

産業用ロボットの操作性と軌道制御 (第3報)

和田 憲造*・香川 浩之**・早野 延男*

Manipulation Ability and Trajectory Control of an Industrial Robot (3rd Report)

Kenzou WADA, Hiroyuki KAGAWA and Nobuo HAYANO

Abstract

This paper presents an application of discrete time model reference adaptive control (MRAC) to a mechanical manipulator.

Generally, manipulators are non-linear time varying system and their parameters usually change along the trajectory of the position of joints and time. Therefore we composed the model reference adaptive control system (MRACS) to make the manipulator joints follow a desired trajectory.

Model decoupled by non-linear state feedback is used as model of manipulator.

Through the simulation experiments, we could obtain a good response (trajectory) compared with the reference trajectory by using the adaptive control scheme, and it was shown that the adaptive controller can make the response of the manipulator insensitive to payload and configuration changes.

As a result, the availability of the MRACS was confirmed.

1. 序 論

産業用ロボットは、多入力多出力の非線形時変システムである。このロボットを高速・高精度で動作させようとする、ロボットの姿勢変化・負荷変動等の外乱によるシステムのパラメータ（慣性項・重力項・コリオリ力・求心力等）の変動により、通常の制御方式では良好な応答を得ることは難しい。また、ロボットの自由度が増すにつれて各軸は互いに干渉し合い、制御系は複雑なものとなる。そこで前報では、多変数制御の一手法である非干渉制御の適用について検討を行なった。多入力多出力システムを1入力1出力のサブシステムに分割して各々のサブシステムについてソフトウェアサーボ系を構成し、シミュレーション実験を

行なった結果、良好な応答を得ることができた。しかし負荷変動などの外乱に対しては、本制御方式では十分な制御性能が得られない場合がある。

したがって本報では、このような場合に対してパラメータが未知あるいは動作中に変動するプロセスに対して有効とされているモデル規範形適応制御(MRAC: Model Reference Adaptive Control)の適用について検討を行なった。ロボットの適応制御については、3自由度関節形ロボットに適用した富塚らの報告がある⁵⁾。この場合のマニピュレータのモデルとしては、運動方程式を積分した形のものが用いられている。

本適応制御システムでは、マニピュレータのモデルとして、前報において求められた非線形状態フィードバックによる非干渉化されたモデルを用いて、各軸に独立した適応制御システムを構成する。したがってロボットマニピュレータへの入力、ロボットマニピュレータの出力が非干渉化モデルの出力に一致するように合成された入力となる。この適応制御システムを用

*生産機械工学科

**大学院生産機械工学専攻

いてシミュレーション実験を行なうことにより、ロボットシステムに対する適応制御方式の適用について検討を行なった。

2. ムーブマスタIIのシステム

本研究で対象とするムーブマスタII (三菱電機製) は、4リンクで自由度が5のマニピュレータであるが、ソフトウェアサーボ系の適用性を調べるため、簡単のために、前報と同様に2リンクについて検討を行なった。ここで2リンクというのは、4つのリンクのうちで第3、4番目のリンクを固定し、見かけ上第1、2番目のリンクの動作のみを考えたものである。

サンプリング周期を τ とするとシステムの離散値系状態推移方程式は次式となる¹⁾。

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Px(k) + Qu^*(k) + Rg(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (1)$$

ただし

$$P = e^{A\tau}, \quad Q = \int_0^\tau e^{A\lambda} B d\lambda, \quad R = \int_0^\tau e^{A\lambda} D d\lambda \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x^T &= [x_1, \dot{x}_1, x_2, \dot{x}_2] \\ &= [\theta_1, \dot{\theta}_1, \theta_2, \dot{\theta}_2]: \text{状態変数ベクトル} \end{aligned}$$

