

유연한 매니퓰레이터 제어를 위한 적응형 명령성형 필터의 최적 시간지연 값 추출

Extraction of Optimal Time-Delay in Adaptive Command Shaping Filter for Flexible Manipulator Control

박 주 한, 임 성 수*
(Joo-Han Park and Sungsoo Rhim)

Abstract : The performance of the direct adaptive time-delay command shaping filter depends on the select time-delay. In the previously introduced direct adaptive command shaping filter, however, the time-delay value is fixed and only the magnitudes of the impulses are learned. 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.

Keywords : time-delay command shaping filter, vibration, flexible manipulator, adaptation

I 서론

FIR(Finite Impulse Response)형태 시간지연(time-delay)필터인 명령성형(command shaping) 필터는 탄성모드 운동을 갖는 운동 시스템에서 잔류진동의 억제를 위한 제어방법으로 그동안 상당히 많은 관심을 받아왔다[1-3]. 잔류진동 억제에 효과적인 명령성형 필터를 설계하기 위해서는 탄성운동에 관련된 시스템 파라미터들을 미리 알아야만 하는데[3,4], 시스템 변수에 대한 불확실성이 존재할 때에도 명령성형 필터의 성능을 유지하기 위한 한 방법은 필터의 파라미터들(임펄스의 수, 크기)을 직접적 또는 간접적으로 적응하도록 하는 것이다[4,5].

간접 적응형 알고리즘은 시스템의 파라미터들을 시간영역 또는 주파수 영역에서의 다양한 시스템 인식(system identification) 기법을 통해 먼저 추출한 후, 추출된 파라미터들을 이용하여 유효한 명령성형 필터를 설계한다[4]. 직접 적응 알고리즘에서는 유효한 명령성형 필터의 설계를 위한 시스템 파라미터들을 필요로 하지 않는다[5,6]. 직접 적응 알고리즘은 간접 적응 알고리즘 보다 노이즈에 매우 강하고, 우수한 수렴특성을 가지며, 현저히 낮은 계산부하를 갖는 것이 증명되었다.

적응형 시간지연 명령성형 필터에서 적용할 수 있는 파라미터들은 1) 임펄스의 수, 2) 임펄스 간의 시간지연 값, 3) 임펄스의 크기(필터 계수 값) 등이다. 이들 중, 시간지연

값과 임펄스 수를 변화해 가며 학습하는 것은 매우 복잡한 비선형 문제이다[7]. 그러나 직접 적응형 명령성형필터 알고리즘은 임펄스의 수와 임펄스 간의 시간지연 값을 고정 한 채, 임펄스의 크기만을 학습하여, 최적의 명령성형 필터를 생성할 수 있다.

직접 적응형 명령성형 필터에서는 시스템 파라미터에 대한 사전 지식 없이, 임의의 시간지연 값을 선택한 후 그에 따른 필터 계수 값들을 학습해 나간다. 이 때, 학습된 필터는 시스템의 잔류 진동을 효과적으로 억제한다.

그런데, 같은 탄성모드를 목표로 설계된 명령성형 필터라도 다른 시간지연 값을 가지면, 상이한 주파수 응답 특성을 가진다. 일반적으로 우리는 명령성형 필터가 시스템의 고유주파수에서 최고의 억제효과를 갖고, 그 외의 다른 주파수영역, 특히 고주파영역에서는 최소의 증폭효과를 갖는 시간지연 값을 원한다.

이러한 필터를 설계하기 위해, 적응형 명령성형 필터의 우수한 수렴특성에 기초하여, 최적의 시간지연 값을 추출하여 보다 효과적인 명령성형 필터를 학습할 수 있는 방법을 제안한다.

이를 위해, 본 논문은 선형이론을 이용하여 명령성형 필터의 특성에 대한 해석을 수행하고, 시간지연 값이 명령성형 필터의 주파수응답 특성에 미치는 영향을 해석하였으며, 해석결과를 바탕으로 직접적응형 명령성형필터에서 최적의 시간지연 값을 추출해 내는 방법을 제안한다. 또한, 하나의 유연 링크(flexible link)를 갖는 직교좌표 로봇 모델을 이용한 시뮬레이션을 통해 제안된 방법의 유효성을 검증하였다.

II. 시간지연 명령성형 필터

시간지연 명령성형필터는 탄성시스템의 공진이 발생하지 않도록 시스템의 입력 값(desired input)을 성형하는 FIR

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 11. 23., 채택확정 : 2008. 5. 14

박주한 : 경희대학교 기계공학과 박사과정(pseven13@hotmail.com).

임성수 : 경희대학교 기계공학과(ssrhim@khu.ac.kr)

※ 이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-신진교수지원-D00019).

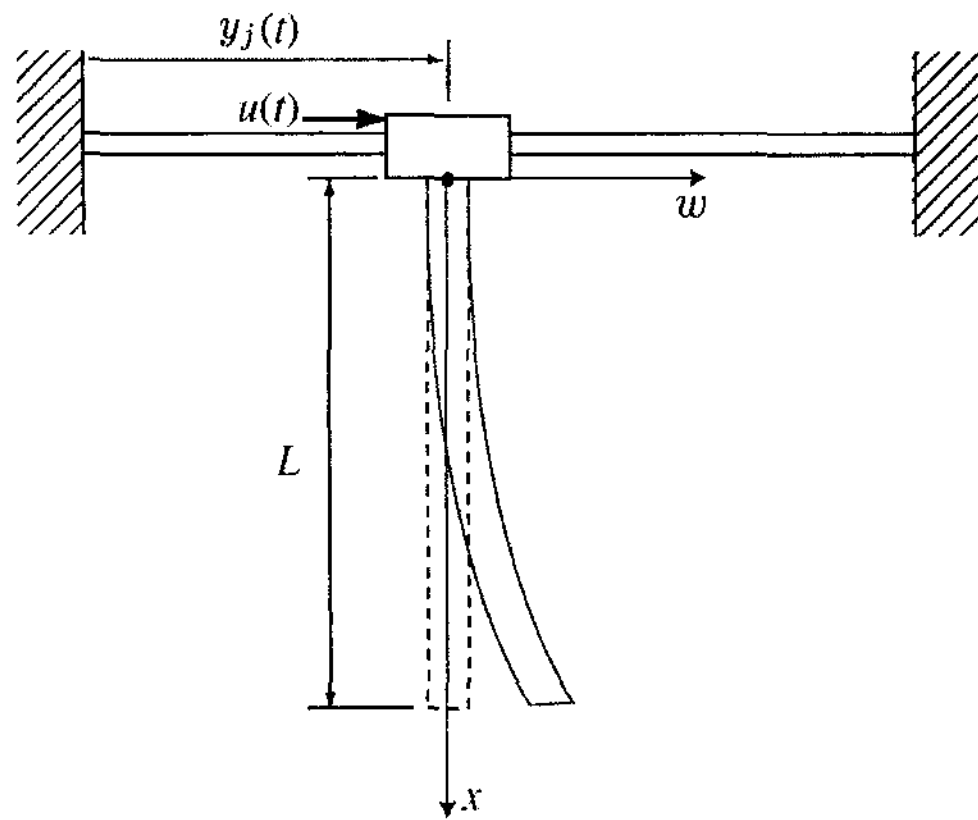


그림 1. 한 개의 유연 링크를 갖는 직교좌표로봇 개략도.
Fig. 1. Sketch of gantry robot with a flexible link.

