オンラインパラメータ同定による マニピュレータの軌道制御†

川 崎 晴 久*

Trajectory Control of Manipulators by
On-Line Parameter Identification

Haruhisa KAWASAKI*

In general, it is very difficult to control motion of mechanical manipulators when their hand grips an unknown object. The reason is that the dynamic characteristics for manipulators vary according to the payload of the object. In this case, mass, center of mass, and inertia tensor of the end link become unknown parameters, while other system parameters do not change.

This paper presents a new approach to trajectory control by using adaptive controller. Only unknown parameters are identified by an on-line recursive algorithm based on the least squares error criterion, though this method requires angular acceleration observation. The controller is calculated on-line, using an accurate dynamic model with estimated values for unknown parameters. Simulation results for a six degrees of freedom manipulator show that trajectory errors become very small in spite of the fact that the least square estimate is biased when observation noise of joint angular acceleration exists. The effectiveness of the proposed control method was verified by experimental results obtained for a two degrees of freedom manipulator.

Key Words: manipulator, parameter identification, adaptive control, trajectory control, least square estimation

1. 緒 言

従来のマニピュレータの動的制御法は、二つに大別することができる。一つは、リンクの質量、慣性モーメントなどの機構パラメータを含むモデルの正確な把握を前提とする制御方式である。もう一つは、機構パラメータの正確な情報を必要としない制御方式で、外乱や環境の変化あるいはマニピュレータ自体の特性変動などがある場合においても、状況の変動に適應させようとするものである。

前者の制御方式としては、目標軌道を実現する関節トルクを入力トルクとして求め、目標軌道への追従性を向上させる方式¹⁾、手先の加速度を関節角加速度に変換し入力トルクを求める方式²⁾、最適制御³⁾などがある。これらの方式は、把握すべき物体の負荷変動などの環境の大きな変動に適應できないが、変動の少ない範囲では優れた特性が得られる。

後者の制御方式としては、各関節ごとの線形1入力1出力系として取り扱ったモデル規範形適應制御(MRAC)⁴⁾、作業空間での目標軌道に対する変分方程式系にMRACを適用した方式⁵⁾、慣性行列の要素や速度2乗項の係数を定数として同定し、関節間の干渉を分離し非線形要素を補償する制御入力を作成する方法⁶⁾、線形自己回帰モデルのパラメータを逐次最小2乗推定し、制御入力をモデルと評価関数に基づき設計する方式⁷⁾などがある。これらいずれの方式も単純化したモデルを仮定し適應制御を応用するもので、系の既知な情報を十分に活用した制御方式ではない。そのため、マニピュレータの位置、姿勢あるいは目標軌道の変動ごとに適應アルゴリズムを作用させる必要がある。

マニピュレータの作業環境の中で、系の動特性を著

† 第26回自動制御連合講演会で発表(昭58・11)

* 日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所 武蔵野市緑町3-9-11

* Musashino Electrical Communication Laboratory, Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation, Musashino

(Received January 14, 1984)

(Revised May 4, 1984)

しく変動させる要因として、未知の物体を把握し作業するときの負荷変動がある。物体の負荷が大きく変化するときには、所定の軌道に沿って動作させようとしても滑らかな運動が得られない。このとき、物体と手先を装着している先端リンクを一体化して考えると、先端リンクの質量、重心位置および慣性行列の各パラメータが変動することになる。しかし、他のリンクのパラメータやサーボモータなどの駆動系のパラメータは変動しない。そこで、変動するパラメータのみを同定し、その推定値を用いて制御入力进行を設計すれば、二つの制御方式の特徴を生かすことができ、高精度な軌道制御が可能と考えられる。

本論文は、変動するパラメータをマニピュレータの正確な動的モデルに基づき実時間同定し、推定値を用いて目標軌道を実現する制御入力を設計する適応制御法を考察する。パラメータ同定は、計算量を最小とするためにパラメータに関する線形入出力式を導き、逐次最小2乗法で行うこととした。以下では、はじめに適応制御法の構成を述べ、未知パラメータに関する二つの線形入出力式を導きパラメータ同定法を示す。つぎに、誤差について述べる。ついで、6自由度機構におけるシミュレーションの結果を述べ、最後に、2自由度機構による軌道制御の実験例を示し、本方式の有効性を明らかにする。

2. 軌道制御

変動するパラメータを未知パラメータとすると、 n 自由度のマニピュレータの運動方程式は一般に次式で表わすことができる。

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

ここで、 $\mathbf{M}$ は $n \times n$ 慣性行列、 $\mathbf{g}$ はコリオリ力・遠心力、重力および摩擦力の効果を表わす $n \times 1$ ベクトル、 $\boldsymbol{\theta}$ は $n \times 1$ 関節角ベクトル、 $\boldsymbol{\tau}$ は $n \times 1$ 関節トルクベクトル、 $\mathbf{p}$ は $k \times 1$ 未知パラメータベクトルである。さらに、駆動装置の入力 $\mathbf{u}$ と $\boldsymbol{\tau}$ とは、駆動源であるサーボモータの慣性モーメントやトルク定数などとの関係で一般に

$$\mathbf{u} = \mathbf{F}(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \ddot{\boldsymbol{\theta}}) \quad (2)$$

