

# 6 自由度開ループ型マニピュレータの動特性モデルの推定と モデルベースド軌道制御

諸富 徳行, 阪本 武志, 平井 慎一  
立命館大学 理工学部

## Identification of Dynamic Model and Model Based Trajectory Control of 6 d.o.f. Open Loop Manipulator

Noriyuki Morotomi, Takeshi Sakamoto, Shinichi Hirai  
Ritsumeikan University

**Abstract** - A model based trajectory control of a 6 d.o.f. open loop manipulator is presented. First, dynamic model of a manipulator with 6 d.o.f. open loop mechanism is estimated using simultaneous method. Second, the validity of the estimated dynamic model is examined by comparing actual trajectories with desired trajectories. Next, the trajectory control based on the estimated dynamic model is implemented on a manipulator. Experimental results are shown to demonstrate the effectiveness of the model based trajectory control.

*Keywords: dynamic model, identification, open loop manipulator, model based trajectory control*

### 1. 緒言

近年, ロボットマニピュレータには, 高速度, 高精度な軌道制御が求められている. ロボットマニピュレータを高速度で運動させると, 機構の動特性が無視できない. したがって, ロボットマニピュレータを高速度, 高精度で制御するためには, その動特性を考慮に入れた動的制御が必要である.

動的制御には, (a) 動特性の同定が難しい, (b) 計算量が多く, 実時間制御に用いることは困難であるという欠点がある. (a) の問題に関しては, ロボットマニピュレータの実際の運動を計測し, その計測値から動特性モデルを推定する方法がある. ただし, 動特性モデルに含まれるパラメータを一意に決定することは不可能である. この問題に対処するために, 基底パラメータの概念が提案されている<sup>1)</sup>. (b) の問題は, DSP を用いることで解決できることが実証されている<sup>2)</sup>.

本報告では, 基底パラメータの概念を動特性モデルに導入し, 6 自由度開ループ型マニピュレータの動特性モデルの推定実験を行うとともに, 推定した動特性モデルの妥当性を検証する. 次に, 動的制御の方法として提案されているモデルベースド軌道制御<sup>3)</sup>を行い, その実験結果について報告する.

### 2. 動特性モデル

ロボットマニピュレータは, 一般に剛体リンクの開ループ機構としてモデル化される. その各々の関節ごとに, 独立なアクチュエータによる駆動力が供給されている. このようなマニピュレータの動特性モデルは,

- ・機構パラメータ (リンク長, ねじれ角, 関節タイプ)
- ・慣性パラメータ (質量, 重心位置, 慣性テンソル)
- ・駆動系パラメータ (イナーシャ, 粘性・クーロン摩擦)

により決定できる.

マニピュレータの機構パラメータの値は, その設計仕様等により比較的簡単に決定できる. しかし, 慣性パラメータについては容易ではない. 機構パラメータが既知であるとき, マニピュレータを実際に運動させ, そのときの入力データ (関節トルクデータ) と運動デー

タ (関節角度, 関節角速度, 関節角加速度データ) からパラメータ値を推定する方法がある. しかし, 1 リンクにつき, 慣性パラメータは 10 個存在し,  $N$  自由度においては合計  $10N$  個存在することになる. よって, 慣性パラメータのすべての値を推定することは極めて困難である. 慣性パラメータは, すべてが独立ではなく, 冗長性を持つ. そこで, 動特性モデルを一意に決定するために必要な, 最小個数のパラメータが提案されている<sup>1)</sup>. このようなパラメータを基底パラメータと呼ぶ. これは, 慣性パラメータの線形結合で表されており, 一意に推定可能である. よって, 基底パラメータと駆動系パラメータを推定することで, マニピュレータの動特性モデルを得ることができる. 基底パラメータと駆動系パラメータをまとめて, モデルパラメータと呼ぶ.

慣性パラメータと駆動系パラメータをベクトル  $\Gamma$  で表すと, ロボットマニピュレータの動特性モデルは,

$$\tau_a = Q(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}, \text{sgn}(\dot{\theta}))\Gamma \quad (1)$$

と表される.  $\tau_a$  はアクチュエータのトルクであり,  $\theta$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $\ddot{\theta}$  はそれぞれ関節角度, 関節角速度, 関節角加速度である. モデルパラメータをベクトル  $\phi$  で表すと,  $\Gamma$  と  $\phi$  の関係は,

$$\Gamma = S^T(SS^T)^{-1}\phi \quad (2)$$

となり, 基底パラメータを動特性モデルに導入することができる<sup>3)</sup>.  $S$  はリンク長とねじれ角から決定されるフルランク定数行列である.

