

신경회로망을 이용한 2자유도 로봇매니플레이터의 슬라이딩모드 제어

*양호석¹, 이건복²

¹ 숭실대학교 대학원 기계공학과, ² 숭실대학교 기계공학과

Sliding Mode control of 2-DOF Robot Manipulator Using Neural Network

*Ho Seog Yang¹, Gun Bok Lee²

¹ Dept. of Mech. Eng., Graduate School of Soongsil Univ., ² Div. of Mech. Eng. Soongsil Univ.

Key words : Sliding Mode Control(슬라이딩 모드 제어), Neural Network(신경회로망), Robot Manipulator(로봇 매니플레이터), Multi Layer Perceptron(다층 퍼셉트론), Variable Structure Control(가변구조제어)

1. 서론

많은 비선형 동적시스템들은 매개변수나 구조의 불확실성으로 인해 정확한 수학적 모델을 확립하기 어렵고 이러한 모델링의 부정확성은 비선형제어 시스템에서 성능저하의 큰 요인이 된다. 그러므로 이러한 모델의 불확실성에도 불구하고 제어 성능을 유지하기 위한 강인한 제어기의 설계가 필요하다^[10]. 이러한 제어기 설계의 방법으로 1950년대부터 가변구조제어 방법이 연구되었으며 이러한 가변구조 제어의 한 형태인 슬라이딩모드 제어(SMC; Sliding Mode Control)는 슬라이딩 평면상에서 불연속적인 제어 입력을 가함으로써 이러한 비선형 시스템의 모델링 오차나 외란에 의한 불확실성을 다루는 강인한 제어기법으로 잘 알려져 있다.^[3] 슬라이딩모드 제어의 목적은 시스템의 궤적이 슬라이딩 곡면을 따라가도록 하는 것이다. 그러나 시스템의 불확실성을 보상하며 슬라이딩 곡면 상에 머물도록 하기 위해서는 제어 입력 값의 급격한 변화가 필요하고 이러한 급격한 입력 값의 변화가 슬라이딩 모드 제어의 가장 큰 단점인 체터링을 발생하게 되어 시스템의 모델링 과정에서 무시되었던 고주파 성분의 특성을 유발할 수 있다. 이러한 체터링을 줄이기 위하여 Slotine은 경계층을 도입하였고^[11] Zhou와 Fisher는 시변시스템에 대하여 연속 슬라이딩 모드 제어를 제안하였다.^[7] 또한 최근에는 동적 시스템 인식능력이 탁월한 신경회로망을 이용하여 불확실성을 보상하고자 하는 연구가 수행되고 있다. Niu, Lam 등은 비선형 상태지연 시스템에 신경회로망을 이용한 슬라이딩모드 제어를 제안하였고^[8] Lin과 Shien 등은 강인한 회귀신경망 슬라이딩모드 제어를 제안하였고^[9] Lee와 Hong는 회귀신경망을 이용한 슬라이딩모드제어를 제안하였다.^[11] 본 논문에서는 시스템의 불확실성의 영향을 최소화하고 슬라이딩모드제어가 갖는 단점을 보완하기 위하여 다층구조 신경회로망을 이용한 슬라이딩모드제어를 제안한다. 본 논문의 구성은 2장에서 매니플레이터의 모델링을 수행하고 3장에서는 슬라이딩 모드 제어기와 다층퍼셉트론 신경회로망 제어기가 결합된 새로운 제어기를 소개하고, 모의실험을 통한 제어기의 성능 평가를 4장에서 수행하였다. 5장에서 결론 및 향후 연구 과제를 설명한다.

