

유연체 모션시스템의 진동억제를 위한 명령성형필터의 시간지연 값 학습

박주한*(경희대 대학원 기계공학과), 임성수(경희대 기계공학과), 이순걸(경희대 기계공학과)

Adaptation of Time-Delay in Command Shaping Filter for Vibration Suppression in Flexible Motion System

J.-H.Park(Mech. Eng. Dept., KHU), S.S.Rhim(Mech. Eng. Dept., KHU), S.-G.Lee(Mech. Eng. Dept., KHU)

ABSTRACT

The performance of the direct adaptive time-delay filter depends on the select time-delay. In this paper, the authors introduce a new scheme to adapt the time-delay which is to be used in conjunction with the direct adaptive command shaping for the improved vibration suppression in flexible motion system. In order to formulate the time-delay adaptation scheme, the authors have analyzed the effect of the time-delay value on the performance of the direct adaptive command shaping filter. By modifying the direct adaptation formula based on the analysis result the authors have established a set of equations to adapt the time-delay toward the optimal value. Simulation results show the effectiveness of the proposed time-delay adaptation approach for the improved vibration suppression.

Key Words : Time-delay command shaping (시간지연 명령성형 필터), vibration (진동), flexible manipulator, adaptation (적응)

1. 서론

FIR (Finite Impulse Response) 시간지연 (time-delay) 필터인 명령성형필터(command shaping filter)는 탄성 운동을 갖는 정밀한 시스템에서 잔류 진동의 억제를 위한 제어방법으로 최근 많은 관심을 받고 있다[1]. 잔류진동 억제에 효과적인 명령성형필터를 설계하기 위해서는 시스템 파라미터들을 미리 알아야만 한다. 시스템 변수에 대한 불확실성이 존재할 때에 명령성형 필터의 성능을 유지하기 위한 방법은 필터의 파라미터들(임펄스의 수, 크기)을 직접적 또는 간접적으로 학습(적응)하도록 하는 것이다[2,3]. 본 논문의 공저자에 의해 제안된 직접적응형 명령성형필터 알고리즘에서는 명령성형필터의 설계를 위해 시스템 변수들을 필요로 하지 않는다[4]. 이 직접적응 알고리즘에서는 '임펄스의 수'와 '임펄스 간의 시간지연 값'은 고정되어있고, 필터의 계수값(임펄스의 크기)이 학습된다. 임펄스 수와 시간지연값의 직접적응을 위해서는 매우 복잡한 비선형 알고리즘 문제를 풀어야하는 어려움이 있다. 명령성형 필터의 주파수영역응답에서 stop band의 넓이와 stop band에서의 응답크기는 임펄스 계수의 값뿐만 아니라 선택된 시간지연 값에 따라 달라지며, 동일한 탄성모드를 억제하기 위해 설계된 명령성형 필터라도 다른 시간지연 값을 갖는 필터들은 서로 다른 주파수응답을 갖게 되고 주파수 영역별 진동억제의

효과도 다를 수밖에 없다. 명령성형 필터를 설계하는 입장에서는 필터응답이 억제하고자 하는 시스템 탄성모드의 고유진동수에서 최고의 억제효과를 가지고 그 이외의 다른 주파수 영역(특히 고주파수 영역)에서는 최소의 증폭효과를 갖도록 시간지연 값을 설정하는 것이 필요하다. 이러한 목표는 시간지연 값을 학습시키는 것으로 성취할 수 있다. 그러나 앞서 지적한 바와 같이 시간지연과 임펄스계수를 동시에 직접적응하도록 하는 문제는 매우 복잡한 비선형 문제로 귀착되며, 이러한 비선형 문제를 풀지 않고 최적의 시간지연값을 적용할 수 있도록 하는 알고리즘을 본 논문에서 제안하고 있다.

2. 시간지연값의 학습

명령성형필터는 시스템의 탄성모드가 여기되지 않도록 유연한 시스템(flexible system)의 명령입력값을 성형한다. 이 필터는 FIR필터(Finite Impulse Response)이고, 이 필터의 파라미터는 잔류진동을 억제하고자하는 대상 시스템의 탄성모드의 공진주파수와 감쇠비에 의해 결정된다.

시스템 변수의 불확실성이 있을 경우 우리는 Fig. 1에 보이는 post-filtering 직접적응형 명령성형 필터를 사용할 수 있다[4]. Fig. 1에 보인 적응형 필터 $C(z, n)$ 는 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$C(z) = c_1 + c_2 z^{-\Delta} + c_3 z^{-2\Delta} \quad (1)$$

여기서 $\Delta = T_d/T_s$, T_d 값은 임의로 선택되고, 필터의 계수 c_1, c_2, c_3 는 적응형 알고리즘에 의해 학습된다.

