

강인한 마찰상태관측기와 RFNN을 이용한 백스테핑 제어기반 정밀 위치제어

여대연⁺, 한성익⁺, 이권순^{*}

(논문접수일 2009. 12. 21, 심사완료일 2010. 06. 03)

Backstepping Control-Based Precise Positioning Control Using Robust Friction State Observer and RFNN

Dae Yeon Yeo⁺, Seong Ik Han⁺, Kwon Soon Lee^{*}

Abstract

In this article, we investigate a robust friction compensation scheme for the purpose of accomplishing precision positioning performance a servo mechanical system with nonlinear dynamic friction. To estimate the friction state and tackle robustness problem for uncertainty, a RFNN and reconstructed error compensator as well as a robust friction state observer are developed. The asymptotic stability of the series of friction compensation methodologies are verified from the Lyapunov's stability theory. Some simulations and experiments on a servo mechanical system were carried out to evaluate the effectiveness of the proposed control scheme

Key Words : LuGre friction model(LuGre 마찰모델), Backstepping control(백스테핑 제어), Robust friction state observer(강인마찰 상태관측기), Recurrent fuzzy neural networks(순환형 퍼지신경망), Reconstructed error compensator(근사오차보상기), Servo mechanical system(서보 기계시스템)

1. 서론

최근에 산업용 로봇이나 공작기계, 반도체 제조장비 같은 서보시스템에 대해 고정밀 성능에 대한 요구가 증대해 왔다. 따라서 이러한 특성에 부합하는 정밀추종성능, 외란제거능

력, 불확실성에 대한 강인성을 갖는 제어시스템이 요구된다. 그러나 비선형 마찰을 자주 이러한 제어시스템의 성능을 저하시키는 원인이 되어 왔다. 그래서 만족스러운 고성능 제어 성능을 얻기 위해서는 비선형 마찰에 대한 정확한 특성을 파악하고 효과적인 보상이 선결되어야 한다. 그러나 비선형 마

* 교신저자, 동아대학교 전기공학과 (kslee@dau.ac.kr)
주소: 604-714 부산시 사하구 하단2동 840
+ 동아대학교 전기공학과

찰의 거동은 매우 복잡하고 접촉면의 윤활특성, 동작속도, 온도 등에 따라 변하기 때문에 쿨롱마찰이나 점성마찰만을 고려하는 고전적 마찰모델이나 단순한 제어방법을 사용해서 만족스러운 성능을 얻기가 어렵다.

그래서 고전적인 마찰모델보다 더 정확하게 마찰현상을 표현할 수 있는 동적마찰 모델들이 연구되었다⁽¹⁻³⁾. 이러한 동적 마찰모델은 점차 이전의 고전적 마찰 뿐만아니라 *presliding* 영역의 거동을 통합해서 묘사할 수 있다. 그러나 이러한 동적마찰 모델에서 LuGre 마찰모델⁽⁴⁾이 수학적으로 간단하고 관측기 적용이 편리하면서도 대부분의 마찰거동을 묘사할 수 있어서 서보시스템^(4,5), 브레이크 제어⁽⁶⁾에 자주 적용되고 있다. 본 연구에서도 LuGre 마찰 모델을 선택하여 마찰제어에 적용하기로 한다. 그러나 LuGre 마찰 모델은 직접 측정이 불가능한 내부 상태변수를 갖고 있어서 이것을 추정하기 위한 관측기가 필요하다.

그렇지만 마찰특성이 작동조건에 따라 변화하므로 이러한 불확실성을 고려한 강인한 관측기 설계가 요구된다. 불확실성을 추정하는 방법으로서 최근에 퍼지 및 신경망을 이용하는 기법들이 많이 연구되어 왔다. 특히 퍼지의 추론능력과 신경망의 학습특성을 결합한 퍼지신경망(*fuzzy neural network: FNN*)이 개발되어 적용되었다⁽⁷⁾. 그러나 FNN은 정적인 방법이어서 이를 개선하는 순환형 퍼지신경망(*recurrent fuzzy neural network: RFNN*)이 개발되어 성능이 입증되었다⁽⁸⁾.

