードバックゲインをどこまで上げられるかによって決まる。しかしながら産業用マニピュレータにおいては速度フィードバックゲインはサンプルノイズの影響のため、あまり大きくできない。本研究でもその傾向は大であった。今後の課題としてはサーボ補償のサンプリングタイムを短縮し位置と速度のフィードバックゲインを上げることでさらに性能を向上させることがある。さらに減速機構の摩擦による性能への影響を緩和するために軸トルクセンサ [10] によるトルクのフィードバックシステムの開発も計画している。最後に、本研究で用いたロボットコントローラはモデルベースド制御とそれに基づく力・インピーダンス制御用に別途開発したものであり、ロボットメーカーが提供する PID 制御との性能比較は行えなかった。ただ、コントローラメーカーが調整した PID 制御を用いて本稿と同じ実験を行ってみると、作業座標制御の結果と比べて追従精度の最大誤差が 50~100 [μ m] 大きくなるという結果を得た。この問題に対してある程度参考になるとと思われる。

参 考 文 献

- [1] H. Mayeda, N. Ikeda and K. Miyaji: "Position/Force/Impedance Control for Robot Tasks," Proc of 2nd Int. Symp. on Measurement and Control Robotics, pp.581-588, 1992.
- [2] H. Mayeda and N. Ikeda: "Motion/Force/Impedance Control for Robot Tasks," Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, pp.1522-1529, 1993.
- [3] An, C. H., C. G. Atkeson and J. M. Hollerbach: Model-based Control of a Robot manipulator. The MIT Press, 1988.
- [4] 前田浩一, 大橋一登, 山縣克之: "DD アームのモデルベースド制御", 第 2 回インテリジェント FA シンポジウム予稿集, pp77-80, 1989.
- [5] 杉山謙一郎, 松浦龍生, 峯松睦雄, 南保智秋, 前田浩一: "産業用ロボットのモデルベースド制御~軌道制御と周波数応答における性能評価~, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp1057-1058, 1999.

- [6] Tsuneki Yasuho, Yasuhiro Omaki, Tomoaki Nampo and Hirokazu Mayeda: "Identification and Model Based Control of A 6D. O. F. Industrial Manipulator," IFAC SYROCO'97 vol.1, pp.117-123, Nantes, France, 1997.
- [7] 吉田浩治, 池田展也, 前田浩一: "6 自由度産業用マニピュレータに対するパラメータ同定法の実証的研究", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.4, pp.564-573, 1993.
- [8] 大須賀公一, 前田浩一: "マニピュレータの動特性同定法", 計測自動制御学会論文集, vol.22, no.6, pp.637-643, 1986.
- [9] 吉川恒夫: ロボット制御基礎論. コロナ社, 1988.
- [10] 小川将彦, 井口達至, 前田浩一: "渦電流変位センサを用いた軸トルクセンサの開発", 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1013-1014, 2000.

杉山謙一郎 (Kenichiro Sugiyama)

1974 年 12 月 7 日生. 1998 年立命館大学理工学部機械工学科卒業, 2000 年同大学大学院博士前期課程理工学研究科情報システム学専攻修了.

(日本ロボット学会正会員)

松浦 龍生 (Ryusei Matsuura)

1976 年 1 月 27 日生. 1999 年立命館大学理工学部機械工学科卒業, 2001 年同大学大学院博士前期課程理工学研究科情報システム学専攻修了.

前田浩一 (Hirokazu Mayeda)

1943 年 10 月 5 日生. 1966 年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業. 1971 年同大学大学院基礎工学研究科博士課程単位取得退学. 同年同大学基礎工学部制御工学科助手. 助教授を経て, 1992 年立命館大学理工学部情報工学科教授. 1996 年理工学部ロボティクス学科教授. この間 (1978~1979) トロント

大学電気工学科客員研究員. 現在, ロボットのモデルベース制御および運動, 作業知能の研究に従事. 計測自動制御学会, 日本機械学会, システム制御情報学会, IEEE の会員. (日本ロボット学会正会員)