(Finite Impulse Response) 필터이고, 필터의 파라미터는 시스템 탄성모드의 공진주파수와 감쇠비에 의해서 결정이 된다.

$M+1$ 개의 항을 갖는 시간지연 명령성형 필터의 일반적인 형태는 연속시간영역에서 다음과 같이 표현된다.

$$c(t) = c_0 + c_1\delta(t - T_d) + c_2\delta(t - 2T_d) + \dots + c_M\delta(t - MT_d) \quad (1)$$

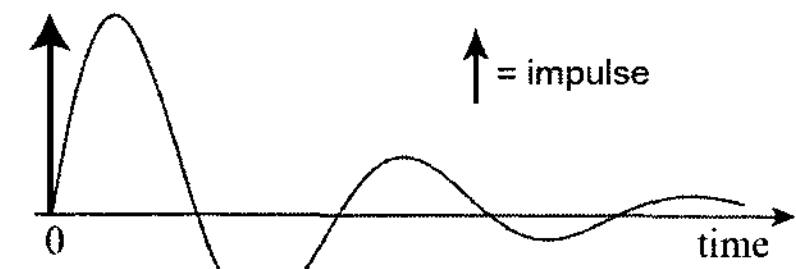
여기서 필터 계수 c_k 는 지연된 입력의 크기 변환비율을 나타내고, $\delta(t)$ 는 단위 임펄스 함수($t=0$), T_d 는 필터 내 임펄스들 간의 시간지연 값이다. 필터 $c(t)$ 는 이산시간영역에서 아래와 같이 표현된다.

$$C(z) = c_0 + c_1z^{-\Delta} + c_2z^{-2\Delta} + \dots + c_Mz^{-M\Delta} \quad (2)$$

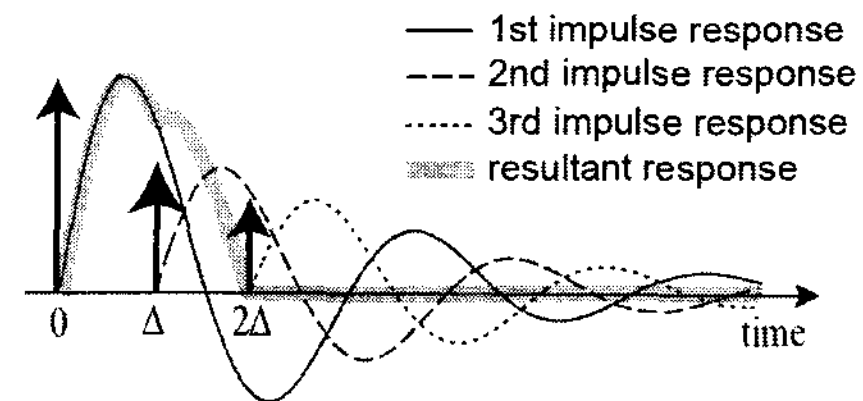
여기서 $\Delta = \text{정수} = T_d/T_s$ 이다. 이산시간영역에서 시간지연 값 T_d 는 임의의 값을 가질 수 없으며, 이산시간 시스템의 샘플링 타임 T_s 의 정수배여야한다. 본 논문에서 z 는 이산시간 신호에서의 시간지연 작용자(z^{-1})와 z 변환의 변수, 두 가지로 사용된다.

명령성형필터의 작용원리를 그림 2에 나타낸 과소감쇠 2차 시스템의 임펄스 응답을 예로 들어 설명하고자 한다. 단일 임펄스 입력 값이 3개의 항으로 이루어진 명령성형필터를 통과하면, 시간지연 값 Δ 만큼씩 지연된 새로운 입력 값이 생성된다. 명령성형필터에 의해서 성형된 새로운 입력 값은 그림 2(b)에서 보이는 세 개의 임펄스의 선형결합이 되며, 시스템이 선형성을 갖는다면 이 새로운 입력에 대한 시스템의 응답은 그림 2(b)에 나타낸 'resultant response' 신호처럼 세 개의 독립적인 임펄스 입력에 대한 시스템 응답의 중첩 값이 된다. 만일 시간지연 값 Δ 와 필터의 계수(즉, 임펄스 크기 변환비율)가 적절히 선택이 되면, 중첩의 원리에 의해 잔류진동은 제거될 수 있다.

유연운동시스템에서 명령성형 필터를 적용하는 방법은 그림 3(a)와 같은데, 만약 시스템이 선형이라면, 명령성형 필터의 적용순서가 도치된 그림 3(b)에 보인 시스템의 응답은 그림 3(a)에 나타낸 시스템의 최종응답 $y_f(n)$ 과 같은 신호를 출력한다. 이하의 해석은, 시스템의 선형성을 가정



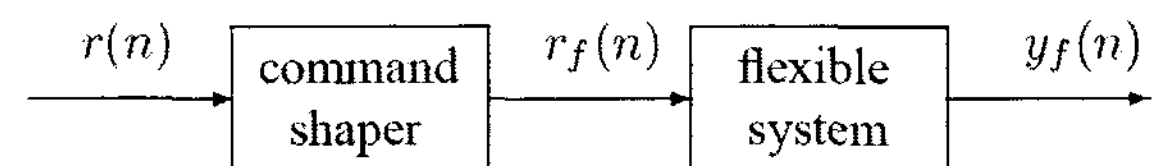
(a) single impulse response



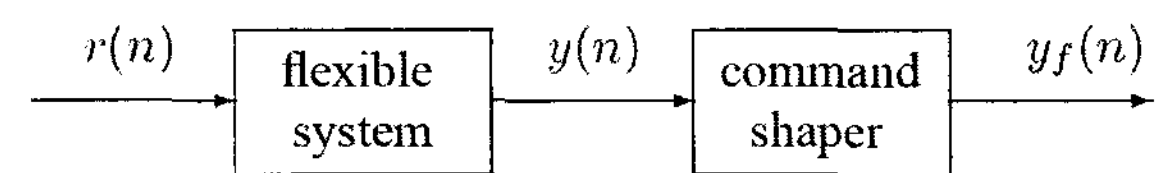
(b) three-term command shaped single impulse response

그림 2. 과소감쇠 이차시스템의 명령성형 필터 이용 전후의 임펄스 입력 반응 비교.

Fig. 2. Impulse responses of under-damped second-order system with/without a command shaper.



(a) normal shaping



(b) commuted shaping

그림 3. 명령성형필터 적용 방법.

Fig. 3. Command shaping configuration.

하고, 이론적용의 편리성과 시스템의 등가성을 고려하여 명령성형 필터가 도치되어 적용된 그림 3(b)의 시스템에 대하여 유도된다.

