マニピュレータのモデルベース適応制御における 効率的計算法と軌道制御実験[†]

川崎 晴久*・望月 進一**・神崎 一男*

An Efficient Computation Method of Model-Based Adaptive Control for Manipulators and Its Experiments

Haruhisa KAWASAKI*, Shinichi MOCHIZUKI** and Kazuo KANZAKI*

The model-based adaptive control of robot manipulators has been studied actively in recent years (e. g., Slotine and Li (1987), Sadegh and Horowitz (1987), Koditschek (1987), and Berghuies et al. (1992)). In these adaptive controllers, global asymptotic stability is guaranteed. But, it is difficult to apply them to manipulators with more than four degrees of freedom because of its computational complexity.

This paper presents an efficient computational algorithm of model-based adaptive control for manipulators. It adopts the basic method of Slotine and Li (1987) and uses the minimum parameter set of manipulator dynamic model, which was derived by Kawasaki and Kanzaki (1991). The number of operations in the algorithm is about one half of that presented by Niemeyer and Slotine (1988). This algorithm can be easily applied to the other model-based adaptive controllers with few modifications. We also present experimental results on the adaptive control of a robot manipulator with six degrees of freedom. Its control system has a 32 bit DSP for the computation of the adaptive control. The sampling time is 1.65 ms.

Key Words: manipulator, adaptive control, computational algorithm, robots

1. ま え が き

マニピュレータの高速化・高精度化には、動力学モデルを基礎にしたモデルベース適応制御が有効である。しかし、モデルベース適応制御は、幾何学パラメータと動力学パラメータの正確な値を必要とする。ここで、幾何学パラメータとは、マニピュレータを構成する各リンクの長さやリンク角度などの幾何学的なパラメータのことで、これらは機構図より高精度に求めることが可能である。動力学パラメータとは、各リンクの質量、1次モーメント、慣性テンソルおよび関節部での粘性摩擦係数、クー

ロン摩擦係数をさす。動力学パラメータは機構図から求められるが、大きな誤差を含むことが一般的である。特に、粘性摩擦係数やクーロン摩擦係数は設計図から求めることは困難である。また、手先の負荷は作業に応じて変化する。このような問題に対処できる制御法として、パラメータをマニピュレータの動作中に推定し、その推定値により制御するモデルベース適応制御^{1)~6)}がある。

マニピュレータのモデルベース適応制御の研究には、変位、速度、加速度の観測値を用いる Craig ら¹⁾と大須賀²⁾の方法、変位と速度の観測値を用いる Slotine ら³⁾、Whitcomb ら⁴⁾、Sadegh ら⁵⁾、Berghuis ら⁶⁾などがある。これらの適応制御はいずれもリンク間の干渉、重力の影響、遠心力/コリオリ力などの非線形性を考慮しており、かつ大域的漸近安定であることを保証した制御法である。しかし、これらの適応制御はその制御則と推定則の計算量が多大なため多自由度マニピュレータへの適用が困難な状況といえる。実験報告も4自由度までである⁴⁾。

[†] 第9回日本ロボット学会学術講演会で発表(1992・10)

* 金沢工業大学 石川県金沢南局区内野々市扇ヶ丘7-1

** (株)金沢総合研究所 金沢市広坂1-2-23

* Kanazawa Institute of Technology, Kanazawa-South, Ishikawa

** Kanazawa Research Institute, Kanazawa

(Received May 10, 1993)

(Revised August 5, 1993)

Niemeyer ら⁷⁾は、Slotine ら³⁾の適応制御に対し、6次元空間ベクトル⁹⁾を用いた計算アルゴリズムを示した。この方法は、ベクトルと行列計算を6次元化することで計算の効率化を図っている。また、Walker⁹⁾も閉ループ機構を含んだマニピュレータに適用できる計算アルゴリズムを提案した。しかし、いずれも多自由度のマニピュレータに対する計算量は多大であり、さらなる計算アルゴリズムの改良が求められている。

本論文では、多くのモデルベース適応制御に共通して現れ、かつ制御則と推定則の両者の計算に必要なとなる動力学パラメータの係数行列に着目し、その効率的計算アルゴリズムを提案する。提案する計算アルゴリズムは、漸化式の Newton-Euler 法を基礎とし、推定する動力学パラメータとして著者ら^{10)~12)}によって導かれた動力学モデルを表わすのに必要十分なパラメータである最小動力学パラメータを用いている。さらに、Slotine ら³⁾が示した適応制御を対象に、提案する計算アルゴリズムをインプリメントした6自由度マニピュレータの軌道制御実験の結果を示す。本制御システムは32ビットDSPで構成している。

2. 適応制御理論

はじめに Slotine ら³⁾の適応制御を要約する。摩擦と外乱がない場合、 n 自由度剛体マニピュレータの運動方程式は一般に次式で表わされる。

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (1)$$

ここで、 $q \in R^n$ は関節変位ベクトル、 $\tau \in R^n$ は関節トルク/力ベクトル、 $H(q) \in R^{n \times n}$ は対称慣性行列、 $C(q, \dot{q}) \in R^n$ は遠心力とコリオリ力を表わすベクトル、 $g(q) \in R^n$ は重力負荷ベクトルである。関節トルクはリンクの質量、1次モーメント、慣性テンソルなどの動力学パラメータに関し線形である。そこで、動力学パラメータの線形結合で構成されるパラメータを要素とする未知な定数パラメータベクトルを $\phi \in R^m$ とすると、つぎの関係式が成り立つ行列 $Y \in R^{m \times n}$ を定義できる¹³⁾。

$$H(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q})\dot{q}_r + g(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r)\phi = \tau_r \quad (2)$$

