

## 신경망을 이용한 리니어모터 이송시스템 제어

유 송 민

경희대학교 기계·산업시스템 공학부

### High Speed Linear Motor Feed System Control using Neural Network

Song Min Yoo

Kyung Hee University of Mechanical and Industrial System Engineering

#### Abstracts

High speed linear motor feed system has been simulated using neural network technique. Due to the limited resources, control gain tuning has been the most troublesome part in controller design. Regardless of the system structure, conventional control gain could be adjusted minimizing the resulting error using the proposed method. Slight performance deterioration was observed at the small value of training epoch.

#### 1. 서론

고도로 발달되는 산업시스템에 따라 가공시스템의 성능도 고정도, 고속화, 고효율화되는 추세이다. 발달하는 가공시스템의 요구성능을 충족시키기 위하여 제안되고 있는 것으로서 고속지능형 머시닝센터이며 이를 위하여 기존에 공작기계에 적용된 것보다 개선된 제반 기술이 요구되고 있다. 고속가공조건을 충족시키기 위하여 주축 및 이송계의 고속화가 이루어져야 하며 이송계는 기계적인 장애요소를 극복할 수 있는 리니어모터가 도입되고 있는 추세이다.

일반적인 회전형태의 모터를 길이방향으로 펼쳐 놓은 구조를 나타내는 리니어모터는 자기부상 열차와 유사한 형식을 나타낸다. 이러한 리니어모터를 이용한 이송계는 공작기계에서의 각종 장작물이 장착된 운동부의 이송을 담당하게 된다. 리니어모터를 구동함에 있어서 볼스크류(ball screw)와는 달리 기계적인 요소가 배제되므로 여러가지의 특성측면에서 차이가 크다. 대표적인 특징으로

동력전달계에서 나타나는 휨현상이나 백래쉬가 없어져 강성이 크게 향상되며 결과적으로 고속가공시에 정밀도의 향상을 기대할 수 있게 된다. 특히 분당 30 m/min이상의 고정도 가공이 가능해야 되는 고속가공기기의 경우에는 볼스크류를 사용하는 이송계의 경우 백래쉬, 발열, 탄성변형 및 낮은 강성으로 인하여 제어성이 저하되므로 리니어모터를 사용한 직접적인 슬라이드 구동을 사용하게 된다.

이송계의 제어기법으로서 재래식 이송계형태인 회전운동형 서보모터시스템에는 재래식 PID제어, 비선형제어 및 feedforward 제어기법 등 다양한 방법에 대한 특징이 비교되었다[1].

리니어모터 제어계를 구성하기 위한 시스템모델링으로서 기자력(magnetomotive force)과 역기전력(back electromotive force)을 이용한 모델이 제기되어 재래식 제어기법에 따른 각종 성능평가가 시도되었으며[2] Lagrange법을 이용한 모델이 개발되어 공작기계의 이송구동계에 적용되었다[3].

리니어모터를 제어하기 위하여 재래식 PID기법도 시도되어 각각의 이득을 조정하기 위한 성능평가가 검토되기도 하였으며 외란(force disturbance)을 보상하는 feedforward 제어기법도 시도되었다[4]. 밀링가공에 MIMO  $H_{\infty}$  제어기를 사용하여 엔드밀가공 중에 철삭력에 의한 추종오차를 감소시켰다[5]. 모델링이 어려운 비선형요소를 신경망을 이용한 학습법을 이용하여 제어기에 적용시킨 결과 추종오차를 상당히 감소시켰다[6].

이러한 리니어모터의 비선형적 요소로 마찰, cogging 및 추력리플(thrust ripple) 또는 토크리플(torque ripple)현상 등의 장애요소가 있으며 이로 인한 성능저하를 개선하기 위한 노력이 다양하게 시도되었다[7].

본 연구에서는 개발 중인 리니어모터 및 모터

제어기를 토대로 이에 적용시킬 수 제어 알고리즘 중 재래식 제어이득의 선정을 용이하게 하도록 신경망시스템을 적용시키고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 신경망

신경망시스템은 일반적으로 입력자료가 적용되는 입력층과 출력결과를 나타내는 출력층으로서 외부와 연결되며 중간에 비선형적인 자료처리를 위한 은닉층으로 구성된다. 자료의 전파는 층간의 전파에 따른 선형 및 비선형의 전방향전파와 오차역전파와같이 층간을 연결하는 가중치의 갱신을 위한 후방향전파를 거쳐 주어진 자료에 적합한 구조를 완성시켜가며 이러한 과정을 학습이라 한다. 본 연구에서는 감독학습법을 사용하는 일반적인 오차역전파 알고리즘을 사용하였다.