측정불가능한 마찰상태변수를 추정하고 정밀한 위치제어 성능향상을 위하여 Han은 슬라이딩 모드, 이중마찰 상태관측방법과 FNN을 이용한 적응형 제어기법을 적용하였고⁽⁹⁾, 이중마찰 상태관측방법과 확장형 칼만필터형 신경망과 외란 관측기 방법을 적용하였고⁽¹⁰⁾, 슬라이딩 모드와 강인한 마찰 상태 관측기와 RFNN을 이용한 정밀위치제어에 대해 연구하였다⁽¹¹⁾.

본 연구에서는 백스테핑 제어기법과 참고문헌⁽¹¹⁾에서 사용한 RFNN의 내부 피드백루프 특성을 개선하여 성능을 개선시킨 RFNN을 설계하고 백스테핑 기법에서 유도되는 마찰 상태변수를 추정하는 강인한 관측기를 설계하여 Camudas⁽¹¹⁾와 Xie⁽⁵⁾가 설계한 관측기 성능과 비교하여 정밀한 위치추종성능을 보이고자 한다.

2. 백스테핑 제어기 및 마찰관측기 설계

비선형 마찰을 갖는 회전체 서보시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$J\ddot{\theta} + T_f = u \tag{1}$$

여기서 J 는 관성모멘트, θ 는 회전각, T_f 는 비선형 마찰을 나타낸다. LuGre 마찰모델의 동특성은

$$\dot{z} = \dot{\theta} - f(\dot{\theta})z \tag{2}$$

로 주어지며 z 는 직접 측정이 불가능한 내부상태변수이고

$$f(\dot{\theta}) = \frac{|\dot{\theta}|}{g(\dot{\theta})} \tag{3}$$

$$\sigma_0 g(\dot{\theta}) = T_c + (T_s - T_c)e^{-\left(\frac{\dot{\theta}}{\theta_s}\right)^2} \tag{4}$$

여기서 T_c 는 쿨롱마찰, T_s 는 점착토크, θ_s 는 Stribeck속도를 나타낸다. 마찰토크는

$$T_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \dot{\theta} \tag{5}$$

이고 σ_0, σ_1 는 각각 *presliding*영역의 강성, 점성을 나타내고 σ_2 는 *sliding* 점성계수이다. 식 (2)를 (5)에 대입하면

$$T_f = \Phi(\dot{\theta})z + \sigma_3 \dot{\theta} = T_z + \sigma_3 \dot{\theta} \tag{6}$$

$$\text{여기서 } \sigma_3 = \sigma_1 + \sigma_2,$$

$$\Phi(\dot{\theta}) = \sigma_0 - \sigma_1 f(\dot{\theta}). \tag{7}$$

따라서 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J\ddot{\theta} + \sigma_3 \dot{\theta} + T_z = u \tag{8}$$

식 (6)에서 마찰 모델링 오차를 고려하면

$$\begin{aligned} T_f &= \sigma_{0n}z + \sigma_{1n}\dot{z} + \sigma_{2n}\dot{\theta} + \Delta(\sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \dot{\theta}), \\ &= T_{zn} + \sigma_{3n}\dot{\theta} + T_d = u \end{aligned} \tag{9}$$

따라서 식 (8)은

$$J\ddot{\theta} + \sigma_{3n}\dot{\theta} + T_{zn} + T_d = u \tag{10}$$

여기서

$$T_d = \Delta(\sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \ddot{\theta}) \quad (11)$$

$x_1 = \theta$ 로 두면 백스테핑 제어를 위한 상태변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{x}_1 = \dot{\theta} = x_2 \quad (12)$$

$$\dot{x}_2 = b_p[-\sigma_{3n}x_2 - T_{zn} - T_d + u] \quad (13)$$

여기서 $b_p = 1/J$. 새로운 상태변수를 다음과 같이 정의한다.

$$z_1 = x_d - x_1 \quad (14)$$

$$z_2 = x_2 + \alpha \quad (15)$$

여기서 x_d 는 명령추종입력이다. 식 (14)에서

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_d - z_2 + \alpha \quad (16)$$

이고 다음과 같이 Lyapunov 함수를 정의한다.