$u^{*T} = [u_1, u_2]:$ マニピュレータの出力が非干渉化されたシステムに一致するように合成された入力ベクトル

$$g^T = [g_1, g_2]: \text{重力ベクトル}$$

ここで

$$\begin{aligned} H &= \det \{A(q) + J\}, \quad J = \text{diag}(J_{11}) \\ J_{11} &= J_1/r_1^2, \quad b_{ii} = (b_{0i} + K_{ti}K_{ei}/R_{ai})/r_i^2 \\ k_{ii} &= K_{ti}/(R_{ai}r_i) \end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -b_{11}(A_{11} + J_{11})/H & 0 & b_{12}A_{12}/H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & b_{21}A_{21}/H & 0 & -b_{22}(A_{22} + J_{22})/H \end{bmatrix}$$

$$B = 1/H \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_{11}(A_{11} + J_{11}) & -k_{12}A_{12} \\ 0 & 0 \\ -k_{21}A_{21} & k_{22}(A_{22} + J_{22}) \end{bmatrix}$$

$$D = -1/H \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ A_{11} + J_{11} & -A_{12} \\ 0 & 0 \\ -A_{21} & A_{22} + J_{22} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

ただし添え字 i, j は各々リンク i, j を表わす。各々の係数は以下の通りである。

$A(q)$: 慣性項

J_i : モータのシャフトと減速機からなる慣性モーメント

r_i : 減速比

b_{0i} : 減速機の粘性摩擦係数

K_{ti} : トルク定数

K_{ei} : 誘起電圧定数

R_{ai} : 電機子回路の抵抗

A_{ii} : 関節 i の有効慣性

A_{ij} : 関節 i と j の間の相互慣性

上式のシステムを非干渉化し²⁾、任意定数をシステムが簡単になるように選択するとシステムは次式のように2次形で表わされる。

$$y(k) = \frac{\tau z e^{-\tau}}{z^2 - 2e^{-\tau}z + e^{-2\tau}} u(k) \quad (3)$$

上式が非干渉化されたマニピュレータのモデルとなる。

3. モデル規範形適応制御システム

3.1 モデル規範形適応制御システムのアルゴリズム

前述したように、ここではロボットマニピュレータへの合成された入力 $u^*(k)$ を含めたロボットマニピュレータをロボットシステム (= 非干渉化されたモデル) と考えると、式(3)よりロボットのシステムは一般的に、次式のARMAモデルで表わすことができる。

$$y(k) = \frac{z^{-d}B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(k) \quad (4)$$

$$d > 0, \quad y(0) \neq 0$$

ただし

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n} \quad (5)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-m} \quad (6)$$

$$b_0 \neq 0$$

d : むだ時間

$u(k), y(k)$: ロボットシステムの入出力

また $B(z^{-1})$ の多項式の極はすべて単位円内に存在するものと仮定する。

ここでロボットの出力 $y(k)$ は次式で表わされる規範モデルの出力 $y_M(k)$ に追従するものとする。

$$y_M(k) = \frac{z^{-d}B_M(z^{-1})}{A_M(z^{-1})} u_M(k) \quad (7)$$

ただし

$$A_M(z^{-1}) = 1 + a_{M1}z^{-1} + \dots + a_{Mn}z^{-n} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} B_M(z^{-1}) &= b_{M0} + b_{M1}z^{-1} + \dots + b_{Mm}z^{-m} \\ b_{M0} &\neq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$u_M(k), y_M(k)$: 規範入出力

制御目的はロボットの出力と規範モデルの出力誤差が $D(z^{-1})$ のダイナミクスを満足しながら零に収束することである。すなわち次式を満足する。

$$\begin{aligned} D(z^{-1}) [y(k+d) - y_M(k+d)] \\ = D(z^{-1}) e(k+d) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

ただし、 $D(z^{-1})$ は次式で表わされる安定な多項式である。

$$D(z^{-1}) = 1 + d_1z^{-1} + \dots + d_nz^{-n} \quad (11)$$

式(4)より式(10)は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} D(z^{-1})e(k+d) \\ = B(z^{-1})u(k) + [D(z^{-1}) - A(z^{-1})] \\ \times y(k+d) - D(z^{-1})y_M(k+d) \end{aligned} \quad (12)$$

式(10)が成立するためには、式(12)の右辺が0となる必要がある。すなわち

$$\begin{aligned} B(z^{-1})u(k) + [D(z^{-1}) - A(z^{-1})] y(k+d) \\ - D(z^{-1})y_M(k+d) \\ = b_0u(k) + P_0^T\Phi_0(k) - D(z^{-1})y_M(k+d) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

