

閉リンクロボットの適応制御における
効率的計算アルゴリズムと制御実験*大岡 泰仁^{*1}, 川崎 晴久^{*2}, 竹村 信人^{*3}An Efficient Computational Algorithm of Adaptive Control
for Closed-Loop Robots and Its Experiments

Yasuhito OOOKA, Haruhisa KAWASAKI and Nobuhito TAKEMURA

This paper presents an efficient computational algorithm of model-based adaptive control for closed-loop robots. The algorithm is an extension of the computational algorithm for serial-link robots, which was derived by Kawasaki and Bito. The proposed algorithm is implemented to a 6 D.O.F robot with parallel-link mechanism using a 32 bit DSP. Experimental results of trajectory control are also shown.

Key Words: Robots, Manipulators, Adaptive Control, Computational Algorithm, Closed-Loop Mechanism

1. 緒言

ロボットの高速・高精度化に向け、非線形動特性や負荷変動に対処すべく、近年モデルベース適応制御が盛んに研究されている。一般的なロボットを対象に、非線形性を考慮した大域的漸近安定な制御法⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾が数多く示され、これを基にシリアルリンクロボットの適応制御計算アルゴリズム⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾が提案され、実験報告^{(7),(8)}もなされている。しかし、閉リンク機構を含むロボットについては十分な研究がなされておらず、Walkerが閉リンク機構の一部を切断したモデルを使った適応制御計算アルゴリズム⁽⁶⁾を提案しているが、計算量は多大であり、多自由度ロボットを対象にした実験報告は見受けられない。実際の制御には、さらなる計算の効率化が求められており、実験による検証も必要である。

本論文では、著者らが提案したシリアルリンクロボットの効率的な適応制御計算アルゴリズム⁽⁷⁾を拡張し、閉リンクロボットの適応制御計算アルゴリズムを導く。さらに平行リンク機構を有する6自由度ロボットを対象に、1)PD制御、2)PID制御、3)閉リンクを考慮しない適応制御、4)閉リンクを考慮した適応制御について実験を行い、その比較結果を示す。

2. 適応制御理論

摩擦と外乱がない場合、 n 自由度剛体ロボットの運動方程式は一般に次式で表される。

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

ここで $\mathbf{q} \in R^n$ は関節変位ベクトル、 $\boldsymbol{\tau} \in R^n$ は関節トルク/力ベクトル、 $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in R^{n \times n}$ は対称慣性行列、 $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in R^n$ は遠心力とコリオリ力を表すベクトル、 $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in R^n$ は重力負荷ベクトルである。関節トルクはリンク質量、一次モーメント、慣性テンソルなどの動力学パラメータに関して線形である。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 $m \times 1$ の定数パラメータベクトル σ によって次の関係式が成り立つ行列 $\mathbf{Y} \in R^{n \times m}$ を定義できる。

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}_r)\dot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}_r, \ddot{\mathbf{q}}_r)\sigma = \boldsymbol{\tau}_r \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{q}_d \in R^n$ を目標関節軌道、 $\mathbf{q}_e \in R^n$ を

$$\mathbf{q}_e = \mathbf{q} - \mathbf{q}_d \quad (3)$$

で表される軌道誤差とすると、 $\mathbf{q}_r \in R^n$ は

$$\mathbf{q}_r = \mathbf{q}_d - \int_0^t \Lambda \mathbf{q}_e d\tau \quad (4)$$

で表される参照軌道である。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 \mathbf{Y} は σ の要素を含まず、式(2)は動的モデルが未知パラメータ σ に関して線形であることを示しており、多くの適応制御はこの関係式を利用している。制御則と適応則はそれぞれ

* 原稿受付 1997年4月11日。

*¹ 学生員, 岐阜大学大学院 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)。*² 正員, 岐阜大学工学部。*³ 学生員, 岐阜大学大学院 [現: 太平洋工業(株)]。

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

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

と与えている．ここで， $\hat{\sigma} \in R^m$ は σ の推定値， $K_D \in R^{n \times n}$ は対称正定のゲイン行列， $P \in R^{m \times m}$ 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安定理論によって証明⁽²⁾されている．

