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)

西海孝夫^{*1}, 加藤博司^{*2}, 小波倭文朗^{*1}

Application of Neural Network for Hydraulic Motor/Load System (1st Report, Angular Position Control of Hydraulic Motor/Load System with Dead Zone)

Takao NISHIUMI^{*3}, Hiroshi KATO^H and Shizurou KONAMI

^{*3} Department of Mechanical Systems Engineering, National Defense Academy,
1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka-shi, Kanagawa, 239-8686 Japan

This paper deals with an application of the Neural Network for an angular position control of a hydraulic motor/load system with an undesirable dead zone in small actuating signals. At first, the mathematical model of the hydraulic motor/load system is investigated by comparing the experimental step response with the simulations, and consequently it is confirmed that an initial driving torque with static friction causes the expansion of dead zone. Then, the angular position control system following the reference model response is constructed by using the Neural Network compensator which adjusts the state feedback gains according to the variations of the control conditions. By carrying out the experiments and simulations to evaluate the control accuracy and the robustness, the significant effects of the Neural Network compensator for improving the control characteristics are recognized. The only exception would be the small command angles that correspond to the small actuating signals near to the dead zone.

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

1. 緒 言

ニューラルネット(以下, NN と呼ぶ)は外部環境の変化に応じて出力を自己調整する適応学習能力を有することから, その効果的な適用方法がさまざまな側面から検討され, フリッドパワーシステムへの適用研究が活発に行われている⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾.

筆者らは出力フィードバック NN 補償器を油圧シリンダの位置決め制御, 油圧モータの角速度制御に適用し, ロバストな制御系を構築しようことを示した⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾. しかし油圧モータの場合, 油圧シリンダに比べその内部漏れや外部漏れが大きく, 負荷条件などによってサーボ増幅器に微小な入力信号を与えても油圧モータが回転しない, いわゆる動作信号の不感帯領域が発生する⁽⁹⁾. 不感帯領域のあるサーボ弁・油圧モータ・負荷系(以下, 油圧モータ・負荷系と呼ぶ)では微小動作信号に対応する運動も多く含まれるため, ロバス

トで高精度な角度制御系を構築することは, 油圧シリンダの位置制御とは異なる困難な一面が存在する.

本報は, 不感帯動作信号領域を持つ油圧モータ・負荷系に対し, 状態フィードバック NN 補償を適用した角度制御系の研究である. 研究の第一段階として, 不感帯動作信号領域に比べて比較的大きな動作信号を与えた場合での NN 補償器の有効性について明らかにする. 研究を進めるにあたって, まず, 制御対象である油圧モータ・負荷系の数学モデルを検討し, シミュレーション解析により不感帯動作信号領域の大きさが, 油圧モータ・負荷系の起動トルクと漏れ流量特性に依存することを確認する. つぎに, 状態フィードバック NN 補償を適用した角度制御系を構築し, そのシミュレーション解析と実験を行う. 不感帯領域に近い動作信号以下で駆動されるような, 微小目標入力角設定の場合を除くと, NN 補償器によりロバストで高精度の制御性能が得られることを検証する.

おもな記号

B_v : 回転粘性抵抗係数
 D_m : 油圧モータの押しのけ容積

* 原稿受付 2000年10月4日.

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

^{*2} 正員, 防衛大学校研修生.

E-mail: nishiumi@nda.ac.jp

J_m	: 慣性負荷の慣性モーメント
K	: 近似伝達関数の開ループゲイン
K_c	: 角速度-電圧変換ゲイン
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	: 油圧モータの流入出流量
R_o, 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_o	: サーボ弁と油圧モータ間の片側容積
v_e	: サーボ増幅器の入力電圧
$v_{e\max}$	: v_e の最大値
v_{as}	: サーボ増幅器の最大許容入力電圧
β	: 作動油の体積弾性係数
θ	: 油圧モータの回転角度
θ_i	: 規範モデル出力信号
θ_R	: 角度目標入力信号
ω	: 油圧モータの回転角速度
ω_n	: 近似伝達関数の非減衰固有角周波数
ξ	: 近似伝達関数の減衰係数
添字 ss は定常状態を表す記号とする。	