ただし

$$P_0^T = [b_1, \dots, b_m, d_1 - a_1, \dots, d_n - a_n] \quad (14)$$

$$\Phi_0^T(k) = [u(k-1), \dots, u(k-m), y(k), \dots, y(k-n+d)] \quad (15)$$

これより制御入力 $u(k)$ は式(13)から次式のように表わせる。

$$u(k) = \frac{D(z^{-1})y_M(k+d) - P_0^T\Phi_0(k)}{b_0(k)} \quad (16)$$

実行に際してはロボットのパラメータは未知であり、また動作中に変動するため、式(16)の制御則をそのまま実行することは不可能である。そこで上式のパラメータを推定値に置き換えた次の制御則を用いる。

$$u(k) = \frac{D(z^{-1})y_M(k+d) - \hat{P}_0^T(k)\Phi_0(k)}{b_0(k)} \quad (17)$$

ここでの設計目的は次式を補償する適応機構を見つけることである。

$$\lim_{k \rightarrow \infty} D(z^{-1})e(k+d) = 0 \quad (18)$$

このときの適応アルゴリズムは次式で与えられる^{4),6)}。

$$\hat{P}(k) = \hat{P}(k-1) + F(k-1)\Phi(k-1)e^*(k) \quad (19)$$

ただし、適応ゲインは次式で表わされる。

$$\begin{aligned} F(k) &= \frac{1}{\lambda_1(k)} \left[F(k-1) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\lambda_2(k)F(k-1)\Phi(k-1)\Phi^T(k-1)F(k-1)}{\lambda_1(k) + \lambda_2(k)\Phi^T(k-1)F(k-1)\Phi(k-1)} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

$$0 < \lambda_1(k) < 1, \quad 0 < \lambda_2(k) < 2, \quad F(0) > 0$$

ここで、式(19)における $e^*(k)$ は適応誤差信号と呼ばれるものであり次式で示される。

$$\begin{aligned} e^*(k) &= \frac{D(z^{-1})y(k) - \hat{P}^T(k-1)\Phi(k-1)}{1 + \Phi^T(k-1)F(k-1)\Phi(k-1)} \\ &= \frac{\hat{e}(k)}{1 + \Phi(k-1)F(k-1)\Phi(k-1)} \end{aligned} \quad (21)$$

また適応アルゴリズムとしては、規範モデルのパラメータが変動する場合でも高い性能が得られるように、次式で示される適応ゲインのトレース一定アルゴリズムを用いる。

$$\begin{aligned} \text{tr}F(0) &= \frac{1}{\lambda_1(k)} \text{tr} \left[F(k-1) \right. \\ &\quad \left. - \frac{F(k-1)\Phi(k-1)\Phi^T(k-1)F(k-1)}{\alpha + \lambda_2(k)\Phi^T(k-1)F(k-1)\Phi(k-1)} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

$\alpha = \lambda_1(k)/\lambda_2(k)$ の値をあらかじめ指定し、上式が成立するように $\lambda_1(k)$ を各時点で選ぶ。

3.2 ムーブマスタIIの適応制御システム

本適応制御システムの概略のブロック線図をFig. 1に示す。ここでは、 $u^*(k)$ の合成部とロボットマニピュレータをまとめたものをロボットシステム (図中破線で囲まれた部分) とし、これを制御対象と考えて制御系を構成する。

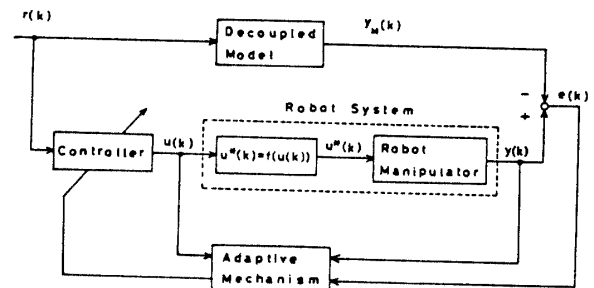


Fig. 1 Block diagram of manipulator with MRACS

マニピュレータとしては2リンクマニピュレータを対象としていることから、ロボットシステムは式(4)において $n=2, m=0, d=1$ となり次式で表わされる。

$$y(k) = \frac{b_0z^{-1}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}} u(k) \quad (23)$$

