

# 미지의 제어 방향성과 비어파인 비선형성을 고려한 신경망 기반 외란 관측기와 추종기 설계

## Neural-networks-based Disturbance Observer and Tracker Design in the Presence of Unknown Control Direction and Non-affine Nonlinearities

김형오\* · 유성진†  
(Hyoung Oh Kim · Sung Jin Yoo)

**Abstract** - A disturbance-observer-based adaptive neural tracker design problem is investigated for a class of perturbed uncertain non-affine nonlinear systems with unknown control direction. A nonlinear disturbance observer (NDO) design methodology using neural networks is presented to construct a tracking control scheme with the attenuation effect of an external disturbance. Compared with previous control results using NDO for nonlinear systems in non-affine form, the major contribution of this paper is to design a NDO-based adaptive tracker without the sign information of the control coefficient. The stability of the closed-loop system is analyzed in the sense of Lyapunov stability.

**Key Words** : Nonlinear disturbance observer, Unknown control direction, Adaptive technique

### 1. 서론

불확실성을 갖는 비선형 시스템을 위한 제어이론은 다양한 기계, 전기 시스템 등의 응용 분야에 적용되면서 현대 제어 공학 분야에서 활발히 연구되고 있다. 이러한 비선형 불확실성 문제를 해결하기 위해 신경 회로망(neural network) 또는 퍼지 논리 시스템(fuzzy logic system)을 이용한 함수 근사화 기반 제어 기법들이 연구되었다[1-2]. 이러한 기법들에서 외부의 시변 외란은 적응 제어 방식을 통하여 외란의 유계치를 추정하거나[3], 르아프노브 안정도 증명과정에서 균일 궁극 유계(uniform ultimate bounds) 분석을 통해 유계치로 간주되었다[4]. 따라서 보다 시변 외란의 효율적인 보상을 위해 외란 관측기 이용한 방법들이 다양한 비선형 시스템에 적용되고 있다[5]. 또한 미지의 비선형성을 갖는 비선형 시스템에서 외란의 보상을 위해 함수 근사화 기법을 이용한 비선형 외란 관측기를 설계하는 연구가 최근에 제안되었다[6]. 하지만 [6]에서는 제어 입력의 도함수 그리고 신경 회로망으로 추정하고자 하는 미지 함수의 도함수가 모두 유계된다는 가정이 필요하고, 게다가 제어 입력의 방향성을 결정하는 비어파인 함수의 편미분함수의 부호에 대한 정보가 필요하다는 제약이 있다.

따라서 본 논문에서는 미지의 방향성을 갖는 불확실한 비어

파인 비선형 시스템의 외란 관측기 기반 적응 신경망 제어 기법을 제안한다. 제어기와 외란 관측기에 각각 함수 근사자를 도입하여 [6]에서 필요했던 제어 입력의 방향성 정보와 미지 함수의 도함수의 유계성의 가정 없이 외란 관측기 기반 적응 제어기를 설계한다. 르아프노브(Lyapunov) 안정도 이론을 바탕으로 설계한 폐루프 시스템의 모든 신호들이 균일하게 궁극적으로 유계됨을 보인다. 마지막으로 모의실험을 통해 본 논문에서 제안한 제어기의 성능을 검증한다.

### 2. 문제 정의

(1)과 같은 외란을 갖는 불확실한 비어파인 비선형 시스템을 고려하자.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= x_{i+1}, \\ \dot{x}_n &= f(x, u) + d(t), \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $i=1, \dots, n-1$ 에 대하여  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in R^n$ 은 상태변수 벡터,  $u \in R$ 과  $y \in R$ 은 각각 제어 입력과 시스템 출력을 의미한다. 미지의 비선형 함수  $f(x, u) : R^n \times R \rightarrow R$ 는  $C^\infty$  함수이며  $d(t) : R^+ \rightarrow R$ 는 시스템 (1)에 대한 외부 시변 외란이다.

