

적응제어를 이용한 선형 모터의 위치제어기 설계

김상우\*, 정원갑\*, 이달해\*, 권판조\*\*, 박상혁\*\*\*  
 \*영남대학교 전기공학과, \*\*인터링크, \*\*\*한국 HP

Position Control of Linear motor using Adaptive Control

Sang Woo Kim, Won Gap Jung, Dal Hae Lee\*, Pan Zq Kwen\*\*, Sang Hyuk Park\*\*\*  
 \*Department of electrical engineering, Yeungnam Univ, \*\*Interlink, \*\*\*Koera HP

**Abstract** - This paper proposes position controller of linear motor using adaptive control algorithm. Some simulation results show the feasibility of the proposed controller for tracking control of linear motor.

1. 서 론

최근의 정보기기, 자동화 기기 등에 사용되는 모터의 구동 시스템에는 고성능화가 요구되고 있으며, 직선 구동 시스템이 많이 이용되고 있다. 직선 구동 방식으로는 회전형 모터와 직선 교환 기구 등으로 얻어지는 간접구동방식이 있으나 이 방식은 한계가 있으므로, 고속화, 장치의 소형화, 소음레벨의 감소, 백래쉬(back lash)나 불감대가 작은 직접 구동방식이 점차적으로 이용되고 있다.

직접구동형의 직선 구동장치는 선형 전자 액츄에이터(Linear Electromagnetic Actuator)라고 불리며 종류도 다양하지만 그 중의 하나인 선형 직류 모터(Linear DC motor :LDM)는 추력 / 질량비가 큰 서보 시스템을 구성했을 때 제어성능이 우수하므로 컴퓨터 주변기기, 반송장치, 집적회로 제조구동용, 각종 로봇 등의 고속 동작을 필요로 하는 위치 제어 장치로써 실용화가 기대되고 있다. [1] 이러한 직접 구동장치 기기가 필요 하는 반송장치에 선형모터가 사용된다면 위치제어기 구성에 따른 tracking control이 이루어져야 한다. 이러한 tracking control이 이루어 질 수 있는 제어기 구성과 함께 반송되어져야 하는 시스템의 변화에도 위치제어계의 성능이 능동적인 제어기 구성이 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 반송대상의 변화 및 시스템의 특성 변화에 대하여 능동적으로 대처할 수 있는 위치제어기를 구성하고 이를 적용하고 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 시스템 모델링

Linear Brushless DC motor의 등가전기회로와 기계적인 동특성을 나타내는 시스템 모델이 그림 1과 같이 보여진다.

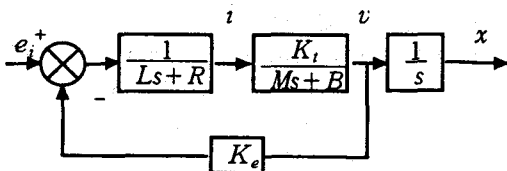


그림1. Block diagram of linear brushless motor

일반적인 제어기 설계시 시스템의 전기적인 시정수가 기계적인 시정수보다 작으므로 전기적인 통특성을 무시하고 그림 2와 같이 간략화된 시스템으로 모델이 될 수 있다.

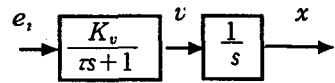


그림 2. Block diagram of simplified system model

연속시간(continue time)에서의 시스템의 방정식은 식 (2-1)에 주어진다.  $K_v$  는 속도 이득이며  $z$  시정수 이다.

$$G(s) = \frac{x(s)}{u(s)} = \frac{K_v}{s(zs+1)} \quad (2-1)$$

이다. 식 2-1은 파라미터의 추정을 위해서, z. o. h 변환을 사용하여 연속영역 함수에서 이산영역 함수 변환 될 수 있다. [3]

$$\hat{x}(k) = \hat{x}(k-1)e^{-\alpha} + \frac{Kv}{\tau}(1-e^{-\alpha})(u(k-1))$$

$$\text{단 } \alpha = \frac{1}{\tau} T_s \quad (2.2)$$

주어진 식(2.2)로부터 모델 파라미터추정에 필요한 regression form의 방정식을 구할 수 있다. 식 (2.3)는 이산영역에서의 regression form으로 변환 된 식이다.

$$\hat{x}(k) = \begin{bmatrix} \hat{x}(k-1) \\ u(k-1) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} e^{-\alpha} & \frac{Kv}{\tau}(1-e^{-\alpha}) \end{bmatrix} = \phi^T b \quad (2.3)$$

2.1.1 파라미터 추정

파라미터 추정(Parameter estimation)을 수행하기 위하여 식 (2-3)를 이용하며, 본 논문에서는 순환 최소자승법(Recursive Least-Squares Algorithm)을 사용하여 파라미터를 추정한다. 식 (2-2)를 일반적인 식으로 표현하면, 식 (2.3)과 같다.