式(23)のモデルのパラメータの値はサンプリング周期 $\tau=0.01\text{sec}$ の場合次のようになる。

$$a_1 = -1.98, \quad a_2 = 0.98, \quad b_0 = 9.9 \times 10^{-3}$$

したがって規範モデルを次式のように与え、 $u_M(k)$ をステップ入力としたときのモデルの出力 $y_M(k)$ を規範応答とした。

$$y_M(k) = \frac{9.9 \times 10^{-3} z^{-1}}{1 - 1.98z^{-1} + 0.98z^{-2}} u_M(k) \quad (24)$$

また式(11)より $D(z^{-1})$ は次式となる。

$$D(z^{-1}) = 1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2}$$

ここで、 $r_0(k) = d_1 - a_1(k)$ 、 $r_1(k) = d_2 - a_2(k)$ とすると推定パラメータベクトル $P(k)$ およびロボットシステムの入出力ベクトル $\Phi(k)$ は次のように表わせる。

推定パラメータベクトル

$$\begin{aligned} \hat{P}^T(k) &= [\hat{b}_0(k), \hat{P}_0^T(k)] \\ &= [\hat{b}_0(k), \hat{r}_0(k), \hat{r}_1(k)] \end{aligned}$$

ロボット入出力ベクトル

$$\begin{aligned} \Phi^T(k) &= [u(k), \Phi_0^T(k)] \\ &= [u(k), y(k), y(k-1)] \end{aligned}$$

また適応ゲイン $F(k)$ は 3×3 の正定対角マトリクスである。このときのシステム全体のブロック線図を Fig. 2 に示す。

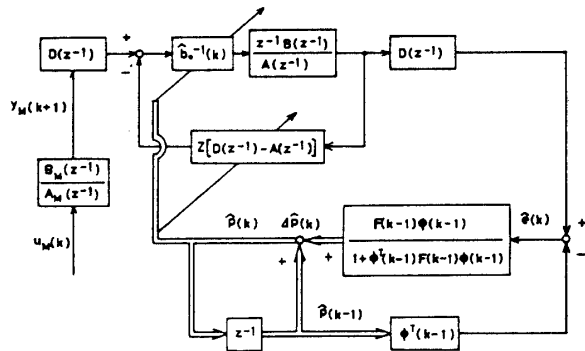


Fig. 2 Block diagram of MRACS

4. シミュレーション結果および考察

4.1 アルゴリズムの検証

はじめに適用アルゴリズムの有効性を調べるため、規範応答として矩形波を与え、これに対する応答について調べた。矩形波として0.8sec毎に ± 1 radのステップ変化を与えた。

$D(z^{-1})$ は $D(z^{-1}) = (1 - 0.5z^{-1})^2$ とした。したがって $d_1 = -1$ 、 $d_2 = 0.25$ となる。

パラメータの初期値は $b_0 = 9.9 \times 10^{-3}$ とし、他はすべて0とした。また適応ゲインの初期値は $F(0) = \alpha I$ (I は単位行列、 $\alpha > 0$) とし、 $\alpha = 0.1$ に設定した。このときの応答波形を Fig. 3 に示す。応答の初期においてかなり振動的となっているが、その後は規範応答にかなり良く追従しており、適用アルゴリズムが有効に働いていることがわかる。

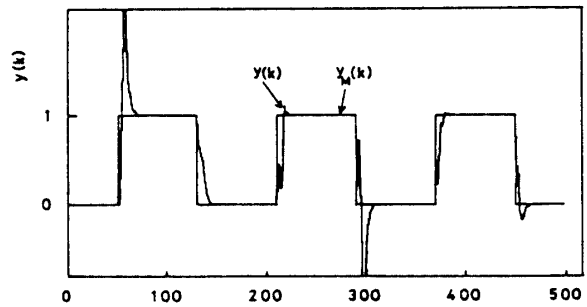


Fig. 3 Simulation result of MRACS

4.2 負荷変動に対する応答

まず適応制御を行なう前にロボットマニピュレータの負荷変動に対する応答について調べた。ロボットシステムの入力 $u(k)$ をステップ状に変化させ、また負荷変動としてロボットの先端に負荷を把握する代わりに、第4番目のリンクの質量を変化させた。リンクの質量変化としての3つの場合： $m = 0\text{kg}$ 、 1.768kg 、 2.5kg (1.768kg はリンク4の計算値) に対する応答を Fig. 4 に示す。