적용알고리즘에 의해 수립된 시간지연 필터는 유연한 시스템의 고유진동수에서 가장 효과적인 상쇄(canceling)효과를 가지며, 그 외의 주파수영역, 특히 고주파수영역에서는 최소의 증폭효과를 갖길 기대된다. 그러나 수립된 필터의 주파수영역 특성은(시스템 파라미터에 대한 정보 없이) 임의로 선택되는 T_d 값에 의존된다. 진동억제측면에서 최적의 시간지연 값은 명령성형필터의 최대계수의 크기가 최소로 되는 것이지만, 시간지연 필터의 시간지연 값을 직접 적응 알고리즘을 통해 학습시키는 것은 매우 복잡한 비선형문제이다. 주어진 임의의 시간지연 값에 대해 적응형 필터 $C(z)$ 가 효과적인 명령성형필터로 수립할 때, 식(2)와 (3)을 이용해서 $w_d T_d$ 를 계산하고, $w_d T_d = \pi$ 의 조건을 만족하는 최적의 T_d 값을 계산할 수 있다. 강조하건대, 이 방법은 직접 적응형 명령성형 필터의 강한 수립 특성을 전제로 한다[5].

$$w_d T_d = \cos^{-1} \left(-\frac{c_2}{2\sqrt{c_1 c_3}} \right) \quad (2)$$

$$\zeta = -\ln \left(\frac{c_3}{c_1} \right) \frac{1}{2w_d T_d} \quad (3)$$

3. 시뮬레이션 결과

제안된 방법의 유효성을 검증하기 위해, [5]에서 제안된 적응형 시간지연 명령성형필터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 한 개의 유연링크(flexible link)를 갖는 gantry형 로봇의 유연한 머니플레이터 모델을 사용하였다. 수평방향으로 전후 병진운동하는 유연링크는 5Hz의 탄성모드를 갖는다. 유연링크 베이스의 조인트위치제어에는 1kHz의 샘플링 비율을 갖는 디지털 PD 제어를 사용하고 유연링크 끝단의 가속도는 가속도센서를 이용해 측정가능하다고 가정한다. 링크베이스 조인트의 기준궤적명령은 사인파형의 반복적인 point-to-point 모션이 사용되었다. 기준입력에 따라 머니플레이터의 베이스가 5초를 주기로 앞뒤로 움직인다. 실제와 근사한 시뮬레이션환경을 위해 상당량의 센서노이즈를 가정하여 모델링하였다.

유연링크에 대한 정보를 모른다고 가정하고, 적응형 명령성형필터의 차수를 3차로, 필터의 초기 시간지연 값을 25ms로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 2의 (a)는 임의의 T_d 값(25ms)을 사용한 적응형 명령성형필터를 사용한 결과이다. 그림은 링크 끝단에서 측정된 가속도를 나타내며, 한 주기(5초동안)의 왕복운동을 나타낸다. 여기서, 적응형 필터는

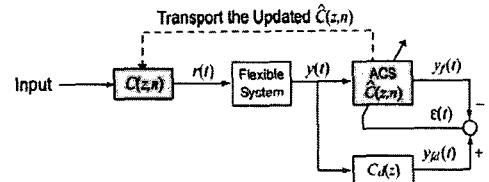


Fig. 1 Block-diagram of adaptive command shaping filter (post-filtering configuration).

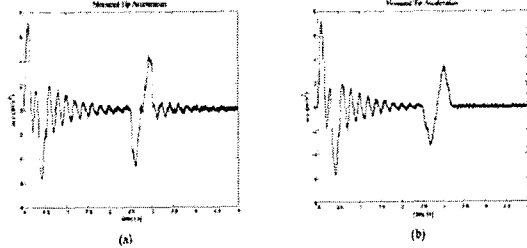


Fig. 2 Calculated tip acceleration (a) $T_d=25$ ms (b) $T_d=100$ ms.

처음 2.5초 동안에 학습되고, 학습결과 수립된 필터는 2.5초 이후의 운동 시 사용되어 진동을 억제한다. 그림 (b)는 (a)의 수립된 필터로부터 식(2)와 (3)을 이용하여 계산된 최적의 T_d 값($w_d T_d = \pi$ 를 만족하는)을 사용한 시뮬레이션 결과이다. 수립된 필터로부터 계산된 최적의 T_d 값 101.5ms는 모델의 실제 최적값 100 ms와 매우 근사한 결과를 보였다. 최적의 T_d 값을 사용한 시뮬레이션 결과 (b)는 (a)에 비교해 향상된 진동억제성능을 보여준다.

4. 결론

본 논문은 직접적응형 명령성형필터의 수립된 필터정보로부터, 유연체 모션시스템의 진동억제에 필요한 명령성형필터의 최적 시간지연 값을 학습하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 제안된 방법이 유연한 시스템에서 진동억제의 효과를 향상시킴을 보여준다.

참고문헌

1. N.C. Singer and W. P. Seering, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112 (1990), p. 76.
2. A. Tzes and S. Yurkovich, IEEE Transactions on Control System Technology, Vol. 1 (1993), p. 114.
3. M. Bodson, Automatica, Vol. 34 (1998), p. 771.
4. S. Rhim and W.J. Book, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 9 (2004), p. 619.
5. S. Rhim, and W. J. Book, IEEE Trans. on Control System Technology, Vol. 6 (2001), p. 385.