油圧モータ・負荷系へのニューラルネットの適用*

(第3報, ディザーによる定常偏差の改善)

加藤 博司^{*1}, 西海 孝夫^{*1}, 小波 俊文朗^{*1}

Application of the Neural Network for a Hydraulic Motor/Load System (3rd Report, An Improvement of Steady State Error Using Dither)

Hiroshi KATOH, Takao NISHIUMI^{*2} and Shizurou KONAMI

^{*2} Department of Mechanical Systems Engineering, School of Systems Engineering, National Defense Academy,
1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka-shi, Kanagawa, 239-8686 Japan

The purpose of this study is to develop a precise angular position control system of the hydraulic motor with undesirable dead zone using a Neural Network. In the previous works, we showed that the state feedback Neural Network control has a good effect on improving position control accuracy and robustness, and then, it was confirmed that the application of the PWM signal to the Neural Network position control system attains a very small angular positioning. On the other hand, it is well known that one method for eliminating the dead zone characteristics is to superimpose the dither signal into the input current of the servovalve. In this study, the effective method using a dither signal together with the on-line training of the Neural Network is proposed in order to achieve precise positioning performance. Amplitude and frequency of the dither signal are examined by analyzing a linearized model of the hydraulic motor load system. From the computer simulation and experiments, it is recognized that the dither effect improve the steady performance of Neural Network based position control system.

Key Words: Hydraulic Actuator, Positioning, Neural Network, Motion Control, Hydraulic Motor, Dither, Dead Zone

1. 緒 言

近年, 油圧サーボ系のモーションコントロールにおいて, 油圧モータを位置決め制御に用いる研究が行われている⁽¹⁾⁽²⁾. しかし, 油圧モータには摩擦トルクや漏れ特性に起因する不感帯特性が存在し, 起動時や低速時の円滑な回転が困難⁽³⁾であることから, その高精度な角度制御は一般に容易でないことが知られている.

筆者らは, このような不感帯特性を持つ油圧モータ・負荷系の角度制御に, 状態フィードバック特性を写像したニューラルネット補償器を適用する研究を進めている. 既報⁽⁴⁾⁽⁵⁾では, この状態フィードバックニューラルネット制御系(以下, NN 制御系と呼ぶ)へ比較的大きな設定入力を与えた場合について, その動的特性と制御精度の改善およびロバスト性に対する有効

性を明らかにし, さらに微小な動作信号に対してはパルス幅変調(PWM)信号で油圧モータを駆動する手法により角度設定制御の分解能が著しく改善されることを示した. しかし, このPWM方式によるNN制御系では, 不感帯領域を越える動作信号に対しては通常の制御信号に切り換えて制御を行うため, 制御系の構成がやや複雑になる.

一方, 機械システムの持つ摩擦特性の影響を低減させる簡易な方法として, 入力信号にディザを重ね合わせる方法が多く用いられる. フルードパワーシステムにおいてもサーボ弁へのディザ適用基準の検討など, さまざまな研究^{(6)~(8)}があるが, NN制御系に対するディザ効果を検討した研究は見当たらない.

本研究は, 定常偏差の改善を目的としてNN制御系にディザを適用し, その制御性能に与える影響について検討したものである. 本報では, まず不感帯特性を記述関数で近似して線形化した油圧モータ・負荷系の信号伝達状況に基づき, 適正なディザの振幅と周波数を解析的に決定する方法を示す. さらに, NN制

* 原稿受付 2002年6月26日.

^{*1} 正員, 防衛大学校システム工学群(〒239-8686 横須賀市志水1-10-20).