N 개의 탄성모드를 갖는 유연체 시스템의 잔류응답 $y(n)$ 은 식 (3)과 같이 이산시간영역에서 $2N$ 개의 지수감쇠 정현파 신호의 합으로 표현된다.

$$y(n) = \sum_{k=1}^n (\alpha_k e^{nT_s p_k} + \beta_k e^{nT_s p_k^*}), \quad n=0,1,\dots,\infty \quad (3)$$

여기서, n 은 주어진 이산시간, T_s 는 이산시간시스템 샘플링 시간, α_k 와 β_k 는 상수, 복소수 p_k 와 p_k^* 는 시간영역에서 유연체 시스템의 k 번째 탄성모드의 공진 pole이며, p_k^* 는 p_k 의 켈레복소수이다. p_k 와 p_k^* 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_k = -\zeta_k \omega_{nk} + j\omega_{dk}, \quad p_k^* = -\zeta_k \omega_{nk} - j\omega_{dk} \quad (4)$$

여기서 ω_{nk} , ζ_k , ω_{dk} 는 각각 k 번째 탄성모드의 고유진동수, 감쇠비, 감쇠고유진동수이다.

$y(n)$ 이 수식 (1)에 나타낸 $M+1$ 개의 항을 갖는 명령성

형필터로 필터된 신호, $y_f(n)$ 은 주어진 시간 n 일 때 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_f(n) = c_0 y(n) + c_1 y(n - \Delta) + \dots + c_M y(n - M\Delta) \quad (5)$$

$n = M\Delta, M\Delta + 1, \dots, M\Delta + L$ (여기서 L 은 충분히 큰 양의 정수) 일 때, 필터된 신호 $y_f(n)$ 이 잔류진동을 갖지 않을 조건, 즉 zero residual vibration condition은 식 (6)과 같은 행렬관계식으로 나타낼 수 있다.

$$Yc = 0_{(L+1) \times 1} \quad (6)$$

여기서 $c = [c_0 \ c_1 \ c_2 \ \dots \ c_M]^T$, $0_{(L+1) \times 1}$ 는 $(L+1) \times 1$ 차원의 영벡터이고, $Y \in R^{(L+1) \times (M+1)}$ 이다.

$$Y = \begin{bmatrix} y(M\Delta) & y((M-1)\Delta) & \dots & y(0) \\ y(1+M\Delta) & y(1+(M-1)\Delta) & \dots & y(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(L+M\Delta) & y(L+(M-1)\Delta) & \dots & y(L) \end{bmatrix} \quad (7)$$

효과적인 명령성형 필터의 계수들은 (6)을 만족하여야 한다. 여기서, 우리는 입력신호 Y 에서 발생할 수도 있는 특이치 문제를 피하기 위해서, 이산시스템의 샘플링 주파수가 시스템의 모든 탄성모드 고유진동수보다 훨씬 크다고 가정한다.

만약 M 과 L 이 다음의 관계식을 만족한다면,

$$2N \leq M+1 \leq L+1 \quad (8)$$

Y 의 랭크는 $2N$ 이 되고, $2N$ 개의 선형적이고 독립인 기저벡터가 존재한다. 이 기저벡터들은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$e_k \equiv [1 \ e^{-\Delta T_s p_k} \ e^{-2\Delta T_s p_k} \ \dots \ e^{-M\Delta T_s p_k}]^T, \quad (9)$$

$$e_k^* \equiv [1 \ e^{-\Delta T_s p_k^*} \ e^{-2\Delta T_s p_k^*} \ \dots \ e^{-M\Delta T_s p_k^*}]^T, \quad (10)$$

$$k = 1, 2, \dots, N.$$

(6)의 zero residual vibration 조건식이 자명해 이외의 해 $c = [c_0 \ c_1 \ c_2 \ \dots \ c_M]^T \neq 0$ 를 갖기 위해선, 기초적 선형이론에 의해 M 이 조건식 (8)을 만족해야 한다.

그럴 경우, 입력신호 행렬 Y 의 null space, $N(Y)$ 는 $M-2N+1$ 의 차원을 갖고, 적어도 $M-2N+1$ 개의 서로 독립인 벡터가 (6)을 만족할 수 있다. (6)을 만족하는 c 는 또한, 모든 k 에 대해서 $e_k^T c = 0$, $e_k^{*T} c = 0$ 를 만족하고, 아래의 식을 만족시킨다.

$$c_0 + c_1 e^{-\Delta T_s p_k} + \dots + c_M e^{-M\Delta T_s p_k} = 0 \quad (11)$$

$$c_0 + c_1 e^{-\Delta T_s p_k^*} + \dots + c_M e^{-M\Delta T_s p_k^*} = 0 \quad (12)$$

정리하면, 임의의 시간지연 값 Δ 가 주어지더라도, 그 시간지연 값에 대하여, $c = [c_0 \ c_1 \ c_2 \ \dots \ c_M]^T$ 의 요소들을 필터계수 값으로 갖는 서로 독립인 $M-2N+1$ 개의 명령성형 필터 $C(z)$ 가 존재하고, $C(z)$ 는 진동시스템의 pole값인

$z = e^{T_s p_k}$ 와 $z = e^{T_s p_k^*}$ 에 영점을 갖는다. 이는 다시 말해서, $C(z)$ 에 의해 필터된 신호는 잔류진동을 전혀 갖지 않는다는 것을 의미한다.

그런데 만약 임의로 선택한 Δ 가 우연히도 k 번째 탄성모드에 대해서 (13)을 만족한다면,

$$\omega_{dk} T_s \Delta = m\pi, \quad (\text{단, } m \text{은 정수}) \quad (13)$$

서로 독립관계였던 $e^{T_s p_k}$ 와 $e^{T_s p_k^*}$ 가 같아지고, Y 의 랭크가 하나 줄어들게 되며, 진동을 억제하기 위해 필요한 필터의 계수의 최소 수 또한 하나 줄어들게 된다. 만약 우리가 선택한 Δ 가 여러 k 에 대해서 동시에 (13)을 만족한다면, (예를 들어, $\omega_{d1} T_s \Delta = m\pi$, $\omega_{d2} T_s \Delta = n\pi$, 여기서 m 과 n 은 상수) Y 의 rank는 훨씬 더 작아지고, 필요로 하는 필터계수의 최소 수 또한 그에 따라 줄어들게 된다.

이러한 특별한 시간지연 값의 경우를 제외한다면, 일반적으로 N 개의 탄성모드의 잔류진동을 완전히 제거하고, 시간지연 값을 자유로이 선택할 수 있게 하는 필터의 최소계수 수는 $2N+1$ ($M=2N$)이 된다.

한편, 명령성형필터가 입력 값을 명령성형하기 전과 후, 모두에서 정상상태 응답을 갖기 위해서는, $C(z)$ 가 단위 DC gain과 같도록 정규화 되어야 하며, 이는 필터계수의 총합이 '1'이 되도록 만듦으로서 해결된다.

시스템에 노이즈가 존재하는 경우, zero residual vibration 조건을 만족하는 엄밀해를 구하는 것이 어려워지며, Yc 값을 최소화하는 최적필터개면이 고려되어야 한다. 필터계수의 최적화를 위해서는 (14)에 나타낸 2차 비용함수 $J(L)$ 이 사용되었다.

$$J(L) = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} |y_f(n)|^2 = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} \left| \sum_{k=0}^M c_k y(n-k\Delta) \right|^2 \quad (14)$$

(14)의 2차 비용함수는 Parseval의 정리에 의해 주파수 영역에서는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J(L) = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} |Y_f(W_L^k)|^2 \quad (15)$$

여기서 $W_L^k \equiv e^{j2\pi k/L}$ 이고, $Y_f(W_L^k)$ 는 $y_f(n)$ 의 정규화된 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform)이다. L 이 크다는 가정 아래, 비용함수 $J(L)$ 은 주파수영역에서 아래와 같이 나타낼 수 있다[8].

$$Y_f(W_L^k) \approx C(\omega) Y(W_L^k) \quad (16)$$

$$J(L) \approx \sum_{k=0}^{L-1} |C(\omega)|^2 |Y_f(W_L^k)|^2. \quad (17)$$

여기서, 주파수관련 변수 W_L^k 는 DTF에, ω 는 $z = e^{j\omega}$ ($-\pi \leq \omega \leq \pi$)에서 평가된 전달함수에 각각 구분되어 사용되었다.