3. 閉リンク機構の適応制御計算アルゴリズム

3.1 閉リンク機構の解析 閉リンクロボットを適当な関節で切断し，仮想的な木構造閉リンク機構を作る(図1)．木構造閉リンク機構の関節トルクは，この機構が閉リンクロボットと同じ運動をするものとして計算し，この値から閉リンクの拘束条件を考慮して閉リンク機構の関節トルクを計算する⁽⁹⁾．この機構は，複数のシリアルリンク機構が結合したものと考えることができ，3つ以上のリンクを結合する結合リンクにより連結される．肢にはベースリンクから手先へ順に番号をつけ，さらに肢 j の要素であるリンクには根元から順にリンク $1_j, 2_j, \dots$ と番号をつける．また，リンク座標の設定は，Denavit-Hartenberg の記法(D-H 法)を拡張した方法⁽¹¹⁾に従うものとする．

3.2 木構造閉リンク機構の適応制御計算

a. 基本的関係 n_o 自由度の木構造閉リンク機構の運動方程式は，関節変位を q_o とすると，

$$M_o(q_o)\ddot{q}_o + C_o(q_o, \dot{q}_o)\dot{q}_o + g_o(q_o) = \tau_o \quad (8)$$

と表される．上式の添字 o は木構造閉リンク機構を示す．ここで，動力学パラメータの線形結合で構成される未知な $m_o \times 1$ の定数パラメータベクトルを σ_o とすると，次の関係式で表される行列 $Y_o \in R^{n_o \times m_o}$ を定義できる．

$$M_o(q_o)\ddot{q}_o + C_o(q_o, \dot{q}_o)\dot{q}_o + g_o(q_o) = Y_o(\dot{q}_o, \ddot{q}_o, \dot{q}_o, \ddot{q}_o)\sigma_o = \tau_o \quad (9)$$

ここで，上式の τ_o はシリアル機構における関係式⁽⁷⁾

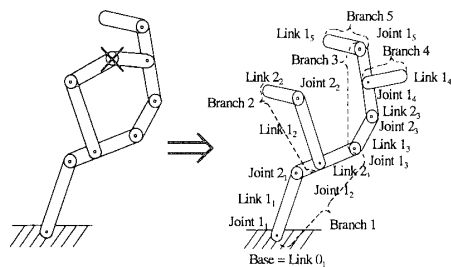


Fig.1 Virtual tree-structure mechanism

と同様に

$$\tau_{or} = \frac{1}{2} \left(\tau_o(q_o, \dot{q}_o + \dot{q}_{or}, \ddot{q}_{or}) - \tau_o(q_o, \dot{q}_{or}, \ddot{q}_{or}) - \tau_o(q_o, \dot{q}_o, \ddot{q}_{or}) + 3\tau_o(q_o, 0, \ddot{q}_{or}) \right) \quad (10)$$

と表せる．この式は，逆運動学計算アルゴリズムの直接的な4回のコールを含むので，冗長な計算を少なくするように試みる．上式右辺の各トルクの計算では，引数 q_o, \dot{q}_{or} は常に同じであり速度項のみ異なる．これに注目し，以下では簡素な表現とするために関数 $f(q_o, *, \ddot{q}_{or})$ を $f\{*\}$ と表記する．はじめに次のベクトルと行列を定義する．

$$\alpha_i = \dot{\omega}_i \{ \dot{q}_o + \dot{q}_{or} \} - \dot{\omega}_i \{ \dot{q}_{or} \} - \dot{\omega}_i \{ \dot{q}_o \} + 3\dot{\omega}_i \{ 0 \} \quad (11)$$

$$\beta_i = \dot{v}_i \{ \dot{q}_o + \dot{q}_{or} \} - \dot{v}_i \{ \dot{q}_{or} \} - \dot{v}_i \{ \dot{q}_o \} + 3\dot{v}_i \{ 0 \} \quad (12)$$

$$F_i = f_i \{ \dot{q}_o + \dot{q}_{or} \} - f_i \{ \dot{q}_{or} \} - f_i \{ \dot{q}_o \} + 3f_i \{ 0 \} \quad (13)$$

$$N_i = n_i \{ \dot{q}_o + \dot{q}_{or} \} - n_i \{ \dot{q}_{or} \} - n_i \{ \dot{q}_o \} + 3n_i \{ 0 \} \quad (14)$$

ここで， τ_{or} の i 要素は次のように与えられる．

$$\tau_{or,i} = \begin{cases} \frac{1}{2} z_i^T F_i & \text{if joint } i \text{ is T} \\ \frac{1}{2} z_i^T N_i & \text{if joint } i \text{ is R} \end{cases} \quad (15)$$