ここで、 $q_d \in R^n$ を目標関節軌道、 $q_e \in R^n$ を

$$q_e = q - q_d \quad (3)$$

で表わされる軌道誤差とすると、 $q_r \in R^n$ は

$$q_r = q_d - \int_0^t \Lambda q_e dt \quad (4)$$

と定義される仮想的な目標軌道である。ただし、 $\Lambda \in R^{n \times n}$ は対称正定のゲイン行列である。行列 Y は ϕ の要素を含まない。(2)式は、動的モデルが未知パラメータ ϕ に関し線形であることを示している。多くの適応制

御は、この関係式を利用している。以下では、 Y をパラメータ係数行列と呼ぶことにする。Slotine ら³⁾の適応制御では、行列 Y を用いて制御則と適応則をそれぞれ

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r)\hat{\phi} - K_D s \quad (5)$$

$$\dot{\hat{\phi}} = -PY(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r)^T s \quad (6)$$

と与えている。ここで、 $\hat{\phi} \in R^m$ は ϕ の推定値、 $K_D \in R^{n \times n}$ は対称正定のゲイン行列、 $P = \{P_{ij}\} \in R^{m \times m}$ は対称正定の適応ゲイン行列、 s は

$$s = \dot{q}_e + \Lambda q_e = \dot{q} - \dot{q}_r \quad (7)$$

で定義されるベクトルである。この適応制御が大域的漸近安定であることはリアプノフの直接法によって証明できる。

モデルベース適応制御は、上記の方法以外にもいくつか提案されている。たとえば、Whitcomb ら⁴⁾は、推定則は(6)式で与え、制御則を

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_d, \dot{q}_d)\hat{\phi} - K_D s \quad (8)$$

としている。また、Berghuis ら⁶⁾は制御則と推定則を

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_e, \dot{q}_e)\hat{\phi} - K_D s \quad (9)$$

$$\dot{\hat{\phi}} = -PY^T(q, \dot{q}, \ddot{q}_e, \dot{q}_e)(\dot{q}_e + \varepsilon q_e) \quad (10)$$

としている。ただし、 ε は系の安定性を保証するように適当に設定される。これらの適応制御もまた大域的漸近安定性をもつことが示されている。いずれの適応制御においても、その実現には Y の計算が必要である。ここで、 Y は2種類の速度項の引数があるために、従来の逆動力学計算法^{11),14)}を直接適用できないことを指摘しておく。

摩擦を考慮した場合、 n 自由度剛体マニピュレータの運動方程式は(1)式に摩擦項を加えたものになる。摩擦として関節 i の粘性摩擦係数とクーロン摩擦力が作用するとすると、各関節ごとに二つの未知パラメータを追加したものをあらためて ϕ とすることにより、上述の結果をそのまま適用できる。

以下では、計算の簡略化のため、ゲイン行列 Λ 、 K_D 、 P は対角正定行列とする。また、任意のベクトル $a = [a_x, a_y, a_z]^T$ 、 $b = [b_x, b_y, b_z]^T$ のベクトル積を $a \times b = [a \times]b$ で表わす記法を用いる。ここで、 $[a \times]$ は次式で与えられる。

$$[a \times] = \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3. 逆動力学計算法と最小動力学パラメータ

3.1 逆動力学計算

マニピュレータの各リンクは、基底部から手先に向けてリンクの番号を0, 1, ..., n とし、リンク $i-1$ とリンク i との連結部を関節 i とする修正した Denavit-Hartenberg の記法¹¹⁾による座標系 $\Sigma_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ を

設定する。 ${}^{i-1}\mathbf{R}_i$ を Σ_{i-1} から Σ_i への回転行列、 ${}^{i-1}\mathbf{p}_i$ を Σ_{i-1} で表わした Σ_{i-1} 原点から Σ_i 原点へのベクトルとすると、それぞれ次式で表わされる。

$${}^{i-1}\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 \\ Ca_i S\theta_i & Ca_i C\theta_i & -Sa_i \\ Sa_i S\theta_i & Sa_i C\theta_i & Ca_i \end{bmatrix} \quad (12)$$

$${}^{i-1}\mathbf{p}_i = (a_i, -d_i Sa_i, d_i Ca_i)^T \quad (13)$$

ここで、 S と C はそれぞれ $\sin$ 関数と $\cos$ 関数を表わし、 θ_i, a_i, d_i は座標変換パラメータである。関節 i の変数 q_i は、関節 i が回転関節のとき θ_i であり、直動関節のときは d_i である。以下では、簡素化のため関節はすべて回転関節とする。直動関節を含むときも容易に拡張できる。

Table 1にNewton-Euler法による逆動力学計算アルゴリズムを示す。ここで、 ${}^i\mathbf{b}_j = ({}^i b_{j,x}, {}^i b_{j,y}, {}^i b_{j,z})^T$ は、座標系 i で表わしたベクトルを示し、 $i=j$ のとき $\mathbf{b}_j = (b_{j,x}, b_{j,y}, b_{j,z})^T$ と略記している。また、 $\omega_i, \dot{\omega}_i, \ddot{\omega}_i$ はそれぞれ Σ_i の角速度、角加速度、並進加速度であり、 $\mathbf{f}_i$ と $\mathbf{n}_i$ はそれぞれリンク $i-1$ からリンク i に作用する力とモーメント、 $m_i, \mathbf{ms}_i, \mathbf{I}_i$ はそれぞれリンク i の質量、1次モーメント、座標原点まわりの慣性テンソルである。初期条件は $\omega_0 = \dot{\omega}_0 = 0, \ddot{\omega}_0 = \mathbf{g}$ である。ここで、 $\mathbf{g}$ は重力加速度ベクトルである。