E-mail: nishiumi@nda.ac.jp

御系の角度位置決め精度の改善に対するディザの有効性をシミュレーションと実験により検証する。

御系と呼ぶ) に対する適正なディザ信号の選定基準を検討し、これを NN 制御系に適用する。

おもな記号

A_d	: ディザ信号の振幅
B_v	: 回転粘性抵抗係数
D_m	: 油圧モータの押しのけ容積
Δd	: ディザ信号
f_d	: ディザ信号の周波数($=\omega_d/2\pi$)
J_m	: 負荷の慣性モーメント
K_f	: サーボ弁の流量ゲイン
p_1, p_2	: 油圧モータの上下流圧力
P_L	: 油圧モータの上下流差圧($P_L=p_1-p_2$)
P_s	: サーボ弁供給圧力
q_1, q_2	: 油圧モータ流入出流量
R_e, R_i	: 油圧モータの外部および内部漏れ係数
T	: サンプリング周期
T_f	: 摩擦トルク (添字 s, d はそれぞれ起動トルク, 動摩擦トルクを表す)
v_e	: サーボ増幅器入力電圧
V_o	: サーボ弁と油圧モータ間の片側管路容積
β	: 作動油の体積弾性係数
η_v	: 油圧モータの容積効率
θ_r	: 規範モデル信号
θ_R	: 設定角度信号
τ_v	: サーボ弁の時定数
ω, θ	: 油圧モータの角速度および角度

添字 ss は定常 (平衡) 状態を表す記号とする。

2. 状態フィードバック角度制御系におけるディザ信号の選定

本 NN 制御系において、状態フィードバックゲインは油圧モータ・負荷系のノミナルモデルに対して設計され、この特性をニューラルネット (以下、NN と呼ぶ) へオフライン学習によって写像する⁽⁴⁾。本研究では、この状態フィードバック角度制御系 (以下、SF 制

2.1 ディザ信号と不感帯特性の関係 油圧モータ・負荷系の基礎式は次式(1)で表される⁽⁴⁾。

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= K_f \cdot v_e \sqrt{P_s - p_1} \\ &= D_m \omega + \frac{V_o}{\beta} \frac{dp_1}{dt} + \frac{p_1 - p_2}{R_i} + \frac{p_1}{R_e} \\ q_2 &= K_f \cdot v_e \sqrt{p_2} \\ &= D_m \omega - \frac{V_o}{\beta} \frac{dp_2}{dt} + \frac{p_1 - p_2}{R_i} - \frac{p_2}{R_e} \\ D_m (p_1 - p_2) &= J_m \frac{d\omega}{dt} + T_f + B_v \omega \\ T_f &= \begin{cases} \text{sign}(P_L) T_{fs} & (\omega = 0) \\ \text{sign}(\omega) T_{fd} & (\omega \neq 0) \end{cases} \end{aligned} \right\} (1)$$

さらに、式(1)において微小変化を仮定して線形化すると、

$$\left. \begin{aligned} \Delta q_m(s) &= k_1 \Delta v_e(s) - k_2 \Delta P_L(s) \\ \Delta q_m(s) &= D_m \Delta \omega(s) + \left(\frac{V_o}{2\beta} s + \frac{1}{R_m} \right) \Delta P_L(s) \\ D_m \Delta P_L(s) &= (J_m s + B_v) \Delta \omega(s) + T_f \\ k_1 &= D_m \omega_{ss} / (\eta_v v_{ess}) \approx D_m \omega_{ss} / v_{ess}, \\ k_2 &= D_m \omega_{ss} / \{2\eta_v (P_s - P_{Lss})\} \approx D_m \omega_{ss} / (2P_s), \\ q_m &= (q_1 + q_2)/2, \quad 1/R_m = 1/R_i + 1/(2R_e) \end{aligned} \right\} (2)$$

である。

この式(2)をプラントの数学モデルとした SF 制御系を図1に示す。同図内の伝達関数 $G_v(s)$, $G_1(s)$, $G_2(s)$, $G_3(s)$ は次式(3)で与えられ、状態変数を $\mathbf{x} = [\theta \ \omega \ \dot{\omega}]^T$ とすれば、状態フィードバックゲインは $\mathbf{H} = [1 \ K_\omega / K_\theta \ K_\alpha / K_\theta]$ である。

$$\left. \begin{aligned} G_v(s) &= 1/(\tau_v s + 1), \quad G_1(s) = K_1/(\tau_1 s + 1), \\ G_2(s) &= K_2/(\tau_2 s + 1), \quad G_3(s) = K_3/(\tau_3 s + 1), \\ K_1 &= k_1/(1/R_m + k_2), \quad K_2 = D_m/(1/R_m + k_2), \\ K_3 &= D_m/B_v, \quad \tau_1 = \tau_2 = (V_o/2\beta)/(1/R_m + k_2), \\ \tau_3 &= J_m/B_v \end{aligned} \right\} (3)$$