で表わすことができる。ただし、 $\mathbf{F}$ は $\mathbf{p}$ を含まない関数である。手先を目標軌道 $\boldsymbol{\theta}_d, \dot{\boldsymbol{\theta}}_d, \ddot{\boldsymbol{\theta}}_d$ に沿って動作させるため、(1)式で $\boldsymbol{\tau}_d$ を求め、(2)式でこの $\boldsymbol{\tau}_d$ に対応する入力 $\mathbf{u}_d$ を求め、制御入力を

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_d + \mathbf{K}_\theta(\boldsymbol{\theta}_d - \boldsymbol{\theta}) + \mathbf{K}_\dot{\theta}(\dot{\boldsymbol{\theta}}_d - \dot{\boldsymbol{\theta}}) \quad (3)$$

とするトルク計算制御法がある。ここで、 $\mathbf{K}_\theta, \mathbf{K}_\dot{\theta}$ はそれぞれ角度と角速度の $n \times n$ フィードバックゲイン行列である。この制御法は、パラメータが既知で不変のときは優れた特性が得られるが、パラメータが未知であったり変動する場合、正確な $\boldsymbol{\tau}_d$ を求めることができないために有効でなくなる。そこで、未知パラメータを実時間同定し、推定値を用いて $\boldsymbol{\tau}_d$ を求め制御入力を構成する適応制御が有効と考えられる。Fig. 1に適応制御のブロック図を示す。非線形特性の強いマニピュレータに線形システム同定法を適用することは困難であり、単純な線形モデルを仮定し同定しても十分な制御系が構成できない。そこで、 $\mathbf{u}, \boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \ddot{\boldsymbol{\theta}}$ を観測し、未知パラメータ $\mathbf{p}$ の線形入出力式に逐次最小2乗法を適用しパラメータ同定することとした。

3. パラメータ同定

3.1 系の記述

$n+1$ 個の剛体リンクを直列に連結した n 自由度関節形マニピュレータを考える。Fig. 2にリンク座標系とパラメータの説明図を示す。基底部から先端に向けてリンク番号を $0, 1, \dots, n$ とし、リンク $i-1$ とリンク i を連結する関節を関節 i とする。リンク n には手先を装着している。各リンク i には Denavit と Hartenberg との方式⁸⁾に基づく i 座標系 (x_i, y_i, z_i) を設定する。 $\mathbf{r}_i$ を i 座標系による $i-1$ 座標原点から

Fig. 1 Block diagram of the adaptive control system

Fig. 2 Link coordinate system and parameters

i 座標原点へのベクトル, A_{i-1}^i を i 座標系から $i-1$ 座標系への回転に関する変換行列とすると, A_{i-1}^i, r_i はそれぞれ次式で与えられる.

$$A_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \phi_i \sin \theta_i & \sin \phi_i \sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \phi_i \cos \theta_i & -\sin \phi_i \cos \theta_i \\ 0 & \sin \phi_i & \cos \phi_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$r_i = (a_i, d_i \sin \phi_i, d_i \cos \phi_i)^T \quad (5)$$

ここで, a_i は z_{i-1} 軸と z_i 軸との距離, ϕ_i は x_i 軸まわりの z_i 軸の z_{i-1} 軸に対する角度, d_i は z_{i-1} 軸に沿った x_{i-1} 軸と x_i 軸との距離, θ_i は z_{i-1} 軸まわりの x_i 軸の x_{i-1} 軸に対する角度, 上添字 T は転置を意味する. リンク相互の幾何学関係は $a_i, \phi_i, d_i, \theta_i$ の 4 つのパラメータによって完全に定められる.

関節トルク $\tau = \{\tau_i\}$ を計算機で効率よく求める方法として, Newton-Euler 法に基づく逐次計算法⁹⁾がある. この方法はまずリンクの速度, 加速度を基底部から手先に向かってリンクに設定した座標系を用いて計算し, つぎにリンクに作用する力, モーメントおよび関節トルクを手先から基底部へと逆方向に逐次計算するものであり, 関節がすべて回転ジョイントのときには次式で与えられる.

順方向計算 ($i=1, \dots, n$)

$$\omega_i = A_{i-1}^i(\omega_{i-1} + z_0 \dot{\theta}_i) \quad (6)$$

$$\dot{\omega}_i = A_{i-1}^i(\dot{\omega}_{i-1} + z_0 \ddot{\theta}_i + \omega_{i-1} \times (z_0 \dot{\theta}_i)) \quad (7)$$

$$\dot{v}_i = \dot{\omega}_i \times r_i + \omega_i \times (\omega_i \times r_i) + A_{i-1}^i \dot{v}_{i-1} \quad (8)$$

$$\ddot{v}_i = \omega_i \times (\omega_i \times s_i) + \dot{\omega}_i \times s_i + \ddot{v}_i \quad (9)$$