ただし，Tは直動関節，Rは回転関節を表す．

次に $\omega_i \{ \dot{q}_o + \dot{q}_{or} \} = \omega_i \{ \dot{q}_o \} + \omega_i \{ \dot{q}_{or} \}$ と Newton-Euler 法による逆動力学計算式から

$$\begin{aligned} \alpha_i &= {}^i R_{i-1} \alpha_{i-1} + \rho_i \left({}^i R_{i-1} \omega_{i-1} \{ \dot{q}_{or} \} \times z_i \dot{q}_i \right. \\ &\quad \left. + {}^i R_{i-1} \omega_{i-1} \{ \dot{q}_o \} \times z_i \dot{q}_{or,i} + 2z_i \ddot{q}_{or,i} \right) \\ \beta_i &= {}^i R_{i-1} \left(\beta_{i-1} + \Phi_{i-1}^{i-1} p_i \right) + 2(1 - \rho_i) \left({}^i R_{i-1} \omega_{i-1} \{ \dot{q}_{or} \} \right. \\ &\quad \left. \times z_i \dot{q}_{or,i} + {}^i R_{i-1} \omega_{i-1} \{ \dot{q}_o \} \times z_i \dot{q}_{or,i} + z_i \ddot{q}_{or,i} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

$$F_i = m_i \beta_i + \Phi_i m s_i + {}^i R_{i+1} F_{i+1} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} N_i &= I_i \alpha_i + \omega_i \{ \dot{q}_{or} \} \times (I_i \omega_i \{ \dot{q}_o \}) + \omega_i \{ \dot{q}_o \} \\ &\quad \times (I_i \omega_i \{ \dot{q}_{or} \}) + m s_i \times \beta_i + {}^i R_{i+1} (p_{i+1} \times F_{i+1} + N_{i+1}) \end{aligned} \quad (18)$$

の漸化式を導ける．ここで，

$$\Phi_i = \Gamma_i + [\alpha_i \times] \quad (19)$$

$$\Gamma_i = [\omega_i \{ \dot{q}_{or} \} \times [\omega_i \{ \dot{q}_o \} \times] + ([\omega_i \{ \dot{q}_{or} \} \times [\omega_i \{ \dot{q}_o \} \times])^T] \quad (20)$$

である．いま，リンク i のパラメータベクトル $\sigma_{o,i}$ を次のように定義する．

$$\sigma_{o,i} = \left(m_i, m s_{i,x}, m s_{i,y}, m s_{i,z}, I_{i,xx}, I_{i,yy}, I_{i,zz}, I_{i,xy}, I_{i,xz}, I_{i,yz} \right)^T \in R^{10} \quad (21)$$

このとき F_i, N_i は

$$F_i = A_i \sigma_{o,i} + {}^i R_{i+1} F_{i+1} \quad (22)$$

$$N_i = B_i \sigma_{o,i} + {}^i R_{i+1} (p_{i+1} \times F_{i+1} + N_{i+1}) \quad (23)$$

と表すことができる．ここで

$$A_i = [\beta_i \quad \Phi_i \quad 0] \quad (24)$$

$$B_i = [0 \quad -[\beta_i \times] \quad \Omega_i] \quad (25)$$

$$\Omega_i = \begin{bmatrix} \alpha_{i,1} & -\Gamma_{i,23} & \Gamma_{i,23} \\ \Gamma_{i,13} & \alpha_{i,2} & -\Gamma_{i,13} \\ -\Gamma_{i,12} & \Gamma_{i,12} & \alpha_{i,3} \\ \alpha_{i,2} - \Gamma_{i,13} & \alpha_{i,3} + \Gamma_{i,12} & \Gamma_{i,22} - \Gamma_{i,33} \\ \alpha_{i,1} + \Gamma_{i,23} & \Gamma_{i,33} - \Gamma_{i,11} & \alpha_{i,3} - \Gamma_{i,12} \\ \Gamma_{i,11} - \Gamma_{i,22} & \alpha_{i,1} - \Gamma_{i,23} & \alpha_{i,2} + \Gamma_{i,13} \end{bmatrix} \quad (27)$$