2. 実験装置

2.1 実験装置の概略 状態フィードバック NN 補償による角度制御系の実験装置を図1に、制御対象の油圧モータ・負荷系の諸元を表1に示す。

サーボ弁で駆動する油圧モータの上下流圧力 p_1, p_2 , またエンコーダ, F-V コンバータで検出された角度 θ , 角速度 ω の信号はコンピュータに組み込んだ DSP (TMS320C31) に送られ, NN 制御プログラムに従って演算処理される。この演算処理信号がサーボ増幅器

Fig.1 Experimental apparatus

Table 1 Specification of hydraulic motor/load system

$P_s = 8 \text{ [MPa]}$	$V_o = 3.46 \times 10^{-5} \text{ [m}^3\text{]}$
$D_m = 1.75 \times 10^{-6} \text{ [m}^3\text{/rad]}$	$\beta = 1.4 \times 10^9 \text{ [N/m}^2\text{]}$
$J_m = 1.92 \times 10^{-2} \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}$	$K_f = 1.75 \times 10^{-8} \text{ [m}^3\text{/(s} \cdot \text{V} \cdot \text{Pa}^{1/2}\text{)]}$
$R_i = 1.2 \times 10^{11} \text{ [(N} \cdot \text{s)/m}^3\text{]}$	$R_o = 6.85 \times 10^{11} \text{ [(N} \cdot \text{s)/m}^3\text{]}$
$B_v = 3.8 \times 10^{-3} \text{ [(N} \cdot \text{m} \cdot \text{s)/rad]}$	$T_{fd} = 0.525 \text{ [N} \cdot \text{m]}$
$v_{as} = 10 \text{ [V]}$	$T = 5 \text{ [ms]}$

に入力され, 角度制御が行われる。油圧モータ・負荷系にはトルク外乱 T_L を付加できる電磁ブレーキが設置されている。使用した油圧モータは産業用の内接歯車モータであり, カタログ推奨の回転数範囲は 200~4000[rpm]である。このため, 本実験装置の開ループ系 (サーボ増幅器, サーボ弁, 油圧モータ, 負荷系) の回転角速度特性は, 80[rpm]程度以下では速度変動が大きく, また起動時において微小動作信号 $v_e < 0.05 v_{as}$ に対して油圧モータの回転しない不感帯動作信号領域が存在する。

2.2 油圧モータ・負荷系の数学モデル 油圧モータ・負荷系の基礎式は次式(1)~(3)で表される⁽¹⁰⁾。

$$q_1 = K_f \cdot v_e \sqrt{P_s - p_1} = D_m \omega + \frac{V_o}{\beta} \frac{dp_1}{dt} + \frac{p_1 - p_2}{R_i} + \frac{p_1}{R_o} \quad (1)$$

$$q_2 = K_f \cdot v_e \sqrt{p_2} = D_m \omega - \frac{V_o}{\beta} \frac{dp_2}{dt} + \frac{p_1 - p_2}{R_i} - \frac{p_2}{R_o} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} D_m (p_1 - p_2) &= J_m \frac{d\omega}{dt} + B_v \omega + T_f \\ T_f &= \begin{cases} \text{sign}(p_1 - p_2) T_{fs} & (\omega=0) \\ \text{sign}(\omega) T_{fd} & (\omega \neq 0) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

油圧モータ・負荷系のシミュレーションにおいて, 油圧モータ駆動開始後の動摩擦トルク T_{fd} , 漏れ流量特性の係数 R_o, R_i , 粘性抵抗係数 B_v などは定常回転時の測定値を用いた。また, 起動トルク T_{fs} の大きさは, 実験値とシミュレーションの不感帯動作信号領域が一致するように設定している。シミュレーションプログラムは C 言語で記述し, 式(1)~(3)の数学モデルの解は 4 次のルンゲ・クッタ法による。

2.3 実験プラントと数学モデルの特性比較 図2は, サーボ増幅器にステップ入力電圧 v_e を与え油圧モータ・負荷系の角速度応答について, 実験波形とシミュレーション波形とを比較した例である。実験プラントでは不確定な摩擦トルクが存在し, この影響によりステップ入力信号 v_e が 1[V]以下では実験応答波

Fig.2 Comparison between experimental results and simulated results for open-loop system

