

외란 관측기를 이용한 리니어 BLDC 모터의 정밀위치제어

고재원*, 이교범**, 구영모***

*유한대학 제어계측과, **고려대학교 전기공학과, ***안양과학기술대학교 전기전자통신학부

Precise Positioning Control of Linear Brushless DC Motor using Disturbance Observer

Jae-Won Kho*, Kyo-Beum Lee**, Young-Mo Koo***

*Yuhan College, **Korea Univ, ***Anyang Technical College

Abstract - This Paper presents a positioning control method of the LBLDCM(Linear Brushless DC Motor) under friction. The friction may cause steady state position error. So it is necessary to consider friction effect for precision positioning control. The proposed control method uses disturbance observer algorithm and friction compensation. The experimental results of the proposed control method based on the disturbance observer are presented to show its effectiveness.

1. 서 론

전자 부품의 소형화 및 반도체의 고집적화에 따라, 첨단 전자 제품 제조 시스템을 위해서는 조립 및 검사시 고정밀, 고속의 위치 시스템의 개발이 요구된다. 위치 정밀도가 수 십 μm 정도를 요하는 과정에서는 크게 고려 대상이 되지 않지만, 그 미만의 정밀도를 요구하는 정밀 기기의 작동에서는 위치결정 정밀도를 저하시키는 요소로서 기계 시스템의 운동부에서 발생하는 마찰력이 가장 큰 원인이 된다. 이러한 마찰력을 보상하기 위하여 적응 보상 기법^[1,2], impulse 보상 기법^[5], 고정 보상 기법^[6] 등의 다양한 보상 기법이 제안되었다.

고속의 응답과 고정밀도의 성능을 가진 시스템을 위해서는 마찰력 보상 이외에도 최소 시간 내에 주어진 응답을 만족시키는 최소 시간 제어기와 외부로부터 시스템에 인가되는 외란에 대한 강인한 특성을 가지는 강인 제어가 요구됨으로 주어진 기구 구조에서 최적의 성능을 나타내는 제어 알고리즘을 개발하여야 한다.

본 논문에서는 미리 정하여진 마찰력 모델의 변수를 실험을 통하여 오프라인으로 추정하고 이에 해당하는 고정된 값을 매 순간 제어 입력에 추가하는 고정 보상 기법을 사용하여 마찰력을 보상한다. 제어 기법으로는 외란이나 시스템 매개변수의 변화에 대해 시스템의 안정성과 만족한 성능을 보장하는 외란 관측기에 의한 제어 기법을 제안한다.^[4]

2. LBLDCM

2.1 수학적 모델링

그림 1로부터 다음과 같은 BLDC 모터의 운동방정식이 구해진다.

$$V_i(t) = L \frac{di_a}{dt} + R i_a(t) + k_m v_m(t) \quad (1)$$

모터에서 만들어지는 토크와 외부 토크에 대한 식으로 표현하면

$$J_m \frac{dv_m(t)}{dt} = k_m i_a(t) - B_m v_m(t) \quad (2)$$

이 된다.

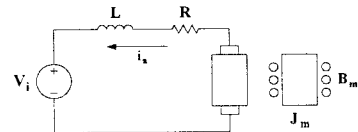


그림 1. 리니어 서보 전동기 시스템의 모델
Fig. 1. Model of linear servo motor system

위의 두 식으로부터 입력 $V_i(t)$ 로부터 출력 $v_m(t)$ 에 대한 전달 함수는 다음 식으로 나타낸다.

$$\frac{v_m(s)}{V_i(s)} = \frac{k_m}{LJ_m s^2 + (Lb_m + RJ_m)s + RB_m + k_m^2} \quad (3)$$

이 식의 대표 극점을 $-\frac{B_m}{J_m}$ 라고 하면, 다음 식이 성립하게 된다.

$$\frac{v_m(s)}{V_i(s)} = \frac{k_m}{J_m s + B_m} \quad (4)$$

저주파 영역에서 증폭기 동적 특성을 무시하면 최종적으로 입력 $u(t)$ 에 대한 출력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_n^v(s) = \frac{v(s)}{u(s)} = \frac{k_m}{J_m s + B_m} = \frac{1}{Js + B} \quad (5)$$