である。

b. パラメータ係数行列の計算 式(9)から、肢を d 本もつ木構造閉リンク機構の関節トルク τ_{or} の i 要素は次式で与えられる。

$$\tau_{or,i} = \sum_{k=1}^{n_d} y_{ik} \sigma_{o,k} \quad (28)$$

ただし、 y_{ik} は

$$Y_o = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n_1} & y_{11} & \cdots & y_{1n_2} & \cdots & y_{11} & \cdots & y_{1n_d} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{n_1n_1} & \cdots & y_{n_1n_2} & \cdots & y_{n_1n_d} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{12} & \cdots & y_{1n_2} & \cdots & y_{1n_d} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{n_2n_2} & \cdots & y_{n_2n_d} \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & y_{1n_d} & \cdots & y_{n_dn_d} \end{bmatrix} \quad (29)$$

で定義される行ベクトルで、結合に無関係の要素は 0 である。いま、 $\sigma_{o,k}$ の j 要素に相当する位置の要素のみ 1 で、ほかの要素を 0 とする単位ベクトル $\mathbf{e}_{k(j)} \in R^{10}$ を定義し、式(9)の σ_o の代わりに代入すると

$$\tau_{or} \Big|_{\sigma_o = (0, \dots, 0, \mathbf{e}_{k(j)}^T, 0, \dots, 0)} = (y_{1k,j}, y_{2k,j}, \dots, y_{kk,j}, 0, \dots, 0)^T \quad (30)$$

を得る。これは τ_{or} の計算アルゴリズムの中で σ_o に $\mathbf{e}_{k(j)}$ を代入して、 k を 1 から n_d まで繰り返し、各 k に対し j を 1 から 10 まで繰り返すことによって Y_o が求められることを示している。 $\mathbf{F}_i, \mathbf{N}_i$ は $i > k$ のときは 0 であるから $i \leq k$ のとき次のように簡潔に計算できる。

$$\mathbf{F}_i = \begin{cases} \mathbf{A}_k \mathbf{e}_{k(j)} & \text{for } i = k \\ {}^i \mathbf{R}_k \mathbf{F}_k & \text{for } i < k \end{cases} \quad (31)$$

$$\mathbf{N}_i = \begin{cases} \mathbf{B}_k \mathbf{e}_{k(j)} & \text{for } i = k \\ {}^i \mathbf{R}_k (\mathbf{h}_{i+1}^k \times \mathbf{F}_k + \mathbf{N}_k) & \text{for } i < k \end{cases} \quad (32)$$

ここで、 \mathbf{h}_i^k は

$$\mathbf{h}_i^k = \sum_{j=i}^k \mathbf{p}_j = {}^k \mathbf{R}_{k-1} (\mathbf{h}_{i+1}^{k-1} + {}^{k-1} \mathbf{p}_k) \quad (33)$$

である。以上の関係から y_{ik} は以下のように表される。

$$y_{ik,j} = \begin{cases} \frac{1}{2} ({}^k \mathbf{R}_i \mathbf{z}_i)^T \mathbf{A}_k \mathbf{e}_{k(j)} & \text{if joint } i \text{ is T} \\ \frac{1}{2} ({}^k \mathbf{R}_i \mathbf{z}_i)^T (\mathbf{B}_k \mathbf{e}_{k(j)} + \mathbf{h}_{i+1}^k \times \mathbf{A}_k \mathbf{e}_{k(j)}) & \text{if joint } i \text{ is R} \end{cases}$$

さらに次のベクトルを定義する。

$${}^k \mu_i = \frac{1}{2} {}^k \mathbf{R}_i \mathbf{z}_i = {}^k \mathbf{R}_{k-1} {}^{k-1} \mu_i \quad (34)$$

$${}^k \gamma_i = {}^k \mu_i \times \mathbf{h}_{i+1}^k \quad (35)$$

これらの関係を利用すると y_{ik} は次のようにかける。

$$y_{ik,j} = \begin{cases} {}^k \mu_i^T \mathbf{A}_k & \text{if } k \text{ is connected with } i, \text{ and joint } i \text{ is T} \\ {}^k \mu_i^T \mathbf{B}_k + {}^k \gamma_i^T \mathbf{A}_k & \text{if } k \text{ is connected with } i, \text{ and joint } i \text{ is R} \\ 0 & \text{if } k \text{ isn't connected with } i \end{cases} \quad (36)$$