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (17)$$

식 (17)을 미분하면

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_2 (\dot{x}_d - z_2 + \alpha) \quad (18)$$

여기서 $\alpha = -k_1 z_1 - \dot{x}_d$ 로 두면 식 (18)은

$$\dot{V}_1 = -k_1 z_1^2 - z_1 z_2 \quad (19)$$

식 (15)에서

$$\dot{z}_2 = b_p(-\sigma_{3n}x_2 - T_{zn} - T_d + u) + \dot{\alpha} \quad (20)$$

다음과 같은 Lyapunov 함수를 정의한다.

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (21)$$

미분하면

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 \\ &= -k_1 z_1^2 + z_2 [(k_1^2 - 1)z_1 + k_2 z_2 \\ &\quad + b_p(-\sigma_{3n}x_2 - \widehat{T}_{zn} - \widehat{T}_d + u) \\ &\quad - x_d] - b_p \Phi_n z_2 \tilde{z} \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 $\tilde{z} = z - \hat{z}$, $\widehat{T}_{zn} = \Phi_n \tilde{z}$. 다음과 같이 새로운 Lyapunov 함수를 정의하고 미분한다.

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} \sigma_{1n} \tilde{z}^2 \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= -k_1 z_1^2 + z_2 [(k_1^2 - 1)z_1 + k_1 z_2 \\ &\quad + b_p(-\sigma_{3n}x_2 - \widehat{T}_{zn} - \widehat{T}_d + u) - \dot{x}_d] \\ &\quad - b_p \Phi_n z_2 \tilde{z} + \sigma_{1n} z (\dot{z} - \dot{\hat{z}}) \end{aligned} \quad (24)$$

다음과 같은 제어입력을 선정하고 식 (24)에 대입하면

$$u = b_p^{-1} [\ddot{x}_d + (1 - k_1^2)z_1 - (k_1 + k_2)z_2] + \sigma_{3n}x_2 + \widehat{T}_{zn} + \widehat{T}_d \quad (25)$$

$$\dot{V}_3 = -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 - b_p \Phi_n z_2 \tilde{z} + \sigma_{1n} z (\dot{z} - \dot{\hat{z}}) \quad (26)$$

그러나 불확실성 T_d 는 미리 알 수 없으므로 이것을 근사한 추정치로 다음과 같이 대치한다.

$$T_d = W_{ko}^* U_{ko} + \epsilon \quad (27)$$

$$\widehat{T}_d = O_o^{IV} = W_{ko}^T U_{ko} \quad (28)$$

여기서 W_{ko}^* 는 최적값이고, $|\epsilon| \leq U$, U 는 양의 상수, \widehat{T}_d 는 T_d 의 추정치, O_o^{IV} 는 그림 1의 RFNN의 출력을 나타낸다. 식 (27)를 고려하면 식 (25)는

$$u_{RFNR} = b_p^{-1} [\ddot{x}_d + (1 - k_1^2)z_1 - (k_1 + k_2)z_2] + \sigma_{3n}x_2 + \widehat{T}_{zn} + \widehat{T}_d + \widehat{T}_u \quad (29)$$

으로 주어진다. 여기서 \widehat{T}_u 는 RFNN의 근사오차에 대한 보상기이다. 식 (20)을 다시 쓰면

$$\dot{z}_2 = b_p (-\sigma_{3n} x_2 - \hat{T}_{zn} - \widehat{W}_{ko}^{*T} U_{ko} - \epsilon + u_{RFNFR}) + \dot{a} \quad (30)$$

따라서

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = & -k_1 z_1^2 + z_2 [(k_1^2 - 1)z_1 + k_1 z_2 \\ & + b_p (-\sigma_{3n} x_2 - \hat{T}_{zn} - \widehat{W}_{ko}^{*T} U_{ko} + \epsilon \\ & + \widehat{W}_{ko}^{*T} U_{ko} - \hat{T}_u + u_{RFNFR}) - \dot{x}_d] \\ & - b_p \Phi_n z_2 \tilde{z} + \sigma_{1n} \tilde{z} (\dot{z} - \dot{\tilde{z}}) \\ = & -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 - b_p z_2 (\widehat{W}_{ko}^{*T} - \widehat{W}_{ko}) U_{ko} \\ & + b_p z_2 (-\epsilon + \hat{T}_u) - b_p \Phi_n z_2 \tilde{z} + \sigma_{1n} \tilde{z} (\dot{z} - \dot{\tilde{z}}) \end{aligned} \quad (31)$$