이런 종류의 최적화 알고리즘은 입력신호 내에 존재하는

신호의 상관성에 의존하며, 그 상관성이 소멸되어질 때까지, 즉, 입력신호가 백색신호 (white signal)가 될 때까지 최적화를 진행한다. 다시 말해서, 비용함수 $J(L)$ 의 최소화 과정은 입력 스펙트럼 $|Y(W_L^*)|^2$ 을 백색화하고, 또한 복소평면 상의 단위 원 주변에 파워 집중이 높은 점(즉, 비감쇠에 가까운 잔류 진동 주파수 성분)에 영점(zeros)들을 배치하게 된다.

더 많은 필터 계수를 사용할수록 명령성형 필터 $C(z)$ 는 단위원 상의 파워가 집중된 지점에 영점들을 배치할 수 있는 보다 많은 자유를 갖게 되고, 보다 효과적으로 입력 신호를 백색화하고, 그렇게 함으로서 잔류 진동을 제거할 수 있게 된다.

III. 적응형 명령성형필터

1. 적응형 명령성형 필터 시스템 구성

II절에서 설명된 바와 같이, 만약 명령성형 필터의 계수 항의 수가 충분히 선택이 된다면, 탄성모드의 수가 몇 개가 되든지, 어떤 시간지연 값을 갖든지, 잔류진동을 제거할 수 있는 효과적인 필터를 설계할 수 있다. 그러나 효과적인 필터의 설계는 시스템 파라미터에 대한 정보를 필요로 한다. 이러한 정보가 주어지지 않을 경우, 적응형 명령성형필터 (Adaptive Command Shaping Filter: ACSF)의 사용을 고려할 수 있는데, 효과적 필터의 설계에 필요한 시간지연 값, 필터 계수 값 등을 학습할 수 있다.

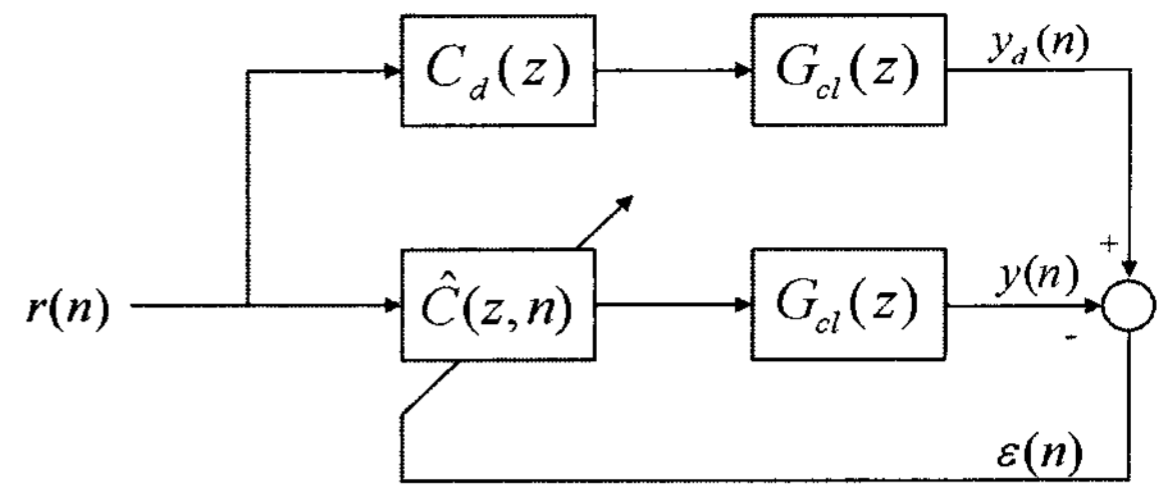
그러나 FIR필터의 경우 시간 지연 값을 적응해 나가는 것은 매우 복잡한 알고리즘을 요구로 할뿐더러, 학습의 수렴성 또한 매우 제한적이다.

그런데, 만약 우리가 제거해야할 탄성모드의 수를 안다면, 잔류진동을 효과적으로 제거하는데 필요한 최소한의 필터의 항의 수를 알 수 있고, 어떠한 시간지연 값에 대해서도 효과적인 필터 계수 값들이 존재함을 앞 절에서 증명하였다. 명령성형필터의 이러한 특성을 이용한다면, 시스템 정보가 알려져 있지 않은 경우라도, 임의의 시간지연 값을 선택하여 고정하고, 단지 필터의 계수 값만을 학습하여도 충분히 잔류진동을 억제할 수 있게 된다. 이처럼 시간지연 값을 고정하고 필터 계수 값을 학습하는 경우, 시간지연 값과 필터의 계수, 둘 모두를 학습하는 것에 비해 학습과정이 매우 간단해지며, 매우 효과적인 선형학습 방법을 적용할 수 있게 된다.

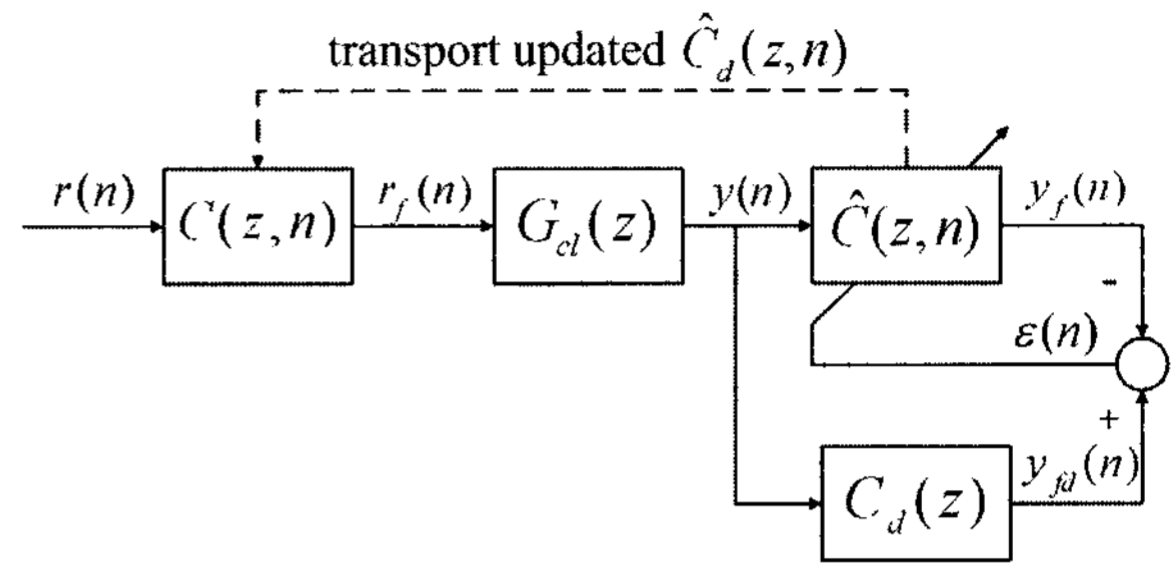
적응형 명령성형기법에는 간접형과 직접형 두 가지 방법이 있을 수 있는데, 간접형은 시스템 파라미터들을 측정된 후 측정된 값을 이용하여 명령성형필터를 설계하는 것이고, 직접형은 시스템 파라미터를 찾는 과정 없이 직접 명령성형필터 자체를 학습해 나가는 방법이다[6,9].