3.2 最小動力学パラメータ

オリジナルの動力学パラメータは $m_i, \mathbf{ms}_i, \mathbf{I}_i$ であるが、これらは運動方程式を表わすのに冗長である。(1)式の運動方程式を表わすのに必要最小限のパラメータを最小動力学パラメータと呼ぶ。このパラメータは、運動により同定できるパラメータと一致する¹⁵⁾。したがって、パラメータ推定に基づく適応制御においてもこの導出は重要である。ここでは、文献11)に述べられている最小動力学パラメータの導出方法を一部表現を修正して要約する。

関節が全て回転関節のとき、関節 i の動作軸 z_i についてつぎの三つの条件分けがなされる。

- 1) 条件R1: 関節の回転により z_i に平行でない $z_j (0 < j < i)$ が少なくとも一つ存在する。
- 2) 条件R2: 任意の $z_i (0 < j < i)$ は常に z_i に平行であり、かつ z_i の軸上に原点のない $z_k (0 < k < i)$ がす

くなくとも一つ存在する。

- 3) 条件R3: 任意の $z_i (0 < j < i)$ は常に z_i に平行であり、かつ z_i の軸上に原点がある。

パラメータ編成により求められるリンク i のパラメータをそれぞれ $M_i, \mathbf{MS}_i = (MS_{i,x}, MS_{i,y}, MS_{i,z})^T, \mathbf{J}_i = [J_{i,jk}]$ とすると、それらは $i=n-1, \dots, 1$ の順につぎの漸化式で与えられる。

$$M_i = m_i + M_{i+1} \quad (14)$$

$$\mathbf{MS}_i = \begin{cases} \mathbf{ms}_i + M_{i+1} {}^i\mathbf{p}_{i+1} + {}^i\mathbf{r}_{i+1} & (\text{条件 R 1, R 2}) \\ \mathbf{ms}_i & (\text{条件 R 3}) \end{cases} \quad (15)$$

$$\mathbf{J}_i = \begin{cases} \mathbf{I}_i + J_{i+1,yy} \mathbf{Q}_{i+1} + {}^i\mathbf{G}_{i+1} & (\text{条件 R 1}) \\ \mathbf{I}_i + {}^i\mathbf{G}_{i+1} & (\text{条件 R 2}) \\ \mathbf{I}_i & (\text{条件 R 3}) \end{cases} \quad (16)$$

ここで、

$$\mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C^2 a_i & Sa_i Ca_i \\ 0 & Sa_i Ca_i & S^2 a_i \end{bmatrix} \quad (17)$$

$${}^{i-1}\mathbf{r}_i = (0, -MS_{i,z} Sa_i, -MS_{i,z} Ca_i)^T \quad (18)$$

$${}^{i-1}\mathbf{G}_i = M_i ({}^{i-1}\mathbf{p}_i^T {}^{i-1}\mathbf{p}_i \mathbf{E}_3 - {}^{i-1}\mathbf{p}_i {}^{i-1}\mathbf{p}_i^T) + 2 {}^{i-1}\mathbf{p}_i^T {}^{i-1}\mathbf{r}_i \mathbf{E}_3 - {}^{i-1}\mathbf{p}_i {}^{i-1}\mathbf{r}_i^T - {}^{i-1}\mathbf{r}_i {}^{i-1}\mathbf{p}_i^T \quad (19)$$

である。ただし、 $\mathbf{E}_3 \in R^{3 \times 3}$ は単位行列である。初期条件は、 $M_n = m_n, \mathbf{MS}_i = \mathbf{ms}_n, \mathbf{J}_n = \mathbf{I}_n$ である。

このように編成するとリンク i の m_i 個の動小動力学パラメータベクトル $\phi_i \in R^{m_i}$ は次式で与えられる。

$$\phi_i = \begin{cases} (MS_{i,x}, MS_{i,y}, J_{i,xx}, J_{i,yy}, J_{i,zz}, J_{i,xy}, J_{i,xz}, J_{i,yz})^T & (\text{条件 R 1}) \\ (MS_{i,x}, MS_{i,y}, J_{i,zz})^T & (\text{条件 R 2}) \\ J_{i,zz} & (\text{条件 R 3}) \end{cases} \quad (20)$$

ここで、 $J_{i,xx} = J_{i,xx} - J_{i,yy}$ である。各条件ごとにそのほかの編成パラメータの値は零とする。これより全リンクの未知パラメータ ϕ は次式で与えられる。

$$\phi = (\phi_1^T, \phi_2^T, \dots, \phi_n^T)^T \quad (21)$$

n 自由度マニピュレータの動力学パラメータは $10n$ 個であるが、パラメータを編成により最小の動力学パラメータの数 $N_{\min}$ は $N_{\min} = 7N_{R1} + 3N_{R2} + N_{R3}$ となる。ただし、 N_i は条件 i を満たす関節の数である。

最小動力学パラメータは、(20)式に現れない要素を0とすることにより、Table 1の逆動力学計算アルゴリズムのパラメータとしてオリジナルなパラメータの代わり直接用いることができる^{11), 16)}。