逆方向計算 ($i=n, \dots, 1$)

$$f_i = m_i \ddot{v}_i + A_{i+1}^i f_{i+1} \quad (10)$$

$$n_i = I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (I_i \omega_i) + m_i(r_i + s_i) \times \dot{v}_i + r_i \times A_{i+1}^i f_{i+1} + A_{i+1}^i n_{i+1} \quad (11)$$

$$\tau_i = (A_{i+1}^i z_0)^T n_i \quad (12)$$

ここで, $\omega_i, \dot{\omega}_i, \dot{v}_i, \ddot{v}_i, f_i, n_i$ は 0 座標原点において i 座標系の姿勢で表わした 3×1 ベクトルで, ω_i はリンク i の角速度, $\dot{\omega}_i$ はリンク i の角加速度, $\dot{v}_i$ はリンク i の直線加速度, $\ddot{v}_i$ はリンク i の重心における直線加速度, f_i はリンク $i-1$ からリンク i へ作用する力, n_i はリンク $i-1$ からリンク i へ作用するモーメントである. また s_i は i 座標系による座標原点からリンク i の重心に向かうベクトル, m_i は

リンク i の質量, I_i はリンク i の重心に対する 3×3 慣性行列である. 以下では, $f_{n+1} = n_{n+1} = 0$ とし, マニピュレータに外力が作用しないとする.

関節トルク τ と f_n および n_n との関係は, $f_n = n_n = 0$ のときの関節トルク τ^0 をとすると, 前述の逐次計算式より

$$\tau - \tau^0 = J^T \begin{bmatrix} f_n \\ n_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

を得る. ここで, J は $6 \times n$ ヤコビアン行列で

$$J = \begin{bmatrix} l_1 \times k_1 & \dots & l_n \times k_n \\ l_1 & \dots & l_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

で示される. ただし, l_i, k_i は

$$l_i = A_n^{i-1} z_0 \quad (15)$$

$$k_i = k_{i+1} + A_n^i r_i \quad (16)$$

で表わすことができる.

3.2 パラメータに関する線形入出力式

リンク n の n 座標原点に対する慣性行列 $\tilde{I}_n$ と重心に対する慣性行列 I_n とにはつぎの関係がある.

$$\tilde{I}_n = I_n + m_n(s_n^T s_n \delta_3 - s_n s_n^T) \quad (17)$$

ここで, δ_3 は 3×3 単位行列である. (9)~(11)式より, I_n を消去すると n_n は次式となる.

$$n_n = \tilde{I}_n \dot{\omega}_n + \omega_n \times (\tilde{I}_n \omega_n) + m_n s_n \times \dot{v}_n + r_n \times f_n \quad (18)$$

手先で未知の物体を把握したときの系の未知パラメータは $m_n, s_n = (s_1, s_2, s_3)^T$ および $\tilde{I}_n = \{\tilde{I}_{ij}\}$ である. これらの線形入出力式を導くためパラメータを

$$\alpha = m_n(1, s_n^T)^T \quad (19)$$

$$\beta = (\tilde{I}_{11}, \tilde{I}_{22}, \tilde{I}_{33}, \tilde{I}_{12}, \tilde{I}_{13}, \tilde{I}_{23})^T \quad (20)$$

とおくと, (10), (18)式より次式を得る.

$$f_n = B\alpha \quad (21)$$

$$n_n = C\alpha + D\beta \quad (22)$$

ここで, e_i を i 番目要素が 1 の単位ベクトルとすると B, C, D は次式で表わされる.

$$B = [\dot{v}_n, \dot{\omega}_n \times e_1 + \omega_n \times (\omega_n \times e_1), \dot{\omega}_n \times e_2 + \omega_n \times (\omega_n \times e_2), \dot{\omega}_n \times e_3 + \omega_n \times (\omega_n \times e_3)] \triangleq [b_1, b_2, b_3, b_4] \quad (23)$$

$$C = [r_n \times b_1, r_n \times b_2 + e_1 \times b_1, r_n \times b_3 + e_2 \times b_1, r_n \times b_4 + e_3 \times b_1] \quad (24)$$

$$D = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_1 & -\omega_2 \omega_3 & \omega_2 \omega_3 & \dot{\omega}_2 - \omega_1 \omega_3 & \dot{\omega}_3 + \omega_1 \omega_2 & \omega_2^2 - \omega_3^2 \\ \omega_1 \omega_3 & \dot{\omega}_2 & -\omega_1 \omega_3 & \dot{\omega}_1 + \omega_2 \omega_3 & \omega_3^2 - \omega_1^2 & \dot{\omega}_3 - \omega_1 \omega_2 \\ -\omega_1 \omega_2 & \omega_1 \omega_2 & \dot{\omega}_3 & \omega_1^2 - \omega_2^2 & \dot{\omega}_1 - \omega_2 \omega_3 & \dot{\omega}_2 + \omega_1 \omega_3 \end{bmatrix} \quad (25)$$

ただし, $\omega_i, \dot{\omega}_i$ はそれぞれ $\omega_n, \dot{\omega}_n$ の第 i 要素である.

以下では, つぎの二つの場合の関係式を導く.