간접 적응형 방법은 여러 가지 문제점(수렴성, 정확성, drifting, 계산량)들로 인해 그 효용성이 매우 떨어지며, 직접 적응형 필터 기법이 보다 우수하다고 증명되었다[9].

직접 적응형 필터링의 구성에 대해 생각해보면, 직관적으로 그림 4(a)에 보인 것처럼 구성할 수도 있다. 여기서 $C_d(z)$ 는 이상적인 명령성형기, $\hat{C}(z,n)$ 는 적응형 명령성형



(a) Pre-filtering



(b) Post-filtering

그림 4. 적응형 명령성형 필터 구성도.

Fig. 4. Adaptive command shaping configurations.

기, $G_d(z)$ 는 피드백 제어기를 포함하는 유연체 매니플레이터 시스템의 페루프 전달함수이다.

그러나 학습과정에서 효과적이고 신속한 수렴이 가능한 선형기법을 사용하기 위해서는, 대상의 출력, 즉 실제필터의 직접 출력과 구하고자 하는 이상적 필터의 직접 출력차이로 정의되는 에러를 필요로 하는데 이러한 필터 배열 구성으로는 RLS나 선형 모델에 기초한 고속 적응형 알고리즘을 사용할 수 없다[7]. 그림 4(b)의 post-filtering 시스템에서 보이는 것처럼 명령성형기의 출력으로부터 직접적으로 정의된 학습오차 $\epsilon(n)$ 는 선형학습을 가능하게 하여 준다. 그림 4(b)의 post-filtering 구성에서 학습된 명령성형기 $\hat{C}(z,n)$ 은 $C(z,n)$ 으로 복사되고, 그것은 실제로 유연체 매니플레이터에 들어갈 입력명령 값을 성형한다. 만약 명령성형기와 유연체 시스템이 선형이라면, 그림 4(b)의 post-filtering 방법으로 생성된 성형기는 pre-filtering에 의해 생성된 것과 같은 효과를 가진다. post-filtering 방법에서, 얻고자 하는 이상적인 명령성형필터의 출력 값 $y_{fd}(n)$ 의 ARX (auto-regressive exogenous) 모델은 아래와 같이 표현된다.

$$y_{fd}(n) = C_d(z)y(n) \tag{18}$$

그리고 그것의 선형 예측치는 (19)로 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{y}_{fd}(n) &= y_f(n) = \hat{C}(z,\theta)y(n) \\ &= \theta^T(n)\psi(n) \end{aligned} \tag{19}$$

여기서 필터계수 벡터인 $\theta(n)$ 와 입력신호 벡터인 $\psi(n)$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\theta(n) = [c_0(n) \ c_1(n) \ \dots \ c_M(n)]^T \tag{20}$$

$$\psi(n) = [y(n) \ y(n-\Delta) \ \dots \ y(n-M\Delta)]^T \tag{21}$$

이때, $\psi(n)$ 는 실험적으로 측정 또는 비교적 정밀한 평가가 가능한 값이다.

2. 이상적 출력값

ACSF 알고리즘에서 학습을 진행하기 위해서는 학습오차 값 $\epsilon(n) \equiv y_{df}(n) - y_f(n)$ 를 측정 또는 계산할 수 있어야 한다. 이상적 명령성형 필터 $C_d(z)$ 를 이용해서 얻고자하는 이상적 시스템 출력 값 $y_{fd}(n)$ 는 $C_d(z), G_d(z)$, 그리고 $r(n)$ 에 의해서 아래와 같이 생성된다.

$$y_{fd}(n) = C_d(z)G_d(z)r(n) \tag{22}$$

이 관계식에 의하면, 시스템의 동역학과 기준입력에 대한 정보, 그리고 $C_d(z)$ 에 대한 정확한 지식 없이는 $y_{fd}(n)$ 을 구할 수 없다.

이러한 한계를 극복하고 적응 알고리즘을 개발하기 위해서, 이상적인 시스템 출력 $y_{fd}(n)$ 에 대한 세밀한 고찰이 필요하다.

그림 2에 보인 시스템을 다시 예로 들어, $y_{fd}(n)$ 의 특성에 대해 살펴보자. 그림에서 시간 0과 2Δ 사이에 영이 아닌 과도응답이 존재한다. 이러한 과도 응답은 시스템의 동특성, 주어진 입력 등에 의존하는 값이다. 그러나 이상적인 명령성형기는 시스템 동특성과는 관계없이 2Δ (여기서 2Δ 는 명령성형기의 길이)의 시간 이후인 잔류응답 구간에서는 시스템 응답을 0으로 만든다. 즉, 우리가 얻고자 하는 시스템의 응답은, 기준 가속도와 기준 속도 모두 0이 되는 잔류응답구간에서 $C_d(z)$ 와 $G_d(z)$ 에 상관없이 0이 되어야 한다고 말할 수 있다. 입력 값 $r(n)$ 은 사용자로부터 사전에 주어진 값으로, 그 정보를 학습에 이용할 수 있고, Δ 는 적응형 명령필터 설계 시 임의로 정한 알려진 값이므로, 잔류구간은 쉽게 파악할 수 있다. 따라서 비록 제한적이긴 하나, 시스템 특성과 무관한 이상적 시스템 출력 값의 특성을 이용하여, 적어도 잔류응답구간에서만 ACSF를 학습할 수 있다.

최소자승 비용함수에 기초한 많은 적응형 알고리즘들 중에서도 RLS방법은 해석이 쉽고, 효과적이며, 비교적 빠른 수렴특성을 갖는다. Post-filtering ACSF에서는 학습알고리즘으로 RLS 알고리즘을 기반으로, (23)에 나타난 단위 DC gain 구속조건을 만족하도록 수정된 선형구속조건 RLS 알고리즘이 개발 적용되었다.

$$h^T\theta(n) = 1 \tag{23}$$

여기서 $h \equiv [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$ 이다.

결과적으로, 주어진 이산시간 n 에서의 적응형 명령성형기(ACS)의 계수 값 $\theta(n)$ 을 찾는 귀납식은 (24)-(26)에 나타내었다.

$$k(n) = \frac{P(n-1)\psi(n)}{1 + \psi(n)P(n-1)\psi(n)} \tag{24}$$

$$P(n) = P(n-1) - k(n)\psi^T(n)P(n-1) \tag{25}$$

$$\theta(n) = \frac{1}{h^TP(n)h}P(n)h \tag{26}$$

여기서 $P^{-1}(n) = \sum_{i=1}^n \psi(i)\psi^T(i)$ 이다[7].