2. 매니플레이터의 운동방정식

로봇 매니플레이터에 대한 오일러 라그랑지 방정식을 행렬형식으로 표현하면 다음과 같다.^[2]

$$\tau(t) = M(q(t))\ddot{q}(t) + h(q(t), \dot{q}(t)) + c(q(t)) \quad (2.1)$$

여기서
 $\tau(t) = n \times 1$ 토크 벡터
 $q(t) = n \times 1$ 로봇팔의 관절 벡터
 $M(q) = n \times n$ 관성행렬
 $h(q, \dot{q}) = n \times 1$ 비선형 코리올리력과 원심력 벡터
 $c(q) = n \times 1$ 중력 벡터
 위의 운동방정식에서 상태변수를 각 관절의 위치와 속도로 설정하면

$x_1 = q, x_2 = \dot{q}, (x = (x_1^T, x_2^T)^T), y = q = x_1$ 와 같으며 일반적으로 상태변수를 사용한 운동방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) + B_2(x_1, x_2)u - B_2(x_1, x_2)d(t) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$y = x_1$
 여기서
 $f_1 = x_2, f_2 = -M^{-1}(x_1)[H(x_1, x_2)x_2 + C(x_1)]$
 $B_2 = M^{-1}(x_1), u = T$ 이다.

3. 신경망을 이용한 슬라이딩 모드 제어기 설계

일반적으로 동적 시스템은 다음과 같이 상태변수를 이용하여 나타낸다.

$$\dot{x}^{(n)}(t) = f(X) + b(X)u(t) + d(t) \quad (3.1)$$

여기서 $u(t)$ 는 제어입력이며, x 는 출력이다. 또한 $X = [x_1, x_2, \dots, x^{(n-1)}]^T$ 는 상태벡터이며 $f(X)$ 는 불확실성을 포함하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f(X) = \hat{f}(X) + \Delta f(X) \quad (3.2)$$

$\hat{f}(X)$ 는 $f(X)$ 의 추정 값이고, $\Delta f(X)$ 는 모델의 불확실 정도를 나타내며 최대값을 $F(X)$ 로 할 수 있다.

$$|\Delta f(X)| \leq F(X) \quad (3.3)$$

제어의 목적은 주어진 불확실한 모델링 함수 $f(X)$ 와 $b(X)$, 외란 $d(t)$ 가 존재하는 상황에서 페루프 시스템의 상태가 원하는 상태벡터 $X_d = [x_d, \dot{x}_d, \dots, x_d^{(n-1)}]^T$ 를 추종하도록 즉, 추적오차가 0이 되도록 제어입력 $u(t)$ 를 결정하는 것이다. 추적오차 벡터는 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{X} = X - X_d = [\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}^{(n-1)}]^T \quad (3.4)$$

슬라이딩 모드 제어 기법은 페루프시스템의 구조가 상태변수의 값에 따라 불연속적으로 달라지는 가변구조 제어 시스템으로 이러한 변환은 미리 설정된 기준에 의해 이루어진다. 이러한 기준이 되는 함수 즉 슬라이딩 곡면(sliding surface)을 다음과 같이 정의한다.^{[5][6]}

$$\sigma(X, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \tilde{x} \quad (3.5)$$

제어 목적을 달성하는 제어입력 u 는 다음과 같은 슬라이딩 조건으로부터 구할 수 있다.^{[5][6]}

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \sigma^2(X, t) \leq -\eta |\sigma|, \quad \eta > 0 \quad (3.6)$$

위의 슬라이딩 조건은 시스템의 오차벡터가 어떠한 초기값을 가지더라도 슬라이딩 곡면상에 도달하고 그 후 슬라이딩 평면 $\sigma(t) = 0$ 에 머물게 하는 조건이다.

페루프 시스템이 식(3.6)의 슬라이딩 조건을 만족하는 제어 법칙 $u(t)$ 를 구하기 위해 2장의 매니플레이터 모델에 슬라이딩 평면을 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma(X, t) = \phi(t) - \sigma_a(X, t) = 0 \quad (3.7)$$

여기서 상태벡터 X 는 X_2 와 X_2 의 해 얻어지며, $\phi(t)$ 는 슬라이딩 함수 $\sigma(X, t)$ 의 시간중속 부분이고, 제어 플랜트에 가하는 기준 입력을 포함한다. $\sigma_a(X)$ 는 $\sigma(X, t)$ 에서 상태변수에만 의존하는 부분으로

$$\sigma_a = G_1 x_1 + G_2 x_2 \quad (3.8)$$

로 쓸 수 있다.