(1) α と β を同定する場合 (方式 I)

(2) α のみ同定する場合 (方式 II)

(1) 方式I

未知パラメータを全て同定する。ここで

$$\mathbf{x}=(\alpha^T, \beta^T)^T \quad (26)$$

$$\mathbf{Q}=\mathbf{J}^T \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{y}=\boldsymbol{\tau}-\boldsymbol{\tau}^0 \quad (28)$$

とおくと, (13), (21), (22) 式より

$$\mathbf{y}=\mathbf{Q}\mathbf{x} \quad (29)$$

を得る。 $\mathbf{y}$ と $\mathbf{Q}$ のデータ列が与えられれば $\mathbf{x}$ を逐次最小2乗法で推定できる。 $\mathbf{y}$, $\mathbf{Q}$ はつぎの手順で求めることができる。はじめに, $\mathbf{f}_n=\mathbf{n}_n=0$ とし, $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ の観測値から (6)~(12) 式より $\omega_n, \dot{\omega}_n, \mathbf{v}_n, \boldsymbol{\tau}^0$ を求める。つぎに, (14), (23)~(25) 式より $\mathbf{J}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ を求め, 最後に (27), (28) 式より $\mathbf{Q}, \mathbf{y}$ を求める。ここで, $\boldsymbol{\tau}$ は関節ごとにトルクセンサを装着しその出力から求めることも可能であるが, (2) 式を用い制御入力からも算出できる。

本方式は系の自由度 n に依存することなく一般的に導出したものである。ここで, $n=1$ で回転ジョイントの場合, 明らかに, 回転軸まわりの慣性モーメントは同定可能であるが, 回転軸に直交する軸まわりの慣性モーメントは同定不能である。このように $n < 6$ の場合, (29) 式に最小2乗法を適用して同定が可能な $\mathbf{x}$ の要素は, 関節トルクに影響を与える要素のみである。逆に, 関節トルクの計算に必要な要素は同定可能といえる。

(2) 方式II

リンク n の重心に対する慣性行列 $\mathbf{I}_n$ は, $m_n, \mathbf{s}_n$ と比較し関節トルクに及ぼす影響が少ないことが多い。この場合, $\mathbf{I}_n=0$ とし, α の推定値 $\hat{\alpha}$ のみでも精度良い関節トルク計算が可能と考えられる。そこで, α のみの線形入出力式を導く。 $n \geq 4$ とすると, (13) 式は,

$$\mathbf{y}_1=\mathbf{H}_{11}\mathbf{f}_n+\mathbf{H}_{12}\mathbf{n}_n \quad (30)$$

$$\mathbf{y}_2=\mathbf{H}_{21}\mathbf{f}_n+\mathbf{H}_{22}\mathbf{n}_n \quad (31)$$

となる。ただし

$$\mathbf{y}=\begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}^T=\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12} \\ \mathbf{H}_{21} & \mathbf{H}_{22} \end{bmatrix}$$

であり, $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2$ はそれぞれ $(n-2) \times 1, 3 \times 1$ ベクトル, $\mathbf{H}_{11}, \mathbf{H}_{12}, \mathbf{H}_{21}, \mathbf{H}_{22}$ は, これに整合する大きさの行列である。ここで, $\mathbf{H}_{22}^{-1}$ が存在するときは $\mathbf{n}_n$ を消去でき, $\mathbf{f}_n$ を (21) 式に代入すると

$$\tilde{\mathbf{y}}_1=\tilde{\mathbf{B}}\alpha \quad (32)$$

を得る。ただし

$$\tilde{\mathbf{y}}_1=\mathbf{y}_1-\mathbf{H}_{12}\mathbf{H}_{22}^{-1}\mathbf{y}_2 \quad (33)$$

$$\tilde{\mathbf{B}}=(\mathbf{H}_{11}-\mathbf{H}_{12}\mathbf{H}_{22}^{-1}\mathbf{H}_{21})\mathbf{B} \quad (34)$$

である。(32) 式より α を推定できる。なお, $\mathbf{H}_{22}$ は

$$\mathbf{H}_{22}=[\mathbf{l}_{n-2}, \mathbf{l}_{n-1}, \mathbf{l}_n]^T$$

であり, $\mathbf{H}_{22}^{-1}$ が存在しないときは, $\mathbf{l}_n, \dots, \mathbf{l}_1$ から一次独立な三つのベクトルを順に選択し, これらを新たに $\mathbf{l}_n, \mathbf{l}_{n-1}, \mathbf{l}_{n-2}$ とする。これに対応するように $\mathbf{J}$ と $\mathbf{y}$ の要素の配列を変換する。三つの一次独立なベクトルが存在しないときは, 機構の退化が生じているときであり, パラメータ同定はできない。

つぎに, 関節に未知な固体摩擦が作用する場合を考察する。摩擦力 $\mathbf{T}_f=(t_{f1} \text{sign } \dot{\theta}_1, \dots, t_{fn} \text{sign } \dot{\theta}_n)^T$ は関節トルクの変動分となり, (13) 式を記述し直すと

$$\mathbf{y}=\mathbf{J}^T \begin{bmatrix} \mathbf{f}_n \\ \mathbf{n}_n \end{bmatrix} + \mathbf{T}_f \quad (35)$$

