

신경회로망을 이용한 슬라이딩 모드 제어기의 설계

이태성^o, 양오, 양해원
한양대학교 전기공학과

Design of the Sliding Mode Controller using Neural Networks

Lee Tae-Sung, Yang Oh, Yang Hai-Won
Department of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract

In this paper, a design of the sliding mode controller using neural networks is proposed. The overall control system consists of a neural network controller and a reaching mode control input. The neural network controller approximates the equivalent control on the sliding surface and reaching mode control input is used to bend the entire system trajectories toward the sliding surface. The proposed controller is applied to the position control of a DC servo motor.

1. 서론

슬라이딩 모드 제어기법은 초기상태부터 슬라이딩 평면에 도달하기까지의 리칭 모드와 슬라이딩 평면의 동특성에 따라 시스템의 상태가 평형점으로 가는 슬라이딩 모드로 구성된다. 적절한 슬라이딩 평면을 선정하고 고주파 성분의 스위칭 제어 입력을 가해줌으로써 시스템의 상태가 슬라이딩 평면으로 되면 슬라이딩 평면의 동특성에 따라 시스템이 제어되기 때문에 시스템의 파라미터가 변하는 경우나 외관에 대하여 둔감한 특성을 보이고, 빠른 과도특성을 나타낸다[1][2].

슬라이딩 모드 제어기를 설계하기 위해서는 임의의 초기치로부터 슬라이딩 평면으로 도달하도록 하고 슬라이딩 평면에 유지될 수 있도록 제어입력을 구하는 것이다. 그러나 이렇게 구한 제어입력은 고주파의 불연속치이고, 채터링 현상을 유발한다. 만일 시스템에 대한 정확한 수학적 모델을 알 수 있다면 슬라이딩 모드일 때의 연속적인 등가제어입력을 구할수 있고, 시스템의 입력을 등가제어입력과 슬라이딩 평면으로 수렴하도록 하는 최소한의 불연속 입력으로 구성하면 보다 안정한 슬라이딩 모드 제어기를 구성할 수 있다[3]. 그러나 시스템의 수학적인 모델을 모르면 등가제어입력을 알 수 없고, 수학적 모델을 안다 하더라도 실제 시스템은 모델보다 훨씬 복잡하기 때문에 정확한 등가제어입력을 구할 수 없게 된다[3].

본 논문에서는 신경회로망의 학습능력을 이용하여 등가제어입력을 학습하도록 하였다. 신경회로망은 역전파 알고리즘으로 학습하며 교사신호를 모르기 때문에 학습신호는 근사적으로 스위칭 변수에서 구하였다. 신경회로망의 파라미터는 임의의 작은 초기값을 가지고, 온라인으로 튜닝된다.

제안된 제어시스템의 효용성을 보이기 위해 DC 서보 모터에 적용하고, 널리 사용되고 있는 PID제어기와 비교하여 본 제어시스템의 우수함을 입증한다.

2. 슬라이딩 모드 제어 기법

다음과 같이 표현되는 n차 비선형 시스템을 고찰 하기로 한다.

$$y^{(n)} = f(y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}) + g(y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)})u \quad (1)$$

여기서 함수 f 와 g 는 미지의 연속함수이고 g 는 양의 값을 갖는다고 가정한다. 슬라이딩 모드 제어기를 설계하기 위하여 $x_1 = y$ 으로 정의하면 (1)식을 다음과 같은 상태 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f(x) + g(x)u \end{aligned} \quad (2)$$

신호 $c_1 = r - y$ 로 정의 하면 오차에 대한 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= e_3 \\ &\vdots \\ \dot{e}_n &= r^{(n)} - f(x) - g(x)u \end{aligned} \quad (3)$$

이때 슬라이딩 평면을 $s = c^T e$
 $c = [c_1, c_2, \dots, 1]^T$ 으로 정의 하고 슬라이딩 모드일 때의 등가제어입력은 $\dot{s} = 0$ 으로 놓고 u 를 u_{eq} 로 대치하여 u_{eq} 에 관하여 풀면 슬라이딩 모드일 때 등가 제어 입력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= r^{(n)} - f(x) - g(x)u_{eq} + \bar{c}^T e = 0 \\ u_{eq} &= g^{-1}(x)[r^{(n)} - f(x) + \bar{c}^T e] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\bar{c} = [0, c_1, c_2, \dots, c_{n-1}]^T$ 이다.