Fig.1 State feedback control system

図1において、動作信号 v_e がサーボ弁伝達関数 $G_v(s)$ に与えられると油圧モータに駆動圧力 P_L が発生する。この圧力 P_L が摩擦トルク T_f に相当する圧力 T_f/D_m に打ち勝つ大きさになるまで油圧モータは回転しない。す

Fig.2 Friction torque and dead zone of hydraulic motor/load system

なわち、この油圧サーボ系には次式(4)で表される不感帯特性が存在する。

$$\left. \begin{aligned} P_L^* &= 0 & (|P_L| \leq |T_f/D_m|) \\ P_L^* &= \text{sign}(P_L)(|P_L| - |T_f/D_m|) & (|P_L| > |T_f/D_m|) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

図2に示すように、油圧モータ・負荷系の摩擦トルク T_f は起動摩擦トルク T_{fs} と駆動状態における動摩擦トルク T_{fd} で大きな相違があり、起動時の不感帯領域は駆動時の不感帯領域の約 5.5 倍である。

この SF 制御系に対し、時刻 $t=0$ において駆動圧力 $P_L > T_{fs}/D_m$ を発生させる大きさのステップ入力 $\theta_R > T_{fs}/(D_m K_\theta K_1)$ を与えれば、油圧モータは回転し起動摩擦トルクは動摩擦トルクに移行する。したがって、定常状態での不感帯特性の影響を改善するには、モータの応答出力角度 θ が設定角度 θ_R に近づく整定時間領域において、不感帯特性 T_{fd}/D_m に対応するディザ信号を与えればよい。すなわち、動作信号 u にディザ信号 Δd を重畳させ、常に動摩擦トルク T_{fd} に打ち勝つ駆動圧力、

$$P_{Lo} > T_{fd}/D_m \quad (5)$$

を発生させることにより、起動摩擦トルクへの移行を防止して定常偏差の改善を図ることができる。

他方、微小な設定角度 $\theta_R \leq T_{fs}/(D_m K_\theta K_1)$ の場合には、

Fig.3 Block diagram of state feedback control system using describing function

起動摩擦トルクに打ち勝つ振幅の大きいディザ信号を与える必要がある。しかし NN 制御系では、制御精度は不十分であるが設定角度 $\theta_R \leq T_{fs}/(D_m K_\theta K_1)$ に対する角度制御が可能であることから⁽⁴⁾、ここでは動摩擦トルクに対応するディザ信号のみを検討の対象とする。

2.2 ディザ信号の周波数と振幅の選定法

フルードパワーシステムに対し、摩擦特性の影響を低減させるための適正なディザの与え方に関する研究が報告されている^{(6), (7)}が、いずれも開ループ系を対象としたものである。ここでは、状態フィードバック補償を考慮した閉ループ系に対して効果的なディザ信号の選定法を検討する。

図1において設定入力 $\theta_R=0$ 、正弦波ディザ信号 $\Delta d = A_d \sin(\omega_d t)$ を与えたときの駆動圧力を $P_L = A_p \sin(\omega_d t + \theta_p)$ で表すと、同図中の不感帯特性は次式(6)の記述関数 G_N で表される⁽⁹⁾。

$$G_N = \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \frac{T_{fd}}{A_p D_m} - \frac{T_{fd}}{A_p D_m} \sqrt{1 - \left(\frac{T_{fd}}{A_p D_m} \right)^2} \right\} \quad (6)$$

図1のブロック線図に式(6)を適用して等価変換すれば図3が得られ、図3より入力を Δd 、出力を P_L とする伝達関数は、

$$G_e(s) = \frac{P_L(s)}{\Delta d(s)} = \frac{G_v(s)G_1(s)}{1 + G_N G_3(s) \left\{ \frac{G_v(s)G_1(s)}{s} F(s) + G_2(s) \right\}} \quad (7)$$

$$F(s) = K_\theta + K_\omega s + K_\alpha s^2 \quad (8)$$

となる。したがって、

$$A_p = |G_e(j\omega_d)| A_d \quad (9)$$

である。不感帯特性に起因する定常偏差を改善するためには、ディザによって発生する駆動圧力の振幅 A_p を式(5)に示す P_{Lo} に選定する必要があるから、式(9)より

$$A_d > \frac{P_{Lo}}{|G_e(j\omega_d)|} \quad (10)$$

である。

一方、図3よりディザ信号 Δd を入力、角度 θ を出力とする伝達関数 $G_t(s)$ は、

$$G_t(s) = \frac{\theta(s)}{\Delta d(s)} = \frac{G_v(s)G_1(s)G_N G_3(s)}{s(1 + G_2(s)G_N G_3(s)) + G_v(s)G_1(s)G_N G_3(s)F(s)} \quad (11)$$