본 논문의 제어 목적은 미지의 방향성을 갖는 비선형 시스템 (1)의 출력  $y$ 가 기준신호  $y_d$ 를 추종하도록 하는 외란 관측기 기

† Corresponding Author : School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University, Korea.

E-mail : sjyoo@cau.ac.kr

\* School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University, Korea.

Received : November 23, 2016; Accepted : March 9, 2017

반 제어기  $u$ 를 설계하는 것이다.

**가정 1.** 기준 출력 신호  $y_d(t)$ 와 그 도함수  $\dot{y}_d(t)$ ,  $\ddot{y}_d(t)$ 는 이용 가능하고 유계한다.

**가정 2.** 시스템에 대한 외란  $d$ 와 그 도함수  $\dot{d}$ 는 미지의 상수  $\bar{d}$ 와  $\bar{\dot{d}}$ 에 대하여 각각  $|d| \leq \bar{d}$ 와  $|\dot{d}| \leq \bar{\dot{d}}$ 로 유계한다.

**가정 3.**  $g(x, u) = \partial f(x, u) / \partial u$ 를 정의하자. 이 때,  $g \neq 0$ 는 알려지지 않고 미지의 부호를 가진다. 그리고  $0 < |g| < \bar{g}$ ,  $\forall (x, u) \in R^{n+1}$ 을 만족하는 양의 상수  $\bar{g}$ 가 존재한다.

**정의 1.** [7] 함수  $N(\xi)$ 가 다음과 같은 방정식을 만족할 경우 Nussbaum 함수라 한다.

$$\lim_{s \rightarrow +\infty} \sup \frac{1}{s} \int_0^s N(\xi) d\xi = +\infty$$

$$\lim_{s \rightarrow +\infty} \inf \frac{1}{s} \int_0^s N(\xi) d\xi = -\infty.$$

본 논문에서는  $N(\xi) = \xi^2 \cos(\xi)$ 을 사용한다.

**보조정리 1.** [8]  $V(\cdot)$ 와  $\xi(\cdot)$ 가 구간  $[0, t_f]$ 에서 정의된  $C^\infty$  함수이고  $\forall t \in [0, t_f]$ 에 대하여  $V(t) \geq 0$ 를 만족하고 Nussbaum 함수  $N(\xi)$ 가 우함수 일 때,  $\forall t \in [0, t_f]$ 에 대하여 아래의 부등식을 만족한다면,

$$V(t) \leq c_0 + e^{-c_1 t} \int_0^t (h(\tau)N(\xi) + 1)\dot{\xi} e^{c_1 \tau} d\tau$$

$V(t)$ ,  $\xi(t)$  그리고  $\int_0^t h(\tau)N(\xi)\dot{\xi} d\tau$ 는  $[0, t_f]$ 에서 반드시 유계된다. 여기서  $c_0, c_1 > 0$ 는 상수이고  $h(\cdot)$ 는 미지의 닫힌 구간  $I := [l^{-1}, l^{+1}]$ ,  $0 \notin I$ 에서 값을 갖는 시변 매개변수이다.

### 3. 주요 결과

#### 3.1 외란 관측기 기반 제어기 설계

제어기 설계를 위해 (2)과 같은 벡터  $z = [z_1, z_2, \dots, z_n]^T$ 를 정의한다.

$$e = [A^T \ 1]z \tag{2}$$

여기서  $z = x - x_d$ 와  $x_d = [y_d, \dot{y}_d, \dots, y_d^{(n-1)}]^T \in R^n$ 이고  $A = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}]^T$ 은  $e^{n-1} + \lambda_{n-1}e^{n-2} + \dots + \lambda_1$ 을 Hurwitz하게 만드는 설계 벡터이다.