形の再現性が小さく、シミュレーションと実験波形に相違が見られたが、入力信号 v_e が 2[V] 以上では双方の応答波形はよく一致する。

起動トルク T_f の大きさと発生する不感帯領域 v_d の関係を漏れ係数 R_o , R_i を一定の下で、シミュレーション解析により求めた。図3に示すように起動トルク T_f が不感帯の発生に影響することがわかる。同様に摩擦トルク T_f を一定とし、漏れ係数 R_o , R_i を変化させた場合の不感帯領域 v_d を検討したが、この漏れインピーダンスの並列結合 $(1/R_i) + (1/2R_o)$ と不感帯領域 v_d とは比例関係がみられた。

3. 状態フィードバック NN 補償による 角度制御系の構築

3.1 NN のオフライン学習 式(1)~(3)で表される油圧モータ・負荷系の基礎式を線形化近似し、ノミナル条件のパラメータに対して設計した状態フィードバックゲインの値をあらかじめ NN に学習させる「オフライン学習」を実施する。このオフライン学習により、制御系に実装した NN の初期学習時間を短縮させ、良好な角度制御系を構築できる。

定常状態からの微小変化を考え、サーボ弁の動特性および式(3)における摩擦トルク T_f を無視すれば、

Fig.3 Dead zone v_d vs torque T_f characteristics

式(1)~(3)よりサーボ弁入力電圧 v_e を入力、油圧モータの角速度 ω を出力とする近似伝達関数は標準 2 次遅れ系となり、そのゲイン K , 非減衰固有角周波数 ω_n , 減衰係数 ζ は、次式(4)~(7)で与えられる。

$$K = \frac{K_c R_o}{R_o + R_f} \doteq K_c \quad (4)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2(R_o + R_f)}{LCR_o}} \doteq \sqrt{\frac{2}{LC}} \quad (5)$$

$$\zeta = \frac{0.5(CR_o R_f) + L}{\sqrt{2(R_o + R_f)LCR_o}} \doteq C_1 \omega_{ss} + C_2 \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{R_o} &\doteq \frac{D_m \omega_{ss}}{2P_s} + \frac{1}{R_i} + \frac{1}{2R_e} \\ R_f &= \frac{B_v}{D_m^2}, \quad K_c = \frac{\omega_{ss}}{v_{ess}}, \quad C = \frac{V_o}{\beta}, \quad L = \frac{J_m}{D_m^2} \\ C_1 &= \frac{D_m}{2P_s} \sqrt{\frac{L}{2C}}, \quad C_2 = \sqrt{\frac{L}{2C}} \left(\frac{C}{2L} R_f + \frac{1}{R_i} + \frac{1}{2R_e} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここに、式(4)~(6)の近似式は $R_o \gg R_f$ において成立する。

式(4)~(7)の値は開ループでの静特性計測および実験プラントの諸元より得られ、本実験装置では $R_f/R_o = 1/30 \sim 1/70$ であり、 $K \doteq 18.5 [\text{rad}/(\text{s} \cdot \text{V})]$, $\omega_n \doteq 114 [\text{rad}/\text{s}]$, また $C_1 = 0.0397$, $C_2 = 3.145$ である。

この標準 2 次遅れ要素と積分要素を 3 次の状態変数で表示すると

$$\dot{x} = Ax + Bv_e \quad (8)$$

$$\theta = Cx \quad (9)$$

$$x = [\theta \quad \dot{\theta} \quad \ddot{\theta}]^T \quad (10)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & K_\theta K \omega_n^2 \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

であり、 K_θ は式(17)で表現されるフィードバックゲインである。この線形化した油圧モータ・負荷系に対し、状態フィードバック

$$v_e = \theta_R - Hx \quad (14)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & \frac{K_\omega}{K_\theta} & \frac{K_\alpha}{K_\theta} \end{bmatrix} \quad (15)$$

を与え、閉ループ角度制御系を構成する場合を考える。減衰係数 $\zeta = 1$, 非減衰固有角周波数 ω_n の 2 次遅れ系を制御系の望ましい応答とすると、角度制御系は 3 次

系であるから、特性方程式が

$$(s + \gamma\omega_{nd})(s + \omega_{nd})^2 = 0 \quad (\gamma \gg 1) \quad (16)$$