で表される。したがって、ディザ信号によって出力角度 θ に重畳するノイズ振幅 θ_N を希望値 ε 以下にするた

Fig.4 Neural Network position control system using dither

Fig.5 Experimental apparatus of Neural Network position control system using dither signal

Table 1 Specification of experimental apparatus

$P_s = 8[\text{MPa}]$	$R_t = 1.2 \times 10^{11}[(\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}^5]$
$D_m = 1.75 \times 10^{-6}[\text{m}^3/\text{rad}]$	$R_e = 6.85 \times 10^{11}[(\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}^5]$
$J_m = 1.92 \times 10^{-2}[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	$B_v = 3.8 \times 10^{-3}[(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})/\text{rad}]$
$V_o = 3.46 \times 10^{-5}[\text{m}^3]$	$K_f = 1.75 \times 10^{-8}[\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{V} \cdot \text{Pa}^{1/2})]$
$\beta = 1.4 \times 10^9[\text{N}/\text{m}^2]$	$\tau_v = 2[\text{ms}]$
$T_{fs} = 2.83[\text{N} \cdot \text{m}]$	$K_o = 4.27[\text{V}/\text{rad}]$
$T_{fd} = 0.525[\text{N} \cdot \text{m}]$	$K_w = 2.34 \times 10^{-1}[(\text{V} \cdot \text{s})/\text{rad}]$
$T = 5[\text{ms}]$	$K_a = (201 - 3.77\omega) \times 10^{-5}[(\text{V} \cdot \text{s}^2)/\text{rad}]$

めに、ディザ振幅 A_d を次式(12)の範囲に選定する。

$$A_d < \frac{\varepsilon}{|G_t(j\omega_d)|} \quad (12)$$

よって式(6)~(12)を用いれば、必要とする駆動圧力 P_{Lo} 、ディザ信号による出力振幅の最小限界値 ε から、望ましいディザ周波数 f_d とディザ振幅 A_d の領域を逐次代入法による数値解析で求めることができる。

3. ニューラルネット制御系と適正ディザ信号

3.1 状態フィードバックニューラルネット補償角速度制御系 図4は、NN 制御系⁽⁴⁾にディザ信号 Δd を与えた状態を示している。NN 制御系を構成するにあたり、規範モデルの伝達関数 $G_M(s)$ は、固有角周波数 $\omega_{hM}=30[\text{rad/s}]$ 、減衰係数 $\zeta_M=1$ の標準2次遅れ系として

いる。規範モデルと図1のSF 制御系の応答が近似的に一致するように、状態フィードバックゲイン $\mathbf{H}$ は極配置法を用いて決定される。このゲイン $\mathbf{H}$ をオフライン学習によってNN に写像した後、図4のNN 制御系が構成される。この制御系は、NN が規範モデル出力 θ_r と油圧モータ・負荷系の出力角度 θ の偏差 $e_r = \theta_r - \theta$ を最小化するように状態フィードバックゲインを適応的に調整するオンライン学習を行う。NN 学習則は誤差逆伝播則に基づく学習アルゴリズムを採用し⁽¹⁰⁾、その学習係数は 1.0×10^{-3} とした。図4のNN 制御系に対応する実験装置の概要を図5に、実験装置に関する主な諸元を表1に示す。

3.2 ディザ周波数と振幅の適正領域 図1のSF 制御系に対する適正なディザ信号の振幅 A_d と周波数 f_d の領域を図6に示す。実験装置のノイズを含む実測駆動圧力は $P_{Lo}=0.42[\text{MPa}]$ を採用して、式(6)、(7)、(10)から破線の曲線が計算される。また実線の曲線は、ディザ信号に起因する出力ノイズ振幅 θ_N を使用している角度センサの分解能程度の大きさに抑えるため $\varepsilon = 4.36 \times 10^{-4}[\text{rad}]$ と定め、式(11)、(12)から算出した。