Fig. 4においてリンク1の応答は、負荷変動で一番大きく変動する重力項の影響が表れないため、3つの応答はほとんど一致したものが得られ一本の実線で表わされている。リンク2については負荷が軽減されれば、応答は速くなり最終値も大きくなっている。また、負荷が増大すれば応答は鈍くなり応答波形（リンクの位置）が下がり、負荷変動の影響を大きく受ける。

つぎに適応制御を行なった場合のシミュレーション結果を Fig. 5~9 に示す。Fig. 5 は各リンクの位置の応答を示しており、リンク1はもとよりリンク2についても3つの応答が良く一致していることがわかり、規範応答によく追従している。Fig. 6 はこのときの入力 $u(k)$ を示しており、ロボットマニピュレータを規範応答に追従させるための入力 $u(k)$ は負荷変動に対して異なり、負荷が増すにつれて増大している。 $u(k)$ から合成されるロボットマニピュレータへの入力 $u^*(k)$ は、リンク2については $u(k)$ と同様に負荷が増すに連れて増大している。リンク1については、前述のように重力項の影響が少ないためあまり変化しない。また、リンク1、2とも $u^*(k)$ の値は時間の経過とともに一定となる。Fig. 7 はこのときのロボットマニピュレータの速度を表わしている。速度はなめらかに変化し最終的に零になり、リンクの位置は設定値に落ちつく。また Fig. 8 にパラメータの変化を、Fig. 9 に適応ゲインの変化の様子を示す。両者の値は適応動作が開始してすぐにはほぼ一定値に収束しており、適応アルゴリズムが有効に働いていることがわかる。