$$y(t) = [y(t-1) \ y(t-2) \ \dots \ y(t-n) \ u(t-1) \ u(t-2)$$

$$\dots u(t-n)] \times \begin{bmatrix} -a_1 \\ -a_2 \\ \dots \\ -a_n \\ -b_0 \\ -b_1 \\ \dots \\ -b_n \end{bmatrix} = \phi(t)^T \theta(t) \quad (2-3)$$

이것 입출력관계로 나타내는 regression model이다. 여기에서

$\phi(t)$  = regressor vector

$\theta(t)$  = parameter vector

식 (2.3)에서 loss function을 구하면 다음과 같다.

$$v(\theta, t) = y(t) - \phi(t)^T \theta(t) \quad (2.4)$$

여기서 식 (2.4)의 최소화하는 파라미터의 추정치  $\hat{\theta}(t)$ 를 구하면 된다. 이미 잘 알려진 Least-square estimation을 real time에서 계산을 할 수 있는 RLSE(Recursive least-square estimation)을 사용하여 파라미터 추정치를 구할 수 있다. 간단한 RLSE 알고리즘에 대해서만 언급하면 다음식(2.5)와 같다. [2][4]

$$\begin{aligned} \theta^* &= \theta^* + K(t)(y(t) - \phi^T(t)\theta^*(t-1)) \\ K(t) &= P(t)\phi(t) = P(t-1)\phi(t)(\lambda I + \phi(t)^T P(t-1)\phi(t))^{-1} \\ P(t) &= (I - K(t)\phi(t)^T)P(t-1)/\lambda \\ \lambda &: \text{forgetting vector} \end{aligned} \quad (2-5)$$

## 2.2 제어기 설계.

### 2.2.1 극배치 제어

기본적인 성능사양을 만족하며 tracking command를 수행할 수 있는 제어기구성이 필요하여 이를 위하여 지금까지 제시될 수 있는 PID, 피지제어등과 같이 여러 제어법칙들이 사용될 수 있다. 본 논문에서 위치제어기를 구성시 사용되어진 제어방법은 극배치(Pole placement)이다. [2][5]

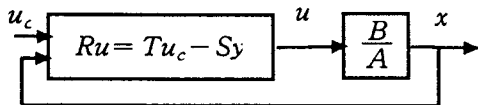


그림 3. Controller Block diagram

극배치 제어방법은 주어진 시스템의 페루프의 극을 결정할 수 있는 제어기 구성방법을 제시하며, 또한 원하는 사양에 대한 제어명령을 추종할 수 있도록 제어기를 구성할 수 있다. 제어기를 포함한 전체 시스템 블록이 그림 3과 같다. 그림 3과 같이 구성되어진 제어기를 2차 유도도를 가진 제어기라고도 한다. 극배치 제어 방법을 사용하기 위한 Process의 전달함수는 식 (2-1)이며, 원하는 페루프 응답을  $w_n = 40$ ,  $\xi = 0.7$ 인 시스템

의 전달함수를 설계 할 수 있다. 이 경우 Sampling time = 0.001sec 일 경우 페루프의 이산 전달함수는 식 (2.6)와 같다.

$$\frac{x}{u} = \frac{(1.4z + 1.3)10^{-3}}{z^2 - 1.91z + 0.91} \quad (2-6)$$

이러한 페루프 전달함수를 구하기 위하여 제어기 설계

시 유의 사항은 다음과 같다. [2]

- 1) process zero가 소거되지 않게 함.
- 2) 적분기능을 포함

### 2.2.2 간접 적응제어

적응제어를 사용하는 주요한 이유는 프로세서나 그 환경의 변화로 인하여 원하는 제어성능을 발휘할 수 없기 때문에 적응제어를 사용한다. 적응제어방식으로는 제어기의 파라미터를 직접 개선하는 방식을 사용하는 직접제어 방식이 있으며, 본 연구에서는 프로세서의 파라미터의 추정값이 계속 updated되고 추정된 파라미터를 사용하여 제어기 설계를 해결할 수 있는 간접적응제어 방식의 일종인 Self-tuning Regulators(STR)를 사용한다. 일반적인 Self-tuning Regulators의 구조를 그림 4에서 보여지고 있으며 제어기의 파라미터는 순환 추정법을 사용한 외측 루프에 의하여 조정되며, 이러한 추정치는 원하는 페루프의 제어기 구조 변경할 수 있는 파라미터 개선에 사용되어 진다. [2][4][6]

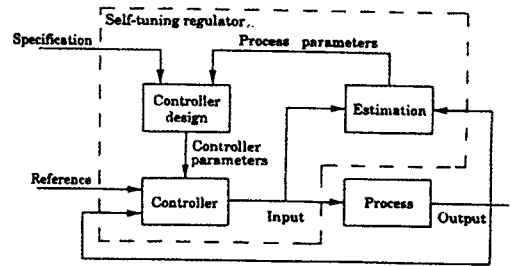


그림 4. Block diagram of a self-tuning regulator

## 2.3 모의 실험 결과

파라미터 추정을 위한 모의 실험에 사용된 모델은 식 (2.2)를 사용하였으며 모델의 파라미터는 다음 표1과 같다.