여기서, $J = \frac{J_m}{k_m}$, $B = \frac{B_m}{k_m}$

2.2 마찰 보상과 시스템의 매개변수 식별

위의 식 (5)로부터 다음 식 (6)이 얻어진다.

$$J \frac{dv(t)}{dt} = -Bv(t) + u(t) \quad (6)$$

이 식에 비선형 마찰력을 첨가하면 식 (7)과 같이 표현될 수 있다.

$$J \frac{dv(t)}{dt} = u(t) - F_f(v(t)) \quad (7)$$

$$F_f(t) = Bv(t) + F_{fn}(v(t)) \quad (8)$$

여기서 $Bv(t)$ 는 선형(점성) 마찰력, $F_{fn}(v(t))$ 는 비선형 마찰력을 나타낸다.

마찰력을 측정하기 위해서는 우선, 제어입력을 일정하게 유지하여 시스템의 속도가 상수가 되도록 만들어야 한다. 식 (7)로부터 속도가 일정하게 되면 좌변이 0이 되고, 따라서 다음 식 (9)가 구해진다.

$$u_s = F_f(v_s) \quad (9)$$

그림 2는 측정된 속도와 마찰력의 그래프를 나타낸다.

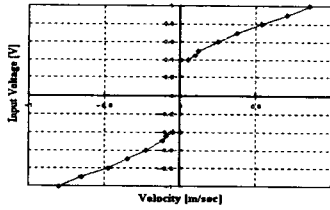


그림 2. 측정된 마찰 모델
Fig. 2. Model of measured friction

시스템의 비선형성은 선형 제어를 하는 시스템의 성능을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 이러한 비선형 항을 상쇄시켜 주는 다음과 같은 제어 입력이 필요하다.

$$u(t) = u^*(t) + \hat{F}_f(v(t)) \quad (10)$$

여기서 $u^*(t)$ 는 선형 제어 입력이고, $\hat{F}_f(v(t))$ 는 비선형 마찰력에 대한 추정치가 된다.

3. 외란 관측기

외란 관측기의 기본 개념은 외란을 역모델에 의해 재구성하고 이것을 피드백해서 제거한다는 것이다.

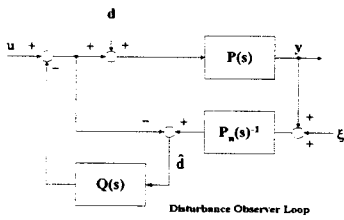


그림 3. 외란 관측기
Fig. 3. Disturbance observer

외란 관측기의 기법은 실제 플랜트에 적용할 때에는 여러 가지 문제점이 발생하게 된다. 첫째로 플랜트를 정확하게 모델링할 수 없고, 둘째로 플랜트의 역모델은 인과성 문제로 구현할 수 없고, 셋째로 플랜트와 모델링된 플랜트 사이에는 오차가 존재하고, 넷째로 시스템의 측정신호의 잡음에 의해 성능을 저하시킬 수 있다. 이 때문에 앞서 서술한 외란 관측기의 기본 개념에 저역통과필터 Q를 도입하여 그림 3과 같이 플랜트의 역모델이 구현 가능하게 하였고 실제 플랜트와 모델링된 플랜트 사이의 오차도 외란으로 간주한다. 그림 3과 같이 외란 관측기는 간단한 구조를 가지고 있을 뿐 아니라 연산도 현저히 적어 그 활용범위가 매우 높다.

그림 3의 블록도에서 시스템의 출력 y 는 다음 식 (11)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y(s) = G_d d(s) + G_w u(s) + G_\xi \xi(s) \quad (11)$$