4. 適応制御の計算アルゴリズム

4.1 τ_i の計算法

パラメータ係数行列の計算では2種類の速度項の引き

Table 1 The Newton-Euler formulations of manipulator dynamics model

$\omega_i = {}^i\mathbf{R}_{i-1} \omega_{i-1} + z_i \dot{q}_i$
$\dot{\omega}_i = {}^i\mathbf{R}_{i-1} \dot{\omega}_{i-1} + z_i \ddot{q}_i + ({}^i\mathbf{R}_{i-1} \omega_{i-1}) \times z_i \dot{q}_i$
$\ddot{\omega}_i = {}^i\mathbf{R}_{i-1} \ddot{\omega}_{i-1} + \dot{\omega}_{i-1} \times {}^{i-1}\mathbf{p}_i + \omega_{i-1} \times (\omega_{i-1} \times {}^{i-1}\mathbf{p}_i)$
$\mathbf{f}_i = m_i \ddot{\omega}_i + \dot{\omega}_i \times \mathbf{ms}_i + \omega_i \times (\omega_i \times \mathbf{ms}_i) + {}^i\mathbf{R}_{i+1} \mathbf{f}_{i+1}$
$\mathbf{n}_i = \mathbf{I}_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (\mathbf{I}_i \omega_i) + \mathbf{MS}_i \times \ddot{\omega}_i + {}^i\mathbf{R}_{i+1} (\mathbf{p}_{i+1} \times \mathbf{f}_{i+1} + \mathbf{n}_{i+1})$
$\tau_i = z_i^T \mathbf{n}_i$

数を用いる。このことが、速度 2 乗項の計算を複雑にしている。遠心力/コリオリ力の項である $C(q, \dot{q})\dot{q}$ の i 要素は、速度の 2 乗項であるから $\dot{q}^T D_i(q)\dot{q}$ として記述できる。ただし、 $D_i \in R^{n \times n}$ は対称行列である。ここで、

$$\begin{aligned} \dot{q}^T D_i \dot{q}_r = & ((\dot{q} + \dot{q}_r)^T D_i (\dot{q} + \dot{q}_r) \\ & - \dot{q}^T \dot{D}_i \dot{q}_r - \dot{q}^T D_i \dot{q})/2 \end{aligned}$$

の関係より

$$\begin{aligned} C(q, \dot{q})\dot{q}_r = & (C(q, \dot{q} + \dot{q}_r)(\dot{q} + \dot{q}_r) \\ & - C(q, \dot{q}_r)\dot{q}_r - C(q, \dot{q})\dot{q})/2 \end{aligned} \quad (22)$$

が成り立つ。(1)~(2)式と(22)式の関係から

$$\begin{aligned} \tau_r = & (\tau(q, \dot{q} + \dot{q}_r, \ddot{q}_r) - \tau(q, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) \\ & - \tau(q, \dot{q}, \ddot{q}_r) + 3\tau(q, 0, \ddot{q}_r))/2 \end{aligned} \quad (23)$$

を得る。この式は、逆動力計算アルゴリズムを 4 コールすることで τ_r が計算できることを示している。しかし、直接的な 4 回のコールは冗長な計算を含む。そこで、冗長な計算をなくすように試みる。上式右辺の各トルクの計算では、 q と $\dot{q}_r$ の引数は常に同じであり速度項のみ異なる。このことに注目し、以下では簡素な表現とするために、関数 $f(q, *, \dot{q}_r)$ を $f(*)$ と表記する。

はじめに、つぎのベクトルと行列を定義する。

$$\begin{aligned} \alpha_i = & \dot{\omega}_i(\dot{q} + \dot{q}_r) - \dot{\omega}_i(\dot{q}_r) \\ & - \dot{\omega}(\dot{q}) + 3\dot{\omega}_i(0) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \beta_i = & \dot{v}_i(\dot{q} + \dot{q}_r) - \dot{v}_i(\dot{q}_r) - \\ & \dot{v}_i(\dot{q}) + 3\dot{v}_i(0) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} F_i = & f_i(\dot{q} + \dot{q}_r) - f_i(\dot{q}_r) \\ & - f_i(\dot{q}) + 3f_i(0) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} N_i = & n_i(\dot{q} + \dot{q}_r) - n_i(\dot{q}_r) \\ & - n_i(\dot{q}) + 3n_i(0) \end{aligned} \quad (27)$$

関節 i のトルクは $\tau_i = z_i^T n_i$ で表わされるから、 $\tau_r = (\tau_{r,1}, \tau_{r,2}, \dots, \tau_{r,n})^T$ の i 要素は次式で求められる。

$$\tau_{r,i} = (z_i^T N_i)/2 \quad (28)$$

つぎに、二つの行列

$$\begin{aligned} \Gamma_i = & [\omega_i(\dot{q}_r) \times] [\omega_i(\dot{q}) \times] \\ & + ([\omega_i(\dot{q}_r) \times] [\omega_i(\dot{q}) \times])^T \end{aligned} \quad (29)$$

$$\Phi_i = \Gamma_i + [\alpha_i \times] \quad (30)$$

を定義すると、 $\omega_i(\dot{q} + \dot{q}_r) = \omega_i(\dot{q}) + \omega_i(\dot{q}_r)$ と Table 1 の関係式から