오차 동역학식은 (3)과 같다.

$$\dot{e} = f(x, u) + d(t) - \dot{y}_d^{(n)} + [0 \ A^T]z. \tag{3}$$

평균값 정리 [9]를 사용하여 (3)를 정리하면 (4)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e} &= f(x, 0) + g(x, u^\theta)u + [0 \ A^T]z + d(t) - \dot{y}_d^{(n)} \\ &= -ke + g(x, u^\theta)u + Q_1(\nu_1) + aD \end{aligned} \tag{4}$$

여기서  $u^\theta = \theta u + (1-\theta)u^0$ ;  $0 < \theta < 1$ 이며,  $k, a > 0$ 는 설계 매개변수이고  $Q_1(\nu_1) = f(x, 0) + ke + [0 \ A^T]z - \dot{y}_d^{(n)}$ 이며,  $D = d(t)/a$ 이다. 그리고  $\nu_1 = [x, x_d, y_d^{(n)}]^T \in R^{2n+1}$ 이다. 미지의 함수  $Q_1(\nu_1)$ 을 근사화하기 위하여 가우시안 radial 기저함수 신경망(RBFNN)[10]을 사용하면, 다음과 같이 표현된다.

$$Q_1(\nu_1) = W_1^T S_1(\nu_1) + \epsilon_1 \tag{5}$$

여기서  $W_1$ 는 이상적인 가중치 벡터이고  $S_1$ 는 가우시안 기저함수 벡터이고  $\epsilon_1$ 은 근사화 오차이며 상수  $\bar{\epsilon}_1 > 0$ 에 대하여  $|\epsilon_1| \leq \bar{\epsilon}_1$ 을 만족한다. (5)를 (4)에 대입하여 정리하면 아래와 같다.

$$\dot{e} = -ke + g(x, u^\theta)u + W_1^T S_1(\nu_1) + aD + \epsilon_1. \tag{6}$$

함수  $g(x, u^\theta)$ 에 의한 미지의 방향성을 고려한 제어기와 적응 법칙은 다음과 같다.

$$u = N(\xi)(-\hat{W}_1^T S_1(\nu_1) - a\hat{D}) \tag{7}$$

$$\dot{\xi} = e \hat{W}_1^T S_1(\nu_1) + e a \hat{D} \tag{8}$$

$$\dot{\hat{W}}_1 = \Gamma_1 (e S_1(\nu_1) - \sigma_1 \hat{W}_1). \tag{9}$$

여기서  $\hat{W}_1$ 은 가중치 벡터  $W_1$ 의 예측벡터이고  $\Gamma_1 > 0$ 은 학습 매개변수이고,  $\sigma_1 > 0$ 은  $\sigma$ -modification [11]을 위한 설계 변수이고  $\hat{D}$ 는 외란  $D$ 의 추정치이다.

비선형 외란 관측기를 설계하기 위해  $\dot{e}$ 을 (10)과 같이 정리한다.

$$\begin{aligned} \dot{e} &= f(x, u) + [0 \ A^T]z + aD - \dot{y}_d^{(n)} \\ &= Q_2(\nu_2) + aD \end{aligned} \tag{10}$$

여기서  $Q_2(\nu_2) = f(x, u) + [0 \ A^T]z - \dot{y}_d^{(n)}$ ;  $\nu_2 = [x, x_d, y_d^{(n)}, \xi]^T$ 이다. 여기서 이를 근사화하기 위하여 가우시안 RBFNN을 사용하면, 다음과 같이 표현된다.

$$Q_2(\nu_2) = W_2^T S_2(\nu_2) + \epsilon_2 \tag{11}$$

여기서  $W_2$ 는 이상적인 가중치 벡터이고  $S_2$ 는 가우시안 기저함수 벡터이고  $\epsilon_2$ 은 근사화 오차이며 상수  $\bar{\epsilon}_2 > 0$ 에 대하여  $|\epsilon_2| \leq \bar{\epsilon}_2$ 을 만족한다.