### 3. 動特性モデルの同定

動特性モデルの推定には, 同時同定法<sup>4)</sup>を用いる. 同時同定法とは, マニピュレータの全軸を同時に運動させ, そのときの入力データと運動データから, モデルパラメータを一意に推定する方法である. 推定の際には, 最小二乗法を用いる.

同定実験に用いる 6 自由度開ループ型マニピュレータ (以後 DENSO-ROBOT と呼ぶ) を Fig.1 に示す. また, リンク構造およびリンク座標系を Fig.2 に示す.

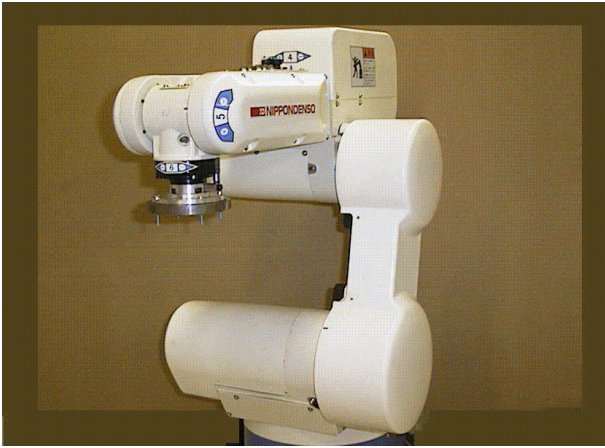


Fig.1: DENSO-ROBOT

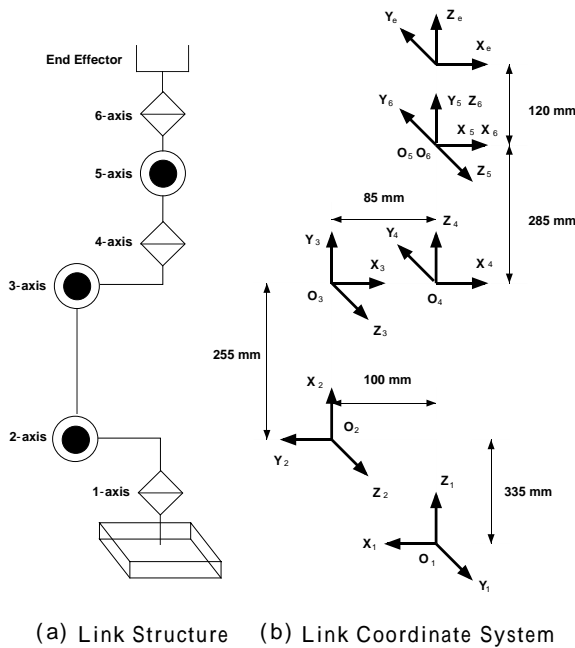


Fig.2: Geometry of DENSO-ROBOT

DENSO-ROBOTの動特性モデルは、36個の基底パラメータと16個の駆動系パラメータから成り立つ。同定実験においては、これら52個のモデルパラメータの値を同時同定法により推定する。

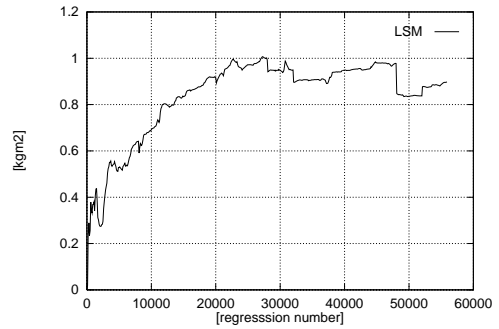
実験には、14組の異なる軌道の入力データと運動データを用いた。各軌道においては、サンプリング時間を1[msec]とし、4000個のデータを計測した。

動特性同定に必要である関節角速度と関節角加速度は、外乱による誤差を減少させるため、2次のディジタルフィルタにより求める。このときのカットオフ周波数は、角速度において50[Hz]、角加速度では7[Hz]である。

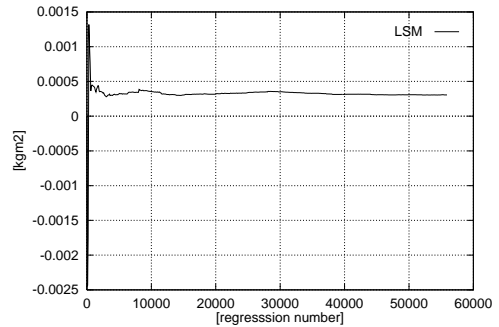
以上の方法で、最小二乗法によりモデルパラメータの推定実験を行う。

1軸のモデルパラメータである  $J_{1z}$ ,  $B_1$ ,  $fc_1$  の推定過程を Fig.3 に示す。今回は、約5万5千回の繰り返し計算の実行による終端値を、モデルパラメータの推定値とした。