다음과 같은 새로운 Lyapunov 함수를 정의하고 미분한다.

$$V_4 = V_3 + \frac{1}{2\eta_1} (\widehat{W}_{ko}^* - \widehat{W}_{ko})^T (\widehat{W}_{ko}^* - \widehat{W}_{ko}) \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 = & \dot{V}_3 + \frac{1}{\eta_1} (\widehat{W}_{ko}^* - \widehat{W}_{ko})^T (-\dot{\widehat{W}}_{ko}) \\ = & -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 + \frac{1}{\eta_1} (\widehat{W}_{ko}^* - \widehat{W}_{ko})^T (-\dot{\widehat{W}}_{ko}) \\ & - b_p z_2 (\widehat{W}_{ko}^{*T} - \widehat{W}_{ko}) U_{ko} \\ & + b_p z_2 (-\epsilon + \hat{T}_u) - b_p \Phi_n z_2 \tilde{z} + \sigma_{1n} \tilde{z} (\dot{z} - \dot{\tilde{z}}) \end{aligned} \quad (33)$$

여기서 마찰상태 변수를 추정할 수 있는 다음과 같은 관측기를 제안한다.

$$\dot{\hat{z}} = w - b_p \frac{z_3}{\sigma_{1n}} + k_3 z_1 \quad (34)$$

여기서 $z_3 = \int_0^t \Phi_n z_2 dt$ 이고 k_3 는 양의 상수로서 관측기의 과도응답을 조절할 수 있다. 그리고 보조변수 w 는 다음과 같다.

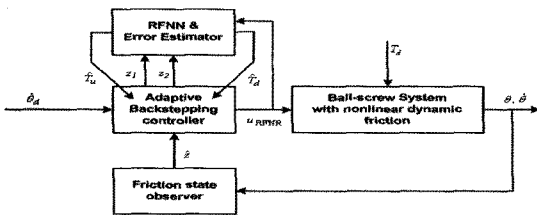


Fig. 1 A schematic diagram of the proposed Back_RFNN control system

$$\begin{aligned} \dot{w} = & \frac{1}{\sigma_{1n}} \left[-\sigma_{on} w - \sigma_{2n} x_2 + b_p \frac{\sigma_{on}}{\sigma_{1n}} z_3 + u_{RFNFR} \right] \\ & - \sigma_{on} k_3 z_1 - b_p^{-1} (\ddot{x}_d + (1 - k_1^2) z_1 - (k_1 + k_2) z_2) \\ & - \hat{T}_d - \hat{T}_u - k_3 \dot{z}_1 \end{aligned} \quad (35)$$

식 (34)를 미분하고 식 (35)를 적용하면

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 = & -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 - \sigma_{1n} f_n(x_2) \tilde{z}^2 \\ & - b_p z_2 (\widehat{W}_{ko}^* - \widehat{W}_{ko})^T U_{ko} - b_p z_2 \epsilon + b_p z_2 \hat{T}_u \\ & + \frac{1}{\eta_1} (\widehat{W}_{ko}^* - \widehat{W}_{ko})^T (-\dot{\widehat{W}}_{ko}) \\ = & -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 - \sigma_{1n} f(x_2) \tilde{z}^2 \\ & - b_p z_2 \epsilon + b_p z_2 \hat{T}_u \\ & + (\widehat{W}_{ko}^* - \widehat{W}_{ko})^T (-b_p z_2 U_{ko} - \frac{1}{\eta_1} \dot{\widehat{W}}_{ko}) \end{aligned} \quad (36)$$

식 (36)에서

$$\dot{\widehat{W}}_{ko} = -\eta_1 b_p z_2 U_{ko} \quad (37)$$

$$\hat{T}_u = -b_p z_2 \text{sgn}(z_2) \quad (38)$$

으로 선정하면

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 = & -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 - \sigma_{1n} f(x_2) \tilde{z}^2 \\ & - b_p (z_2 \epsilon + |z_2| U) \\ \leq & -b_p (|z_2| |\epsilon| + |z_2| U) = -b_p |z_2| (U + |\epsilon|) \leq 0 \end{aligned} \quad (39)$$

따라서 $\dot{V}_4 \leq 0$ 이므로 Barbalat의 정리[12]에 의해 $t \rightarrow \infty$ 에 따라 $z_1 \rightarrow 0, z_2 \rightarrow 0$ 을 만족하게 된다.