속도 이득 (= $K_v$ )	0.3
시정수 (= $\tau$ )	0.02466

표 1

### 2.3.1 파라미터의 추정 결과

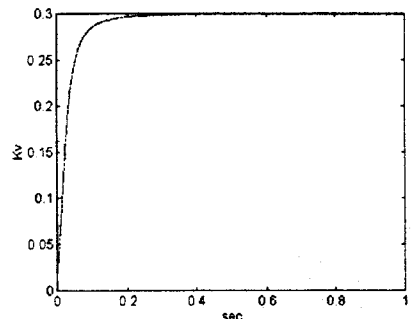


그림 5. Estimation result of  $K_v$

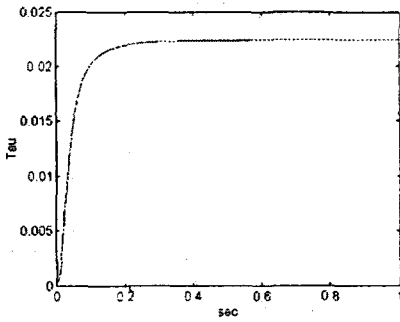


그림 6. Estimation result of  $\tau$

그림 5, 6 은 순환 최소 자승법을 (RLS)를 이용한  $K_v$  와  $\tau$ 의 추정결과이다.

### 2.3.2 제어기 입력

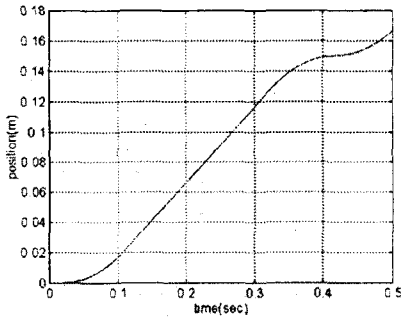


그림 2-7. tracking command

위치제어기의 입력으로는 그림 7과 같은 위치지령을 사용한다.

### 2.3.3 극배치 제어한 경우

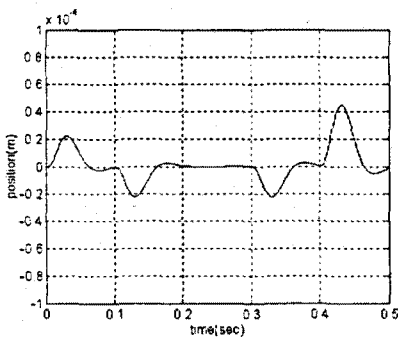


그림 8. Tracking error with pole placement control for mass variation

질량이 변동을 고려하지 못한 제어기 구조를 설계한 경우 tracking error를 그림 8 확인 할 수 있으며 이는 파라미터 추정과 indirect self tuning regulator를 사용하여 개선 할 수 있다.

### 2.3.4 간접 적응제어한 경우

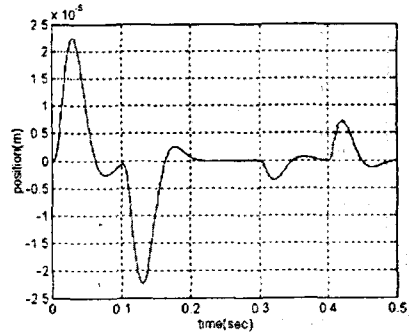


그림 9. Tracking error with adaptive control for mass variation

질량이 변동 있는 제어대상에 대하여, 파라미터의 추정을 통한 시스템 파라미터 계속 updated하고 이를 제어기의 파라미터를 개선에 사용한 결과 tracking error가 감소함을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 제어기대상의 변경에도 적절히 대응할 수 있는 간접 적응방식의 한 일종인 Self-tuning regulators의 제어기를 설계하고 이를 모의 실험을 통하여 검증하였다. 그리고 실제 시스템에 대한 실험이 차후에 수행되어야 할 부분이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 편집부, "리니어 모터 응용 핸드북", 세화, 1988
- [2] Karl Johan Åström, Björn Wittenmark, "Adaptive control", Addison Wesley, 1995
- [3] Gene F. Franklin, J. David Powell and Michael L. Workman "Digital Control of Dynamic Systems", Addison Wesley, 1990
- [4] V.V Chalam, "Adaptive Control Systems", Marcel Dekker, 1987
- [5] Jean-Jacques E. Slotine, Weiping Li "Applied Nonlinear Control", Prentice Hall, 1991
- [6] Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering", Prentice Hall, 1993