$$\begin{aligned} \alpha_i = & {}^i R_{i-1} \alpha_{i-1} + ({}^i R_{i-1} \omega_{i-1}(\dot{q}_r)) \times z_i \dot{q}_i \\ & + ({}^i R_{i-1} \omega_{i-1}(\dot{q})) \times z_i \dot{q}_{r,i} + 2z_i \ddot{q}_{r,i} \end{aligned} \quad (31)$$

$$\beta_i = {}^i R_{i-1}(\beta_{i-1} + \Phi_{i-1} {}^{i-1} p_i) \quad (32)$$

$$F_i = m_i \beta_i + \Phi_i m s_i + {}^i R_{i+1} F_{i+1} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} N_i = & I_i \alpha_i + \omega_i(\dot{q}_r) \times (I_i \omega_i(\dot{q})) \\ & + \omega_i(\dot{q}) \times (I_i \omega_i(\dot{q}_r)) + m s_i \times \beta_i \\ & + {}^i R_{i+1}({}^i p_{i+1} \times F_{i+1} + N_{i+1}) \end{aligned} \quad (34)$$

の漸化式を導ける。したがって、 $\alpha_i, \beta_i, F_i, N_i$ を計算することによって τ_r が求められる。

最小動力学パラメータを用いて求めた関節トルクの計算値は、もとの動力学パラメータを用いて求めた関節トルクの計算値と厳密に等しい¹¹⁾。全ての関節が回転関節のときは $M_i = 0$ であるから、 F_i と N_i は

$$F_i = \Phi_i \xi_i + {}^i R_{i+1} F_{i+1} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} N_i = & \Omega_i \eta_i - [\beta_i \times] \xi_i \\ & + {}^i R_{i+1}({}^i p_{i+1} \times F_{i+1} + N_{i+1}) \end{aligned} \quad (36)$$

と表わせる。ここで、 ξ_i と η_i は

$$\xi_i = \begin{cases} (MS_{i,x}, MS_{i,y}, 0) & (\text{条件 R 1, R 2}) \\ (0, 0, 0)^T & (\text{条件 R 3}) \end{cases} \quad (37)$$

$$\eta_i = \begin{cases} (J'_{i,xx}, J_{i,zz}, J_{i,xy}, J_{i,xz}, J_{i,yz})^T & (\text{条件 R 1}) \\ (0, J_{i,zz}, 0, 0, 0)^T & (\text{条件 R 2, R 3}) \end{cases} \quad (38)$$

で定義される最小動力学パラメータから構成するベクトルであり、 $\Omega_i \in R^{3 \times 5}$ は次式で定義する行列である。

$$\begin{aligned} \Omega_i \eta_i = & \tilde{J}_i \alpha_i + \omega_i(\dot{q}_r) \times (\tilde{J}_i \omega_i(\dot{q})) \\ & + \omega_i(\dot{q}) \times (\tilde{J}_i \omega_i(\dot{q}_r)) \end{aligned} \quad (39)$$

ただし、

$$\tilde{J}_i = \begin{bmatrix} J'_{i,xx} & J_{i,xy} & J_{i,xz} \\ J_{i,xy} & 0 & J_{i,yz} \\ J_{i,xz} & J_{i,yz} & J_{i,zz} \end{bmatrix} \quad (40)$$

である。(39)式から、

$$\Omega_i = \begin{bmatrix} \alpha_{i,1} & \Gamma_{i,23} & \alpha_{i,2} - \Gamma_{i,13} \\ \Gamma_{i,13} - \Gamma_{i,13} & \alpha_{i,1} + \Gamma_{i,23} \\ -\Gamma_{i,12} & \alpha_{i,3} & \Gamma_{i,11} - \Gamma_{i,22} \\ \alpha_{i,3} + \Gamma_{i,12} & \Gamma_{i,22} - \Gamma_{i,33} \\ \Gamma_{i,33} - \Gamma_{i,11} & \alpha_{i,3} - \Gamma_{i,12} \\ \alpha_{i,1} - \Gamma_{i,23} & \alpha_{i,2} + \Gamma_{i,13} \end{bmatrix} \quad (41)$$

と展開できる。ここで、 $\alpha_{i,j}$ は α_i の j 要素、 $\Gamma_{i,jk}$ は Γ_i の j 行 k 列要素である。

4.2 パラメータ係数行列の計算法

τ_r の i 要素は(2)式より次式で与えられる。

$$\tau_{r,i} = \sum_{k=1}^n y_{ik} \phi_k \quad (42)$$

ただし、 $y_{ik} = (y_{i,1}, y_{i,2}, \dots, y_{i,m_k}) \in R^{1 \times m_k}$ は、

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ & & \dots & \\ 0 & & & y_{nn} \end{bmatrix} \quad (43)$$

で定義される行ベクトルである。ここで、 ϕ と同一の大きさのベクトル $e_{k(j)} \in R^m$ を、 ϕ_k の j 要素に相当する位置の要素のみが 1 でほかの要素を零とする単位ベクトルとする。(2)式の ϕ の代わりに $e_{k(j)}$ を代入すると、

$$\begin{aligned} \tau_r | (\phi = e_{k(j)}) \\ = (y_{1k,j}, y_{2k,j}, \dots, y_{nk,j}, 0, \dots, 0)^T \end{aligned}$$

を得る。これは、 τ_r の計算アルゴリズム中で ϕ に $e_{k(j)}$ を

代入し k を 1 から n まで繰り返し、各 k に対し j を 1 から m_k まで繰り返すことで Y が求められることを示している。したがって、 ξ_k または η_k の一方を単位ベクトル、他方を零ベクトルとして代入することで Y の要素が求められる。ここで、 $\tilde{\xi}_{k(j)}$ と $\tilde{\eta}_{k(j)}$ をおのおの ξ_k と η_k に等しい大きさで、 j 要素が 1 でほかの要素は 0 の単位ベクトルとする。 F_i と N_i は、 $i > k$ のときは 0 であるから $i \leq k$ のときはつぎのように簡潔に計算できる。

