

모델 참조 제어 방법에 의한 새로운 마찰 보상 방법

New Friction Compensation Method by Model Reference Approach

°마진석*, 이무영*, 권우현*, 변승완**.

* 경북대학교 전자공학과(Tel:+82-053-950-5526, Fax:+82-053-952-3262, E-mail:whkwon@ee.kyungpook.ac.kr)

** 삼성전자 전략시스템 사업팀 개발 1그룹

Abstract Integral type system is that a system is represented by a proper rational function. In this paper, novel control scheme based on model reference approach is proposed for integral type system. The proposed scheme compensates various undesirable effects of the system. In especially, the proposed scheme applied to DC servo control system, analyzed its control characteristic. Performances of the proposed system show excellent control characteristics; complete compensation of the undesirable nonlinear friction and load viscous. For proving realistic validities, LOS(Line Of Sight) stabilization system which has typically many nonlinear effects is experimented. After executing the computer simulation in "MATLAB", then the results are compared with the experiments. The results are very similar in theoretical study and the proposed control scheme is successfully verified.

Keywords Nonlinear friction, Model reference control, Friction compensation

1. 서론

산업현장에서 널리 사용되고 있는 서보 시스템은 일반적으로 극도의 작업 환경 하에 그 기능을 발휘하여야 하므로 고도의 신뢰성이 요구되어지고 있다. 현재 서보시스템은 고기능성, 고신뢰성, 고안정성 요구에 대한 대책으로 여러 가지 제어기법이 사용되어지고 있지만, 단일 제어 기법만으로는 사용자의 모든 요구를 충족시키는 것이 어려운 실정이다. 특히 비선형적인 마찰과 공진 특성은 서보시스템의 성능을 급격히 악화시키는 주원인으로 간주되어지고 있다. 이중 마찰은 서보시스템에서 속도 및 위치오차를 발생시키며, 외란이 발생할 경우 서보시스템의 외란제거특성 또한 매우 악화시키는 원인이 되어 이의 적절한 보상은 오랫동안 서보시스템설계자에게 중요한 제어 대상으로 간주되어오고 있다. 우선 기존의 마찰제어방법으로는 다음과 같은 보상법이 고려되고 있다. 우선 첫째로 고이득 제어기를 사용하여 궤환 제어 루프의 특성을 이상화되도록 구현하여 마찰 등의 각종 비선형적인 특성을 상쇄시키는 역할을 하는 제어루프이다. 이 방법은 알고리즘이 간단한 장점이 있지만, 고이득 제어기 구현을 위한 시스템의 반복된 회로변수 조정이 필요하여 제어기 설계에 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 제어 입력량이 적을 경우에는 비선형적인 특성이 더욱 커지므로 마찰의 상쇄가 불가능한 단점이 있다.

둘째로 적응 제어 알고리즘을 사용하여 마찰 등의 비선형적인 특성을 추정하여 보상하는 방법이 있다. 이 방법은 마찰 모델을 가질 수 있을 때 효과적으로 적용될 수 있으나, 마찰의 고유 특

성상 시변하므로 적응 제어 알고리즘 자체의 수렴성과 안정성문제가 발생하는 단점과 함께 이의 부적당한 사용은 오히려 시스템의 명령추종성능악화 및 안정성문제를 유발시킬 수 있다 [2],[6],[8].

셋째로 외란관측기와 피드포워드 제어를 혼용하는 방법이 있다. 시스템의 제어 입력과 플랜트의 출력감지량을 사용한 시스템의 오차 정정 루프와 피드포워드 제어를 사용한 시스템 전달함수의 이상화를 이루는 방법이다. 그러나 이 또한 시스템의 선형 모델의 역모델을 사용함으로써 비선형특성의 추정에는 오차를 가지며 피드포워드제어시 필요로 하는 마찰모델이 실제마찰특성과 오차가 발생하면 명령추종성능이 급격히 악화된다. 또한 외란관측기의 특성상 잡음을 가진 시스템에서 매우 불안정한 성능을 가질 수 있으며 만약 시스템이 공진을 가질 경우와 같이 고차시스템에서는 최적의 극점배치위치결정이 모호한 단점이 있다[7]. 따라서, 본 논문에서는 마찰의 정확한 모델을 사용하지 않고 시스템의 모델만으로 마찰특성을 보상할 수 있는 제어방법을 제안한다.

