



$$\phi_j(x) = \exp\left(-\frac{\|X - \mu_j\|^2}{\sigma_j^2}\right) \quad (2)$$

신경회로망 출력은 식(3)과 같이 결정된다.

$$y_k = \sum_{j=1}^M w_{jk} \phi_j + \theta_k, \quad (3)$$

힘 추정값  $F_e$  과 실제 작용하는 힘  $F_d$  사이의 오차를 생성하고 이를 신경망의 목적함수로 root mean square 취해, 신경망의 힘 추정 값의 오차를 줄이기 위해 gradient decent algorithm 의 역전파 알고리즘을 사용하였다.

$$\Delta w_{jk} = -\eta_c \frac{\partial E}{\partial w_{jk}} \quad \Delta b_k = -\eta_b \frac{\partial E}{\partial b_k} \quad (4)$$

$$\Delta \sigma_j = -\eta_\sigma \frac{\partial E}{\partial \sigma_j} \quad \Delta \mu_j = -\eta_\mu \frac{\partial E}{\partial \mu_j} \quad (5)$$

#### 4. 실험 및 결과

##### 1. 실험환경

실험에 사용한 양방향 원격제어 시스템 전체 구성은 그림 3 과 같다.

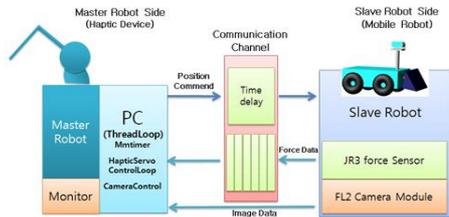


Fig. 3. Proposed structure I of time delay compensation control using neural network

조작기는 Senable PHANTOM Omni 를 사용하여, 1Khz 의 servo 제어주기의 쓰레드 작업 우선 순위를 높게 설정하여 이를 만족하였고, 힘센서 JR367M25A25-140 를 10 msec 주기로 데이터를 수집하여 피드백하였다. 일정한 시간지연은 다중배열의 시프트 연산자로 생성하여 실험환경을 구성하였다.

##### 2. 실험결과

500 msec 의 일정한 시간 지연을 가지는 양방향 원격제어 시스템에서 시간지연을 보상하지 않은 경우의 힘 반영 결과는 그림 4 와 같다.

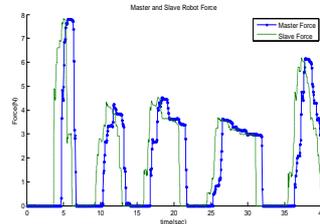


Fig.4. Force reflection result with time delay

신경망을 이용한 시간지연 보상에 따른 힘 반영 결과는 그림 5 와 같다.

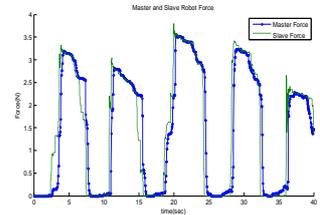


Fig.5. Force reflection result with NN time delay compensation

#### 5. 결론

원격 제어 시스템이 가지는 비선형성을 극복하기 위해서 Smith Predictor 를 신경망 추정기로 대체 하였다. RBF 신경망은 구조가 간단하여 안정성의 이론적 증명이 가능하며, 학습이 빠르기 때문에 실시간 제어 및 모델링 사용되어지고 있다. 따라서 기존의 MLP 신경망을 이용한 시간지연 보상제어기의 성능을 이를 통해서 개선하도록 하였다. 이 때, 신경망에 존재하는 여러 가중치의 크기와 오차에 따라 가중치의 학습률을 조절하는 방법을 고려하여 RBF 신경망의 시스템 모델링 오차와 빠른 수렴성을 보장하도록 하였다.

#### 참고문헌

1. Heung Jae Im, Wan Kyun Chung, and Il Hong Suh, "Predictive Control of Bilateral Teleoperation with Short Time Delay", Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 6, No. 4, April 2000
2. Andrew C. Smith and Keyvan Hashtrudi-Zaad "Smith Predictor Type Control Architectures for Time Delaied Teleoperation". The International Journal of Robotics Research Vol. 25, No. 8,