여기서,

$$G_d = \frac{PP_n(1-Q)}{Q(P-P_n) + P_n}$$

$$G_w = \frac{PP_n}{Q(P-P_n) + P_n}$$

$$G_\xi = \frac{PQ}{Q(P-P_n) + P_n}$$

위의 식 (11)로부터 외란 관측기의 설계에 있어서 가장 중요한 것 중에 하나는 $Q(s)$ 를 설계하는 것으로서, 이는 시스템의 강인성과 외란 억압의 성능을 좌우하는 요소이다. 만약 $Q(s)$ 의 이득 특성이 $Q(s) \approx 1$ 인 경우에는 식 (11)로부터

$$G_d(s) \approx 0, G_w(s) \approx P_n(s), G_\xi(s) \approx 1 \quad (12)$$

이 된다. 따라서 외란 보상이기 실제 플랜트를 모델링된 플랜트로 만들고 저주파 성분의 외란 토크와 모델링된 플랜트와의 차이를 상쇄시키므로 전체 시스템을 강인하게 한다. 또한 $Q(s) \approx 0$ 인 경우에는

$$G_d(s) \approx P, G_w(s) \approx P, G_\xi(s) \approx 0 \quad (13)$$

로서 외란 관측기에 의한 시스템의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 그러므로, 저주파 영역에서는 모델링 오차와 토크를 제거하기 위해 $Q(s) \approx 1$ 이 되도록 하고 고주파 영역에서는 센서 노이즈를 제거하기 위해 $Q(s) \approx 0$ 이 되도록 한다. 이것은 필터 $Q(s)$ 의 교차 주파수의 적절한 선택으로 해결된다.

u 에서 y 까지의 전달함수를 T 라 하면

$$T = \frac{y}{u} = \frac{P(s)}{1 - Q(s) + P_n^{-1}(s)P(s)Q(s)} \quad (14)$$

감도 S 는 다음과 같이 P 변화량과 T 변화량의 비로 나타낸다.

$$\lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta T/T}{\Delta P/P} = \frac{dT}{dT} \frac{P}{T} = S \quad (15)$$

여기서,

$$S = \frac{1 - Q(s)}{1 - Q(s) + P_n^{-1}(s)P(s)Q(s)} \quad (16)$$

$P = P_n(s)$ 라 가정하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$S = 1 - Q(s), \quad T = Q(s) \quad (17)$$

위의 관계로부터 $Q(s)$ 에 의해서 시스템의 감도가 주로 결정됨을 알 수 있다.

4. LBLDCM의 고정밀 제어 구조

고정밀 시스템의 위치 제어에 있어서 가장 큰 문제가 되는 것은 시스템의 불확실성이다. 이는 주로 정지 마찰력이나 쿨롱 마찰력에 의해서 발생하며, 이를 효과적으로 제거하기 위한 제어기의 설계가 요구된다.

다음의 그림 4는 외란 관측기를 사용한 위치 제어 시스템의 제어기 구성을 보여준다. 외란 관측기는 외부에서 인가되는 외란 및 내부의 불확실성 등을 효과적으로 제거하여 전체 시스템이 제어 영역에서 nominal 모델처럼 거동하게 만들어 준다.

비선형 마찰력의 상쇄를 위해 앞서 구해진 비선형 마찰 모델을 이용하고, 외란 관측기로 구성된 nominal 모델에 근거를 두고 피드백 제어기를 설계한다.

nominal 모델은 다음과 같이 이중 적분기로 하였다.

$$P_n(s) = \frac{q}{s^2} \cdot k_v \quad (18)$$

Q 필터로는 다음 식 (19)와 같은 상대 차수가 2인 binomial 필터를 이용하였다.

$$Q(s) = \frac{3(\tau s) + 1}{(\tau s)^3 + 3(\tau s)^2 + 3(\tau s) + 1} \quad (19)$$

고정밀 위치 제어 시스템의 목적은 시스템이 최소 시간 및 최소 변위를 가지도록 제어기를 구성하는데 있다. 이를 위해 여기서는 외란 관측기에 기초한 근사 시간 최적 제어기(Proximate Time Optimal Servomechanism)를 설계하여, 이 두 조건을 동시에 만족시키고 외란 및 모델의 불확실성에 대해 강인한 특성을 지니는 시간 최적 제어기를 구성한다.