(11)을 (10)에 대입하면 (12)와 같다.

$$\dot{e} = W_2^T S_2(\nu_2) + aD + \epsilon_2. \quad (12)$$

다음으로 보조변수  $s$ 을 (13)과 같이 정의하자.

$$s = e - \psi \quad (13)$$

여기서  $\psi$ 는  $\dot{\psi} = cs + \hat{W}_2^T S_2(\nu_2)$ 에 의해 생성되고  $c > 0$ 는 설계 매개변수이고  $\hat{W}_2$ 은 가중치 벡터  $W_2$ 의 예측벡터이며 (14)와 같이 학습된다.

$$\hat{W}_2 = \Gamma_2 (s S_2(\nu_2) - \sigma_2 \hat{W}_2) \quad (14)$$

여기서  $\Gamma_2 > 0$ 은 학습 매개변수이고,  $\sigma_2 > 0$ 은  $\sigma$ -modification [11]을 위한 설계 변수이다.

따라서  $s$ 의 동역학식은 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{e} - \dot{\psi} \\ &= W_2^T S_2(\nu_2) + \epsilon_2 + aD - cs - \hat{W}_2^T S_2(\nu_2) \\ &= -cs + aD + \epsilon_2 + \tilde{W}_2^T S_2(\nu_2). \end{aligned} \quad (15)$$

이를 바탕으로 외란  $D$ 에 대한 외란 관측기를 (16)과 같이 설계한다.

$$\hat{D} = s - \phi \quad (16)$$

여기서  $\phi$ 는  $\dot{\phi} = -cs + a\hat{D}$ 에 의해 생성된다. 외란 예측 오차를  $\tilde{D} = D - \hat{D}$ 로 정의하면, 그 동역학식은 (17)과 같다.

$$\dot{\tilde{D}} = \dot{D} - \dot{\hat{D}} = \dot{D} - a\tilde{D} - \tilde{W}_2^T S_2(\nu_2) - \epsilon_2. \quad (17)$$

### 3.2 안정도 분석

전체적인 페루프 시스템의 안정도를 분석하기 위해 르아프노브 함수  $V$ 을 (18)과 같이 정의하자.

$$V = \frac{1}{2}e^2 + \frac{1}{2}\tilde{D}^2 + \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2\Gamma_1} \tilde{W}_1^T \tilde{W}_1 + \frac{1}{2\Gamma_2} \tilde{W}_2^T \tilde{W}_2 \quad (18)$$

여기서  $i=1,2$ 에 대하여  $\tilde{W}_i = W_i - \hat{W}_i$ 이다.

**보조정리 1.** [11] 가우시안 RBFNN의 기저함수 벡터  $S_i(\nu)$ 을 위해  $\|S_i(\nu)\| \leq b$ 를 만족하는 임의의 양의 상수  $b$ 가 존재한다.

**정리 1.** 미지의 방향성을 갖는 불확실한 비어파인 비선형 시스템(1)에 제안한 제어기 (7)과 외란 관측기 (16), 적응 규칙 (9), (14)을 적용한 전체 페루프 시스템을 고려하자. 이 때 가정 1-3를 만족하고 전체 페루프 시스템의 신호들이 균일하고 궁극적으로 유계(uniformly ultimately bounded)되고 추종 오차는 충분히

줄어든다.

**증명)** (6)-(9), (15)와 (17)을 이용하여  $V$ 를 미분하면 (19)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= (g(x, u^\theta)N(\xi) + 1)\dot{\xi} - ke^2 + ae\tilde{D} \\ &\quad + e\tilde{W}_1^T S_1(\nu_1) + \epsilon_1 e + \dot{\tilde{D}}\tilde{D} - a\tilde{D}^2 \\ &\quad - \tilde{D}\tilde{W}_2^T S_2(\nu_2) - \epsilon_2 \tilde{D} - cs^2 + asD + \epsilon_2 s \\ &\quad + s\tilde{W}_2^T S_2(\nu_2) - \frac{1}{\Gamma_1} \tilde{W}_1^T \dot{\tilde{W}}_1 - \frac{1}{\Gamma_2} \tilde{W}_2^T \dot{\tilde{W}}_2 \\ &= (g(x, u^\theta)N(\xi) + 1)\dot{\xi} - ke^2 + ae\tilde{D} + \epsilon_1 e + \dot{\tilde{D}}\tilde{D} \\ &\quad - a\tilde{D}^2 - \tilde{D}\tilde{W}_2^T S_2(\nu_2) - \epsilon_2 \tilde{D} - cs^2 + asD \\ &\quad + \epsilon_2 s + \sigma_1 \tilde{W}_1^T \tilde{W}_1 + \sigma_2 \tilde{W}_2^T \tilde{W}_2. \end{aligned} \quad (19)$$