となるようにフィードバックゲイン H を定めればよい。したがって、式(8)~(15)で構成される角度制御系(以下、NN なし制御系と呼ぶ)の特性方程式の係数と式(16)の係数を等しいとくと

$$\left. \begin{aligned} K_{\theta} &= \frac{\gamma\omega_{nd}^3}{K\omega_n^2} \\ K_{\omega} &= \frac{(2\gamma + 1)\omega_{nd}^2 - \omega_n^2}{K\omega_n^2} \\ K_{\alpha} &= \frac{(\gamma + 2)\omega_{nd} - 2\zeta\omega_n}{K\omega_n^2} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

が得られる。

線形化したシステム方程式(8)~(13)において、定常状態が時々刻々変化すると考え、式(6)の近似式における ω_{nd} を角速度出力 ω として扱う。ここで、 $\omega_{nd} = 30[\text{rad/s}]$ 、 $\gamma = 38$ として角度制御系のノミナルパラメータをもとに設計されたフィードバックゲイン

$$H = [1 \quad 0.055 \quad (471 - 8.82\omega) \times 10^{-6}] \quad (18)$$

を NN に対してオフライン学習を実施した。

図4は誤差逆伝ばり則(Back-Propagation Algorithm)によるオフライン学習のブロック図である。使用した NN は入力層に4個、第1隠れ層に8個、第2隠れ層に4個、出力層に1個のニューロンを有し、隠れ層ニューロンが双曲線正接関数で表される入出力特性を持つ非線形階層型 NN である。また、式(3)において定

Fig.4 Neural Network off-line training procedure

常状態からの変化量を考えるとき

$$d\omega/dt = (D_m/J_m)P_L \quad (19)$$

であることが実験により確認できるので、微分動作におけるノイズの影響を避けるために、角加速度 $d\omega/dt$ の代わりに圧力差信号 P_L を用いた。また、オフライン学習は、学習係数 1×10^3 の条件で、 $\pm 2[\text{rad}]$ の範囲内で変化する任意の階段状波形 θ_R を繰り返し入力し、誤差が十分に小さくなるまで行った⁽⁹⁾。

3.2 NN 補償による角度制御系の構成 前節に示したオフライン学習済みの NN 補償器を用いて構成した状態フィードバック角度制御系(以下、NN 制御系と呼ぶ)を図5に示す。この系は規範モデル信号 θ_r と角度信号 θ の誤差を NN に与え⁽⁹⁾、その角度誤差を零に近づけるようにオンラインで学習させることで、非線形な油圧モータ・負荷系のパラメータが変化しても望ましい出力を得ることができる。ここで、規範モデルと油圧モータ・負荷系の次数の差は、NN の教師学習に一般的に影響を及ぼさない。

Fig.5 Angular position control system using Neural Network compensator

Fig.6 Comparison between experimental results and simulated results for Neural Network control system

規範モデルは標準2次遅れ系とし、その非減衰固有角周波数 ω_{nm} を閉ループ系の ω_{cl} に等しい $\omega_{nm}=\omega_{cl}=30[\text{rad/s}]$ にとり、減衰係数は $\zeta_M=\zeta_r=1$ を採用している。また、オンライン学習時の学習係数はオフライン学習と同様に 1×10^3 とした。この角度制御系のシミュレーション解析は、図5における油圧モータ・負荷系のブロックを式(1)~(3)のコンピュータ処理に置き換えて行われた。

4. 状態フィードバック NN 補償器による 角度制御系の特性評価

4.1 制御精度の改善について 図6に示すように、NN 制御系におけるステップ入力応答のシミュレーション波形と実験応答波形はよく一致する。

状態フィードバックゲイン H に式(18)のノミナル値を用いた NN なし制御系と NN 制御系のステップ入力に対するシミュレーション応答波形を図7(a), (b)に示す。NN なし制御系における定常角度偏差 $\theta_{e,ss}=\theta_r-\theta_{ss}$ の大きさは油圧モータの不感帯に依存し、目標設定角 θ_r に関係なくほぼ一定であるため、 θ_r が増加すると $\theta_{e,ss}/\theta_r$ は小さくなり、定常精度 $\theta_{e,ss}/\theta_r$ が向上する。一方、NN 制御系の定常角度偏差 $\theta_{e,ss}$ は、規範モデル