となる。ここで

$$\mathbf{r}=(t_{f1}, t_{f2}, \dots, t_{fn})^T \quad (36)$$

とおくと, 前述の方式 I, II に対応する未知パラメータの線形入出力式を同様の手順で導出できる。その結果方式 I は

$$\mathbf{y}=[\mathbf{Q} : \mathbf{W}] \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{r} \end{bmatrix} \quad (37)$$

であり, 方式 II は

$$\tilde{\mathbf{y}}_1=[\tilde{\mathbf{B}} : \mathbf{W}_1 : -\mathbf{H}_{12}\mathbf{H}_{22}^{-1}\mathbf{W}_2] \begin{bmatrix} \alpha \\ \mathbf{r} \end{bmatrix} \quad (38)$$

を得る。ただし

$$\begin{aligned} \mathbf{W} &= \text{diag}(\text{sign } \dot{\theta}_1, \dots, \text{sign } \dot{\theta}_n) \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 \\ \mathbf{W}_2 \end{bmatrix}_n^{n-3} \end{aligned} \quad (39)$$

である。

3.3 逐次最小2乗法と式誤差

これまでに導いたパラメータに関する線形入出力式は, 観測誤差がないとしたときの関係式である。しかし, 実際には何らかの観測誤差があるのが一般的である。 $\mathbf{y}_c, \mathbf{Q}_c$ をそれぞれ $\mathbf{y}, \mathbf{Q}$ の観測値とすると, 観測誤差があるときサンプリング N 時点では (29) 式は

$$\mathbf{y}_c(N)=\mathbf{Q}_c(N)\mathbf{x}(N)+\mathbf{e}(N) \quad (40)$$

と表わすことができる。ここで, $\mathbf{e}$ は式誤差である。

最小2乗法は評価関数

$$PI=\sum_{i=1}^N \|\mathbf{y}_c(i)-\mathbf{Q}_c(i)\mathbf{x}(i)\|^2 \quad (41)$$

を最小とする $\hat{\mathbf{x}}(N)$ を推定値とするものである。そのアルゴリズムは, $N-1$ 時点での推定値 $\hat{\mathbf{x}}(N-1)$ を $\bar{\mathbf{x}}_0$ とすると, $i=1$ より n まで

$$\hat{\mathbf{x}}_j=\hat{\mathbf{x}}_{j-1}-\mathbf{h}_j(\mathbf{q}_j^T \hat{\mathbf{x}}_{j-1}-y_j) \quad (42)$$

$$\mathbf{h}_j=\mathbf{R}_{j-1}\mathbf{q}_j(1+\mathbf{q}_j^T \mathbf{R}_{j-1}\mathbf{q}_j)^{-1} \quad (43)$$

$$\mathbf{R}_j=\mathbf{R}_{j-1}-\mathbf{h}_j\mathbf{q}_j^T \mathbf{R}_{j-1} \quad (44)$$

を計算し, $\hat{\mathbf{x}}(N)=\mathbf{x}_n, \mathbf{R}(N)=\mathbf{R}_n$ とするものである。

ここで, $\mathbf{q}_j$ は $\mathbf{Q}_e$ の第 j 行ベクトル, y_j は $\mathbf{y}_e$ の第 j 要素, $\mathbf{R}(N-1)=\mathbf{R}_0$ である.

式誤差 $\mathbf{e}$ は, 検出器の特性や外乱によって定められる. 角度検出器として高分解能なエンコーダを用い, 角速度検出としてエンコーダ出力の微分を行えば高精度な角度と角速度の検出が可能である. 角加速度はエンコーダ出力の 2 階微分を行えば, 検出可能となるが, 一般に観測誤差が大きくなる傾向にある. そこで, つぎの条件で $\mathbf{e}$ の性質を考察する.

1) 外力は作用せず, $\theta, \dot{\theta}, \tau$ の観測誤差はない.

2) $\ddot{\theta}$ の観測値 $\ddot{\theta}_e$ は, 平均値零, 分散 $\sigma^2 \delta$ の白色雑音 ε を含む, すなわち

$$\ddot{\theta}_e = \ddot{\theta} + \varepsilon \quad (45)$$

(1) 式の $\mathbf{p}$ を $\mathbf{x}$ と置換し, $\mathbf{x}=0$ としたときの τ^0 は

$$\mathbf{M}(\theta, 0)\ddot{\theta} + \mathbf{g}(\theta, \dot{\theta}, 0) = \tau^0 \quad (46)$$

となる. 以下, 簡素化のため $\mathbf{M}(\theta, \mathbf{x})$ を $\mathbf{M}(\mathbf{x})$, $\mathbf{g}(\theta, \dot{\theta}, \mathbf{x})$ を $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ とする. このとき, (28) 式の $\mathbf{y}$ は次式で表わされる.

$$\mathbf{y} = (\mathbf{M}(\mathbf{x}) - \mathbf{M}(0))\ddot{\theta} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{g}(0) \quad (47)$$

一方, $\mathbf{y}_e, \mathbf{Q}_e$ は

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_e &= \tau - \mathbf{M}(0)\ddot{\theta}_e - \mathbf{g}(0) \\ &= \mathbf{y} - \mathbf{M}(0)\varepsilon \end{aligned} \quad (48)$$

$$\mathbf{Q}_e \mathbf{x} = \mathbf{Q} \mathbf{x} + (\mathbf{M}(\mathbf{x}) - \mathbf{M}(0))\varepsilon \quad (49)$$