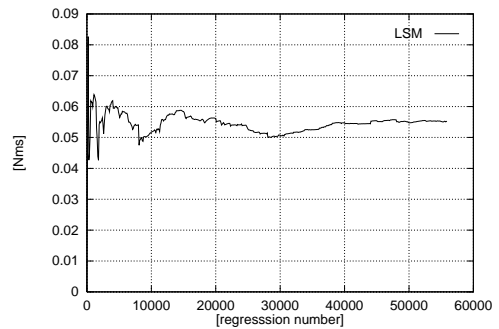
今回の同定により、52個のモデルパラメータ値をすべて推定することができた。しかし、 $J_{1z}$  のように、パラメータ値が完全に収束していないものが見うけられ



$J_{1z}$



$B_1$



$fc_1$

Fig.3: Estimations of model parameters

た。今回はPTP動作による軌道をPID制御したときのデータを用いた。このデータにおいて、トルクが振動的になっていることがパラメータ値が完全に収束していない原因であると考えられる。この点は、今後改善していく予定である。

#### 4. 動特性モデルの検証

本説では、推定した動特性モデルの妥当性を確認する。まず、推定したモデルパラメータを用いた逆力学アルゴリズムに、サンプリング時間1[msec]ごとの目標関節角度を入力し、目標関節トルクを計算する。次に、このトルクを1[msec]ごとにDENSO-ROBOTに与え、実際に運動した軌道と目標軌道と比較し、動特性モデルの妥当性を検証する。

1軸、2軸、5軸の検証結果を Fig.4 に示す。これは、全軸を同時に動かした場合の結果である。実線は目標軌道を、破線は実際の軌道を表す。

検証結果を見ると、すべての軸において目標軌道に対する誤差が発生していることが分かる。これは、静止摩擦の影響が大きな原因であると考えられる。とくに2軸に関しては、他の軸よりも大きくずれている。こ

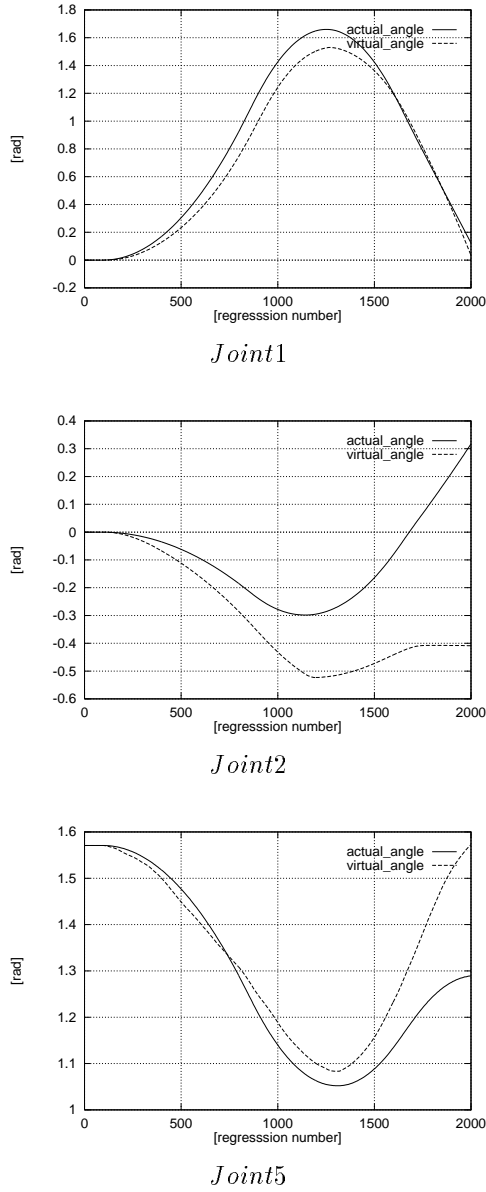


Fig.4: Examination of dynamic model

これは、静止摩擦の他に重力の影響が大きいと考えられ、推定したモデルパラメータの重力項の値が不正確であると推測される。しかし、モデルベース制御の際に関節角度の誤差は補償されるので、得られたモデルで十分である。

