

PID-신경망 제어를 이용한 Rotary Inverted Pendulum 제어

“선권석”

*광주기능대학 메카트로닉스학과

Rotary Inverted pendulum control Using PID-Neural network Controller

Kwon Seok Seon

*Dept. of Mechatronics, Kwang ju Politechnic College, San58-1, Woonam-dong
Puk Ku, Kwangju 500-170, KOREA

Abstracts In this paper, we describes PID-neural network controller for the Rotary Inverted pendulum. PID control is applied to many fields but has some problems in nonlinear system due to a variation of parameter. So, we should design the controller which is adjusted PID parameters by the neural network which is learned by backpropagation algorithm. And we show that on-line control is possible through the PID-neural network controller. The angle of the pendulum is controlled and then the position of the Rotating arm is also controlled to maintain with in the set point. Measurement of the pendulum angle is obtained using a potentimeter. The objective of the experiment is to design a PID-neural network control system that positions the arm as well as maintains the inverted pendulum vertical. Finally, we describe the actual experiment system and confirm the experimental results.

Keywords Fuzzy Logic Control, Neural network control, PID-Neural network control.

I. 서 론

제어기에 있어서 시스템의 안정도가 가장 중요하다. 종래의 동적 시스템 제어에 있어서는 제어대상의 확실한 수학적 모델이 필요하다. 그러나 실제 시스템이 비선형성을 갖고 있는 경우에는 거의 불가능하다. PID 제어 방식과 같은 일정 이득을 갖는 경우, 이와 같은 비선

형성 특성이 있고, 제어기에는 정확한 응답을 기대할 수 없다. 일반적으로 신경 회로망(Neural network)은 신경망 위상(network topology), 개별적인 뉴런 특성(Individual neuron characteristics) 그리고 학습 알고리즘(learning algorithm)에 의해 특징 지어진다. 신경 회로망은 동적 적용 제어에 있어서 효과 적인 방법인데 그 이유는 다음과 같다. 첫째, 개개의 뉴런의 계산에 따라 높은 계산 속도를 가지고 병렬 처리가 용이하다. 둘째, 불 분명 하거나 알수 없는 동력학적 특성에 의해 영향을 받지 않는다. 셋째, 학습되지 않는 구간에도 대해서도 효과적으로 대응한다. 따라서 연속시간 제어 시스템에 많이 사용되는 PID 제어기와 신경 회로망을 접목하여 PID-신경망 제어를 설계하여 Rotary Inverted pendulum 제어에 사용할 것이다. Rotary Inverted pendulum은 Pendulum의 각도와 Rotating Arm의 위치에 의해 완성된다. 이들 각각의 신호 값은 포텐시메터에 의해서 측정되고, 측정된 값은 제어기 입력으로 사용된다. 여기서 신경회로망은 PID제어기에서 중요한 비례값, 정상상태의 오차를 감소 시켜주는 적분값 그리고 응답의 오비슈트를 감소 시켜주는 예측 동작을 하는 미분값을 결정해준다. 기어가 장착된 모터를 적절한 Torque를 발생하도록 구동하여 Pendulum의 각도와 Rotating Arm의 위치를 적절하게 찾아준다. 실험에 있어서 포텐션 메터는 기준 위치가 몇번의 실험을 하게되면 변화가 생김에 따라 매번 확인하고 실험에 응하는것이 좋을 듯 싶다. 먼저 PID 신경 회로망에 대해서 알아보고, Rotary Inverted Pendulum에 대해서 알아볼 것이다. 그리고 이를 제어하고자 하는 시스템을 설계하고, 단순 PID 제어기의 경우와 PID-신경망 제어기의 성능에 대해서 확인한다.

II. PID 신경망 제어기

일반적으로 신경회로망이 제어에 적용될 때는 오류 역전파(Backpropagation) 학습 방법이 많이 이용된다. 간략히 살펴보면 다음과 같이 나타낼수 있다. 입력층 신경 세포에 입력 패턴을 제시하고, 출력층 신경 세포의 에러(error)와 에러의 변화값을 구해서 은닉층의로 역전파한다. 이런 과정에 따라 출력층과 은닉층의 에러와 에러의 변화값이 모두구해지면 연결 가중치를 조절한다. 즉, 학습이 완료되때 까지 반복한다. 이와 같은 작업을 통해 적절한 PID 값을 찾도록 본 논문에서는 설계하였다. 먼저 PID-신경망의 구성을 보면 그림 1과 같다.