2. 본론

2.1 적분형 시스템의 정의 및 특성

아래의 식 (1)로 주어지는 임의의 1차 시스템을 고려하여 보자.

$$H(s) = \frac{A_1}{s+a}, \quad |a| \leq \delta, a \in c, \operatorname{Re}(a) \geq 0, \quad (1)$$

식 (1)과 같이 어떤 시스템이 유리 함수로 주어질 때 분모의

차수가 분자의 차수 보다 1차 이상 높은 시스템을 적분형 시스템이라고 한다. 서보 시스템에서 모터의 출력과 부하의 속도와의 관계는 적분형 시스템으로 나타나며, 부하의 변동, 선형 마찰의 변화는 시스템의 극점 변화로 표현된다. 즉, 식 (1)에서 주어진 1차 시스템의 계수 a 는 시스템의 극점을 형성하며 주파수 응답 특성은 시스템이 선형시스템일 경우에 주파수 특성은 유일한 특성을 가지며 또한 시간 응답 특성에 있어서도 입력의 형태에 따라 단일한 출력 특성을 얻을 수 있다. 따라서 일반적인 폐루프시스템으로도 간단하게 제어가 가능하고 요구되어진 성능을 만족시킬 수 있다. 그러나, 주어진 시스템의 극점이 시변특성을 가지면서 주파수와 입력의 크기에 의존하는 특성을 가질 경우에는 주파수 응답 특성 측정시 각각의 입력에 대하여 서로 상이한 특성이 관측되며 따라서 주파수 응답특성의 정의가 유효하지 않게 되어 시스템의 정의가 매우 어려워진다.

2.2 제안된 적분형 시스템 제어

만약 어떠한 시스템이 시변특성을 가질 경우에 그림 1과 같은 제어루프를 사용하면 시스템의 특성이 요구되어진 제어특성을 가지는 시스템으로 변환되어 원하는 특성을 만족시킬 수 있다.

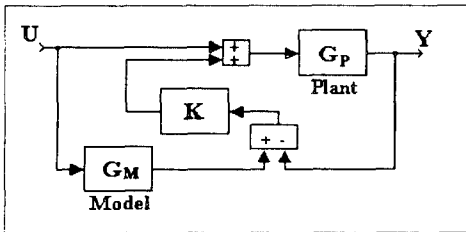


그림 1 제안된 시스템 제어 방법
Fig. 1 Proposed control scheme

그림 1로부터 제안된 시스템의 전달함수는 식 (2)와 (3)으로서 표현되어질 수 있다.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{P_n(s)}{P_d(s)} + K \frac{M_n(s)P_n(s)}{M_d(s)P_d(s)} \quad (2)$$

$$= \frac{P_n(s)(M_d(s) + K \times M_n(s))}{M_d(s)(P_d(s) + K \times P_n(s))} \quad (3)$$

여기에서 플랜트 전달함수 : $G_P(s) = \frac{P_n(s)}{P_d(s)}$,

모델 전달함수 : $G_M(s) = \frac{M_n(s)}{M_d(s)}$.

이며, 이때 모델의 전달함수는 안정함을 가정한다.

식 (3)의 의미를 간단하게 확인하기 위하여 식 (1)로 표현되어지는 시스템에 적용하면 식 (4)와 같다.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p A_1 (s + b + A_2 K)}{(s + b)(s + a + A_1 K)} \quad (4)$$

여기에서 $G_M(s) = \frac{A_2}{s + b}$,

식 (4)는 a, b 와 K 값에 따라서 표 1과 같은 제어특성을 가진다.