### 2.2 시스템모델링

일반적인 시스템의 모델링은 영구자석형 DC 리니어모터의 경우 기자력,  $F(t)$ 와 자기저항,  $R$ 의 식으로 표현된다[2]. 모델링에 사용된 시스템의 동특성을 실험적으로 파악하기 위하여 리니어모터 이송시스템을 구동하여 응답신호를 저장 분석하였다. 입력신호에 대한 응답성을 참조하여 시스템특성의 근사치를 유추하였다. 구동신호를 제어보드를 통하여 증폭기 및 구동기를 거쳐 모터로 공급하였으며 이때 생성되는 위치를 리니어스케일을 통하여 수집하였으며 속도는 위치신호를 기반으로 별도로 처리하여 분석하였다. 실험장치상에서 이송구간이 제한되므로 계단함수 형태보다는 임펄스함수 형태의 구동신호로 생성하여 시스템을 구동하였다. 시스템의 각종 변수 및 실험을 통하여 계산된 전압과 속도간의 관계인 시스템의 동력학적인 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{V(s)}{E_a(s)} = \frac{1}{5.072 \times 10^{-6} s^2 + 0.5047 s + 2.2} \text{ (m/V)}$$

## 3. 제어기의 구성

### 3.1 PID 제어기

본 연구에서는 시스템의 특성을 파악하고 제어

기간의 성능을 비교 분석하기 위하여 일반적으로 사용되는 재래식 선형 PID의 제어기를 도입하였으며 이에 사용되는 제어이득을 신경망을 통하여 확인하고자 한다(Fig. 1).

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

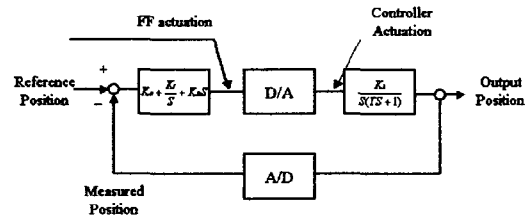


Fig. 1 Block Diagram of Control Block

### 3.2 신경망 제어기

신경망시스템의 도입한 제어기의 블록구조는 Fig. 2와 같다. 시스템 변수 및 입력치의 변화에 따라 출력오차를 최소화시키는 목적으로 구성된 제어기의 입출력관계는 Fig. 3에 나타나 있다.

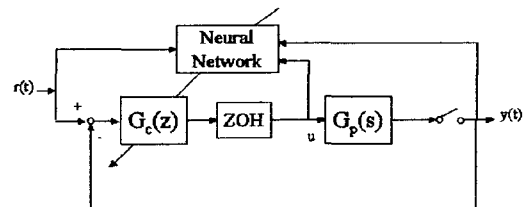


Fig. 2 Block Diagram of Neural Network Controller

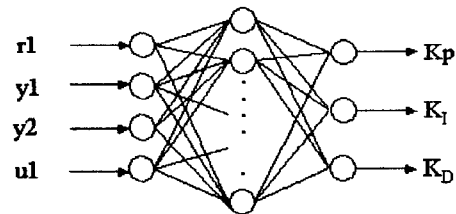


Fig. 3 Neural Network Controller Structure

각각의 입출력인자 및 추종목표궤적과의 오차를 후방으로 전파하여 각 층을 연결하는 가중치

를 갱신시키는 관계식은 다음과 같다.

$$\delta_j = u(t)U(1-u(t))e(t)f_p'(u(t))$$

$$\delta_j = \delta \cdot w_{ij}O_j(1-O_j)$$

$$\Delta w_{ij}(t+1) = \eta\delta_j O_i + \alpha\Delta w_{ij}(t)$$

$$\Delta w_{ij}(t+1) = \eta\delta_j \gamma + \alpha\Delta w_{ij}(t)$$

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 신경망의 학습

구성된 신경망시스템에 의한 제어이득이 결정되며 학습횟수(epoch)의 증가에 따라 수렴하게 된다. Figs. 4-6은 이때 나타나는 제어이득의 경향을 나타내고 있다.