제안된 제어시스템은 그림 1에 제시되어 있다. 제안한 RFNN에 대한 구조는 그림 2에 제시되어 있으며 다음과 같이 전개된다.

(I) 입력층 $O_i^I(N) = u_i^I, i = 1, 2, \quad (40)$

(II) 멤버십층 $O_j^{II}(N) = \exp[-s_{ij}^2 (O_i^I(N) + w_{ij}^{II} O_{ij}^{II}(N - I) - m_{ij})^2], j = 1, \dots, n \quad (41)$

(III) 규칙층

$$O_k^{III}(N) = \Pi_j w_j^{III}(N) w_k^{III} O_k^{III}(N-1), \quad (42)$$

$k=1, \dots, q$

(IV) 출력층

$$O_o^{IV}(N) = \sum_k w_{ko}^{IV} u_{ko}^{IV}(N) = \widehat{W}_{ko}^T U_{ko}, \quad (43)$$

$o=1,$

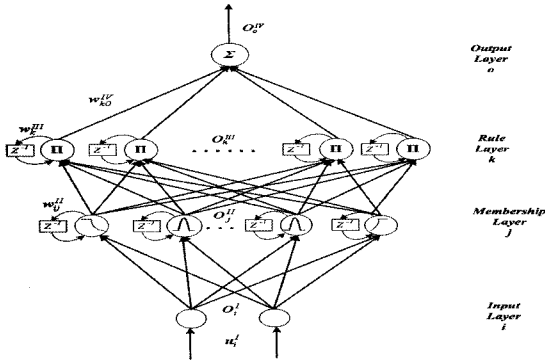


Fig. 2 A structure of the proposed RFNN system

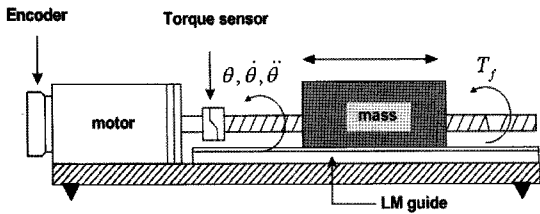


Fig. 3 A schematic diagram of the servo mechanical system

Table 1 Parameters of ball-screw and friction model

Symbol	Value
J	0.0013 kgm ²
T _c	0.0088 Nm
T _s	0.0026 Nm
q _s	0.013 rad/sec
σ ₀	0.75 Nm/rad
σ ₁	0.011 Nmsec/rad
torque constant	0.3 Nm/A
amplifier gain	2.72 A/V

3. 시뮬레이션 및 실험

서보모터와 볼-스크류, 직선가이드로 구성되는 서보 시스템에 대해 정적 마찰 파라미터를 실험적으로 구한 결과는 그림 3에 나타나 있으며 동적 마찰과 시스템 변수값들은 표 1에 제시되어 있다. 먼저 제한한 백스테핑 제어, 식 (34), (35)의 강인마찰관측기, RFNN, 근사오차 보상기를 결합한 Back_RFNR 시스템, 백스테핑 제어, 식 (35)에서 \widehat{T}_d , \widehat{T}_u 가 없는 마찰관측기만 결합한 Back_FO 시스템, 그리고 백스테핑만 사용한 Back 시스템을 설계하여 다음과 같은 경우에 대해 먼저 시뮬레이션을 수행하였다.