1) $\xi_k = \tilde{\xi}_{k(j)}$, $\eta_k = 0$ のとき

$$F_i = \begin{cases} \Phi_k \tilde{\xi}_{k(j)} & (i=k) \\ {}^i R_{i+1} F_{i+1} = {}^i R_k F_k & (i < k) \end{cases}$$

$$N_i = \begin{cases} -[\beta_k \times] \tilde{\xi}_{k(j)} & (i=k) \\ {}^i R_{i+1} (p_{i+1} \times F_{i+1} + N_{i+1}) \\ = {}^i R_k (h^k_i \times F_k + N_k) & (i < k) \end{cases}$$

2) $\xi_k = 0$, $\eta_k = \tilde{\eta}_{k(j)}$ のとき

$$F_i = 0$$

$$N_i = \begin{cases} \Omega_k \tilde{\eta}_{k(j)} & (i=k) \\ {}^i R_{i+1} N_{i+1} = {}^i R_k N_k & (i < k) \end{cases}$$

ここで、 h^k_i は

$$h^k_i = \sum_{j=i+1}^k {}^i p_j = {}^i R_{k-1} h^{k-1}_{i+1} + p_k \quad (44)$$

である。これらの関係式から、 $y_{ik,j}$ は

$$y_{ik,j} = \begin{cases} 0 & (i > k) \\ ({}^k R_i z_i)^T \mu^k_j / 2 \quad (1 \leq i \leq k) \end{cases} \quad (45)$$

と表わせる。ここで、 μ^k_j は z_k が条件 R1 または R2 を満たすとき

$$\mu^k_j = \begin{cases} h^k_i \times (\Phi_k \tilde{\xi}_{k(j)}) - [\beta_k \times] \tilde{\xi}_{k(j)} & (j=1, 2) \\ \Omega_k \tilde{\eta}_{k(j)} & (j=3, 4, \dots, m_k) \end{cases} \quad (46)$$

であり、 z_k が条件 R3 を満たすとき

$$\mu^k_j = \Omega_k \tilde{\eta}_{k(j)} \quad (j=1) \quad (47)$$

である。以上の関係式は、 Y が簡単な繰り返し計算で求められることを示している。

4.3 適応則の計算法

$P = \text{diag}(P_{11}, P_{22}, \dots, P_{mm})$ の仮定より、適応則は

$$\dot{\hat{\phi}}_i = -P_{ii} \sum_{j=1}^i s_j y_{ji}^T \quad (48)$$

である。ここで、 s_j は s の j 要素である。

4.4 計算回数の評価

前述の計算アルゴリズムを整理し Table 2 に示す。初期条件は、 $h^1_i = \omega_0(\dot{q}_r) = \omega_0(\dot{q}) = \alpha_0 = 0$, $\beta_0 = 2z_0g$, $\Phi_0 = 0$ である。ここで、 g は重力加速度定数である。

本アルゴリズムの計算量を、Table 3 に示す。総計算量は、乗算 $43n^2 - 19n + 25$ 回、加算 $(59n^2 + 19n - 20)/2$ 回となり、 $n=6$ では、乗算 1459 回、加算 1085 回となる。Niemeyer ら⁷⁾ による計算アルゴリズムでは乗算 471n,

Table 2 Computation algorithm of adaptive control

Step 1. Calculate for $i=1, 2, \dots, n$:	
$\omega_i(\dot{q}) = {}^i R_{i-1} \omega_{i-1}(\dot{q}) + z_i \dot{q}_i$	(A1)
$\omega_i(\ddot{q}_r) = {}^i R_{i-1} \omega_{i-1}(\ddot{q}_r) + z_i \ddot{q}_{r,i}$	(A2)
Γ_i (given by Eq. (29))	(A3)
α_i (given by Eq. (24))	(A4)
$\Phi_i = \Gamma_i + [\alpha_i \times]$	(A5)
$\beta_i = {}^i R_{i-1} (\beta_{i-1} + \Phi_{i-1}^{i-1} p_i)$	(A6)
Ω_i (given by Eq. (41))	(A7)
$p_i = (a_i C \theta_i, -a_i S \theta_i, d_i)^T$	(A8)
Step 2. Calculate for $i=1, 2, \dots, n$:	
Calculate for $k=i, i+1, \dots, n$:	
$h^k_i = {}^k R_{k-1} h^{k-1}_{i+1} + p_k$	(A9)
${}^k R_i = {}^k R_{k-1} {}^{k-1} R_i$	(A10)
Calculate for $j=1, 2, \dots, m_k$:	
u^k_i (given by Eq. (46) - (47))	(A11)
$y_{ik,j}$ (given by Eq. (45))	(A12)
Step 3. Calculate for $i=1, 2, \dots, n$:	
$\tau_{r,i}$ (given by Eq. (42))	(A13)
Step 4. Calculate for $i=1, 2, \dots, n$:	
$\hat{\phi}_i$ (given by Eq. (48))	(A14)