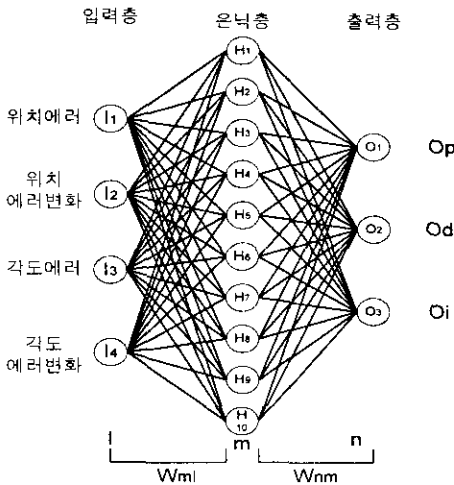


그림 1 PID-신경망의 구성

제안된 PID-신경망 제어기는 입력층은 Rotaring Arm 의 위치 에러와 에러의 변화분, Pendulum의 각도 에러와 에러의 변화분인 4개, 중간층인 은닉층은 10개 그리고 출력층은 PID의 각각의 값에 해당하는 3개의 뉴런으로 구성 하였다. 그 결과 PID 각각에 해당하는 제어 입력 값을 구하고, PID 제어기로 입력되어 새로운 제어 입력값을 얻는다. 오차는 기준값과 피드백 되어오는 실제 값에의해 얻어지고, 신경 회로망의 학습 방법은 모멘트 항이 있는 오류 역전파 모뎀이다. 은닉층은 시그모이드 함수를 전이 함수로 하였다. 이를 바탕으로한 PID-신경망 제어기의 Block Diagram은 다음과 같다.

먼저 PID의 특성을 알아보면,

$$U(t) = K \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (1)$$

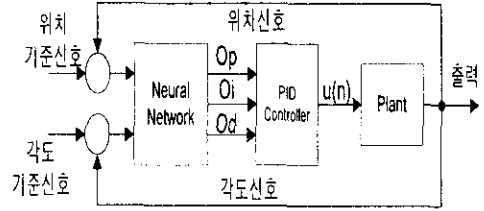


그림 2. PID-신경망 제어기의 블록도

이고, 식 (1)을 이산화하고 제어기 출력값으로 표현하면,

$$\Delta u(n) = u(n-1) + O_p \{e(n) - e(n-1)\} + O_i e(n) + O_o \{e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)\} \quad (2)$$

로 된다. 따라서 뉴런 세포 사이의 관계식은 다음 식과 같다.

$$HO_k = \sum W_{nm} \cdot H_j \quad (3)$$

$$OO_k = f(HO_k) \quad (4)$$

∴ HO_k : 출력층 뉴런으로의 모든 입력.

OO_k : 출력층 뉴런의 출력.

W_{nm} : 중간층과 출력층 사이의 가중치.

f(·) : 뉴런의 활성화 함수(시그모이드).

평가 함수는 식(5)와 같고, 이 평가 함수를 최소화 해야한다. 이는 최소 오차 자승법을 이용하여 가능하다.

$$E = \frac{1}{2} (y_i - y_o)^2 \quad (5)$$

여기서, y_i는 측정된 출력이고, y_o는 목표치이다.

가중치 수정은 다음식에 의해서 이루어진다.

$$\Delta W_{nm}(n) = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{nm}} + \alpha \Delta W_{nm}(n-1) \quad (6)$$

여기서, η와 α는 각각 학습률과 모멘트 항으로서 0~1의 값을 갖도록 한다.

III. Rotary Inverted Pendulum

서보 플랜트가 장착된 Rotary Inverted Pendulum의 구성은 그림 3과 같다. 펜듈럼의 각도와 위치 측정은 포텐셜 미터를 사용해서 한다.