- 경우 1: $T_f = T_{fn}$, $T_d = 0$
- 경우 2: $T_f = 1.5 \times T_{fn}$, $T_d = 0.5 \times T_{fn}$

명령추종입력은 그림 5 (a)와 같은 가변정현입력을 선정하였다. 경우 1에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 5에 제시되어 있다. 그림 5 (b)에서 제한한 마찰관측기가 마찰 상태변수 z를 잘 추정하고 있으며 따라서 마찰토크도 잘 추정됨을 그림 5 (c)에서 확인할 수 있다. 따라서 Back FO 시스템은 공칭마찰에 대해 마찰보상 성능이 Back시스템보다 우수한 것을 그림 5 (d)에서 알 수 있다.

다음에 제한한 강인 마찰관측기의 성능을 다른 유사한 마찰관측기와 비교하기 위해 Canudas de Wit⁽¹⁾이 제안한 다음과 같은 마찰관측기를 설계하였다.

$$\dot{\hat{z}} = \dot{\theta} - f(\dot{\theta})\hat{z} - kz_1 \quad (44)$$

여기서 $k=0.1$ 또한 다음과 같이 주어지는 Xie⁽⁵⁾가 제안한 마찰관측기를 설계하였다.

$$\dot{\hat{z}} = \dot{\theta} - f(\dot{\theta})\hat{z} + \mu sgn(s) \quad (45)$$

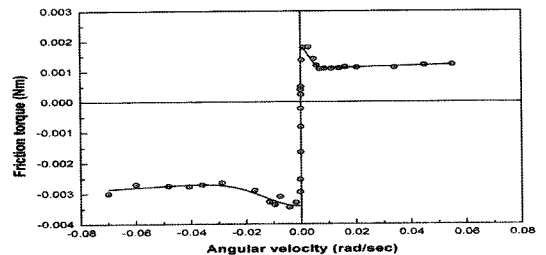
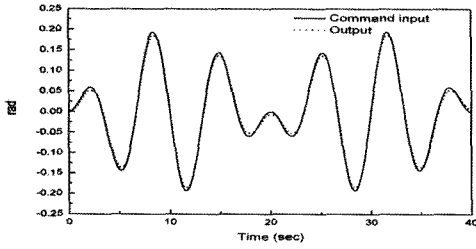
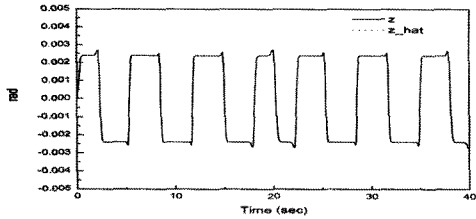


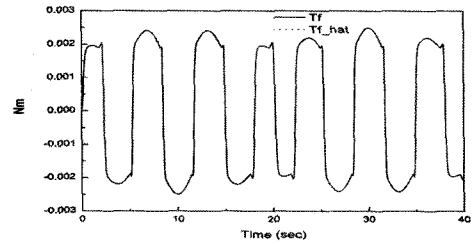
Fig. 4 The identified result of the static friction parameters



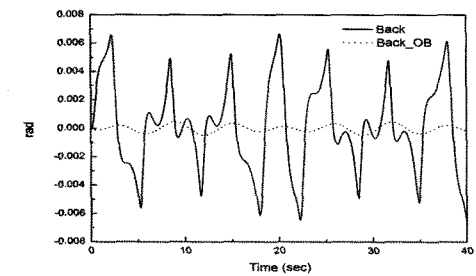
(a) The position tracking response of the Back system



(b) The estimated result of the friction state z of the Back_OB system



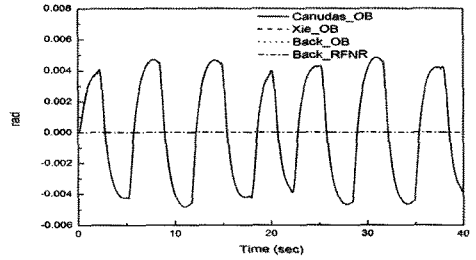
(c) The estimated result of the friction torque T_f of the Back_OB system



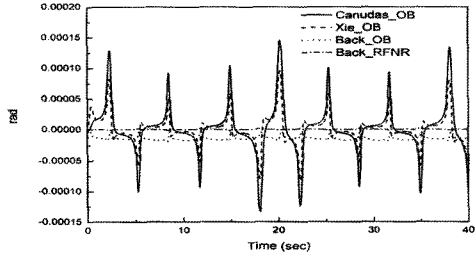
(d) The position tracking errors of each system