표 1. 제안된 제어방법의 제어특성

TABLE 1. Various control characteristics of proposed scheme

경우	전달함수	조건
I	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p A_1}{(s + b)}$	$a \ll A_1 K, b \ll A_2 K$
II	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p A_1 (s + b + A_2 K)}{(s + b)(s + a + A_1 K)}$	$b + A_2 K < a + A_1 K$
III	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p A_1 (s + b + A_2 K)}{(s + b)(s + a + A_1 K)}$	$b + A_2 K > a + A_1 K$
IV	$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p A_1 (s + b + A_2 K)}{(s + b)(s + a + A_1 K)}$	$a < 0, A_1 K > 0,$ $\delta < A_1 K$

표 1의 I 경우에서 알 수 있듯이 시스템은 모델로 주어진 고정된 계수의 극점과 직류이득으로 구현됨으로써 시스템의 원하는 전달특성을 얻을 수 있다. 또 II, III 경우는 고주파영역에서 진·지상제어기 또는 지·진상제어기를 가지는 전달함수를 가지며, 따라서 시스템의 고주파영역 특성 제어가 용이한 제어기를 포함하는 형태가 되도록 시스템을 변환시키는 것이 가능함을 알 수 있다. 또한 제안된 방법의 제어루프를 사용하여 시스템의 극점이 우반평면에 존재할 경우인 IV 조건을 만족한다면 시스템은 안정하게 제어되며, K 의 설정에 따라서 요구되어진 시스템의 성능 또한 달성할 수 있음을 알 수 있다.

2.3 비선형 마찰 특성

여러가지 마찰의 특성을 그림 2에 나타내었다. 쿨롱마찰은 주파수 영역에서 일정한 마찰이며 속도의 반전에 따라 그 값 또한 반대의 부호를 가지며 이러한 특성은 다른 종류의 마찰특성에서도 공통적인 현상이다. 스틱현상, 스트리백현상과 선형 점성마찰 특성이 이미 참고문헌 등에 잘 정의되어있으므로 이를 참조하기 바란다[1-4]. 그림에서 보는 바와 같이 서보시스템내에서 마찰은 여러 가지 복합적인 마찰특성의 합으로서 나타내어질 수 있다. 그러나 본 논문에서 실험대상시스템으로 다루고 있는 시선안정화 짐발의 경우 마찰의 주원인이 베어링으로 인한 것으로 이는 대표적인 대역제한된 마찰특성을 가지는 것으로 알려져 있다[2].

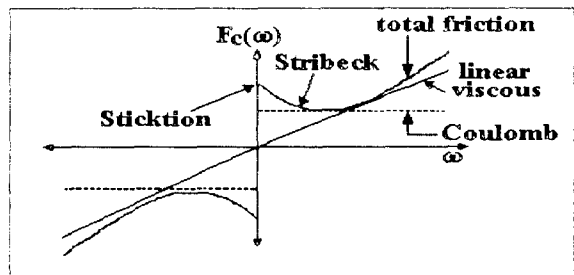


그림 2 여러 가지 마찰특성
Fig. 2 Various nonlinear friction

3. 결론

본 논문에서는 적분형 시스템의 비선형성과 외란 제어를 위한 모델참조기법에 의한 마찰보상제어기를 제안하고 이를 해석하였다. 또한 제안된 제어기를 서보시스템에 적용하여 해석하고, 안정성을 증명하였고 제안된 제어루프를 전형적인 서보시스템인 시신 안정화 짐발에 적용하여 이에 대한 모의실험 및 실험을 실시하여 제안된 제어기가 마찰과 같은 비선형특성에 우수한 성능을 나타냄을 보였다. 이러한 결과는 적분형시스템으로 주어지는 모든 서보 시스템에도 곧바로 적용이 가능할 것으로 사료되며, 고성능 속도제어루프나 위치제어루프가 요구되어지는 산업용 로봇 등의 응용분야에서 그 성능을 발휘할 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] Dean Karnopp "Computer Simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems," *Trans. of the ASME*, vol. 107, pp. 101-103, 1985.
- [2] Craig D. Walrath "Adaptive Bearing Friction Compensation Based on Recent Knowledge of Dynamic Friction," *Automatica*, vol. 20, no. 6, pp. 712-727, 1984.
- [3] D.A. Haessig, B. Friedland "On the Modeling and Simulation of Friction," *J. of Dyn. Sys. Meas. and Contr.*, vol. 113, pp. 354-362, 1991.
- [4] C. Canudas, H. Olsson, K. J. Astrom, P. Lischinsky "A New Model for Control of Systems with Friction," *IEEE Trans. on Automatic Control* vol. 40, no. 3, pp. 419-425, 1995.
- [5] C. Canudas, P. Noel, A. Aubin, B. Brogliato, P. Drevet "Adaptive Friction Compensation In Robot Manipulators: Low-Velocities," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1352-1357, 1989.
- [6] Seon-Woo Lee, Jong-Hwan Kim, "Robust Adaptive Stick Slip Friction Compensation," *IEEE Trans. on Ind. Elect.*, vol. 42, no. 5, Oct pp. 474-479, 1995.
- [7] Ho Seong Lee, Masayoshi Tomizuka, "Robust Motion Controller Design for High-Accuracy Positioning Systems," *IEEE Trans. on Ind. Elect.*, vol. 43, no. 1, Feb., pp. 48-55, 1996.
- [8] Bernard Fried, Young-Jin Park, "On Adaptive Friction Compensation," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 37, no. 10, Oct, pp. 1609-1612, 1992.
- [9] 임성운, 마진석, 권우현 "EOTS에서의 동조자이로스코프의 동작모드에 따른 특성비교" *제어·자동화·시스템 공학회*, vol. 3, no. 3, pp. 311-317, 1997.