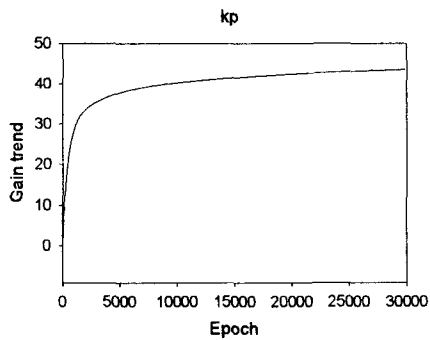


Fig. 4 Convergence Trend of kp

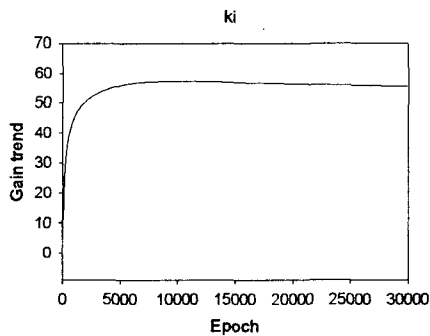


Fig. 5 Convergence Trend of ki

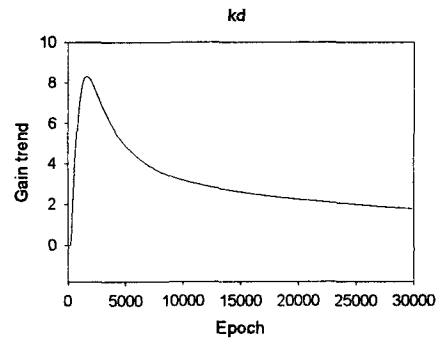


Fig. 6 Convergence Trend of kd

분석결과 약 20000회의 학습횟수를 거치면 제어이득이 수렴하기 시작하며 목표치와의 추종오차에 따른 성능평가를 기준으로 하면 학습횟수를 줄일 수 있는 것으로 나타나고 있다.

학습횟수에 따른 시스템의 특성을 비교하기 위하여 일정한 학습횟수 후 얻어진 제어이득을 적용시킨 결과를 나타내었다. Fig. 7은 epoch가 각각 100, 200 및 300일 때의 속도추종결과를 나타내고 있으며 이에 따른 오차가 Fig. 8에 표시되었다. 적은 학습횟수에서는 추종성능 및 오차의 변화가 심하지만 1000회 이상에서는 이러한 오차를 기준으로 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

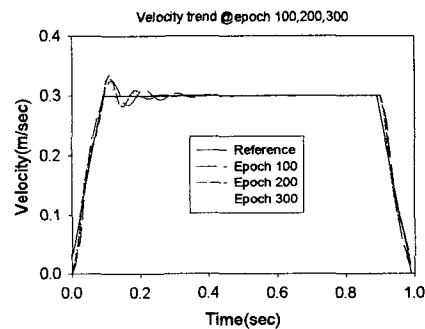


Fig. 7 Velocity Trend vs Epoch

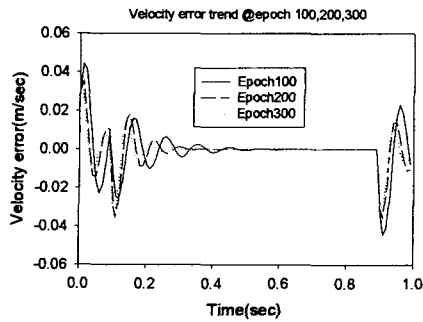


Fig. 8 Velocity Error Trend vs Epoch

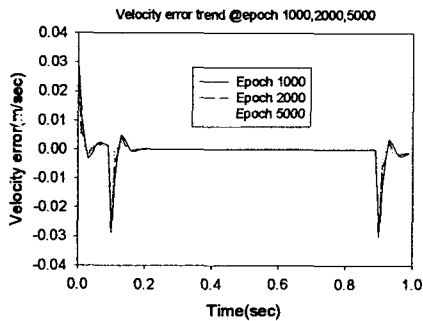


Fig. 9 Velocity Error Trend vs Epoch

#### 4.2 추종성능 평가

산출된 이득을 기준으로 이를 Fig. 1에 나타나는 제어시스템에 적용시켜 출력에 대한 성능평가를 수행하였다. Fig. 10은 속도추종결과를 나타내고 있다.