Fig. 5 Simulated result of the Back and Back_OB system: Case 1

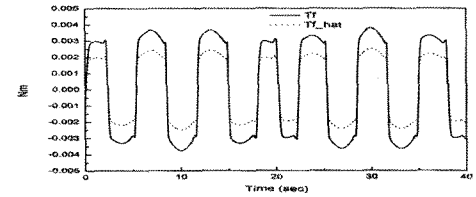
여기서 $\mu = 0.00025$, $s = z_1 + \lambda z_1$, $\lambda > 0$. 이러한 마찰관측기를 백스테핑 및 RFNN 보상기에 결합하여 경우 2에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 제한한 강인한 마찰 관측기를 갖는 Back_RFNR 시스템이 마찰값의 변화에 대해 가



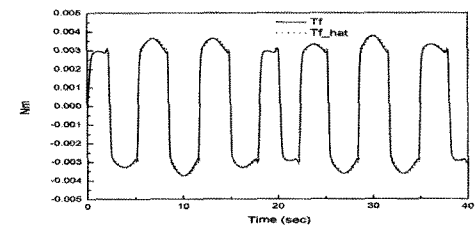
(a) The position tracking errors of each system



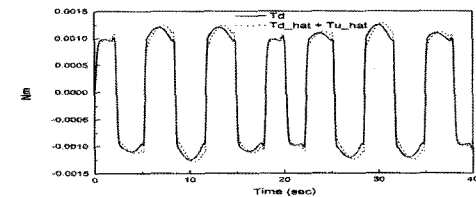
(b) The estimated errors of the friction state z of each system



(c) The estimated result of T_f of the Back_OB system



(d) The estimated result of T_f of the Back_RFNR system

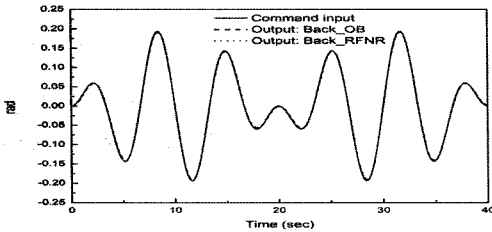


(e) The estimated result of T_d of the Back_RFNR system

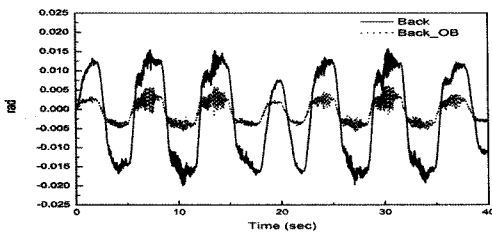
Fig. 6 Simulated results of the Canudas_OB, Xie_OB, Back_OB and Back_RFNR systems: Case 2

Table 2 Specification of system components of the control system

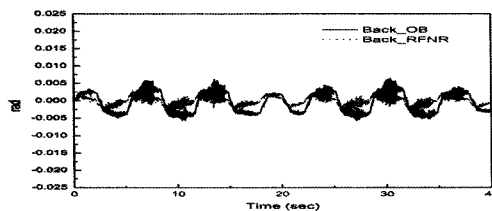
Item	Specification
IBM PC	Pentium II, MS-DOS, C-language
DAQ board	DR8330, resolution : 12 bits
Encoder counter board	PCL-833 Resolution : 32bits
Motor driver	FDD-106PD
DC servo motor	300W, 3000rpm
Encoder	ITD 21 B14, resolution 10000 pulse/rev
Ball-screw	THK, C0 grade



(a) The position tracking responses of the Back_OB and RFNR systems



(b) The position tracking errors of the Back and Back_OB systems



(c) The position tracking errors of the Back_OB and RFNR systems

Fig. 7 Experimental results

장 강인한 성능을 갖고 있음을 그림 6에서 확인할 수 있다. 위치추종성능과 마찰 상태변수 추종 성능이 우수하고 따라

Table 3 Mean and RMS values of the position tracking error for each control system (rad)

System	Mean Value	RMS Value
Back	-0.00186	0.0115
Back_OB	-5.4×10^{-4}	0.0029
Back_RFNR	-3.3×10^{-5}	0.0013

서 마찰토크와 변화된 마찰값을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. Back_OB의 경우 그림 6 (c)에서 변화된 마찰추종 성능이 저하됨을 알 수 있다. 이러한 시뮬레이션 결과에서 제안한 강인마찰 관측기와 RFNN의 성능이 개선됨을 보였다.