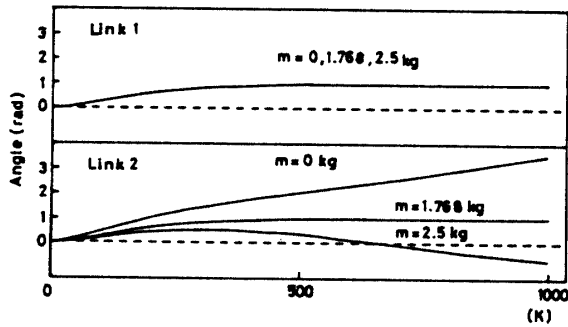


Fig. 4 Responses of the position of links

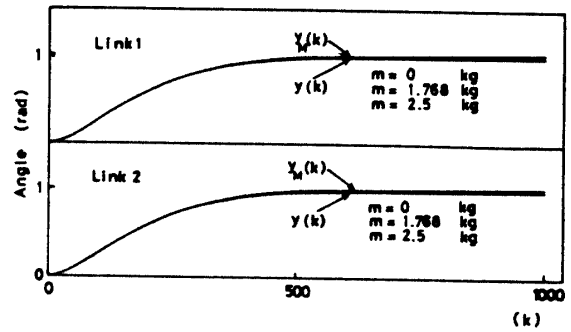


Fig. 5 Responses of the position of links

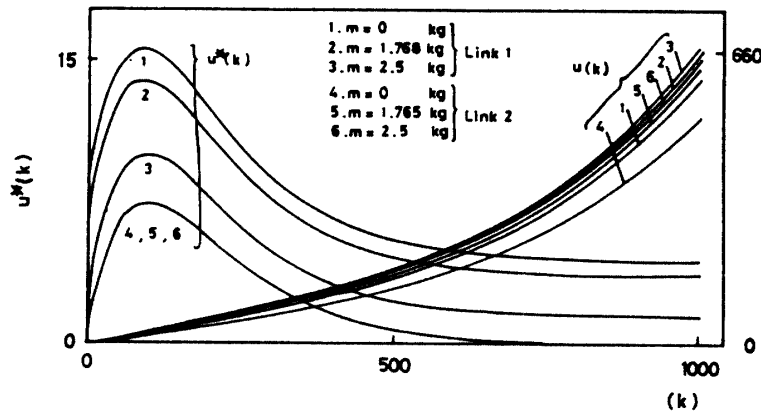


Fig. 6 Manipulated variable $u(k)$ and synthetic input $u^*(k)$

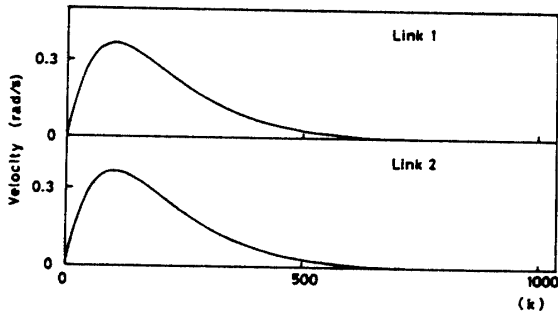


Fig. 7 Responses of the velocity of links

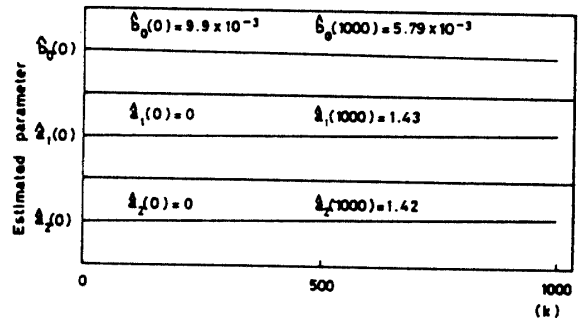


Fig. 8 Behaviour of estimated parameters with time

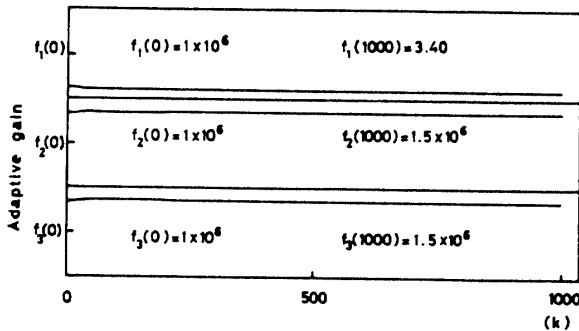


Fig. 9 Behaviour of adaptive gains with time

5. 結論

非干渉化されたシステムを用いることにより、ロボットマニピュレータのモデルが簡単なARMAモデルで表わすことができ、制御系の構成が非常に容易に行えた。また非線形多変数時変システムである産業用ロボット(ムーブマスタII)に適応制御を適用した結果、負荷変動の外乱に対して良好な応答が得られ適応制御の有効性が示された。

参 考 文 献

- 1) 和田憲造, 香川浩之, 早野延男: “産業用ロボットの操作性と軌道制御 (第一報)”, 山口大学工学部研究報告, Vol. 37, No2, pp.221-232, 1987
- 2) 和田憲造, 香川浩之, 三好慎一郎, 早野延男: “産業用ロボットの操作性と軌道制御 (第二報)”, 山口大学工学部研究報告, Vol. 38, No1, pp.29-34, 1987
- 3) 富塚誠義: “基礎適応制御理論とロボット制御への応用—I”, 日本ロボット学会誌, Vol. 3, No5, pp.473-482, 1985
- 4) 富塚誠義: “基礎適応制御理論とロボット制御への応用—II”, 日本ロボット学会誌, Vol. 3, No6, pp.610-617, 1985
- 5) B. Horowitz and M. Tomizuka: “Discrete Time Model Reference Adaptive Control of Mechanical Manipulator”, Computers in Engineering, 1982, Vol. 2, Robots and Robotics, ASME, New York, pp.107-112, 1982
- 6) I.D.ランダウ, 富塚誠義: “適応制御システムの理論と実際”, オーム社, p.210, 1981
(昭和62年10月15日受理)