

축소 모델을 이용한 마찰력의 온라인 추정 및 보상 기법

*최재일, 양상식
아주대학교 제어계측공학과

On-line Friction Estimation and Compensation with a Reduced Model

*Jaeil Choi, Sangsik Yang
Dept. of Control & Instrumentation Eng. Ajou Univ.

Abstract - In this paper, on-line adaptive friction compensation scheme for the precise position control is presented. 2 DOF system with compliance and friction is used for the plant model. In order to reduce the calculation time for the parameter estimation, 1 DOF estimation model is used. The computer simulation and experimental results show the validity of the supposed scheme.

유도를 갖는 4계 모델이 제안되었다.[6]

모터가 고속으로 운동할 때에는 진동현상을 관찰할 수 없지만 출발시와 정지시에는 진동현상이 관찰된다. 모터에 펄스 입력을 가하면 응답은 2계 시스템의 부족감쇠특성을 나타낸다. 이 현상은 LBLDCM의 운동부를 지지하고 구면내에서 구름운동을 하는 베어링의 진동에 의해 발생한다고 생각된다. 이를 등가모형으로 나타내면 그림 1.(a)와 같고 자유물체도는 그림 1.(b)와 같다. 이 시스템에 대한 운동방정식은

$$M_1 \dot{x}_1 = F - k_{eq}(x_1 - x_2) - b_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (1)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 = k_{eq}(x_1 - x_2) + b_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - b_2 \ddot{x}_2 - f \quad (2)$$

이고, 비선형 마찰력, f 를 정지마찰력, f_s 와 운동마찰력, f_d 로 나타내면,

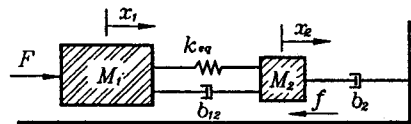
$$f = \begin{cases} f_s \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) & \dot{x}_2 = 0, \quad |\dot{x}_1| > f_s \\ f_s & \dot{x}_2 = 0, \quad |\dot{x}_1| \leq f_s \\ f_d \operatorname{sgn}(\dot{x}_2) & \dot{x}_2 \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

이다. 여기서 $f_1 = k_{eq}(x_1 - x_2) + b(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - b_2 \ddot{x}_2$ 이고, 운동마찰력, f_d 는 v 의 함수로 모델링하는 것이 보편적이며, v 에 대한 지수 함수,

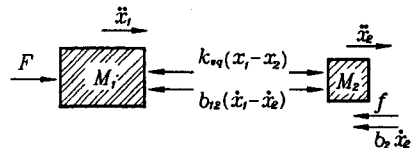
1. 서 론

위치 정밀도가 10 μ m 정도인 위치결정기구는 대개 drive train에 커플링과 ball-screw를 사용하므로 콤파라이언스, 마찰력, 백래쉬 및 구동기 포화 등의 비선형 요소가 존재한다. 이러한 요소들로 인하여 ball-screw 방식의 위치결정기구는 정밀 위치제어가 불가능하다. 위치 정밀도가 1 μ m 이하인 정밀 위치제어시에는 Linear Brushless DC Motor(LBLDCM)를 이용하여야 하고, 위치결정기구 자체가 정밀가공 및 조립으로 제작되어야 한다. 이러한 시스템은 백래쉬가 없으며 제어를 적절히 동조함으로써 구동기 포화를 없앨 수 있다. 또한 마찰력과 콤파라이언스가 무시할만큼 작으나 정밀위치제어시에는 간과할 수 없는 문제로 작용한다.

마찰력은 복잡한 비선형 특성을 나타내며, 이를 무시하고 제어를 설계하였을 경우 정상상태 오차 및 섭동을 유발한다.[1] 본 연구에서 사용한 LBLDCM(Linear Brushless DC Motor) 스테이지도 PD 제어기로 위치제어를 수행하였을 경우 40-50 μ m 정도의 정상상태 오차가 발생했으며 마찰력이 위치 및 운동방향에 따라 달라짐을 실험을 통하여 확인하였다. 이러한 마찰력을 보상하기 위하여 비선형 제어를 이용한 보상기법[2], impulse 보상기법[3], 직접 보상기법[4], 적응보상기법[5] 등 다양한 보상기법이 제안되었다. 본 연구에서는 비선형성을 갖는 마찰력의 온라인 적응보상을 수행하도록 한다. 이를 위하여 콤파라이언스를 고려한 2자유도 모델을 1자유도 모델로 간략화하여 추정 변수를 줄였다. 또한 계산량을 줄이기 위하여 오프라인으로 추정된 모터 운동부의 질량, M 과 점성마찰계수, B 를 추정된 값으로 고정시킨 후 마찰력만을 온라인으로 추정, 보상하도록 한다.