応答に対する偏差 $|\theta_r-\theta|$ の変化状況の影響を受けて、 θ_r の大きさにより変化する。

図8は、NN 制御系と NN なし制御系において、 θ_r の変化に対する最大動作信号 $v_{e,max}/v_{as}$ および、定常精度 $\theta_{e,ss}/\theta_r$ を求めた実験結果である。NN 補償器の学習効果により定常精度が改善され、その改善効果は θ_r の小さい範囲で著しい。NN 制御系、NN なし制御系のいずれの場合もサーボ増幅器の定格最大入力電圧 $v_{as}=10[\text{V}]$ を超えないように動作信号電圧 v_e に対しリミッタを挿入しているが、実験した設定入力 θ_r の範囲ではリミッタによる動作信号の制限は定常精度にほとんど影響を与えていない。

図7(a),(b)に見るように、 θ_r が大きくなると過渡応答時に規範モデル θ_r に対する偏差が大きく現われる傾向がある。そこで、応答特性の全般的精度を評価するために、応答誤差面積と規範モデル応答面積の比を制御精度評価関数 Λ として採用する。

$$\Lambda = \frac{\int_0^{t_s} |\theta_r(t) - \theta(t)| dt}{\int_0^{t_s} \theta_r(t) dt} \quad (t_s=2.0[\text{s}]) \quad (20)$$

図9は NN 制御系と NN なし制御系において、 θ_r

(a) $\theta_r=0.5[\text{rad}]$

(b) $\theta_r=4.0[\text{rad}]$

Fig.7 Simulated results in Neural Network control system

Fig.8 Evaluation of steady state error

Fig.9 Evaluation of control accuracy

の変化に対する制御精度評価値 Λ を実験およびシミュレーションで求めた結果である。NN 制御系では NN なし制御系に比べ優れた評価値 Λ を示し、NN 補償器による制御精度改善効果が検証され、目標入力設定角 $\theta_r \leq 0.25[\text{rad}]$ の領域を除けば定常精度 (図8) ならびに制御精度 (図9) とも実用性のある制御系が得られている。NN 制御系に対しては、実験とシミュレーション解析による面積誤差の制御特性評価値 Λ は、 θ_r の全領域できわめてよく一致している。

微小入力設定角範囲 $\theta_r < 0.25[\text{rad}]$ や微小ランプ入力に対する分解能の改善については、オブザーバを用いた摩擦トルク T_f の除去や PWM 信号の採用などが考えられ、これについては次報で報告する。

4.2 繰返し学習効果とロバスト性について 図10はNN 制御系のオンライン学習効果を確認するため、 $0 \sim 1.0[\text{rad}]$ の範囲で変化する周波数 $f=0.5[\text{Hz}]$ の矩形波目標角 θ_r を系に加えた実験結果である。 $\theta_r=1[\text{rad}]$ のステップ応答では、比較的大きな評価値 Λ をもつが、NN 補償器がオンライン学習を繰返し、応答直後に見られる規範モデル θ_r と出力角 θ の誤差は10回(20[s])程度の学習で完全に収束する。繰返し学習に対応する制御精度の評価関数 Λ_n を次式で定義する。

$$\Lambda_n = \frac{\int_{(n-1)/f}^{n/f} |\theta_r(t) - \theta(t)| dt}{\int_{(n-1)/f}^{n/f} \theta_r(t) dt} \quad (21)$$

Fig.10 Effectiveness of iterative on-line training

Fig.11 Evaluation of control accuracy for iteration times

Fig.12 Robustness to supply pressure change

Fig.13 Robustness to torque disturbance

ここで、 Λ の添字 n は繰返し学習回数であり、 θ_r の1周期に対応する。

図11は繰返し学習回数 n に対する制御精度評価値 Λ_n の変化を示したもので、数回の繰返し学習でおおよそその誤差修正を達成している。また、同図に見るようにシミュレーション結果の評価値は実験値によく一致している。

図12は $0 \sim 0.5[\text{rad}]$ の範囲で変化する周波数 $f=0.5[\text{Hz}]$ の矩形波目標角 θ_r を系に与え、十分にオンライン学習が進行した状態のNN 制御系において、供給圧力 $P_s=8[\text{MPa}]$ を $P_s=5.8[\text{MPa}]$ まで急激に減少させた実験結果である。供給圧力 P_s の急減により発生する規範モデル θ_r と出力角 θ の誤差は、ほぼ1回の学習でその修正が行われ、NN補償器が急激なパラメータ変動に対応していることがわかる。