以上の関係式は、 Y_o が繰り返し計算で求められることを示している。

c. 適応制御則の計算 $\mathbf{P} = \text{diag}(P_1, P_2, \dots, P_{n_d})$,

$P_i \in R^{10 \times 10}$ と仮定すると、適応制御則は次式で表される。

$$\dot{\hat{\sigma}}_{o,i} = -P_i \sum_{j=1}^i s_j y_{ji}^T \quad (37)$$

d. 計算アルゴリズム 木構造における適応制御計算アルゴリズムを表 1 に示す。これは、一般的に複雑になる木構造のアルゴリズムを、再帰関数呼出し (Recursive call) を行うことにより簡単化している。ここで、初期条件は $\omega_0 \{\dot{\mathbf{q}}_{or}\} = \omega_0 \{\dot{\mathbf{q}}_0\} = \alpha_0 = \mathbf{0}$, $\beta_0 = 2\mathbf{z}_0 \mathbf{g}$,

$\mathbf{h}_{i+1}^i = \mathbf{0}$, ${}^i \mu_i = \mathbf{z}_i / 2$ であり、 \mathbf{g} は重力加速度定数とする。表中の $\text{Func_A}(j)$ は、逆動力計算および各パラメータの計算を行う。もし、肢 j の先に肢が繋がっている場合、さらに Func_A を呼び出し、これを繰り返すことで肢すべての計算を行う。また、 $\text{Func_B}(j,i)$ は、パラメータ係数行列 Y の計算を行う。 j は肢番号を表し、 i は肢 j のリンク番号を表す。 i が結合リンクの場合、 j に次の肢番号、 i にリンク 1 を設定して Func_B を呼び出し、もし i が結合リンクでない場合は、 i に次のリンク番号を設定して Func_B を呼び出す。これを繰り返す行うことで、すべてのリンクのパラメータ係数行列を計算することができる。以上により求められた値を使い、関節トルクおよび推定パラメータの計算を行う。

3.3 閉リンク機構の適応制御計算

a. 関節トルク算出 一般に、 n_c 自由度の閉リンクロボットの運動方程式は次式で表される。

$$\mathbf{M}_c(\mathbf{q}_c) \ddot{\mathbf{q}}_c + \mathbf{C}_c(\mathbf{q}_c, \dot{\mathbf{q}}_c) + \mathbf{g}(\mathbf{q}_c) = \tau_c \quad (38)$$

上式の添字 c は閉リンク機構を示す。ここで関節角度 $\mathbf{q}_c, \dot{\mathbf{q}}_c$ が閉リンクロボットの一般化座標 \mathbf{q} を使って以下のように与えられるとする。

$$\mathbf{q}_c = \mathbf{q}_c(\mathbf{q}) \quad (39)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_c = \dot{\mathbf{q}}_c(\mathbf{q}) \quad (40)$$

このとき機構の拘束条件と仮想仕事の原理より、閉リンクロボットの関節トルク τ_c は、木構造閉リンク機構のトルク τ_o を使って

Table 1 Adaptive control algorithm
of tree-structure mechanismStep 1. $j=1$ Func_A(j)Step 2. Calculate for $j=1,2,\dots,d$ For $i=1,2,\dots,n_j$ Func_B(j,i)Step 3. Calculate $\dot{\sigma}_o$ given by Eq.(38)Step 4. Calculate $\tau_{or,j}$ given by Eq.(28)

Where

Func_A(j)Calculate for $i=1,2,\dots,n_j$

$$\omega_i \{\dot{\mathbf{q}}_o\} = {}^i\mathbf{R}_{i-1} \omega_{i-1} \{\dot{\mathbf{q}}_o\} + \mathbf{z}_i \dot{q}_{o,i}$$

$$\omega_i \{\dot{\mathbf{q}}_{or}\} = {}^i\mathbf{R}_{i-1} \omega_{i-1} \{\dot{\mathbf{q}}_{or}\} + \mathbf{z}_i \dot{q}_{or,i}$$