(a) 2자유도계 시스템



(b) 자유물체도

그림 1. 2자유도 진동모형

2. LBLDCM 스테이지의 비선형 모델

실험에 사용한 LBLDCM(Linear Brushless DC Motor) 스테이지의 출발 및 정지시의 운동부와 베어링의 진동을 고려하여 2자

$$f_d = (f_s - f_c)e^{-\frac{\lambda t}{v_c}} + f_c \quad (4)$$

로 나타낸다. 여기서 f_s 는 운동마찰력이고, v_c 는 윤활조건이나 접촉면의 특성에 따른 상수이다.

모터의 계단 및 펄스응답을 관측하면 그림 1의 변수들을 구할 수 있다. 모터가 정속으로 운동할 경우에는 진동현상이 나타나지 않고 질량과 점성마찰력에 의해 기술되는 1계 시스템으로 볼 수 있기 때문에 점성마찰계수, b_{12} 가 지배적으로 나타난다. 이 경우에는 k_{eq} 와 b_{12} 는 시스템의 운동에 영향을 주지 못한다. 그러나 모터가 출발하거나 정지할 때에는 b_{12} 보다는 k_{eq} 와 b_{12} 가 진동운동에 지배적인 역할을 한다.

3. LBLDCM 스테이지의 변수 추정

적용 보상 기법은 마찰력 모델의 변수를 실시간으로 매 순간 추정하여 보상하는 방법이다. 이 방법은 마찰력의 비선형성, 위치의존성 및 시변특성을 감안할 수 있다는 장점이 있지만 모델이 복잡해지고 추정할 변수가 많아지면 연산시간이 길어진다는 단점이 있다. 따라서 변수추정모델을 1자유도모델로 간략화시키고 추정변수의 최소화를 위하여 운동마찰력만을 추정하도록 한다. 또한 마찰력 등의 시변 특성을 가지는 변수를 추정하기 위해서 지수함수적인 망각 인자를 이용한 재귀적 최소 자승법을 이용하며, 추정 변수가 참값으로 수렴하기 위해서는 초기치 문제, 외란, 여기(Excitation) 조건 등을 고려하여야 한다.[7][8]

3.1 재귀적 최소자승법

최소자승법은 시스템의 입출력 신호로부터 미지의 변수를 추정하는 것을 근본으로 한다. 따라서 추출 가능한 입출력 신호와 미지의 변수로 구성되는 다음 식 (5)와 같은 추정 모델을 설정하여야 한다.

$$y = \theta^T \varphi \quad (5)$$

여기서 y 는 시스템 출력으로 구성되고, θ 는 미지의 변수를 나타내는 벡터, φ 는 시스템의 신호로 구성되는 벡터이다. 실시간 변수 추정은 식 (6)을 바탕으로 출력 오차를 결정함으로써 정의된다. 1자유도모델로 간략화된 모터 운동부의 운동 방정식으로 부터

$$e = F - \hat{\theta}^T \varphi \quad (6)$$

$$\hat{\theta}^T = [\hat{M}, \hat{B}, \hat{f}] \quad (7)$$

$$\varphi = [\ddot{x}, \dot{x}, \text{sgn}(\dot{x})]^T \quad (8)$$

이다. 여기서 \ddot{x} 은 가속도, \dot{x} 은 속도이다. PAA(Parameter Adaptation Algorithm)는 다음과 같다.[7]

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t)(y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)) \quad (9)$$

$$K(t) = P(t-1)\varphi(t)(\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t))^{-1} \quad (10)$$

$$P(t) = (I - K(t)\varphi^T(t))P(t-1) / \lambda \quad (11)$$

여기서 λ 는 망각인자(forgetting factor)로 $0 < \lambda \leq 1$ 인 값을 가지며 $\lambda = 1$ 이면 표준 최소자승법이 된다.