### 5. モデルベース軌道制御

マニピュレータの動特性モデルは一般に (1) 式によって表される。この動特性モデルに対して、 $u$  を入力とする非線形フィードバック補償

$$\tau_a = Q(\theta, \dot{\theta}, u, \text{sgn}(\dot{\theta}))\Gamma \quad (3)$$

を適用する。このとき (1), (3) 式より

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

が得られる。上式は、出力 $\theta$ に関する線形かつ非干渉系を表している。したがって、各関節軸は (5) 式のような 1 入力 1 出力のシステムとみなすことができる。

$$g_p(s) = \frac{1}{s^2} \quad (5)$$

すなわち、任意のマニピュレータの動特性は (5) 式で表される。よって、(5) 式のモデルに対して制御を行えばよいことになる。モデルベース軌道制御系のブロック線図を Fig.5 に示す。

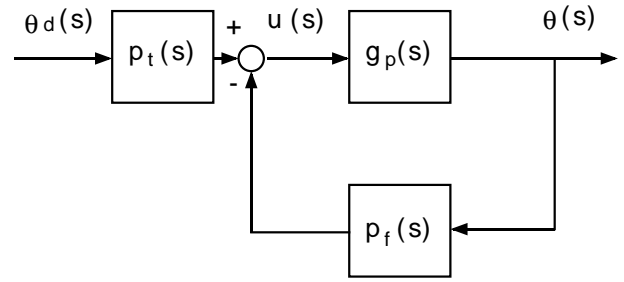


Fig.5: Block diagram

ここで、伝達関数  $P_t(s)$ ,  $P_f(s)$  は次式で表される。

$$P_t(s) = s^2 + c_v s + c_p + \frac{c_i}{s} \quad (6)$$

$$P_f(s) = c_v s + c_p + \frac{c_i}{s} \quad (7)$$

上式中の  $c_v$ ,  $c_p$ ,  $c_i$  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, 積分フィードバックゲインである。

実際は、入力  $u$  を次式により計算する。

$$u = \ddot{\theta}_d + c_v \dot{e} + c_p e + c_i \int_0^t e dt \quad (8)$$

ただし、

$$e = \theta_d - \theta \quad (9)$$

$$\dot{e} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta} \quad (10)$$

とする。これにより、モデルベース軌道制御を実現することができる。

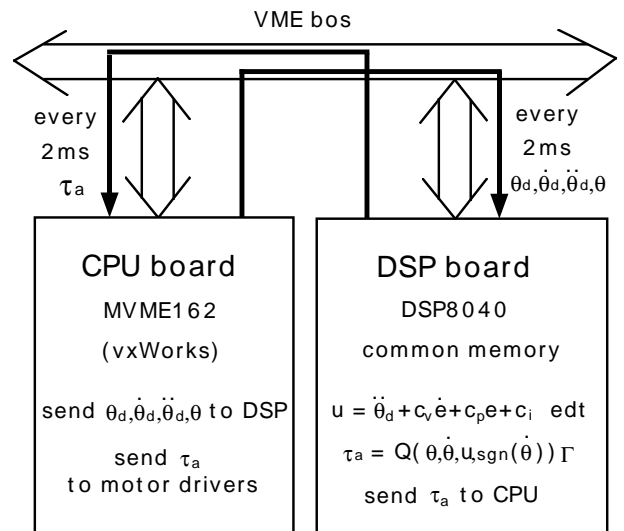
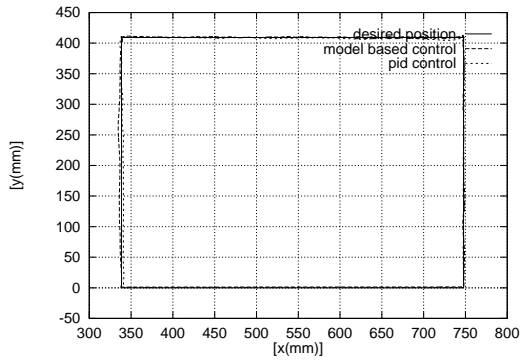
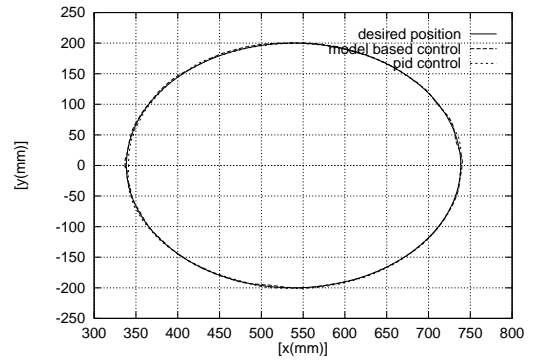