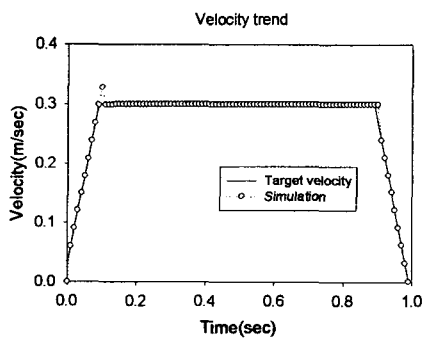


Fig. 10 Velocity Trend

위치추종 결과는 Fig. 11과 같으며 이때 소요되는 입력값의 변화경향을 Fig. 12에 나타나 있다.

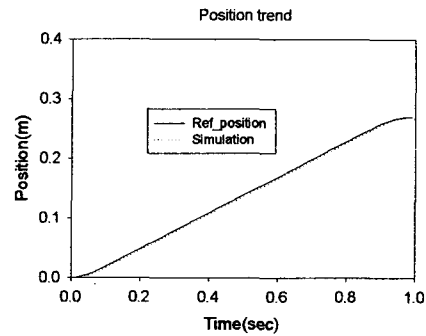


Fig. 11 Position Trend

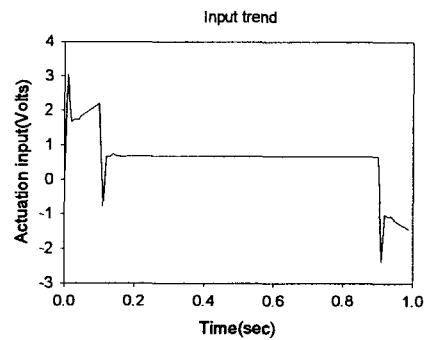


Fig. 12 Actuation Input

#### 5. 결론

본 연구에서는 고속가공시스템에 사용되는 리니어모터 이송시스템의 제어기를 설계함에 있어 재래식 제어이득의 설정기준을 정립하고 이에 따른 추종성능을 비교 분석하였다. 또한 학습횟수에 따른 제어이득의 수렴경향을 분석하였으며 이에 따라 적절한 학습횟수를 제안하였다. 제어이득은 학습횟수에 따라 점진적으로 변화하므로 학습종료점을 지정함에 있어 이득의 수렴보다는 추종목표치와의 오차를 기준으로 설정하는 것이 효과적이다. 추후에는 시스템의 다른 인자의 변화에 따른 성능평가를 수행하고자 하며 다른 제어기법과의 결과 비교를 통하여 가장 우수한 제어법을 제안하고자 한다.

## 6. 참고문헌

1. Renton, D., and Elbestawi, M.A., "High Speed Servo Control of Multi-Axis Machine Tools", *Int'l J. of Mach. Tool & Manufact.*, Vol. 40, pp. 539-559, 2000.
2. Ha, K.S., Im, T.B., Chung, J.K., and Yang, J.M., "High Speed Position Control System with Linear Brushless DC Motor", *Proc. of ICEE*, Vol. 2, pp. 259-262, 1999
3. Kumin, L., Stumberger, G., Dolinar, D., and Jezernik, K., "Modeling and Control Design of a Linear Induction Motor", *Proc. of IEEE, ISIE.*, Vol. 2, pp. 963-967, 1999
4. Bassi, E., Benzi, F., Moro, F., and Buja, G., "Force Disturbance Compensation for an A.C. Brushless Linear Motor", *Proc. of IEEE, ISIE.*, Vol. 3, pp. 1350-1354, 1999
5. Choi, C., Tsao, T.C., and Matsubara, A., "Control of Linear Motor Machine Tool Feed Drivers for End Milling: Robust MIMO Approach", *Proc. of ACC*, Vol. 5, pp. 3723-3727, 1999
6. Hu, A.P., Register, A., and Sadegh, N., "Using a Learning Controller to Achieve Accurate Linear Motor Motion Control", *Proc. of the IEEE/ASME Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 611-616, 1999
7. Min, B.W., Choi, J.H., and Lee, J., "Thrust Ripples Reduction in the Moving Magnet Type LDM by using FEM & Phase Control", *Proc. of the SMIC*, pp. 301-304, 1999