とする. これらの関係を (29) 式に代入すると

$$\mathbf{e} = -\mathbf{M}(\mathbf{x})\varepsilon \quad (50)$$

を得る. $\mathbf{e}$ の平均値は $E(\mathbf{e}) = -\mathbf{M}(\mathbf{x})E(\varepsilon) = 0$ であるが, (49), (50) 式に示めされるように, $\mathbf{Q}_e$ と $\mathbf{e}$ は相関があり独立でない. このため最小 2 乗法による推定値 $\hat{\mathbf{x}}$ はバイアスが生じる. このバイアスは前処理として $\mathbf{y}_e, \mathbf{Q}_e$ に

1) 短時間平均操作

2) 低減フィルタ操作

などを行うことによって低減できる¹⁰⁾.

同様に, $\mathbf{y}_{1e}, \mathbf{y}_{2e}, \mathbf{B}_e$ をそれぞれ $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \mathbf{B}$ の観測値とし, 観測誤差があるときの方式 II の線形入出力式を求めると

$$\ddot{\mathbf{y}}_{1e} = \ddot{\mathbf{B}}_{1e}\alpha + \xi \quad (51)$$

を得る. ただし

$$\ddot{\mathbf{y}}_{1e} = \mathbf{y}_{1e} - \mathbf{H}_{12}\mathbf{H}_{22}^{-1}\mathbf{y}_{2e} \quad (52)$$

$$\ddot{\mathbf{B}}_{1e} = (\mathbf{H}_{11} - \mathbf{H}_{12}\mathbf{H}_{22}^{-1}\mathbf{H}_{21})\mathbf{B}_e \quad (53)$$

$$\xi = [-\delta_{n-3} : \mathbf{H}_{12}\mathbf{H}_{22}^{-1}]^T \mathbf{M}(\mathbf{x})\varepsilon \quad (54)$$

である. $E(\xi) = 0$ であるが, ξ は $\ddot{\mathbf{B}}_{1e}$ とは独立でないため, 推定値 $\hat{\alpha}$ はバイアスが生じる. しかし, 方式 I と同様に, 短時間平均操作や低減フィルタ操作によってバイアスを低減できる.

Table 1 Number of computation of parameter identification

unknown parameter	method	multiplies	adds	mul. (n=6)	add. (n=6)
α	I	$379n-186$	$333n-156$	2088	1842
β	II	$244n-333$	$209n-308$	1131	946
α	I	$n^3+25n^2+379n-186$	$\frac{3}{2}n^3+\frac{65}{2}n^2+303n-156$	3204	3156
β	II	$n^3+10n^2+205n-133$	$\frac{3}{2}n^3+10n^2+\frac{331}{2}n-308$	1473	1369

Fig. 3 Coordinate frames for the 6 degrees of freedom manipulator

以上は, 固体摩擦がないあるいは既知の場合について考察したものであるが, 固体摩擦が未知の場合についても同様の関係式を求めることができる.

サンプリングごとのパラメータ同定の計算量を Table 1 に示す. この計算量は逐次最小 2 乗法のみならず, $\mathbf{y}_e, \mathbf{Q}_e, \ddot{\mathbf{y}}_{1e}, \ddot{\mathbf{B}}_{1e}$ などの計算を含むが, 前処理の計算量は含まれていない. 方式 II は方式 I の計算量の 0.5 倍ほどである.

オンラインパラメータ同定に基づく制御の安定性は, 系が非線形システムであるために厳密に論じることが困難である. しかしながら, σ の値が小的时候は, 推定値は漸近的に変化しかつそのバイアスは少ないため, サンプリングごとに同定と推定値に基づく入力計算を行えば, 漸的に安定になるだろう.

4. シミュレーション

6 自由度マニピュレータを対象に, 適応制御の計算機シミュレーションを行った. マニピュレータの構成と各リンクに設定した座標系を Fig. 3 に示す. 座標系パラメータとリンクの各定数を Table 2 に示す.

Table 2 Link parameter of the six degrees of freedom manipulator

link		1	2	3	4	5	6
a_i	(m)	0	0.1306	0	0.01	0	0.0285
d_i	(m)	0.107	0	0	0.099	0	0
ϕ_i	(deg.)	90	0	90	90	90	0
s_i	(m)	-0.014	-0.0703	0	-0.006	0	-0.008
		0	0.0058	-0.0038	-0.002	0	0
		-0.039	0	0.037	0.025	0	0
m_i	(kg)	0.645	0.561	0.202	0.046	0.02	0.004
I_{11}^i			176	242	10.3	3	0.4
I_{22}^i	(10^{-6}kgm^2)*	1470	938	242	0.04	3	0.4
I_{33}^i			850	54.8	8.7	0.7	0.07