이러한 결과를 토대로 Back, Back_OB, Back_RFNR 시스템에 대해 위치추종 실험을 실시하였다. 실험은 표 2에 주어진 사양으로 DOS 모드에서 Turbo-C를 이용하여 제어기를 프로그래밍하였고 제어신호 및 위치입력은 DR8330 입출력보드와 PCL-833 엔코더 카운터 보드를 사용하여 구현하였다. RFNN의 계산시간을 고려하여 샘플링 시간은 4ms로 선정하였다. RFNN의 신경망 은닉층과 피지 멤버십 함수의 갯수는 각각 5개로 선정하였고 내부 루프에서 3회 반복하도록 선정하였다. 그림 7 (a)는 Back_OB와 Back_RFNR 시스템의 명령추종응답을 나타내고 있다. 그림 7 (b), (c)에서 제안한 Back_RFNR 시스템의 위치추종 성능이 가장 우수함을 알 수 있으며 표 3에 위치추종 오차에 대한 결과가 정량적으로 제시되어 있다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 동아대학교 교내연구비의 지원을 받아 연구하였습니다.

참고 문헌

- (1) Canudas de Wit, C., Olsson, H., and Astrom, K. J., 1995, "A new model for control of systems with friction," *IEEE Trans A.C.*, Vol. 40, No. 3, pp. 419~425.
- (2) Dupong, P., Hayward, V., Armstrong, B., and Alpeter, J., 2002, "Single state elasto-plastic friction models," *IEEE Trans A.C.*, Vol. 47, No. 5, pp. 787~792.
- (3) Al-Bender, F., Lampaert, V., and Swevers, J., 2005, "The generalized Maxwell-slip model: a novel model

- for friction simulation and compensation," *IEEE Trans. A.C.*, Vol. 50, No. 11, pp. 1883~1887.
- (4) Ge, S. S., Lee, T. H., and Ren, S. X., 2001, "Adaptive friction compensation for servo mechanism," *Int. J. System Science*, Vol. 32, No. 3, pp. 523~532.
- (5) Xie, W. F., 2007, "Sliding-mode-observer-based adaptive control for servo actuator with friction," *IEEE Trans. Indust. Elect.*, Vol. 54, No. 3, 1517~1527.
- (6) Alvarez, L., Yi, J. G., Horowitz, R., and Olmos, L., 2005, "Dynamic friction model-based tire-road friction estimation and emergency braking control," *Trans. ASME*, Vol. 127, March, pp. 22~32.
- (7) Lin, F. J., Hwang, W. J., and Wai, R. J., 1997, "A supervisory fuzzy neural network control system for tracking periodic inputs," *IEEE, Trans. Fuzzy Syst.*, Vol. 7, No. 1, pp. 41~52.
- (8) Lin, C. H., 2004, "Adaptive recurrent fuzzy neural network control for synchronous reluctance motor servo drive," *IEE Proc Electr. Power Appl.*, Vol. 151, No. 6, pp. 711~724.
- (9) Han, S. I., 2008, "Robust control for nonlinear servo system using fuzzy neural network and robust friction state observer," *KSPE*, Vol. 25, No. 6, pp. 89~99.
- (10) Han, S. I., 2009, "Robust adaptive Back-stepping control using dual friction observer and RNN with disturbance observer for dynamic friction model," *J. of KSMTE*, Vol. 18, No. 1, pp. 50~58.
- (11) Han, S. I., 2009, "Nonlinear friction control using the robust friction state observer and recurrent fuzzy neural network estimator," *J of KSMTE*, Vol. 90, No. 1, pp. 90~102.
- (12) Slotine, J. E. and Li, W., 1991, *Applied Nonlinear Control*, Prentice -Hall, New Jersey.