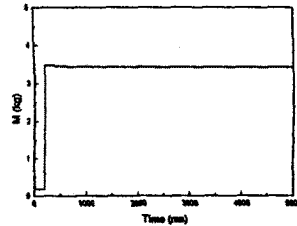
3.2. 모의 실험에 의한 변수 추정

정확한 변수추정을 위하여 시스템의 입력신호로 PRBS(Pseudo Random Binary Signal)를 사용하였으며 입력의 크기는 $\pm 1V$ 로 하였다.[8] 망각인자, λ 는 변수의 수렴성이 좋도록 1로 하였고 추정변수의 초기치는 0, 적용 이득, $P = 500(I)$ 로 하였다. 4계 진동모델에 대한 2계 모델로의 변수추정 결과를 그림 2에 보인다. 모의 실험에 사용된 변수 값은 표 1과 같다.

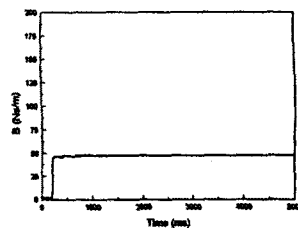
모의 실험 결과, 추정된 질량, \hat{M} 은 추정오차를 감안하면 M_1 과 M_2 의 합의 형태로 나타난다. 이는 M_1 의 질량이 작아지면 더욱

표 1. 변수 값

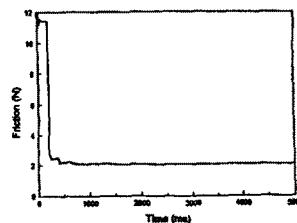
파라메타	값
M_1	3.5 [kg]
M_2	0.35 [kg]
b_{12}	549.5 [Ns/m]
b_2	55 [Ns/m]
ζ	0.25
ω_n	314 [rad/s]
k_{eq}	3.45×10^6 [N/m]
f_s	2.831 [N]
f_c	2.265 [N]
v_c	0.005 [m/s]



(a) 추정 질량



(b) 추정 점성마찰계수



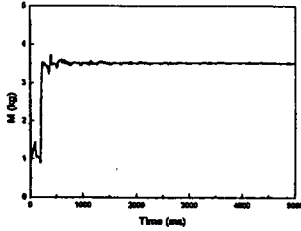
(c) 추정 마찰력

그림 2. 변수추정 모의실험 결과

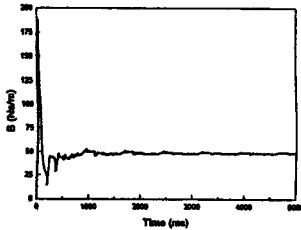
뚜렷이 나타난다. 추정된 점성마찰계수, β 은 b_2 와 b_2, k_{eq} 등이 복합되어 나타나는 것으로 생각되며, b_2 에 근사한 값이 나타난다.

3.3. 실험에 의한 변수 추정

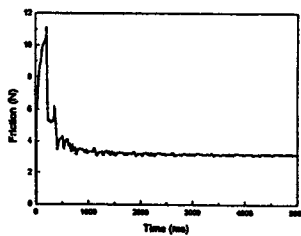
실험에 사용된 시스템 입력 및 조건은 모의실험과 동일하다. 위치제관은 레이저 간섭계를 사용하였으며 486 DX2-66MHz PC와 16bit D/A 변환기를 사용하였다. Sampling time은 1ms이다. 실험 결과를 그림 3에 보인다. 실험 결과와 모의실험 결과가 거의 일치함을 볼 수 있다.