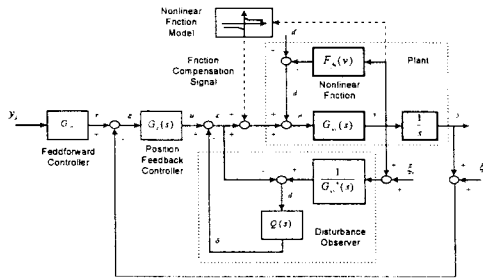


그림 4. 정밀 위치 제어 시스템의 제어 블록도
Fig. 4. Block Diagram of Precise Positioning Control System

5. 실험 결과

본 논문에서 제시된 선형 BLDC 전동기의 고속, 고정밀 위치제어를 위한 외란 관측기 제어기법의 타당성을 고찰하기 위하여, Anrad사의 선형 BLDC 전동기 시스템을 가지고 실험을 행하였다. 각각의 궤적추종 응답 (trajectory following response) 특성을 살펴보았다. 우선 X,Y stage를 구성하고 두 축에 원계축을 추종하는 지령치를 인가하여 PI 제어기법과 외란 관측기를 이용한 제어기법을 비교하였다. 실험의 목적은 기존의 PI제어기를 사용하는 제어기법에 비해서 제시된 기존의 제어기법에 외란 관측기를 합한 제어기가 정상상태 오차 특성 및 궤적 추종 응답 특성이 우수함을 확인하는데 있다.

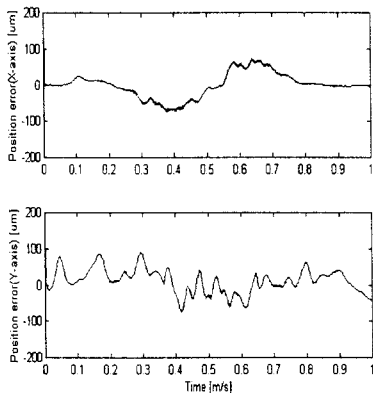


그림 5. PI 제어의 궤적 추종 응답
Fig. 5. Trajectory following response of PI control.

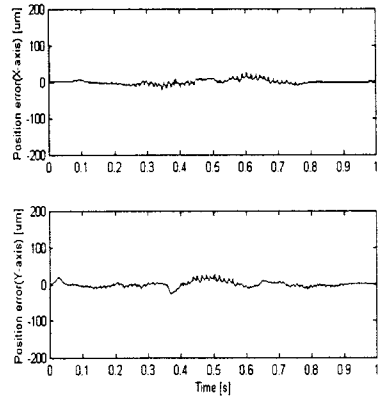


그림 6. PI외란 관측기를 이용한 PI 제어의 궤적 추종 응답
Fig. 6. Trajectory following response of PI control with disturbance observer

6. 결 론

최근에 μm 이하의 정밀도를 요하는 공정에서 반드시 고려되어야 하는 마찰력을 보상함으로써 위치오차를 줄이고 고속, 고정밀의 강인한 제어기를 개발하려는 연구가 계속되어지고 있다. 본 논문에서는 고정 보상 기법을 이용한 마찰력 보상을 통해 위치 오차를 줄이고, 시간 최적 제어의 단점을 보완한 근사 시간 최적 제어 기법과 파라미터 변화에 강인한 외란 관측기를 이용한 제어기법을 제안하였다. 시뮬레이션 및 실험 결과를 통해 PI 제어기를 이용한 기초적인 제어 알고리즘에 비해 위치 오차, 응답 속도의 성능이 뛰어난을 알 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Canudas de Wits, C., K.J.Åström, and K.Brown, "Adaptive friction compensation in DC motor drives," *IEEE J. of Robotics and Automation*, vol. 3, no. 6, pp. 681-685, 1987.
- [2] Canadas de Wits, C., K.J.Åström, "Adaptive friction compensation in robot manipulator : Low velocities," *IEEE Proc. Intr. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1352-1357, 1989.
- [3] Gene F. Franklin, J. David Powell, and Micheal L.Workman, "*Digital Control of Dynamics Systems*," Second Edition, Addison Wesley, pp. 581-596
- [4] Koji Sugiura, and Yoichi Hori, "Vibration suppression in 2- and 3-mass system based on the feedback of imperfect derivative of the estimated torsional torque," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 43, no. 1, February 1996.
- [5] S.Yang, Momizuka, "Adaptive pulse width control for precise positioning under influence of stiction and coulomb friction," *Proc. of the American Control Conference*, vol.1, pp. 188-193, 1987.
- [6] S.Yang, "A stable friction compensation scheme for motion control system," 대한기계학회 논문집, vol. 6, no. 2, pp. 95-100, 1992.