 α_i (given by Eq.(16)) β_i (given by Eq.(17)) Γ_i (given by Eq.(21))

$$\Phi_i = \Gamma_i + [\alpha_i \times]$$

 Ω_i (given by Eq.(27))Calculate for $k = \text{next branches}$ Func_A(k)Func_B(j,i)Calculate for $k=i,i+1,\dots,n_j$

$$\mathbf{h}_{i+1}^k = {}^k\mathbf{R}_{k-1} (\mathbf{h}_{i+1}^{k-1} + {}^{k-1}\mathbf{p}_k)$$

$${}^k\mu_i = {}^k\mathbf{R}_{k-1} {}^{k-1}\mu_i$$

$${}^k\gamma_i = {}^k\mu_i \times \mathbf{h}_{i+1}^k$$

 y_{ik} (given by Eq.(37))if $i = \text{connected link then}$ Calculate for $k = \text{next branches}$ Func_B($k,1$)

else

Func_B($j,i+1$)

$$\tau_c = (\mathbf{S}^T)^{-1} \mathbf{J}^T \tau_o \quad (42)$$

と与えられる。ここで、 \mathbf{S}, \mathbf{J} は

$$\mathbf{S} = \frac{\partial \mathbf{q}_c}{\partial \mathbf{q}} \in R^{n_c \times n_c} \quad (43)$$

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{q}_o}{\partial \mathbf{q}} \in R^{n_o \times n_c} \quad (44)$$

である。平行リンク機構など、一般的に採用される閉リンク機構では、 \mathbf{S}, \mathbf{J} は簡単な行列となるため、計算量は少ないといえる。例えば、図 2 に示すロボットの場合、 \mathbf{S}, \mathbf{J} は

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (46)$$

となり、計算量は適応制御計算アルゴリズムに比べて少ない。

b. 最小動力学パラメータ オリジナルの動力学パラメータ(ODP)は、運動方程式を表すのに冗長であるので、最小限のパラメータ(MDP)を使用することで計算量の低減を図る。閉リンク構造のMDPは数式処理による解析法⁽¹²⁾によって求めることができる。実験で使った図 2 に示す平行リンク機構を含む 6 自由度ロボットの場、×印で仮想的に切断し肢 3 個からなる木構造ロボットを考えると、ODP は 80 個だが、MDP は数式解析により 39 個となる。この MDP を ODP の代わりに使用し、零要素の計算を省くことで適応制御計算をより効率的に行うことができる。

c. 計算量の評価 表 2 に図 2 に示すロボットを対象に、ベクトルの外積、回転行列とベクトルの積等の計算量の Walker⁽⁶⁾のアルゴリズムと上記のアルゴリズムの比較を示す。評価は文献 7 に基づき行った。

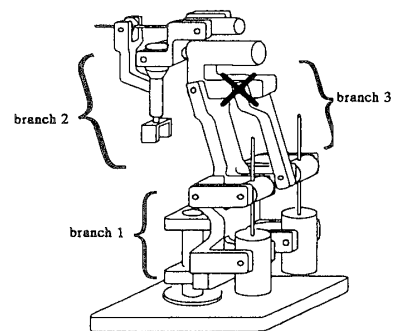


Fig.2 6 D.O.F robot with parallel-link mechanism

Table 2 Number of computations

	Parameter	Multi.	Addi.
Walker	ODP	2539	1959
New Algorithm	ODP	2073	1374
	MDP	1494	1013

ともに ODP を使用した場合, Walker の方法に比べて乗算で約 20%, 加算で約 30% の計算量を低減できる. さらに提案した方法に MDP を使用した場合では, 乗算で約 40%, 加算で約 50% の計算量の低減が可能となる.

4. 実験

4.1 実験システム 実験には図 2 に示すロボットを使用した. このロボットは図 3 のような構造になっており, その座標変換パラメータを表 3 に示す. ここでロボットの駆動源はすべて DC サーボモータであり, 関節 $1_1, 1_2, 2_2, 4_2$ 用減速機構はボールネジ送り機構とスライド機構, 関節 $3_2, 5_2$ 用はハーモニックドライブシステムによって構成されている. また, 適応制御をリアルタイムで行うために 32bit 浮動小数点 DSP(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図った.

4.2 実験結果 実験では, 1)PD 制御, 2)PID 制御, 3)シリアルリンクロボットと見なした適応制御, 4)閉リンク機構の適応制御の 4 種類の制御法で軌道誤差の比較を行った. 適応制御の未知パラメータとして, 3)はシリアルリンクロボットの, 4)は閉リンクロボット