この振幅と周波数の適正領域は、油圧モータ・負荷系の線形化近似式と不感帯特性の記述関数に基づく解析結果であり、その近似度を確認するために非線形数学モデルの式(1)に対し、4次のルンゲクッタ法を用いてSF 制御系のシミュレーション解析を行った。

図6における○印は、非線形数学モデルを用いたSF 制御系のシミュレーション応答において、入力として

$\theta_R=0$, $\Delta d=A_d \sin(2\pi f_d t)$ を与え, その駆動圧力 P_L の応答振幅値 A_p が $P_{Lo}=0.42[\text{MPa}]$ に等しくなる A_d , f_d を求めたものである. また, 同図中には, 同様のシミュレーション解析を行い, 出力角度の振動振幅 $\theta_R=\varepsilon$ が得られる A_d , f_d を求め, Δ 印で示している. 式(6)~(12)の解析結果とシミュレーション結果はよく一致することが確認できる.

4. 実験結果と考察

図6における $\times$ 印で示されるディザ信号 $C_1(A_d=0.4[\text{V}], f_d=10[\text{Hz}])$, $C_2(A_d=0.2[\text{V}], f_d=40[\text{Hz}])$, $C_3(A_d=0.1[\text{V}], f_d=60[\text{Hz}])$ は, それぞれ適正領域外の左上, 領域内, 領域外の右下部から選定したものである. これらのディザ信号をNN制御系に与えた場合のシミュレーションステップ応答波形を図7に示す.

同図に見るように, 適正なディザ信号 C_2 を与えると定常偏差が良く改善され, また定常ノイズも極めて小さくなっている. しかし, C_1 では定常偏差の改善は見られるが, 大きな定常出力振動が発生し実用的な制

Fig.6 Optimum amplitude and frequency of dither signal

Fig.7 Simulated step response using dither (NN control system)

御精度を得られない. また C_3 ではディザの効果が十分でなく定常偏差が発生し, この選定方法の有効性が確認できる. 本研究では実システムにおけるサンプリング周波数 (200[Hz]) の7分の1程度をディザ周波数にとり, 適正領域内のディザ信号 $C_0(A_d=0.2[\text{V}], f_d=30[\text{Hz}])$ を用いて, NN制御系に対する効果を検討する.

図8は $\theta_R=0.5[\text{rad}]$ を与えたNN制御系とSF制御系について, シミュレーションによりディザの効果を検証したものである. 同図(a), (b)の比較に見るように, NN制御系, SF制御系のいずれの場合もディザを与えたことにより出力角度の定常偏差 $\theta_{ess} = |\theta_R - \theta_{ss}|$ は明らかに減少している.

図8(b)のディザなしNN制御系における駆動圧力 P_L は, 応答直後に不感帯圧力 $T_{fd}/D_m \leq 0.42[\text{MPa}]$ の領域に入り実質的な制御動作を行っていない. 一方, 図8(a)のNN制御系における駆動圧力 P_L はディザによる振動を重畳して2秒程度の制御動作を行い, その後 $P_L=0$ を中心に定常振動する. このようにNN制御系ではオンライン学習が効果的に行なわれる P_L が発生し, 定常偏差はほぼ零となる.

しかしながら, NN制御系の出力角度 θ の過渡応答に関しては, ディザ信号を与えることによりオーバーシュートが発生し, 過渡的偏差が大きく表れている. これは, 応答初期の偏差 e_r を低減しようとするNN学習の効果が, ディザ信号の付加によってより顕著に表れるためである. すなわち, 規範モデルへの追従性の改善には制御プラントと規範モデルの初期応答に大きな相違が発生しないようにNN制御系を構成する必要がある, これについては次報で報告する.

図8のシミュレーション結果に対応する実験結果を図9に示す. 両者では, 過渡応答部分は異なるが定常偏差の改善傾向はほぼ一致する. 実システムにおいてもディザありNN制御系では, 雑多な信号ノイズに起因する微小な定常偏差が残るが, 定常偏差の改善は著しい.