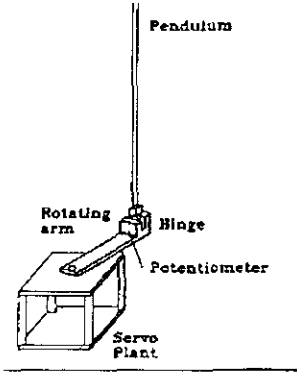


그림 3. Rotary Inverted Pendulum의 Schematic

Rotary Inverted Pendulum의 Model은 그림 4에서 다시 단순화하여 나타내었다. 시스템에서 에너지들은 다음 식에 의해서 주어진다.

$$\begin{aligned}
 PE_{pen} &= m_p g l_p \cos(\alpha) \\
 KE_{pen} &= 0.5 m_p [(\dot{\theta} r + \dot{\alpha} l_p \cos(\alpha))^2 \\
 &\quad + (\dot{\alpha} l_p \sin(\alpha))^2] \\
 KE_{base} &= 0.5 J_b \dot{\theta}^2
 \end{aligned} \quad (7)$$

윗식과 Lagrangian 공식을 이용하여 다음과 같이 시스템의 미분 방정식을 얻을수 있다.

$$(m_p r^2 + J_p) \ddot{\theta} + m_p r \ddot{\alpha} l_p \cos(\alpha) - m_p r \dot{\alpha}^2 l_p \sin(\alpha) = T \quad (8)$$

$$m_p l_p \cos(\alpha) \ddot{\theta} r - m_p l_p \sin(\alpha) \dot{\alpha} \dot{\theta} r + m_p \ddot{\alpha} l_p^2 - m_p g l_p \sin(\alpha) = 0 \quad (9)$$

또한 선형 모델은 식(10)에 의해서 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{m_p r g}{J_b} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{J_b + m_p r^2}{l_p J_b} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J_b} \\ \frac{r}{l_p J_b} \end{bmatrix} T \quad (10)$$

여기서, 시스템에 주어진 상수들을 이용하여 상태 표

현이 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -67 & 0 & 0 \\ 0 & 64 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 258 \\ -62 \end{bmatrix} T \quad (11)$$

- r (arm length) : 0.145[m]
- g : 9.8
- m_p (pendulum mass) : 0.210[kg]
- l_p (half of full length) : 0.305[m]
- L_p (full length) : 0.61[m]
- J_b (base inertia) : 2*gear72+gear120+hinge+arm+motor
- gear72 : 0.00000361, gear120 : 0.0000226,
- hinge : 0.0015,
- arm : 0.00094, motor : 3.87e-7*70.5*70.7

그리고 다음 식에 의해서 DC 서보 모터의 Torque가 구해진다.

$$V = IR_m + K_m w_m = IR + K_m K_g w \quad (12)$$

, 여기서 $w_m = K_g w$

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{V}{R} - \frac{K_m K_g}{R} w \\
 T &= K_g T_m = K_g K_m I \\
 \text{따라서, } T &= \frac{K_m K_g}{R} V - \frac{K_m^2 K_g^2}{R} w
 \end{aligned}$$

이것과 시스템 파라메타들을 행렬식으로 대입하면 다음 식과 같이 다시 표현 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -67 & -25 & 0 \\ 0 & 64 & 12 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 47 \\ -62 \end{bmatrix} V \quad (13)$$

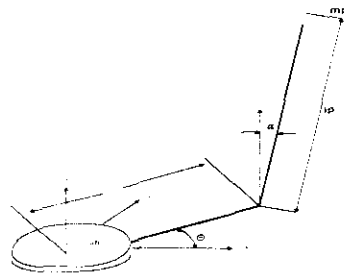


그림 4. Rotary Inverted Pendulum의 모델

Matlab의 LQR 디자인을 이용하여 최적의 피드백 이득 k_1, k_2, k_3, k_4 의 값을 각각 구하면

$$\text{즉, } V_{in} = -(k_1 \theta + k_2 \alpha + k_3 \dot{\theta} + k_4 \dot{\alpha})$$

the closed loop system : $A_c = A - bK$

minimizes the quadratic performance index :

$$J = \int (X'QX + rV^2)dt$$

여기서,

$$Q = \begin{bmatrix} 0.25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad r = 0.05$$