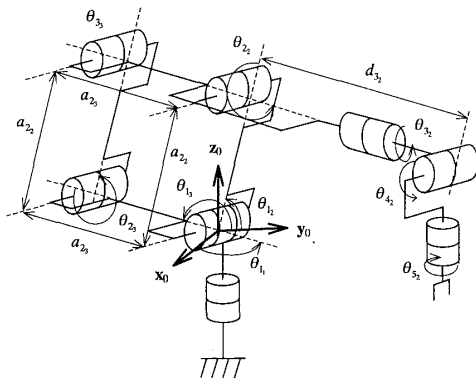


Fig.3 Structure of 6 D.O.F robot

Table 3 Kinematic parameters

Branch	i	Joint j	a_{ji} [mm]	α_{ji} [deg]	d_{ji} [mm]	θ_{ji} [deg]
Branch 1	1	1	0.0	0	213.0	θ_{1_1}
Branch 2	1	1	-11.0	90	0.0	θ_{1_2}
	2	2	103.9	0	0.0	θ_{2_2}
	3	3	42.0	90	79.6	θ_{3_2}
	4	4	0.0	-90	0.0	θ_{4_2}
	5	5	0.0	90	0.0	θ_{5_2}
Branch 3	1	1	-11.0	90	0.0	θ_{1_3}
	2	2	-40.0	0	0.0	θ_{2_3}

の最小動力学パラメータを使用した. 実験条件として, サンプルング時間は 1.85[ms]とした. 各ゲインは, PD, PID 制御では比例ゲイン $K_p = \text{diag}[1.45, 0.27, 0.31, 0.25, 0.078, 0.05]$, 微分ゲイン $K_v = \text{diag}[20.3, 3.78, 4.34, 1.5, 1.092, 0.3]$, 積分ゲイン $K_i = \text{diag}[0.5, 0.5, 0.5, 0.3, 0.5, 0.3]$, 適応制御では試行錯誤で良好な応答となるように $K_D = \text{diag}[12.5, 8.5, 5.5, 0.1, 0.95, 0.005, 0.5, 0.05]$, $\Lambda = [12, 7, 10, 14, 16, 60, 10, 1]$ と設定した. また, 初期・終端値を $q_{\text{START}} = [0, 60, 30, 0, -90, 0]^T$, $q_{\text{END}} = [30, 80, 50, 90, -80, -45]^T$ [deg] とし, 0.8[s]で移動させた. ここで, 2 点間を時間の 5 次多項式で補間し軌道を生成した. 適応制御の場合, 試行回数 1 回目は推定値すべてを 0 とし, 2 回目以降は前回の推定値の最終値を使用している. 図中の(*)は適応制御試行回数を示す.

図 4 は手先に負荷をつけない場合の肢 2 の第 2 関節の軌道を表している. また, 図 5(a),(b)は手先に負荷をつけない場合, 図 5(c)は負荷 430[g]を取り付けた場合における全関節の軌道誤差ノルムを表している. 図 5(a)から閉リンク機構の適応制御 1 回目の最大誤差は, PD 制御に比べて 22%, シリアルリンク機構適応制御 1 回目と比べて 62%となっている. また, 図 5(b)から制御 10 回目ではシリアルリンク機構適応制御に比べて 68%となった. さらに図 5(c)から手先に負荷を取り付けた場合, 閉リンク機構適応制御 1 回目の最大誤差は, PD 制御の 21%, PID 制御の 33%, シリアルリンク機構適応制御の 61%となった.

今回使用したロボットの平行リンク機構部分は, リンクがあまり大きくなく, 平行リンクの影響は少ないと思われたが, 図 5(b)からも明らかなようにロボットをシリアルリンクと仮定した場合に比べて, 誤差ノルムは大きく減少した. このことから, 本アルゴリズムが, 閉リンク機構を有するロボットに十分有効であるといえる.

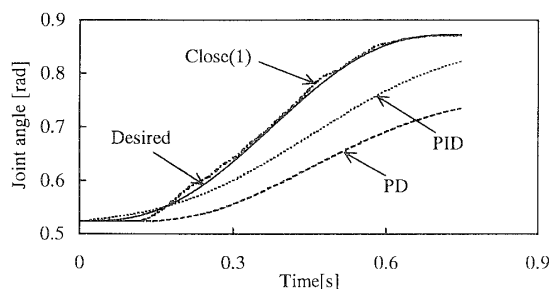
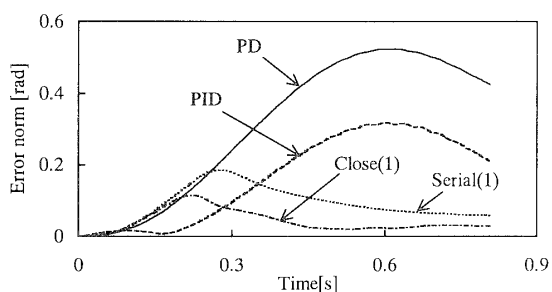
5. 結言