IV. 시간지연 값의 학습

III절에서 설명하였듯이, N 개의 탄성모드에 대해 $2N+1$ 개 이상의 항을 갖는 직접 ACSF를 사용하면, 시간지연 값 T_d 에 상관없이 주어진 시간지연 값에 대해 잔류진동을 완전히 제거할 수 있는 필터계수 값들이 존재한다. 적응알고리즘은 시스템동특성이 알려져 있지 않은 경우, 임의로 정해진 시간지연 값에 대하여 최적의 필터계수를 학습한다.

동적특성이 알려지지 않은 한 개의 탄성모드(가장 지배적인 탄성모드)를 갖는 시스템의 잔류진동을 억제하기 위해서는 최소 세 개의 항을 가지는 ACSF를 사용해야 한다.

$$c(t) = c_0 + c_1\delta(t - T_d) + c_2\delta(t - 2T_d) \tag{27}$$

이 때, III절에서 설명된 null-space 이론과 (11), (12)를 적용하면, 적응알고리즘에 의해 최종 학습된 3항의 적응형 필터는 수식 (28)에서 보인 필터로 수렴된다.

$$c(t) = \frac{1}{M}\delta(t) - 2\cos(\omega_d T_d)e^{-\zeta\omega_n T_d}\delta(t - T_d) + e^{-2\zeta\omega_n T_d}\delta(t - 2T_d) \tag{28}$$

여기서, $M = 1 - 2\cos(\omega_d T_d)e^{-\zeta\omega_n T_d} + e^{-2\zeta\omega_n T_d}$, T_d 는 시간지연, δ 는 단위 임펄스 함수($t=0$), ω_n 은 유연한 시스템의 고유진동수, ζ 는 감쇠비, ω_d 감쇠 고유진동수이다.

(28)의 형태를 갖는 모든 명령성형 필터는 주어진 시간지연 값과 관계없이 탄성모드의 공진주파수에서 stopband를 가진다. 그러나 공진주파수를 제외한 다른 주파수영역에서의 주파수응답은 필터를 설계하는데 사용된 시간지연 값에 따라 필터별로 큰 차이를 보인다. 그림 5는 시간지연 값에 따른 명령성형 필터별 주파수응답의 변화를 보여준다. 그림에서 시간지연 값은 주어진 공진 주파수 ω_d 에 의해서 정규화 되었다.

그림 5에서 나타낸 것처럼 잘 설계된 명령성형 필터는 시간지연 값에 상관없이 탄성모드의 공진주파수 ω_d 에서 stopband를 갖지만, 그 외의 주파수 영역에서는 사용된 시간지연 값에 따라 명령성형 필터가 증폭효과(주파수응답크기 > 0dB)를 갖기도 한다. 증폭효과는 고주파 영역의 노이즈나 모델링에서 고려되지 않은 높은 주파수의 탄성모드를 증폭시킬 수 있기 때문에 실제 현상에서 피해야할 문제이다.

필터의 주파수 응답특성을 분석해보면, 명령성형 필터의 시간지연 값이 아래의 관계식을 만족할 때 주파수 영역에서 최소의 증폭효과, 전 주파수 영역에서 최대 응답치가 1을 넘지 않는 특성을 가진다(그림 5(b)의 시간지연 값이 $0.5T$ 인 경우의 주파수응답 특성 참고).

$$\omega_d T_d = \pi \tag{29}$$

또는

$$T_d = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{T}{2} \tag{30}$$

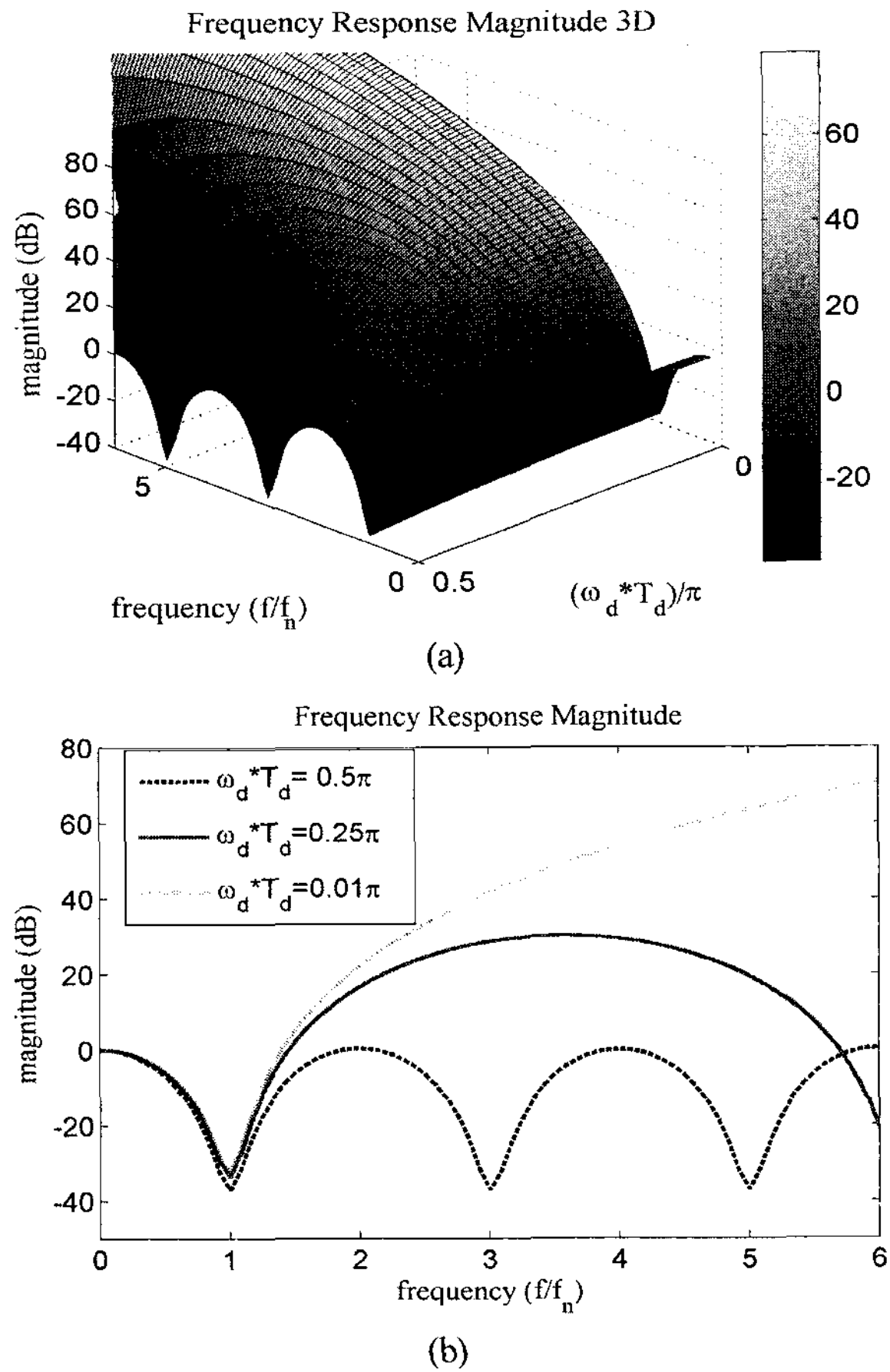


그림 5. (a) 시간지연 값에 대한 주파수응답 선도 (3D) (b) 세 개의 다른 시간지연 값에 대한 응답곡선.