시스템에 대하여 다음과 같이 리아프노브 함수를 선택한다.

$$V = 1/2 \sigma^T \sigma \quad (3.9)$$

이 함수는 양의 한정함수이고, 리아프노브 함수의 도함수는 다음과 같이 정의하며 음의 한정 함수이다.

$$\dot{V} = -\sigma^T Dsgn(\sigma) < -\eta |\sigma| \quad (3.10)$$

여기서 D 는 양의 한정 행렬이고, $sgn(\sigma)$ 는 σ 의 각 요소에 적용되는 시그모이드 함수를 의미한다.

$$\text{식 (3.9)와 식(3.10)으로부터} \quad (3.11)$$

$$\sigma^T \dot{\sigma} = -\sigma^T Dsgn(\sigma) \quad (3.11)$$

와 같이 되며

슬라이딩 함수의 미분은 다음과 같다.

$$\dot{\sigma} = \dot{\phi} - G_1 f_1 + G_2 (f_2 - B_2 u + B_2 d) \quad (3.12)$$

식(3.12)을 식(3.11)에 대입하면 다음과 같이 제어입력 신호를 얻을 수 있다.

$$U(t) = U_{eq}(t) + \Delta U(t) \quad (3.13)$$

여기서 $U_{eq}(t)$ 는 등가제어 입력으로 다음과 같이 쓸 수 있으며

$$U_{eq}(t) = (G_2 B_2)^{-1} [\dot{\phi} + G_2 f_2 - G_1 f_1] + d \quad (3.14)$$

추가적인 제어 항은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta U(t) = -(G_2 B_2)^{-1} Dsgn(\sigma) = -Ksgn(\sigma) \quad (3.15)$$

시스템이 슬라이딩조건을 만족하는 u 는 다음과 같이 선택한다.^{[5][6]}

$$u = u_{eq} - K \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (3.16)$$

슬라이딩 모드 제어의 강인함은 불연속 함수 $\operatorname{sgn}(\sigma)$ 에 근거한 빠른 스위칭에 있으나 제어입력의 급격한 변화는 시스템의 채터링을 유발한다. 이와 같은 채터링을 피하는 방법으로 스위칭 평면 주위에 얇은 경계층을 도입한다.^{[11][6]} 여기서 ϕ 는 경계층의 두께이고 실제 적용하기 위해서 식(3.6)의 조건을 다음과 같이 수정한다.

$$|\sigma| \geq 0 \rightarrow \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \sigma^2 \leq (\dot{\phi} - \eta) |\sigma| \quad (3.17)$$

위 식을 만족하기 위하여 식(3.16)의 제어법칙 $u(t)$ 는 다음과 같이 수정된다.

$$u = u_{eq} - K \operatorname{sat}(\sigma/\phi) \quad (3.18)$$

여기서 sat 함수는 다음과 같다.

$$\operatorname{sat}(\sigma/\phi) = \begin{cases} \sigma/\phi & |\sigma/\phi| < 1 \\ \operatorname{sgn}(\sigma/\phi) & \text{otherwise} \end{cases}$$

온라인신경회로망제어는 Fig. 1와 같이 슬라이딩모드제어의 등가제어 입력항과 추가제어 항은 다층퍼셉트론 신경회로망에서 계산되어 그 결과를 더하여 매니플레이터의 제어입력으로 보낸다.

신경망으로부터 출력된 값 U_{cjk} 는 원하는 값 U_{cjk}^d 와 비교하여 오차 e_k 를 만들며

$$e_k = U_{cjk}^d - U_{cjk} = \Delta U_k \quad (3.19)$$

최소화할 목적함수는 모든 오차의 합으로 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 (U_{cjk}^d - U_{cjk})^2 \approx \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 e_k^2 \quad (3.20)$$

오차를 최소화하기 위해 가중치 값을 갱신하기 위한 출력층의 가중치 변화율은 다음과 같다.

$$\Delta w_{jk} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{jk}} = \eta \delta_k U_{cjk} \quad (3.21)$$

$$\delta_k = -\frac{\partial E}{\partial v_k} = -\frac{\partial E}{\partial U_{cjk}} \frac{\partial U_{cjk}}{\partial v_k} = e_k \phi'(v_k) \quad (3.22)$$

출력이 다음과 같은 하이퍼볼릭 탄젠트 함수이면

$$\phi(v_k) = \frac{1 - e^{-v_k}}{1 + e^{-v_k}} \quad (3.23)$$

시그모이드 함수의 미분은 다음과 같다.

$$\phi'(v_k) = \frac{1}{2} (1 - \phi^2(v_k)) \quad (3.24)$$

은닉층의 가중치 변화는 다음으로 계산한다.