本論文では閉リンク機構を含むロボットにおける効率的な適応制御計算アルゴリズムを提案した. このアルゴリズムは, 閉リンク機構を本構造開リンク機構と仮定し, 再帰関数呼出しを利用して計算の効率化をはかった. さらに, 最小動力学パラメータを導入することで計算量を低減できる. また, DSP 制御システムに本アルゴリズムを実装し, 平行リンク機構を有する 6 自由度ロボットによる実験を行った. この 6 自由度ロボットの閉リンク機構部分は, 大きな影響を及ぼさないと想定されたが, 本アルゴリズムを使用することで

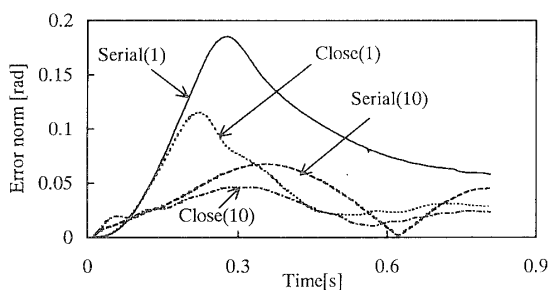
誤差ノルムを低減することができた。しかしゲインの調整は試行錯誤的であり、ゲイン調整が困難であった。今後、ゲインの自動調整の研究を行う計画である。

参考文献

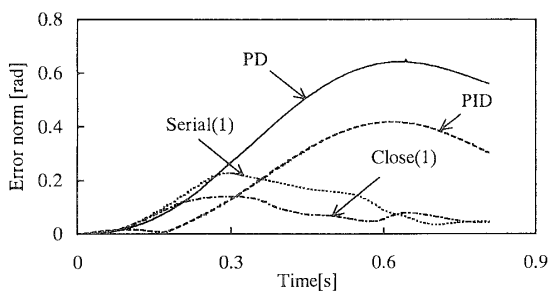
- (1) J.J.Craig, P.Hsu and S.Sastry: Adaptive Control of Mechanical Manipulators, IEEE Conf. on Robotics and Automation, 190/195 (1986)
- (2) J.J.E.Slotine and W.Li: On the Adaptive Control of Robot Manipulators, The Int. Jour. of Robotics Research, 6-3, 50/59 (1987)
- (3) 大須賀: 非線形メカニカルシステムの適応制御, 計測自動制御学会論文集, 第 22 巻, 第 7 号, 756/762 (1986)
- (4) H.Berghuis, R.Ortega and H.Nijmeijer: Robust Adaptive Controller for Robot Manipulators, IEEE Conf. on Robotics and Automation, 1876/1881, (1992)
- (5) G.Niemeyer and J.J.E.Slotine: Performance in Adaptive Manipulator Control, Proc. 27th Conf. Decision and Control, 1585/1591 (1988)
- (6) M.W.Walker: An Efficient Algorithm for the Adaptive Control of a Manipulator, 5th IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 682/690 (1988)
- (7) H.Kawasaki, T.Bito and K.Kanzaki: An Efficient Algorithm for the Model-Based Adaptive Control of Robotic Manipulators", IEEE Trans. on Robotics and Automation, 12-3, 496/501 (1996)
- (8) L.L.Whitecomb, A.A.Rizzi and D.E.Koditschek: Comparative Experiments With a New Adaptive Controller for Robot Arms, IEEE Trans. on Robotics and Automation, 9-1, 59/61, (1993)
- (9) 中村: パラレルメカニズムの動力学, 日本ロボット学会誌, 第 10 巻, 第 6 号, 709/714 (1992)
- (10) 川崎, 神崎: ロボット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, 第 11 巻, 第 1 号, 100/110 (1993)
- (11) 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, 第 28 巻, 第 12 号, 1444/1450 (1993)
- (12) 川崎, 村田, 神崎: 数式処理による閉リンクマニピュレータの最小動力学パラメータの解析法, 日本ロボット学会誌, 第 13 巻, 第 4 号, 558/564 (1995)

Fig.4 Response of joint 2₂ without load

(a) PD, PID, Serial, and Close without load



(b) Serial and Close without load



(c) PD, PID, Serial, and Close with load

Fig.5 Error norms