Fig. 5. (a) Transition of magnitude response due to time-delay change (3-D view) (b) magnitude responses for three different time delays.

여기서, T 는 탄성모드의 진동주기이다.

필터 계수 학습과정이 (28)에 보인 것처럼 수렴된 이후, 수렴된 필터의 계수들은 시스템 변수의 정보를 내포하고 있으며, 수렴된 계수로부터 그 정보를 추출하여 최적의 시간지연 값을 학습할 수 있다.

$$\omega_d T_d = \cos^{-1} \left(-2 \frac{c_1}{\sqrt{c_0 c_2}} \right) \quad (31)$$

$$\zeta = -\ln \left(\frac{c_2}{c_0} \right) \frac{1}{2\omega_d T_d} \quad (32)$$

V. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안하는, 수렴된 ACSF로부터 최적의 시간지연 값을 추출하는 방법의 유효성을, 하나의 유연링크를 갖는 직교좌표 로봇 모델을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 직교좌표 로봇 모델은 그림 6에 나타낸 실제의 직교좌표 로봇 시스템을 기반으로 설계되었다. 그림에 보인 실제 시스템은, 선형 BLDC 모터로 구동되는 하나의 유연한 링크를 갖고 있으며, 유연링크는 5Hz의 공진주파수를 갖는 지배적인 탄성모드와 20Hz의 공진주파

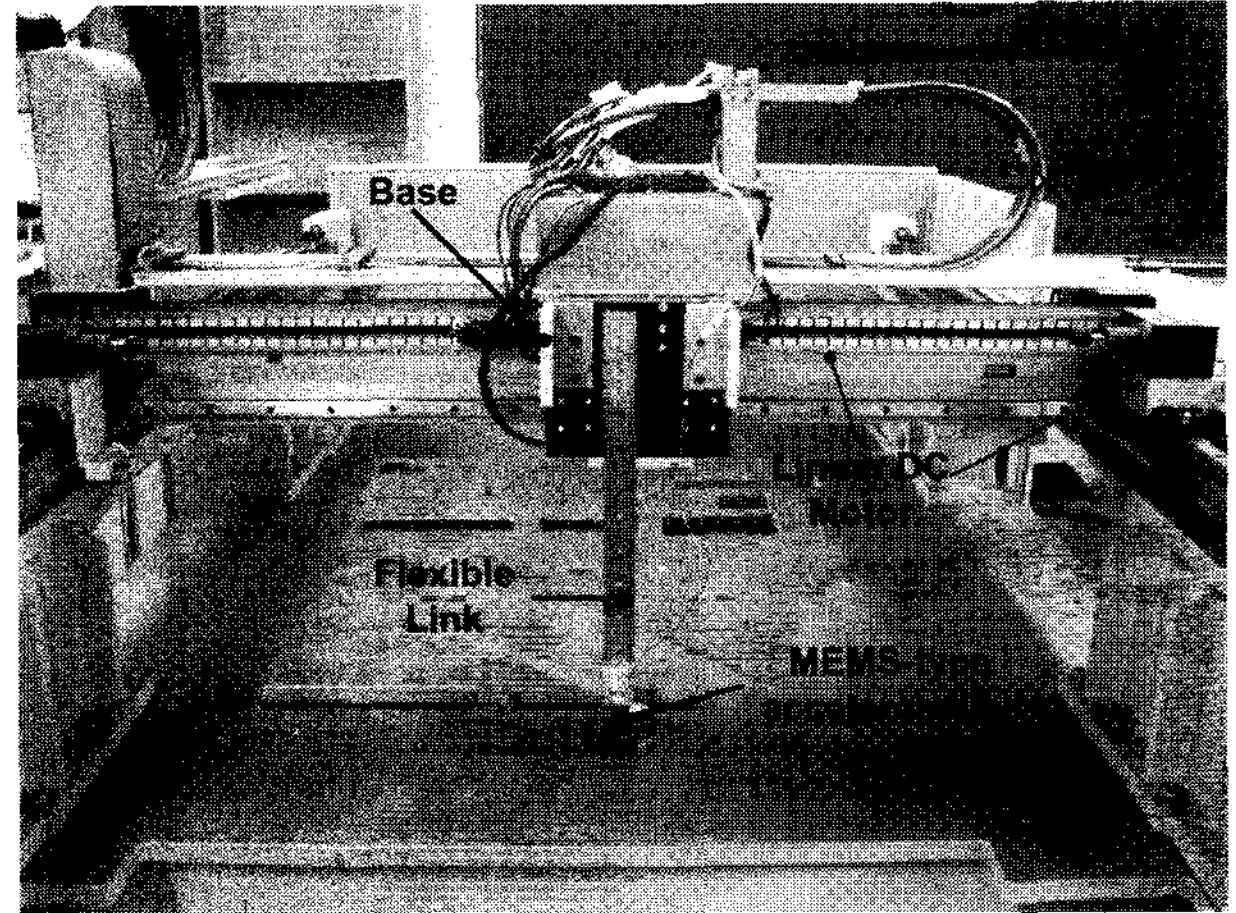


그림 6. 시뮬레이션 모델로 사용한 실제 시스템.
Fig. 6. Actual system modeled in simulation.

수를 갖는 낮은 파워의 탄성모드 등 2개의 탄성모드를 갖고 있다. 시뮬레이션 모델은 실제로봇과 기하학적 동역학적 특성이 갖도록 설계되었다.

1축 직교좌표로봇의 제어를 위해 전형적인 PD 조인트 위치제어기가 설계되어 사용되었으며, 제어시스템은 1kHz의 샘플링 속도를 갖는다. 유연 링크 끝단의 진동을 억제하기 위해 사용된 직접 ACSF는, 링크 끝단의 가속도 정보를 이용하여 학습된다. 유연 링크 끝단의 가속도는 그림 6에 보이는 것처럼 링크의 끝단에 부착된 MEMS-type의 가속도계에 의해서 측정된다.

그림 7과 그림 8은 조인트 피드백 제어시스템에 가해지는 기준입력신호와 베이스의 위치를 나타낸다. 링크의 베이스는 기준입력을 따라 전후로 왕복운동을 하는데, 링크의 베이스가 주어진 기준입력을 잘 따라가는 것을 확인할 수 있다. 또한, 명령성형필터가 적용된 그림 8을 보면, 유연링크 끝단의 잔류진동이 억제되는 것을 확인할 수 있다.

링크가 운동을 시작할 때, 시스템의 동역학적 파라미터들은 알려져 있지 않은 것으로 가정되었으며, ACSF를 이용하여 잔류진동을 억제할 수 있는 효과적인 필터를 학습하도록 하였다.

ACSF는 3개의 항을 갖고, 시간지연 값은 임의의 값 25ms를 선택하였다.

그림 9의 첫 번째 그림은 링크가 왕복운동을 수행하는 동안 계산된 링크 끝단의 가속도 값으로, 전진 운동 시 (0-2.5초 사이)에는 시간지연 값 25ms를 갖는 적응형 명령성형 필터의 필터계수의 학습이 진행되었고, 후진 운동 시 (2.5초-5초 사이)에는 학습된 성형필터에 의해 잔류진동이 상당히 억제된 결과를 보여준다. 전진 운동 시에는 성형필터의 학습이 진행되었을 뿐 원래의 기준입력이 그대로 사용된 것이다.