가정 2로부터  $|D| \leq \bar{D}$ 와  $|\dot{D}| \leq \bar{D}_d$ 를 만족하는 양의 상수  $\bar{D}$ 와  $\bar{D}_d$ 가 존재함을 알 수 있다. 이것과 보조정리 1, 그리고 영의 부등식(Young's inequality)을 사용하면 (19)의 각각의 항은 다음의 부등식을 만족한다.

$$\begin{aligned} ae\tilde{D} &\leq \frac{a}{2}e^2 + \frac{a}{2}\tilde{D}^2 \\ \epsilon_1 e &\leq \frac{1}{2}\epsilon_1^2 + \frac{1}{2}e^2 \\ \dot{\tilde{D}}\tilde{D} &\leq \frac{1}{2}\tilde{D}_d^2 + \frac{1}{2}\tilde{D}^2 \\ -\tilde{D}\tilde{W}_2^T S_2(\nu_2) &\leq \frac{1}{2}\tilde{D}^2 + \frac{b_2^2}{2}\|\tilde{W}_2\|^2 \\ -\epsilon_2 \tilde{D} &\leq \frac{1}{2}\epsilon_2^2 + \frac{1}{2}\tilde{D}^2 \\ asD &\leq \frac{1}{2}s^2 + \frac{a^2}{2}\tilde{D}^2 \\ \epsilon_2 s &\leq \frac{1}{2}\epsilon_2^2 + \frac{1}{2}s^2 \\ \sigma_i \tilde{W}_i^T \tilde{W}_i &\leq -\frac{\sigma_i}{2}\|\tilde{W}_i\|^2 + \frac{\sigma_i}{2}\|\bar{W}_i\|^2, \quad i=1,2. \end{aligned}$$

위의 부등식들을 이용하면 (19)는 (20)이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq (g(x, u^\theta)N(\xi) + 1)\dot{\xi} - \left(k - \frac{(a+1)}{2}\right)e^2 - \frac{1}{2}(a-3)\tilde{D}^2 \\ &\quad - (c-1)s^2 - \frac{\sigma_1}{2}\|\tilde{W}_1\|^2 - \frac{1}{2}(\sigma_2 - b_2^2)\|\tilde{W}_2\|^2 + C \end{aligned} \quad (20)$$

여기서  $C = (1/2)\bar{\epsilon}_1^2 + \bar{\epsilon}_2^2 + (a^2/2)\bar{D}^2 + (1/2)\bar{D}_d^2 + (\sigma_1/2)\|\bar{W}_1\|^2 + (\sigma_2/2)\|\bar{W}_2\|^2$ 이다.  $j=1, 2, \dots, 5$ 에 대하여  $\rho_j > 0$ 일 때 설계 매개변수  $k, a, c, \sigma_1, \sigma_2$ 를  $k = ((a+1)/2) + \rho_1, a = 3 + \rho_2, c = 1 + \rho_3, \sigma_1 = \rho_4, \sigma_2 = b_2^2 + \rho_5$ 와 같이 선택하면, (20)은 (21)과 같다.

$$\dot{V} \leq (g(x, u^\theta)N(\xi) + 1)\dot{\xi} - \rho V + C \quad (21)$$

위의 부등식에서  $\rho := \min(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_5)$ 이다. (21)의 양변 적분하면 (22)와 같다.

$$V(t) \leq e^{-\rho t} \int_0^t (g(x, u^\theta)N(\xi) + 1)\dot{\xi}e^{\rho\tau}d\tau + \eta \quad (22)$$