Table 3 Number of operations

	Multiplications	$n=6$	Additions	$n=6$
Y	$36n^2 - 27n + 33$	1167	$(45n^2 + n - 12)/2$	801
τ_r	$(7n^2 + 7n - 8)/2$	143	$(7n^2 + 5n - 8)/2$	137
$\hat{\phi}$	$(7n^2 + 9n - 8)/2$	149	$(7n^2 + 7n)/2$	147
Total	$43n^2 - 19n + 25$	1459	$(59n^2 + 11n - 20)/2$	1085

加算 $377n$ と推定される。 $n=6$ では乗算 2826 回、加算 2262 回である。この推定では、計算回数を最も少なくするように配置行列の構造を利用している。このことから、本アルゴリズムの計算回数は、従来ある方法と比較し 1/2 程度と少なくなっている。なお、Niemeyer らの計算法は、 Y を直接的には計算していないことを指摘しておく。

関節での粘性摩擦とクーロン摩擦を考慮する場合は、その分計算回数は増えるが、全計算回数から比較するとわずかな増加といえる

5. 実験

5.1 6 自由度マニピュレータの構成

Fig. 1 に示す 6 自由度マニピュレータを対象に、本アルゴリズムによる適応制御の実験を試みた。マニピュレータの座標変換パラメータを Table 4 に示す。マニピュレータの駆動源は、全て D.C. サーボモータであり、関節 1~3, 5 用減速機構はボールネジ送り機構とスライド機構、関節 4, 6 用はハーモニックドライブシステムによって構成している。また、位置信号は、モータ軸に直結したパルスエンコーダで計測する。速度信号は位置

信号のデジタル信号処理により求めた。

本マニピュレータの関節 1 は条件 R3 を満たし、関節 2~6 は条件 R1 を満たす。したがって、最小動力学パラメータの数は 36 である。さらに、各関節での粘性摩擦係数とクーロン摩擦力を考慮すると 12 のパラメータが追加され、総計 48 の未知パラメータとなる。適応制御ではこれらすべてのパラメータを動作中に推定する。

適応制御をリアルタイムで行うために、32 ビット浮動小数点 DSP (Digital Signal Processor TMS320C30) による制御システムを構成し、制御計算・入出力処理の高速化を行った。実験で用いた DSP による制御システムの構成を Fig. 2 に示す。本適応制御のサンプル周期は 1.65 ms である。

5.2 実験結果

目標軌道は、各関節ごとに適当に設定した 2 点間を 1 秒で起動し静止するように 5 次多項式補間で求める軌道とした。この軌道を目標点を変化させ連続的に生成した。各ゲインは $A = \text{diag}(3, 0.7, 1, 7, 4, 30)[s^{-1}]$, $K_D = \text{diag}(12.5, 8.5, 5.5, 0.1, 0.95, 0.005)[Nms]$, $P = 10^{-6} \text{ block diag}(20E_{27}, 4E_{18}, E_3)$ とした。ゲインは適度な応答となるように試行錯誤的に設定した。なお、ゲインが不適切のとき、入力波形が振動的になりさらには暴走した。たとえば、適応ゲイン P の関節 6 に対応するパラメータのゲインを適正とする値の 1.5 倍ほどにすると、関節 6 のみならず関節 4 でもその応答は振動的にな

Fig. 1 Six-degrees-of-freedom manipulator

Table 4 Kinematic parameters

Joint i	a_i [$10^{-3}m$]	α_i [deg]	d_i [$10^{-3}m$]
1	0.0	0	213.0
2	-11.0	90	0.0
3	103.9	0	0.0
4	42.0	90	79.6
5	0.0	-90	0.0
6	0.0	90	0.0

り、2 倍にすると関節 4 が許容誤差以上となり停止した。このように、一つのパラメータのゲインが全体に影響を及ぼすため、この調整は容易ではなかった。

Fig. 3 と Fig. 4 に 6 関節を同時に動作させたときの PD 制御と適応制御による関節 1 と関節 6 の応答波形を示す。PD 制御では、ゲイン行列 K_D と A の値を適応制御のそれらと同一にした。適応制御のパラメータ推定値の初期値は $\hat{\phi}(0) = 0$ とした。破線が目標軌道、実線が実験軌道、一点鎖線が入力トルクを示す。このときの軌道誤差ノルム $\|q_e\|$ を Fig. 5 に示す。適応制御は PD 制御と比較し良好な特性を示している。図中の $\hat{\phi}(10)$ は、10 秒間適当に異なる目標軌道で適応制御した後のパラメータ推

Fig. 2 Control system

(a) PD control

(b) Adaptive control with $\hat{\phi}(0)$

Fig. 3 Responde of joint 1

(a) PD control

(b) Adaptive control with $\hat{\phi}(0)$

Fig. 4 Response of joint 6

Fig. 5 Error norm of PD and Adaptive Control

定値を初期値とした場合である。パラメータ推定を継続することにより軌道誤差はより少なくなるが、大幅な低減はないといえる。

Fig. 6 にパラメータ推定の例を示す。パラメータの推定値は理論上は持続的励振条件を満たす軌道であれば真値に収束するが、実験では図に示されるように軌道ごとに変化し一定値に収束しない。これは、モデル化されない部分の影響が現れていると推察される。

先端に重量 430 g の負荷を加えたときの軌道誤差ノルムの例を Fig. 7 に示す。PD 制御では負荷変動が軌道誤差に大きく影響しているが、適応制御ではその変動が少なく負荷変動に対しロバストであるといえる。