이제 전체 제어입력을 구하기 위하여 Reaching 조건을 만족

하도록 다음과 같은 Reaching Law

$$\dot{s} = r^{(n)} - f(s) - g(s)u_t + \bar{c}^T e = -Q \text{sat}(s), \quad Q > 0 \quad (5)$$

를 도입해서 진짜 제어입력을 구하면

$$u_t = g^{-1}(s)[r^{(n)} - f(s) + \bar{c}^T e + Q \text{sat}(s)] \quad (6)$$

이 된다. 여기서 $\text{sat}(s)$ 는

$$\text{sat}(s)' = \begin{cases} -1 & s < -\delta \\ \frac{1}{\delta}s & |s| \leq \delta \\ +1 & s > \delta \end{cases} \quad (7)$$

이다. 식 (6)의 우변에서 앞의 세항은 식 (4)에서 구한 등가 제어 입력과 같은 것을 알 수 있다. 따라서 식(6)의 제어 입력은 등가 제어 입력과 리칭조건을 만족하도록 하는 제어 입력 부분으로 나눌 수 있고 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u_t = u_{eq} + u_r \quad (8)$$

u_r 은 $g(y)$ 의 lower bound \underline{g} 를 안다고 가정하면

$$u_r = Q \text{sat}(s) \quad (9)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 Q 는 Q/\underline{g} 이다.

3. 신경회로망을 이용한 슬라이딩 모드 제어기 설계

실제로 등가제어입력 u_{eq} 를 구하기 위해서는 플랜트의 수학적인 모델이 필요하다. 수학적인 모델이 주어진 경우에도 실제의 플랜트와 수학적인 모델 사이의 오차가 크다면 정확한 등가 제어입력 u_{eq} 를 구할 수 없게 될 것이다. 따라서 본 논문에서는 신경회로망의 비선형 함수 근사 특성을 이용하여 u_{eq} 를 학습하도록 하였다. 식 (8)의 제어입력은

$$u_t = \hat{u}_{eq} + u_r \quad (10)$$

이 되고 사용된 신경회로망은 입력층, 1개의 은닉층과 출력층으로 구성되며, 은닉층의 활성화함수는 tanh 함수를 사용하였고, 출력층의 뉴런은 선형 뉴런을 사용하였다. 신경회로망의 파라미터 학습방법은 다음과 같은 역전파 알고리즘으로 하였으며

$$W^{(k+1)} = W^{(k)} - \eta \frac{\partial J}{\partial W} \quad (11)$$

(11)

사용된 평가함수는

$$J = \frac{1}{2} (u_{eq} - \hat{u}_{eq})^2 \quad (12)$$

이다. 식 (12)를 식 (11)에 대입하면 다음과 같다.

$$W^{(k+1)} = W^{(k)} + \eta (u_{eq} - \hat{u}_{eq}) \frac{\partial \hat{u}_{eq}}{\partial W} \quad (13)$$

이때 교사신호 u_{eq} 를 모르기 때문에 u_{eq} 대신에 \hat{u}_{eq} 가 쓰이므로 $u_{eq} - \hat{u}_{eq}$ 을 \tilde{u}_{eq} 라 정의하고 \hat{u}_{eq} 에 관해 풀면

$$\hat{u}_{eq} = u_{eq} - \tilde{u}_{eq} \quad (14)$$

이 된다. 식 (10)과 식 (14)를 식 (5)에 대입하면

$$g(x) \hat{u}_{eq} - g(x)Q \text{sat}(s) = -Q \text{sat}(s) \quad (15)$$

이 된다. 여기서 gQ 는 항상 Q 보다 크기 때문에 \tilde{u}_{eq} 는 $\text{sat}(s)$ 에 비례하는 식이 된다. 따라서 식 (13)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W^{(k+1)} = W^{(k)} + \eta \text{sat}(s) \frac{\partial \hat{u}_{eq}}{\partial W} \quad (16)$$

4. 실험 및 결과

실험대상은 엔코더가 부착된 DC 시보 모터이며 모터의 사양은 정격출력 200W, 역기전력정수(K_b) 2.25×10^{-2} V/rpm, 토크 정수 (K_t) 2.2×10^{-2} N·m/A, 기계적 시정수 (T_m) 12.68 msec, 전기적 시정수 (T_e) 1.6 msec 이다.

그림 1은 실험 장치의 구성도이다.

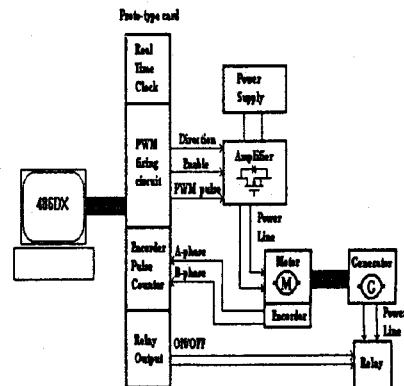


그림 1 실험 장치의 구성도

그림 1에서 제어 알고리즘을 수행하기 위하여 IBM-PC 486이 사용되며, PC내부에 Interface용 Proto type Board를 제작하였다. 이 장치에서는 Programmable Interval Timer(82C54)와 Programmable Logic Device인 EPM7096의 EPLD가 내장되어 각종 보호회로 및 부하 제어신호등을 발생시킨다. PWM파형은 타이머 82C54의 2개의 카운터를 이용하여 구성 되는데, 1개의 카운터는 PWM파형의 주기를 만들고 다른 1개의 카운터는 PWM파형의 On-Time을 구성한다. 이렇게 만들어진 PWM파형은 Power FET로 구성된 증폭부에서 증폭된후 모터의 입력으로 들어간다. 모터의 출력은 엔코더 펄스를 카운트하고 회전방향을 감출하여 주제어기인 CPU로 채환된다. 주제어기인 CPU는 채환된 값으로부터 제어 알고리즘으로 제어입력을 구한 후, 구한 제어입력에 맞는 PWM파형을 만들기 위해 82C54의 On-Time을 만들어주는 카운터값을 변화시킴으로써 제어를 하였다.