図10は, ステップ設定角度入力 $\theta_R=0.05 \sim 4.0[\text{rad}]$ を与えたときの, NN制御系の定常偏差改善に対するディザ効果を比較した結果である. ディザなしNN制御系において, 不感帯特性の影響を大きく受ける $\theta_R \leq 0.25[\text{rad}]$ の領域では十分な制御精度が得られないが, ディザありNN制御系では実験した設定角度の全範囲 $\theta_R=0.05 \sim 4.0[\text{rad}]$ で定常偏差 θ_{ess} / θ_R が著しく改善される. またディザありNN制御系では, 微小な設定角度入力 $\theta_R \leq T_{fs}/(D_m K_\theta K_f) \approx 0.1[\text{rad}]$ に対しても

Fig.8 Simulation results of step response

Fig.9 Experimental results of step response

設定角の1/100程度の定常偏差が得られ、NNとディザ一信号の相乗効果が確認できる。

5. 結 言

摩擦トルクや漏れ特性に起因する大きな不感帯特性が存在する油圧モータ・負荷系の状態フィードバックNN補償角度制御にディザ一を適用し、その定常偏差の改善に対する有効性をシミュレーションと実験により検証した。研究結果の要約は以下の通りである。

- (1) NN制御系にディザ一を適用するにあたって、まずSF制御系に対する適正なディザ一について検討した。不感帯特性を記述関数で表し、油圧モータ・負荷系の線形化近似式をもとに適正なディザ一信号の選定式を導いた。
- (2) 適正ディザ一信号の選定式を用い、制御対象のSF制御系に対する適正なディザ一信号の振幅と周波数領域を求めた。さらに、シミュレーション解析を行い、適正ディザ一信号の選定領域の妥当性を確認した。
- (3) SF制御系、NN制御系のステップ応答に対し、シミュレーションと実験によりディザ一信号の効果を

Fig.10 Evaluation of steady state error (NN control system)

確認した。NN制御系にディザ一を与えると、過渡応答領域における規範モデルへの追従性能がやや低下しオーバーシュートが現われるが、定常偏差は著しく改善される。

- (4) ディザ一なしNN制御系では $\theta_R=0.25[\text{rad}]$ 以下の設定角度入力に対する制御精度は十分でないが、ディザ一ありNN制御系ではNNとディザ一の相乗効果により $\theta_R=0.05[\text{rad}]$ までの微小な設定角度入力に対する制御が可能となり、その定常偏差は $\theta_{\text{ess}}/\theta_R=0.01$ 程度である。

文 献

- (1) 武藤高義・加藤弘毅・大野公博・山田宏尚・末松良一, 差動 PWM 法による油圧ロータリアクチュエータのデジタル制御, 油圧と空気圧, **23-7**, (1992), 839-846.
- (2) 山橋浩三・池尾茂・高橋浩爾, 直接法モデル規範形適応制御理論の電気油圧サーボシステムへの応用 (サーボ弁・油圧モータによる位置決め制御), 油圧と空気圧, **20-7**, (1989), 625-632.
- (3) 日比昭・市川常雄・山村真, 歯車モータの低速トルク特性に関する実験的研究, 機論, **41-346**, (1975), 1863-1870.
- (4) 西海孝夫・加藤博司・小波倭文朗, 油圧モータ・負荷系へのニューラルネットの適用 (第1報, 不感帯動作信号領域の存在する油圧モータ・負荷系の角度制御), 機論, **67-659**, C (2001), 2212-2218.
- (5) 加藤博司・西海孝夫・小波倭文朗, 油圧モータ・負荷系へのニューラルネットの適用 (第2報, 微小動作信号のバルス幅変調による油圧モータ・負荷系の高精度角度制御), 機論, **68-670**, C (2002), 1827-1833.
- (6) 中野和夫, Dither に関する一提案, 計測と制御, **3-4**, (1964), 262-271.
- (7) 池辺洋・佐藤三祿・井上淳・坂本義昭, ディザによる油圧サーボモータの低速特性の改善, 油圧と空気圧, **4-4**, (1973), 215-223.
- (8) 前田賢史・川上幸男・中野和夫, 空気圧リフタの位置制御, 日本油空圧学会論文集, **30-4**, (1999), 89-95.
- (9) たとえば, Ogata, K., *Modern Control Engineering*, (1990), 655-658, Prentice Hall International Editions.
- (10) Nishiumi, T. and Watton, J., Model Reference Adaptive Control of an Electrohydraulic Motor Drive using an Artificial Neural Network Compensator, *Proc. Inst. Mech. Eng., Part I, Journal of System and Control Engineering*, **211** (1997), 111-122.