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \mu \delta_j U_{cjk} \quad (3.25)$$

여기서 $\delta_j = \sum_{k=1}^2 \delta_k w_{jk} \phi'(U_{cjk})$ 이다.

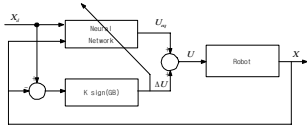


Fig. 1 Overall system with proposed controller

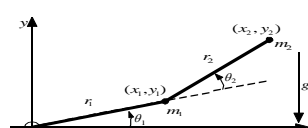


Fig. 2 Two-link manipulator

4. 모의시험 및 고찰

본 절에서는 Fig. 2과 같은 2링크 매니플레이터에 대해서 온라인 신경회로망 슬라이딩모드 제어기에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 제어성능을 평가 하였다.

2링크 매니플레이터의 운동방정식은 2장의 오일러 라그랑지 방정식으로부터

$$\begin{bmatrix} M_{11}(\theta_2) & M_{12}(\theta_2) \\ M_{12}(\theta_2) & M_{22}(\theta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -A_{12}(\theta_2)\dot{\theta}_2 - A_{12}(\theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ A_{12}(\theta_2)\dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1(\theta_1, \theta_2)g \\ g_2(\theta_1, \theta_2)g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix}$$

와 같이 유도할 수 있으며 여기서

$$\begin{aligned} M_{11} &= (m_1 + m_2)r_1^2 + m_2r_2^2 + 2m_2r_1r_2\cos\theta_2, & M_{12} &= m_2r_1r_2\cos\theta_2 \\ M_{22} &= m_2r_2^2, & A_{12} &= m_2r_1r_2\sin\theta_2 \\ g_1 &= (m_1 + m_2)r_1\cos\theta_1 + m_2r_2\cos(\theta_1 + \theta_2), & g_2 &= m_2r_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned}$$

이다. 본 시뮬레이션에서 사용된 파라미터는 다음과 같다.

$$r_1 = 1, r_2 = 0.8, m_1 = 0.5, m_2 = 0.5$$

또한 로봇에 작용하는 미지의 외란은 다음과 같이 가정하였다.

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \cdot \sin(5t) + 2\theta_1 \\ 0.5 \cdot \sin(3t) + 2\theta_2 \end{bmatrix}$$

온라인 신경회로망에서 등가제어입력을 계산하기 위한 구조는 입력층에 12개의 뉴우런, 중간 은닉층에 24개의 뉴우런, 출력층에 2개의 뉴우런을 가지는 구조로 되어있으며 은닉층의 비선형 활성화함수는 하이퍼볼릭 탄젠트 함수 $f(x) = \frac{e^{-x} - e^x}{e^{-x} + e^x}$ 를 사용하고, 출력층의 선형함수는 $f(x) = x$ 를 사용하였다.

모든 가중치는 ± 0.5 의 범위 내에서 랜덤하게 초기화시켰다. Fig. 10과 Fig. 11에서는 추종응답을 나타내고 있다. 결과에서 보듯이 신경회로망 슬라이딩 모드 제어기의 정상상태 응답이 외란이 존재함에도 불구하고 원하는 출력을 잘 추종하고 있음을 보여주고 있다. Fig. 14과 Fig. 15는 각 관절의 등가제어입력을 보여주고 있으며 첫 번째 관절이 두 번째 관절의 관성부하를 포함하고 있어 크게 나타남을 볼 수 있다.