여기서  $\eta = V(0) + C/\rho$ 이다. 보조정리 2에 의하여  $V(t), \xi(t)$  그리고  $\int_0^t (g(x, u^\theta)N(\xi) + 1)\dot{\xi}d\tau$ 는 구간  $[0, t_f]$ 에서 유계된다. [12]의 Proposition 2을 통해 전체 페루프 시스템의 유계성은  $t_f = \infty$ 일 때 성립한다. 그러므로 부등식 (21)은 (23)과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\dot{V} \leq -\rho V + \bar{C} \quad (23)$$

여기서  $\bar{C} = C + \eta$ ;  $\eta$ 는  $|(g(x, u^\theta)N(\xi) + 1)\dot{\xi}| \leq \eta$ 를 만족하는 양수이다. 따라서  $\rho > \bar{C}/V$ 일 때  $\dot{V} < 0$ 이다. 결과적으로 폐회로의 모든 신호들은 균일하고 궁극적으로 유계하고 추종 오차는 콤팩트 집합(compact set)  $\Omega = \{e | \|e\| \leq \sqrt{2\bar{C}/\rho}\}$ 로 유계한다. 집합  $\Omega$ 는  $\rho$ 를 작게 하도록 설계 매개변수 값들을 조절하면 충분히 작아진다.

#### 4. 모의 실험

모의 실험을 위한 Van der Pol 발진기는 아래와 같이 나타낼 수 있다[13,14].

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ x_2 &= f(x, u) + d(t), \\ y &= x_1 \end{aligned}$$

여기서  $f(x, u) = -x_1 + x_2 + u + (x_1^2 + x_2^2)(1 - e^{-u})/(1 + e^{-u}) - x_1^2x_2$ 이고, 외란  $d(t)$ 는  $d(t) = 0.5\sin(2t) + 0.2\cos(t)$ 으로 주어진다. 또한 기준 신호  $y_d$ 는  $y_d = \sin(t)$ 이다. 상태변수의 초기값은  $[x_1(0) \ x_2(0)]^T = [0.5 \ 0]^T$ 으로 선택하였다. 이 때, 제안한 외란 관측기 기반 제어 시스템을 위한 매개변수 값들은  $a=1, c=1, k=2, \lambda_1 = \lambda_2 = 1, \Gamma_1 = \Gamma_2 = 2, \sigma_1 = \sigma_2 = 0.001$ 로 선정한다.

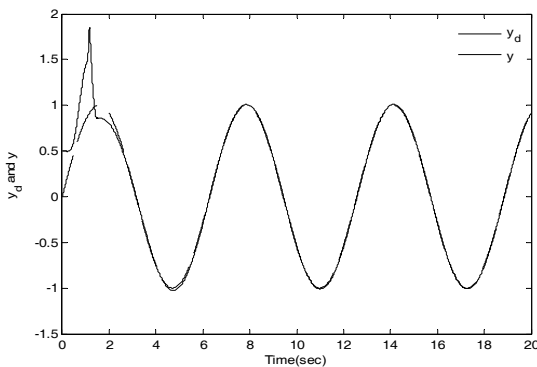


그림 1 추종 제어 결과 (실선:  $y$ , 점선:  $y_d$ )  
Fig. 1 Tracking result (full line:  $y$ , dotted line:  $y_d$ )

그림 1로부터 본 논문에서 제안한 제어 시스템의 출력이 기준 신호를 잘 추종한다는 것을 확인할 수 있으며, 그림 2는 기준 신호와 출력 간의 추종 오차를 나타낸다. 그림 3은 가우시안