Fig.6: Model based control system

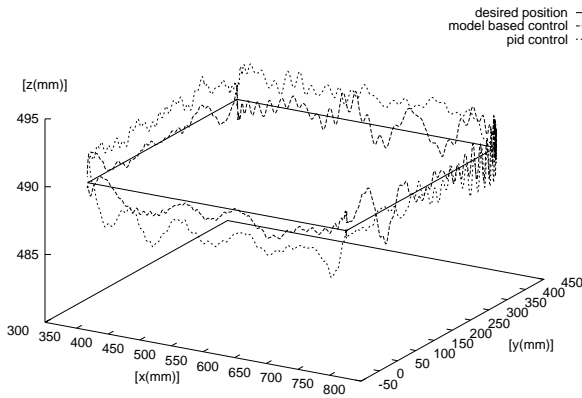
モデルベース軌道制御のシステム構成を Fig.6 に示す。線形フィードバック補償および逆動力学演算は、多くの計算処理時間を必要とする。そこで、こ



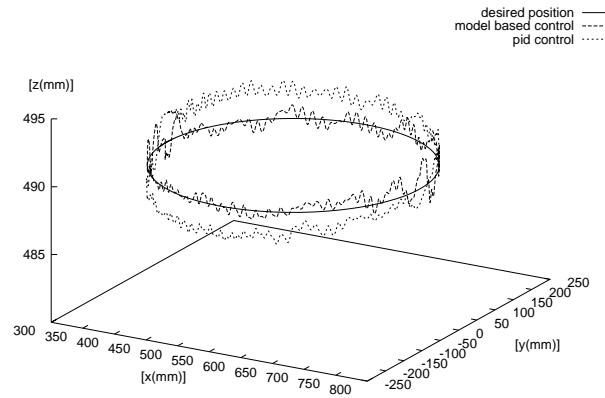
(a) x-y plane



(a) x-y plane



(b) 3D view



(b) 3D view

Fig.7: Square trajectory

Fig.8: Circle trajectory

これらの計算にはメイン CPU(MVME162)ではなく、DSP(DSP8040)を用いる。また、CPUとDSPのデータ通信にはDSP側にある共有メモリを使用する。全体のサンプリング時間は2[msec]である。

今回は、作業座標系目標値に対して逆運動学を解き、得られた角度を目標軌道とする。目標軌道は、正方形軌道と円軌道の2種類を用いる。それぞれの軌道に対して、モデルベース軌道制御とPID制御を行い、その結果を比較する。

モデルベース軌道制御とPID制御の正方形軌道および円軌道の結果をそれぞれ、Fig.7, Fig.8に示す。所要時間が双方とも4[sec]になるように軌道を定めた。

Fig.7-(a), Fig.8-(a)に示すように、x-y平面で比較すると、モデルベース軌道制御とPID制御の差はさほど大きくないことが分かる。しかし、Fig.7-(b), Fig.8-(b)に示すように、z軸方向で比較すると、モデルベース軌道制御の方がPID制御よりも良好な結果が出ている。これは、モデルベース軌道制御が各リンク間の相互作用による慣性力や、重力による影響を補償しているためである。PID制御は、重力補償しか行っていないため、モデルベース軌道制御ほどの正確な動作は実現できないものと考えられる。

## 6. 結言

本報告では、6自由度開ループ型マニピュレータを用いて動特性モデルの推定と検証を行った。また、モデルベース軌道制御とPID制御の比較により、モデルベース軌道制御の有効性を確認した。動特性モデ

ルの推定に関しては、改善の余地があると考えられる。今後は、本報告での問題点を改善し、より高速度、高精度な制御が実現できるようにしたい。また、力センサを用いたインピーダンス制御系の開発も進めていく予定である。

## 【参考文献】

- 1) 前田 浩一: ロボットアームの動的モデルと同定, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.2, pp.95-100, 1989
- 2) 松浦 弘幸, 山名 康博, 前田 浩一: 浮動小数点DSPを用いた汎用標準化ロボットコントローラのプログラム開発, 日本ロボット学会第5回ロボットシンポジウム予稿集, pp.59-64, 1995
- 3) Tsuneki Yasuho, Yasuhiro Omaki, Tomoaki Nampo and Hirokazu Mayeda: "Identification and Model Based Control of A 6 D.O.F. Industrial Manipulator", IFAC SYROCO '97, Vol.1, pp.117-123, Nantes France, 1997
- 4) 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