図13は、図12と同様の繰返し学習状態にあるNN 制御系において、電磁ブレーキによりトルク外乱 $T_L=0.5[\text{N}\cdot\text{m}]$ をステップ状に与えた実験結果である。外乱 T_L により生ずる誤差はオンライン学習の進行とともに改善され、7回(14[s])程度の繰返し学習で外乱入力前の状態に戻り、NN 制御系のロバスト性が確認できる。

5. 結 言

不感帯動作信号領域のある油圧モータ・負荷系に対し、状態フィードバック NN 補償器を適用した角度制御系を構成し、シミュレーション解析及び実験を行った。研究結果の要約は下記のとおりである。

- (1) 角度制御系のシミュレーションを行う上で必要な制御プラント「油圧モータ・負荷系」の数学モデルを検討し、油圧モータ・負荷系における不感帯動作信号領域の発生は、油圧モータの起動トルクや漏れ特性に起因することが確認された。
- (2) 線形化近似伝達関数をもとに設計された特性を NN 補償器にオフライン学習させ、その NN 補償器を搭載したモデル規範形状状態フィードバック NN 角度制御系を構築した。その結果、非線形特性をもつ油圧モータ・負荷系に対して、十分に NN 補償器が動作することを確認した。
- (3) 構築された NN 制御系について、シミュレーション解析と実験結果を比較検討し、シミュレーションによる NN 制御系の特性推定が可能であることを示した。
- (4) NN なし制御系と NN 制御系のステップ応答特性が比較され、目標設定角 $\theta_r = 0.25 \sim 4[\text{rad}]$ に対し、定常特性および過渡特性が NN 補償器によって著しく改善されることが検証された。
- (5) 入力設定角範囲 $\theta_r < 0.25[\text{rad}]$ では、動作信号電圧の最大値 v_{emax} が不感帯動作信号領域に近づき、状態フィードバック NN 補償器のみでは、制御精度の改善は困難になる。
- (6) 繰り返し矩形波入力に対する NN 制御系の応答状態において、供給圧力変化やトルク外乱を与え、

NN 制御系のロバスト性が確認された。

文 献

- (1) 真田一志・北川能, 線形二層ニューラルネットワークによるサーボ機構の適応制御, 機論, **60**-570, C(1994), 569-576.
- (2) 小林邦夫・小森俊明・森澤正旭, ニューラルネットワークの油圧サーボ系への適用に関する研究 (第1報, 第2報), 日本油空圧学会論文集, **29**-6 (1998), 113-125.
- (3) 千平・山田宏尚・武藤高義, 油圧サーボ系の自動調整ファジィ制御 (第2報 ニューラルネットワークによる自動調整), 日本油空圧学会論文集, **29**-2 (1998), 39-45.
- (4) 松熊利治・宋軍波・石田義久・能登山俊一, ニューラルネットワークを用いた空気圧シリンダのPID制御, 日本油空圧学会論文集, **30**-1 (1999), 28-33.
- (5) 橋本強二・今枝正夫・三浦範大・大平信哉, セルフチューニング型ニューラルコントローラを用いた空気圧モータ系の位置制御, 日本油空圧学会論文集, **29**-2 (1998), 46-52.
- (6) Nishiumi, T., Konami, S. and Watton, J., An Application of a Neural Network Controller to a Hydraulic Servo Cylinder System, 日本油空圧学会論文集, **31**-4 (2000), 115-121.
- (7) 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*, **211** (1997), 111-122.
- (8) Nishiumi, T., Konami, S. and Watton, J., Model Reference Control of a Hydraulic Servovalve/Motor System by Neural Network, *Proc. JSASS 11th Aircraft Symposium* (1997), 555-558.
- (9) 小波倭文朗・西海孝夫・米元邦行, 不感帯を持つ角度制御系の要素特性推定と制御精度の改善, 油圧と空気圧, **24**-4 (1993), 549-561.
- (10) 小波倭文朗・西海孝夫, 油圧制御システム, (1999), 東京電機大学出版局.