실험에서는 모터의 위치제어를 하였으며 기준입력은 30π (1-cost) 이고 신경회로망의 학습률 η 는 1.5로 하였다. 부하변동은 1.57초마다 발전기 출력단자를 릴레이를 통해 ON/OFF 시킴으로써 가해주었다.

그림 2와 그림 3은 부하 변동이 없을 경우 각각 PID 제어기와 제안한 제어기를 사용했을 경우의 실험결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 제안한 제어기를 사용했을 경우가 PID 제어기를

사용했을 경우 보다 훨씬 오차가 작음을 알 수 있다.

그림 4와 그림 5는 모터의 부하변동이 있는 경우의 실험 결과이다. 제안한 제어기의 경우가 부하변동이 있는 경우에도 PID 제어기보다 우수한 제어성능을 보임을 알 수 있다.

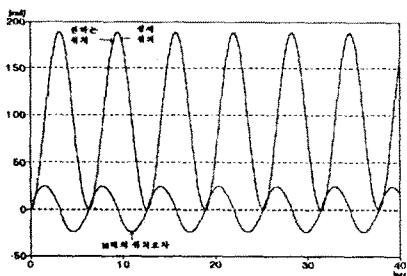


그림 2 PID 제어기를 사용했을 경우

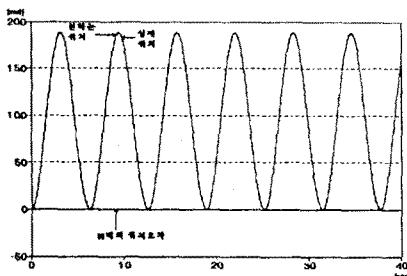


그림 3 제안한 제어기를 사용했을 경우

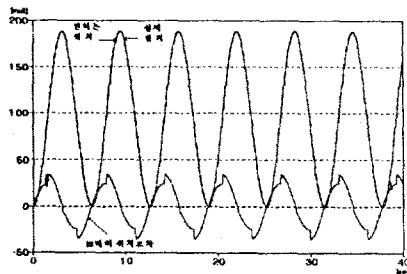


그림 4 PID 제어기를 사용했을 경우 (부하변동)

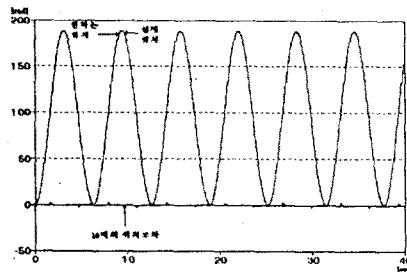


그림 5 제안한 제어기를 사용했을 경우 (부하변동)

5. 결 론

본 논문에서는 신경회로망을 이용하여 슬라이딩 모드 제어기를 구현하였다. 전체 제어시스템은 시스템의 수학적 모델이 필요없이 신경회로망으로 학습한 등가제어입력과 리칭모드 제어입력으로 구성되었다. 리칭모드 제어입력은 임의의 초기치로부터 슬라이딩 평면으로 수렴하도록 하고 슬라이딩 평면에서는 극사한 등가제어입력으로 제어를 함으로써 시스템의 동특성이 슬라이딩 평면의 동특성을 갖도록 하였다. 본 논문에서 제안한 제어시스템을 DC 서보 모터에 적용함으로써 우수한 성능을 확인하였다. 앞으로는 다변수 제어시스템에 적용할 수 있는 제어시스템을 설계하고 전체시스템의 안정성에 관하여 연구가 필요하다.

6. 참고문헌

- [1] J. Y. Hung and W. Gao, "Variable Structure Control: A Survey," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 40, no. 2, pp. 2-21, 1993.
- [2] W. Gao and J. C. Hung, "Variable Structure Control of Nonlinear Systems," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 45-55, 1993.
- [3] Z. Qijie and S. Chunyi, "An adaptive sliding mode control scheme for robot manipulators," *INT. J. CONTROL*, vol. 57, no. 2, pp. 261-271, 1993.
- [4] S. C. Lin and Y. Y. Chen, "RBF-Network-Based Sliding Mode Control," *Proceedings of the International Conference on Systems, Man, Cybernetics*, pp. 1957-1961, 1994.
- [5] K. S. Narendra and K. Parthasarathy, "Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks," *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 4-27, 1990.
- [6] 이진영, 양해원, "최적 전향 제어기를 이용한 DC 서보모터의 위치제어," *대한전기학회 논문지*, vol. 41, no. 9, pp. 1042-1049, 1992.