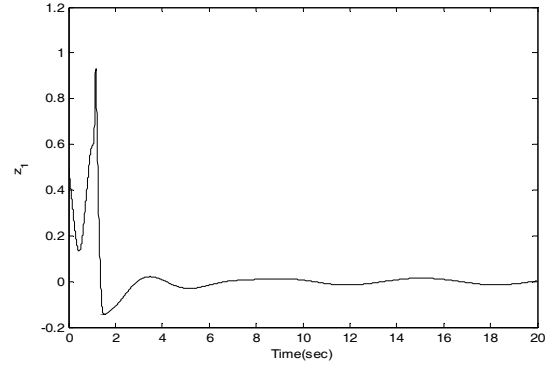


그림 2 추적 오차  $z_1$   
Fig. 2 Tracking error  $z_1$

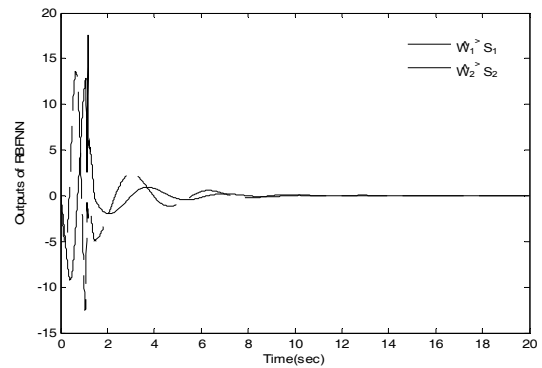


그림 3 가우시안 RBFNN의 출력  
(실선:  $\widehat{W}_1^T S_1(\nu_1)$ , 점선:  $\widehat{W}_2^T S_2(\nu_2)$ )  
Fig. 3 Outputs of RBFNN  
(full line:  $\widehat{W}_1^T S_1(\nu_1)$ , dotted line:  $\widehat{W}_2^T S_2(\nu_2)$ )

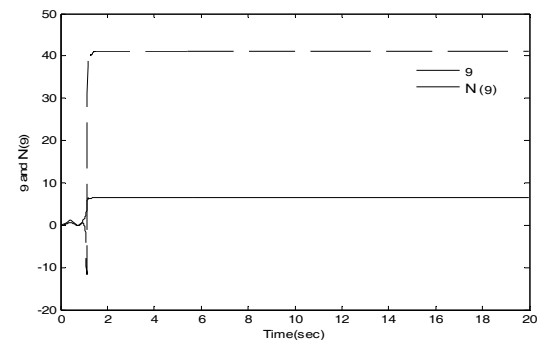


그림 4 매개변수  $\xi$ 와 Nussbaum 함수  $N(\xi)$   
(실선:  $\xi$ , 점선:  $N(\xi)$ )  
Fig. 4 Parameter  $\xi$  and Nussbaum function  $N(\xi)$   
(full line:  $\xi$ , dotted line:  $N(\xi)$ )

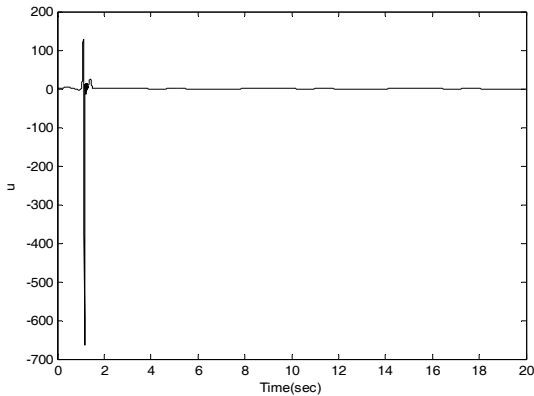


그림 5 제어 입력  $u$   
**Fig. 5** Control input  $u$

RBFNN의 출력을 보여주고 있다. 그림 4와 5에서 각각 적응 매개변수  $\xi$ 와 Nussbaum 함수  $N(\xi)$ , 그리고 제어 입력을 나타낸다. 이와 같은 결과를 통해 신호들이 유계되어 있음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 미지의 방향성을 갖는 불확실한 비어퍼인 비선형 시스템의 외란 관측기 기반 적응 신경망 제어 기법을 제안하였다. 비선형 외란 관측기를 설계하여 시스템에 시변 외란이 가해지는 경우에 출력이 기준 신호를 추종하도록 하였다. 불확실성을 갖는 함수의 근사화를 위해 가우시안 RBFNN을 이용하였고, 제어 입력에 대한 미지의 방향성 문제는 Nussbaum 함수를 이용하여 해결하였다. 설계된 제어 시스템의 안정도를 르야프노브 이론을 이용하여 검증하였다.