7. まとめ

本論文は、モデルベース適応制御の効率的な計算アル

(a) joint 1

(b) joint 6

Fig. 6 Parameter estimates

Fig. 7 Error norms with and without load

ルゴリズムを示した。本計算アルゴリズムは、漸化式の Newton-Euler 法を基礎に、推定則と制御則の両者に現れるパラメータ係数行列を最小動力学パラメータを用いて求めることを特徴としている。これにより従来の約 1/2 の計算量で適応制御を可能とした。推定されるパラメータは冗長性がないために持続的励振条件を満たす適当な動作をへて真値に収束することが理論上は保証される。また、32 bit 浮動小数点 DSP による制御システムに本適応計算アルゴリズムをインプリメントし、6 自由度マニピュレータにおいてサンプル周期 1.65 ms の適応制御を実現した。実験の結果、適応制御は PD 制御と比較し優れた軌道追従特性をもつことを確認した。ただし、実験ではモデル化されていない部分の影響を受けパラメータの推定値は軌道により絶えず変動した。

本計算アルゴリズムは、パラメータ係数行列が現れるモデルベース制御全般に対しても有効である。また、パラメータ係数行列を陽に計算することで、動力学パラメータのトルクへの影響を解析する手段を提供している。なお、多自由度マニピュレータの適応制御は、ゲイ

ンの調整が大きな問題であり、今後の検討課題とします。

最後に、実験を協力して頂いた尾藤貴宏君に深く感謝します。また、本研究の一部は渋谷学術文化スポーツ振興財団の助成を受けており、ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) J. J. Craig, P. Hsu and S. Sastry: Adaptive Control of Mechanical Manipulators, IEEE Conf. on Robotics and Automation, 190/195 (1986)
- 2) 大須賀公一: 非線形メカニカルシステムの適応制御, 計測自動制御学会論文集, 22-7, 756/762 (1986)
- 3) J. J. E. Slotine and W. Li: On the Adaptive Control of Robot Manipulators, The Int. Jour. of Robotics Research, 6-3, 50/59 (1987)
- 4) L. L. Whitcomb, A. A. Rizzi and D. E. Koditschek: Comparative Experiments With a New Addaptive Controller for Robot Arms, IEEE Trans., on Robotics and Automation, 9-1, 59/61 (1993)
- 5) N. Sadegh and R. Horowitz: Stability Analysis of an Adaptive Controller for Robotics Manipulators, Proc. of the 26th. Conf. on Decision and Control, 1223/1229 (1987)
- 6) H. Berghuis, R. Ortega and H. Nijmeijer: A Robust Adaptive Controller for Robot Manipulators, IEEE Conf. on Robotics and Automation, 1876/1881 (1992)
- 7) G. Niemeyer and J. J. E. Slotine: Performance in Adaptive Manipulator Control, Proc. of the 27th Conf. on Decision and Control, 1585/1591 (1988)
- 8) R. Featherstone: Robot Dynamics Algorithms, Kluwer Academic Publishers (1987)
- 9) M. W. Walker: An Efficient Algorithm for the Adaptive Control of a Manipulator, IEEE Conf. on Robotics and Automation, 682/690 (1988)
- 10) H. Kawasaki and K. Kanzaki: Minimum Dynamics Parameters of Robot Models, Reprinted from IFAC Symposium on Robot Control, SYROCO'91, PER-GAMON PRESS, Edited by Troch et. al, 33/38 (1991)
- 11) 川崎, 神崎: マニピュレータモデルにおける最小動力学パラメータと逆動力学計算法, 日本ロボット学会誌, 11-1, 100/110 (1993)
- 12) 川崎, 紅谷, 神崎: ツリー構造ロボットの最小動力学パラメータ, 計測自動制御学会論文集, 28-12, 1444/1445 (1992)
- 13) 川崎, 西村: マニピュレータのパラメータ同定, 計測自動制御学会論文集, 22-1, 76/83 (1986)
- 14) 大須賀, 前田: マニピュレータのモデリングと逆動力学問

題のためのパラメータ表現, 日本ロボット学会誌, 5-2, 150/157 (1987)

- 15) H. Mayeda and K. Ohashi: Base parameters of Dynamic Models for General Open Loop Kinematic Chains, Robotic Research/The fifth Int. Symp. 271/278 (1990)
- 16) H. Kawasaki, A. Murata and K. Kanzaki: An Efficient Method for the Computation of Inverse Dynamics and Inertia Matrix Based on the Minimum Set of Dynamics Parameters of Manipulators, Proc. of ICAR CV'92, RO-1. 2. 1-1. 2. 5 (1992)

[著 者 紹 介]

川 崎 晴 久 (正会員)

1949 年, 名古屋大学大学院航空工学専攻修士課程修了, 同年日本電信電話公社(現 NTT)入社, 90 年金沢工業大学機械システム工学科教授, 現在に至る。ロボット制御, パラメータ同定, 数値計算などの研究と教育に従事, 日本ロボット学会, IEEE などの会員(工学博士)。

望 月 進 一

1991 年, 金沢工業大学機械システム工学科卒業, 93 年同大学大学院修士課程機械工学専攻修了。同年(株)金沢総合研究所に入社, 現在に至る。日本ロボット学会の会員。

神 崎 一 男 (正会員)

1958 年, 東京大学工学部機械工学科卒業, 同年日本電信電話公社入社, 電気通信研究所で浮動ヘッド, プリントなどの研究実用化に従事, 84 年金沢工業大学機械システム工学科教授, 現在に至る。位置決め, バイラテラルサーボなどの研究に従事, 日本機械学会, 日本ロボット学会などの会員(工学博士)。