* $I_i = \text{diag} (I_{11}^i, I_{22}^i, I_{33}^i)$

シミュレーションの条件は、同定アルゴリズムの初期値 $\hat{x}(0)=0$, $R(0)=\delta_6$, 加速度観測誤差は平均値 0, 分散 $\sigma^2\delta_6$ の白色雑音, 同定のサンプリングサイクルを 3.8 ms, 制御のサンプリングサイクルを 0.7 ms, 未知の物体を把握したときの真のパラメータ値を

Fig. 4 Profiles of the command trajectory **Fig. 5** Trajectory error norms at $\sigma=12\text{ rad/s}^2$

$$\alpha = (0.18, 0.018, 0, 0)^T$$

$$\beta = 10^{-5}(4.2, 5.3, 2.5, 0, 0, 0)^T$$

とした。また、目標軌道は **Fig. 4** に示すように 0.38 秒で目標に到達する軌道とした。この軌道における $\ddot{\theta}_d$ の絶対最大値 (単位 rad/s^2) は関節 1 より順に、97, 160, 56, 710, 157, 90 である。シミュレーションの結果を **Fig. 5**~**Fig. 8** に示す。

Fig. 5 は、フィードバックのみの制御, 未知パラメータ値を零としたときのトルク計算制御および方式 I による適応制御の軌道誤差ノルム $\|\Delta\theta\| = \|\theta_d - \theta\|$ を示したものである。ただし、固体摩擦は作用せず, $\sigma=12\text{ rad/s}^2$, 前処理なしとしている。適応制御はほかの制御と比較し、軌道誤差が大幅に少ないといえる。

Fig. 6 は、方式 I において、信号の前処理なし、低域フィルタ操作, および短時間平均操作を施したときの 2 回の $\|\Delta\theta\|$ を示したものである。ただし、固体摩擦は作用せず $\gamma=24\text{ rad/s}^2$ としている。このときの推定値 $\hat{x}_1$ を **Fig. 7** に示す。なお、低減フィルタ操作は

Fig. 6 The effectiveness of pre-filter with method I at $\sigma=24\text{ rad/s}^2$

Fig. 7 Comparison of parameter estimate $\hat{X}_1$

$$y_{out}(N) = (1-s)y_{in}(N) + sy_{out}(N-1)$$

で表わされる。ここで、 y_{in} は入力信号、 y_{out} は出力信号であり、 $s=0.5$ とした。短時間平均操作は、

$$y_{out}(N) = \frac{1}{l} \sum_{i=N-l}^N y_{in}(i)$$

$$= y_{out}(N-1) + (y_{in}(N) - y_{in}(N-1))/l$$

で表わされる。ここでは $l=4$ とした。Fig. 7, 8 より、推定値にバイアスがあっても同一軌道を繰り返すと軌道誤差はかなり減少するといえる。また、信号の前処理によって推定値のバイアスを低減できるといえる。

Fig. 8 は、フィードバックのみの制御と方式 I および方式 II の適応制御における軌道誤差 $\Delta\theta_6$ を示したものである。ただし、固体摩擦力は未知としその真値を

$$\tau = (1, 1, 0.5, 0.5, 0.1, 0.1)^T$$

としている。推定値が収束するまでの過渡状態を除き、方式 II は方式 I と同程度の効果があることがうかがえる。

5. 2 関節マニプレータによる実験

2 関節マニプレータを対象に方式 I の適応制御の実験を行った。Fig. 9 に 2 関節マニプレータのモデル図を示す。駆動源は、関節に直結したサーボモータである。 $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ の観測値は、関節に装着したエンコーダ (2 相 1056 パルス / 1 回転) の出力パルスの計数および時間間隔の逆数計算によって求めた。空間

$$Q = \begin{bmatrix} l_1 \ddot{\theta}_1 & ((2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \cos \theta_2 - (2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \dot{\theta}_2 \sin \theta_2) l_1 & \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 \\ 0 & (\ddot{\theta}_1 \cos \theta_2 + \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2) l_1 & \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix}$$

$$W = \text{diag}(\text{sign } \dot{\theta}_1, \text{sign } \dot{\theta}_2)$$

となる。実験機構の各定数は、 $\tilde{I}_1 + I_{M1} = 3.36 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$, $\tilde{I}_2 = 1.15 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$, $I_{M2} = 2.55 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$, $l_1 = 0.08 \text{ m}$, $l_{o2} = 0.078 \text{ m}$, $m_2 = 0.178 \text{ kg}$, $t_{f1} = 0.04 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$, $t_{f2} = 0.01 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$ であり、サンプリング周

Fig. 8 Trajectory error, $\Delta\theta_6$

Fig. 9 A two degrees of freedom model

運動を前提とした (37) 式を 2 関節マニプレータに直接適用すると冗長な計算が多くなる。すなわち、 $I_{Mi} (i=1, 2)$ をモータ慣性モーメント、 $\tilde{I}_i$ を関節軸に対するリンク慣性モーメント、 l_i をリンク長さ、 l_{oi} を関節からリンクの重心までの距離、 m_i をリンク質量、 u_i をモータ発生トルク、 t_{fi} を固体摩擦力とすると、未知パラメータは $m_2, l_{o2}, \tilde{I}_2, t_{f1}$ および t_{f2} の 5 個である。そこで、未知パラメータを整理して

$$x = (m_2, m_2 l_{o2}, \tilde{I}_2, t_{f1}, t_{f2})^T = (x_1, \dots, x_5)^T$$

とした。これに対応して (37) 式の y, Q, W は

$$y = \begin{pmatrix} u_1 - (\tilde{I}_1 + I_{M1}) \ddot{\theta}_1 - I_{M2} \ddot{\theta}_2 \\ u_2 - I_{M2} (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \end{pmatrix}$$