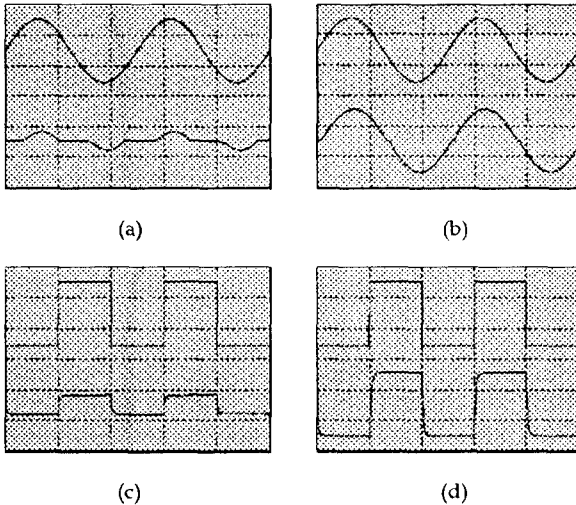


그림 5 정현파 및 구형파 응답 (0.5Hz, 1.4Vpp)

(a)(c) 보상 전 (b)(d) 보상 후

Fig. 5 Sine and square wave response

(a)(c) Without compensation (b)(d) With compensation

그림 5에서 알 수 있듯이 정현파, 구형파 입력에 대해서 보상 전에 발생하는 출력제로(dead zone)와 진폭감소 현상이 보상 후에는 완벽하게 제거됨을 볼 수 있다. 제안된 알고리즘의 수렴속도에 의한 속도 영점부근에서의 왜곡은 무시할 정도가 됨을 알 수 있다. 그림 6은 시간 영역 응답의 실험파형이며, 상단 파형(CH 1)은 속도입력명령, 하단 파형(CH 2)은 속도출력파형이다.

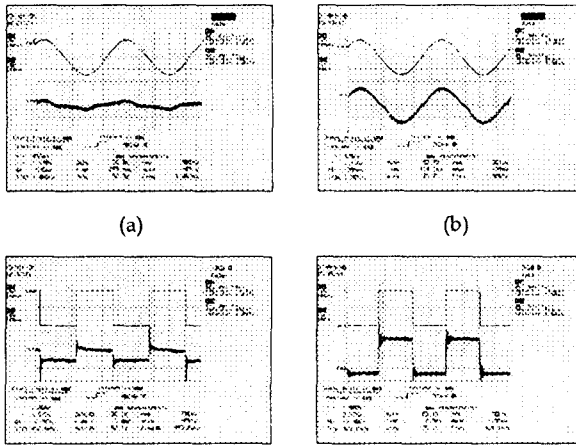


그림 6 정현파 및 구형파 응답 (0.5Hz, 1.4Vpp)

(a)(c) 보상 전 (b)(d) 보상 후

Fig. 6 Sine and square wave response

(a)(c) Without compensation (b)(d) With compensation

시간영역 응답 실험결과와 마찰 등의 비선형 특성을 가지는 시스템에서 제안된 제어루프를 사용하였을 경우 월등한 성능 향상을 보였으며, 모의 실험결과와 실험결과가 일치하고 있다. 제안된 시스템의 실험결과와 마찰의 완전한 보상으로 종래 시신안정화 시스템의 마찰현상을 완전히 해결하는 결과를 보였다.