(a) 추정 질량



(b) 추정 점성마찰계수



(c) 추정 마찰력

그림 3. 변수추정 실험 결과

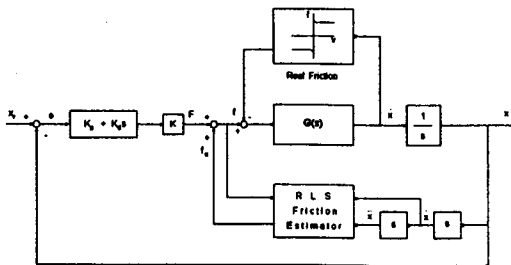


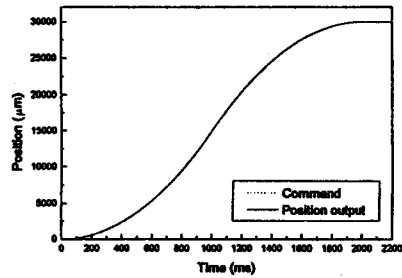
그림 4. 전체 제어시스템의 블록다이아그램

4. 제어기 구성

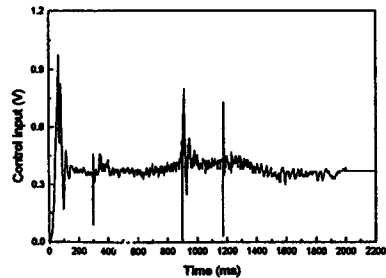
본 연구에서는 기존의 PD 제어기의 출력이 실시간으로 추정된 마찰력에 해당하는 보상입력을 더하는 방식을 사용한다.[5] 이를 위하여 먼저 모터 운동부의 질량, M 과 점성마찰계수, B , 마찰력, f 를 오프라인으로 추정한 후, M 과 B 를 추정된 값으로 고정시키고 f 만을 온라인으로 추정, 보상하도록 한다. 전체 제어기의 구성은 그림 4와 같다.

5. 위치제어 실험

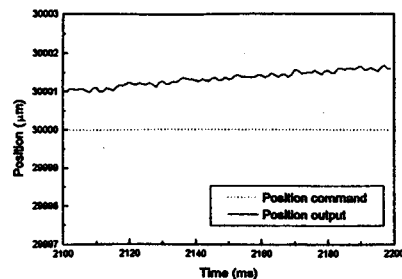
질량, M 과 점성마찰계수, B 를 추정된 값, 3.5kg과 49Ns/m로 고정시킨 후 마찰력, f 를 추정하여 마찰력보상을 수행하였다. PD 제어기의 비례이득, K_p 는 $9.7656 \times 10^3 [V/m]$, 미분이득, K_d 는 $39.063 [Vs/m]$ 이다. 마찰력의 시변특성을 고려하여 $\lambda=0.98$ 로 하여 변동하는 변수의 추정에 용이하도록 하였다. 실험에 사용된 위치지령은 속도 0.03m/s, 가속도 $0.03m/s^2$ 의 사다리꼴 속도지령을 적용한 형태이다. 다음의 그림 5에 실험 결과를 보인다. 위치 지령에 대한 추종 성능이 좋고 마찰력의 추정성능도 좋을 수 있다. 그림 5.(a)에서 위치지령과 위치응답이 겹쳐 보이며 정상상태 위치오차는 $2\mu m$ 이내이다.



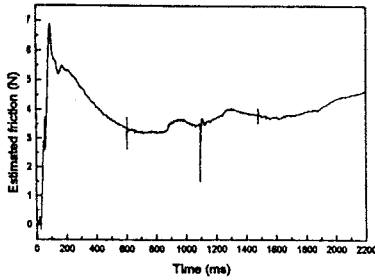
(a) 위치응답



(b) 제어입력



(c) 목표위치 부근에서의 위치응답



(d) 추정 마찰력
 그림 5. 전체 제어기의 성능

6. 결 론

LBLDCM 스테이지의 2자유도 진동모델에 대해 간략화된 모델로 변수 추정을 수행하였으며 실험결과와 비교하여 모델의 타당성을 보였다. 오프라인으로 추정된 시스템의 변수를 고정시키고 온라인으로 마찰력을 추정, 보상한 결과 위치제어 성능이 향상됨을 보였다. 앞으로 2자유도 진동모델에 대한 변수의 추정과 더욱 정밀한 마찰력모델을 바탕으로한 마찰력의 추정을 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] B. Armstrong, *Control of Machines with Friction*, Kluwer Academic Press, 1991, pp. 7-21.
- [2] 김사열, "기계적 비선형 요소 존재시의 정밀 위치 제어," 아주대학교 석사학위 논문, 1991.
- [3] S. Yang, M. Tomizuka, "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.
- [4] S. Yang, "A stable friction compensation scheme for motion control systems," 대한기계학회 논문집 Vol. 6, No. 2, pp. 95-100, 1992.
- [5] Canudas de Wits, C., K. J. Astrom, "Adaptive Friction Compensation in Robot Manipulator : Low Velocities," IEEE Proc. Intr. Conf. on Robotics and Automation, pp1352-1357, 1989.
- [6] 양상식, 최제일, 조용대, "정밀위치제어를 위한 리니어모터 시스템의 모델화," 제3회 G7 첨단생산시스템 workshop, pp.783-792, 1995.
- [7] Karl Johan Åström, Björn Wittenmark, *Adaptive Control*, Addison-Wesley, 1989, pp. 58-99.
- [8] I. D. Landau, *System Identification and Control Design*, Prentice Hall, 1990, pp. 145-148.