Matlab을 이용하여 LQR 제어기를 디자인하면,

$$k = \text{lqr}(A, B, Q, r)$$

여기서, 구해진 최적의 gain은

$$K = [-2.23 \quad -31.24 \quad -2.01 \quad -5.0] \text{ V/rad.}$$

$$K = [-0.391 \quad -0.54 \quad -0.35 \quad -0.87] \text{ V/deg.}$$

IV. 실험 및 결과 고찰

Rotary Inverted Pendulum의 제어를 위한 하드웨어 시스템 구성은 그림 5와 같다. 그리고 데이터 입출력을 위해 사용한 하드웨어 사양은 8개의 single ended A/D 컨버터, 8개의 D/A 컨버터, 16 비트 DIO, 타이머 3개 그리고 엔코더 6개로 구성되어있다. Rotary Arm의 위치와 Pendulum의 각도를 알아내기 위해 2개의 포텐션 메터를 사용하였다. 물론 구동원으로는 DC 서보 모터를 사용하였다. 모터 구동을 위한 드라이버의 주회로는 PWM 진류 제어기와 독일 TEMIC사의 IPM(PMC15 U060 B001)을 사용하였다.

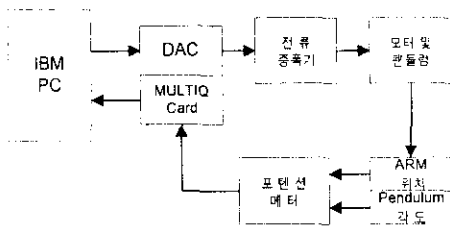


그림 5. 시스템 구성도

실험 결과는 그림6 과 그림7 이다.

V. 결론

본 논문에서는 비 선형 시스템인 Rotary Inverted

Pendulum의 세이슬 위해 PID-신경망 Controller를 설계 하였다. 안정된 점에서 Pendulum에 외란을 가했을 때 보다 빠르게 안정점에 도달됨을 PID 제어기와 비교하여 볼 때 알 수 있다. 실험에 있어서 먼저 시스템이 안정해 지도록 실험자가 펜듈럼을 중심에 위치시켜 균형을 잡고, 그 상태에서 외란을 가하여 균형을 유지하기 위한 과정을 관찰한 실험이다. 단순 PID제어기 만을 사용한 경우에 비해 다소 시스템이 복잡하기는 하지만 플랜트의 특성이 본 실험에서 사용한 것과 같이 비 선형이라 할지라도 초기 값만 적절히 조정해 줄 경우 시스템의 안정상태는 잘 유지됨을 확인 할 수 있었다.

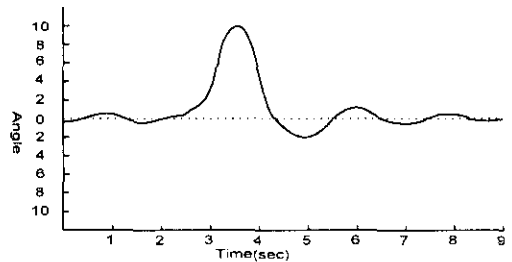


그림 6. PID-신경망 제어기에 의한 결과 그래프

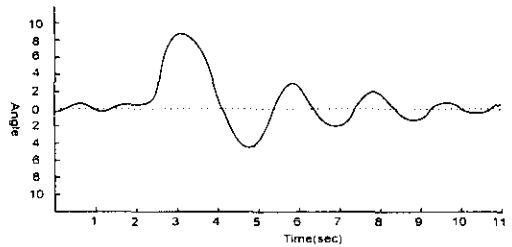


그림 7. 단순 PID 제어기에 의한 결과 그래프

References

- [1] C. V. Altrock, B. Krause and H. J. Zimmermann, "Advanced Fuzzy Logic Control of a Model Car in Extreme Situations," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 48, pp. 41-52, North-Holland, 1992.
- [2] K. M. Passino, "Intelligent Control for Autonomous Systems," *IEEE Spectrum*, pp. 55-62, June, 1995.
- [3] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Control-Part II," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 20, no. 2, pp. 419-435, 1990.
- [4] F. R. Rubio, M. Berenguel, and E. F. Camacho, "Fuzzy Logic Control of a Solar Power Plant," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 459-468, 1995.
- [5] Jose Valente de Oliveira, Member, IEEE. "A Design Methodology for Fuzzy System Interfaces," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 3, NO. 4, pp. 404-414, NOVEMBER, 1992.