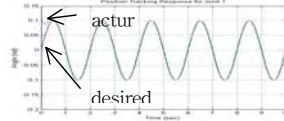


Fig. 10 On-line position tracking response for joint 1 with disturbance

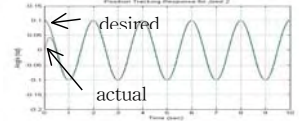


Fig. 11. On-line position tracking response for joint 2 with disturbance

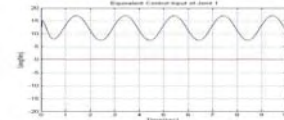


Fig. 14. Equivalent control input of joint 1 using NN

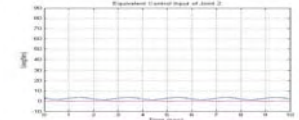


Fig. 15. Equivalent control input of joint 2 using NN

위의 결과를 검토하면 온라인 신경회로망 슬라이딩 모드 제어에서는 초기 학습시간동안 과도상태의 유효한 오차가 관측되고 있으나 과도시간이 지난 후 이러한 오차는 급격히 감소됨을 볼 수 있다. 또한 외란 및 시스템 모델의 추정 값의 변화에도 불구하고 시스템의 출력응답 특성이 잘 추종함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 시스템의 불확실성의 영향을 최소화하고 슬라이딩모드 제어의 단점인 채터링을 줄이기 위해 신경회로망을 이용한 슬라이딩 모드제어를 제안하였다. 슬라이딩 모드 제어의 안정성은 리아프노브(Lyapunov) 함수를 사용함으로써 보장하였고 제안된 신경 회로망은 다층퍼셉트론 이론을 사용하였다. 제안된 제어기를 2링크 매니플레이터에 적용하여 모의실험으로 그 성능을 확인하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 슬라이딩모드의 등가제어 입력 값을 신경회로망에 의해 결정함으로써 슬라이딩모드 제어의 빠른 스위칭 제어입력 대신 신경회로망의 연속적인 제어입력의 선택으로 채터링 문제를 극복할 수 있음을 보였다.
2. 모의실험 결과에서 보는 바와 같이 외란이나 부하의 변동에 대하여 강한 성질을 가지고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] J. J. E. Slotine, "Sliding Control Design for Non-linear System", Int. J. Control Vol. 40, No. 2, pp.421~434, 1984
- [2] Mark W. Spong, M. Vidyasagar, Robotics Dynamics and Control, Jone Wiley & Sons, 1989.
- [3] Utlin, V. I., Darkunov, S. V., "Sliding Mode Control; in Dynamic System", Int. J. Control, vol. 55, No.4, pp. 1029~1037, 1992.
- [4] F. L. Lewis, S. Jagannathan and A. Yesildir, "Neural Network Control of Robot Manipulators and Nonlinear Systems", Taylor & Francis, 1999.
- [5] J. J. E. Slotine, W. Li, Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J., 1991.
- [6] R. Palm, "Sliding mode Fuzzy Control", IEEE Int. Conf. on fuzzy systems, pp.519~526, 1992
- [7] Zhou, F., Fisher, D. G., "Continuous Sliding Mode Control", Int. j. Control, vol. 55, pp. 313~327, 1992.
- [8] Y. Niu, J. Lam, X. Wang and D.W.C. Ho, "Sliding-mode Control for nonlinear state-delayed system using neural-network approximation", IEE Proc.-Control Theory Appl. Vol. 150. No. 3, 2003.
- [9] F. J. Lin, P. H. Shieh and P. H. Shen, "Robust Recurrent-neural-network Sliding-mode Control for the X-Y table of a CNC Machine", IEE Proc. Control Theory Appl. Vol. 153, No. 1, 2006.
- [10] Ho Seog Yang, Yu Chul Jung, and Gun Bok Lee, "Continuous-Time Controller Design using Identification of Feedback System in Frequency Domain," Proc. of the KSME, Vol. 1, No. 2, pp. 664~669. 2001
- [11] Kyung Soo Hong and Gun Bok Lee, "Sliding Mode Control based on Recurrent Neural Network", Proc., of KSMTE, Vol. 2, pp135~139, 2000.
- [12] Wilfrid Perruquetti and Jean Pierre Barbot, "Sliding Mode Control in Engineering", Marcel Dekker, 2002.