期は 4.5 ms とした。

Fig. 10 に θ_2 の応答波形を示す。目標軌道は θ_1, θ_2 ともに図中の実線で示すように、0.3 秒で目標角度を移動し 0.3 秒間静止を繰り返す波形である。区間 (A) では、(1) フィードバックのみの制御と、(2) パ

Fig. 10 System response for two degree of freedom manipulator

ラメータ値を予想し、予想値によるトルク計算制御の応答波形である。後者の場合、 x_i の予想値 $\hat{x}_i$ は、 $\hat{x}_4$ と $\hat{x}_5$ は零とし、 $\hat{x}_1, \hat{x}_2$ および $\hat{x}_3$ は $\hat{x}_i/x_i (i=1, 2, 3)$ の値が 0.5 と 2 のときを示した。なおこの区間では、 $\hat{x}(0)=0$ としてパラメータ同定を実行している。区間(B)は、フィードバックのみの制御をパラメータ同定による適応制御に切り替えたときの応答波形である。 θ_1 についても同様な波形を得た。明らかに、適応制御によって大幅に軌道誤差が減少している。

6. 結 言

本論文の主な結果を要約する。

- (1) 未知な物体を把握したときに変動するパラメータは、先端リンクの質量、重心および慣性行列の各要素であり、これらのパラメータ同定法を示した。
- (2) 加速度観測誤差が白色雑音であるとき、逐次最小 2 乗推定はバイアスが生じるが、軌道誤差は大幅に減少する。また、このバイアスは、低減フィルタ操作や短時間平均操作によって低減できる。
- (3) 先端リンクの重心に対する慣性行列を零と近似できるとき、方式Ⅱは方式Ⅰと同程度の制御特性となる。また、方式Ⅱの計算量は方式Ⅰの 0.5 倍ほどである。
- (4) 2 関節マニピュレータの実験により、提案する適応制御の有効性を確認した。

今後の課題は、多自由度マニピュレータに適用したときの計算時間である。方式Ⅱの計算量はニュートン・オイラ法に基づく関節トルク計算¹¹⁾の 1.4 倍ほど

である。関節トルク計算は専用 LSI による高速化¹²⁾が検討されており、今後の技術動向を考慮すると提案した適応制御法の実現性は高い。

最後に、本研究を進めるに際し有益な助言をいただいたもと横須賀電気通信研究所 中川特別研究室中川三男室長ならびに武蔵野電気通信研究所 西村国俊研究専門調査役に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) A. K. Bejczy: Robot Arm Dynamics and Control, Tech. Memo, 33/669, Jet Propulsion Laboratory, Feb. (1974)
- 2) J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. Paul: Resolved-Acceleration Control of Mechanical Manipulators, IEEE Trans. on Automatic Control, **AC-25-3**, 468/474 (1980)
- 3) G. N. Saridis, and C. G. Lee: An Approximation Theory of Optimal Control for Trainable Manipulators, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, **SMC-9-3**, 152/159 (1979)
- 4) S. Dubowsky and D. T. Desforages: The Application of Model Referenced Adaptive Control to Robotic Manipulators, Trans. ASME, J. Dynamic Systems, Measurement and Control, **101**, Sept. 193/200 (1979)
- 5) 竹垣盛一, 有本 卓: マニピュレータの適応的な軌道制御, 計測自動制御学会論文集, **17-4**, 467/472 (1981)
- 6) R. Horowitz and M. Tomizuka: An Adaptive Control Scheme for Mechanical Manipulators-Compensation of Nonlinearity and Decoupling Control, ASME Paper 80-WA/DSC-6 (1980)
- 7) A. J. Koivo and T. H. G. Ho: Adaptive Linear Controller for Robotic Manipulators, IEEE Trans. on Automatic Control, **AC-28-2**, 162/171 (1983)
- 8) J. Denavit and R. S. Hartenberg: A Kinematic Notation for Lower Pair Mechanisms Based on Matrices, ASME J. of Applied Mechanics, **32-2**, 215/221 (1955)
- 9) J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. Paul: On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators, Trans. ASME, J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, **102**, 69/76 (1980)
- 10) J. S. Bendat and A. G. Piersol: Random Data, Analysis and Measurement Procedures, 培風館 (1976)
- 11) J. M. Hollerbach: A Recursive Lagrangian Formulation of Manipulator Dynamics and a Comparative study of Dynamic Formulation Complexity, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, **SMC-10-11**, 730/736 (1980)
- 12) J. L. Turney and T. N. Mudge: VLSI Implementation of a Numerical Processor for Robotics, Proc. of the 27-th International Instrumentation Symposium, Indianapolis, Indiana, 169/175 (1981)