### 감사의 글

본 연구는 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2016R1D1A1B03931312)이며 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No.20154030200860)임.

### References

[1] S. S. Ge, and C. Wang, "Adaptive NN control of uncertain nonlinear pure-feedback systems," *Automatica*, vol. 38, No. 4, pp. 671-682, 2002.  
 [2] D. Wang, and J. Huang, "Adaptive neural network control for a class of uncertain nonlinear systems in

pure-feedback form," *Automatica*, vol. 38, No. 8, pp. 1365-1372, 2002.  
 [3] T. P. Zhang, S. S. Ge, "Adaptive dynamic surface control of nonlinear systems with unknown dead zone in pure-feedback form," *Automatica*, vol. 44, No. 7, pp. 1895-1903, 2008.  
 [4] B. Miao, and T. Li, "A novel neural network-based adaptive control for a class of uncertain nonlinear systems in strict-feedback form," *Nonlinear Dyn.*, vol. 79, No. 2, pp. 1005-1013, 2015.  
 [5] W. H. Chen, "Disturbance observer based control for nonlinear systems," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 9, No. 4, pp. 706-710, 2004.  
 [6] M. Chen and S. S. Ge, "Direct adaptive neural control for a class of uncertain nonaffine nonlinear systems based on disturbance observer," *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 43, No. 4, pp. 1213-1225, 2013.  
 [7] R. D. Nussbaum, "Some remarks on the conjecture in parameter adaptive control," *Syst. Contr. Lett.*, vol. 3, pp. 243-246, 1983.  
 [8] C. Wang, D. J. Hill, S. S. Ge, and G. Chen, "An ISS-modular approach for adaptive neural control of pure-feedback systems," *Automatica*, vol. 42, No. 5, pp. 723-731, 2006.  
 [9] S. Lang, *Real analysis reading*. Addison Wesley, MA, 1983.  
 [10] J. Park, I. W. Sandberg, "Universal approximation using radial-basis function networks," *Neural Comput.*, vol. 3, pp. 246-257, 1991.  
 [11] P. A. Ioannout, and P. V. Kokotovic, *Adaptive systems with reduced models*. New York: Springer, 1983.  
 [12] E. P. Ryan, "A universal adaptive stabilizer for a class of nonlinear systems," *Syst. Control Lett.* vol. 16, pp. 209 - 218, 1991.  
 [13] Y. S. Lee, A. F. Vakakis, L. A. Bergman, and D. M. McFarland, "Suppression of limit cycle pscillations in the Van der Pol oscillator by means of passive non-linear energy sinks," *Struct. Control Health Monit.*, vol. 13, No. 1, 2006.  
 [14] B. Karimi, M. B. Menhaj, and I. Saboori, "Robust adaptive control of nonaffine nonlinear systems using radial basis function neural networks," *Proc., 32nd IEEE Conf., on Industrial Electronics*, pp 495-500, 2006.  
 [15] H. O. Kim and S. J. Yoo, "Disturbance-observer-based Adaptive neural tracking of uncertain non-affine nonlinear systems with unknown control direction" *Conf. Information and Control Systems(CICS)* (in Korean), pp. 146-147, 2016.

## 저 자 소 개



**김형오 (Hyoung-Oh Kim)**

2016년 중앙대학교 전기전자공학과 학사. 현재 동 대학원 석사 과정. 관심 분야는 비선형 적응 제어 및 지능 제어 이론.



**유성진 (Sung-Jin Yoo)**

2003년 연세대학교 전기전자공학과 학사. 2005년 동 대학원 석사. 2009년 동 대학원 대학원 박사. 2009년~2010년 미국 UIUC 박사 후 연구원. 현재 중앙대 전자전기공학부 부교수. 관심 분야는 비선형 적응 제어, 분산 적응 제어 및 지능 제어 이론. 시간 지연 시스템, 대규모 시스템, 로봇 시스템