수렴된 필터의 계수 값을 (31), (32)에 대입하여 주어진 유연체 시스템에 대한 무차원 수 $\omega_d T_d$ 값을 계산하고, 계산된 값으로부터 $\omega_d T_d = \pi$ 가 되도록 하는 최적의 시간지연 값으로 $T_d = 100ms$ 를 얻었다.

그림 9의 두 번째 그림은 시간지연 값으로 100ms가 사용되었을 때의 끝단의 가속도 값이다. 그림 9의 첫 번째 그림에서 나타나는 경우와 마찬가지로, 전진 운동 시(0-2.5초 사이)에는 시간지연 값 25ms를 갖는 적응형 명령성형필터의 필터계수의 학습이 진행되었고, 후진 운동 시(2.5초-5초 사이)에는 학습된 성형필터에 의해 잔류진동이 상당히 억제된 결과를 보여준다.

그림 10은 각각의 시간지연 값에서의 필터 계수값의 학

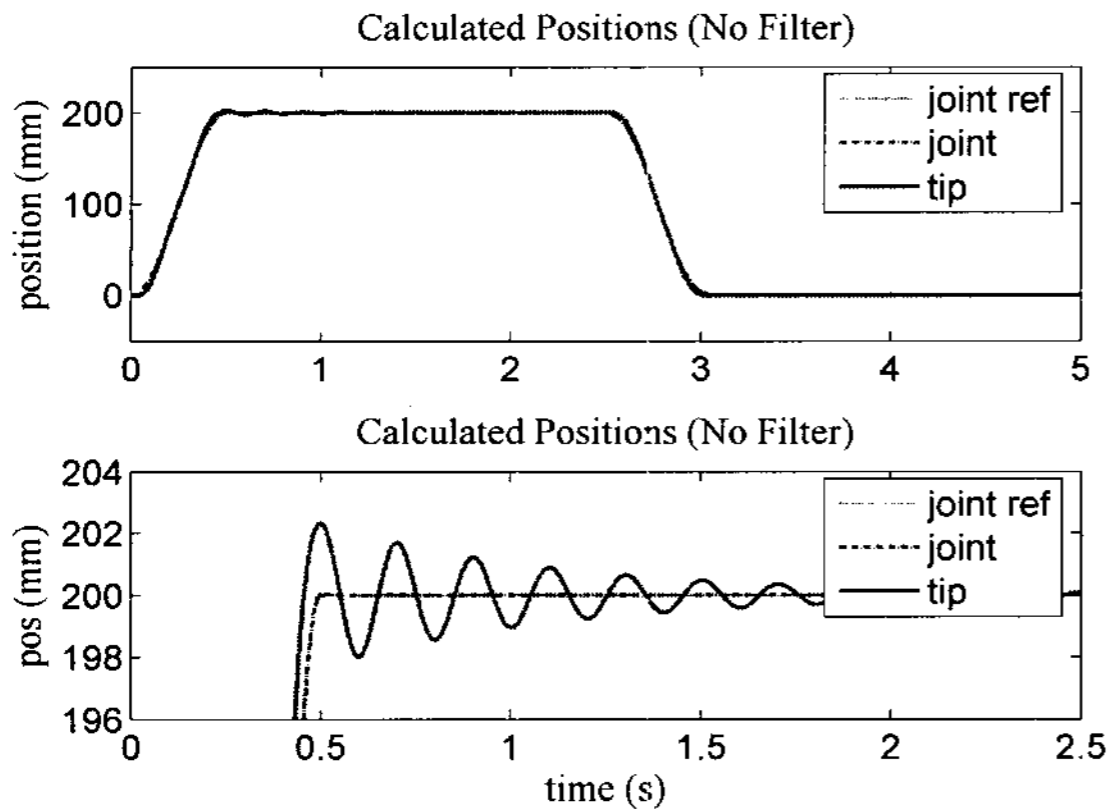


그림 7. 기준입력과 베이스의 위치 (no filter).
Fig. 7. Reference position and base position for joint control.

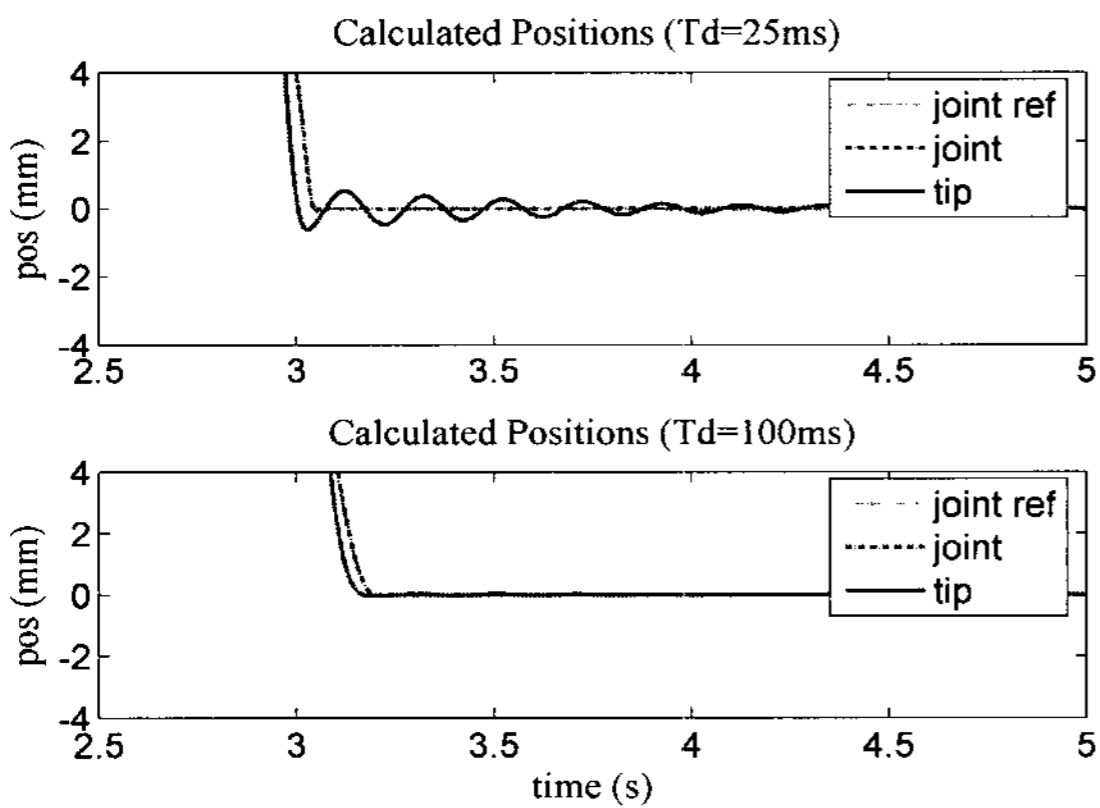


그림 8. 기준입력과 베이스의 위치(Td=25ms, Td=100ms).
Fig. 8. Reference position and base position for joint control.

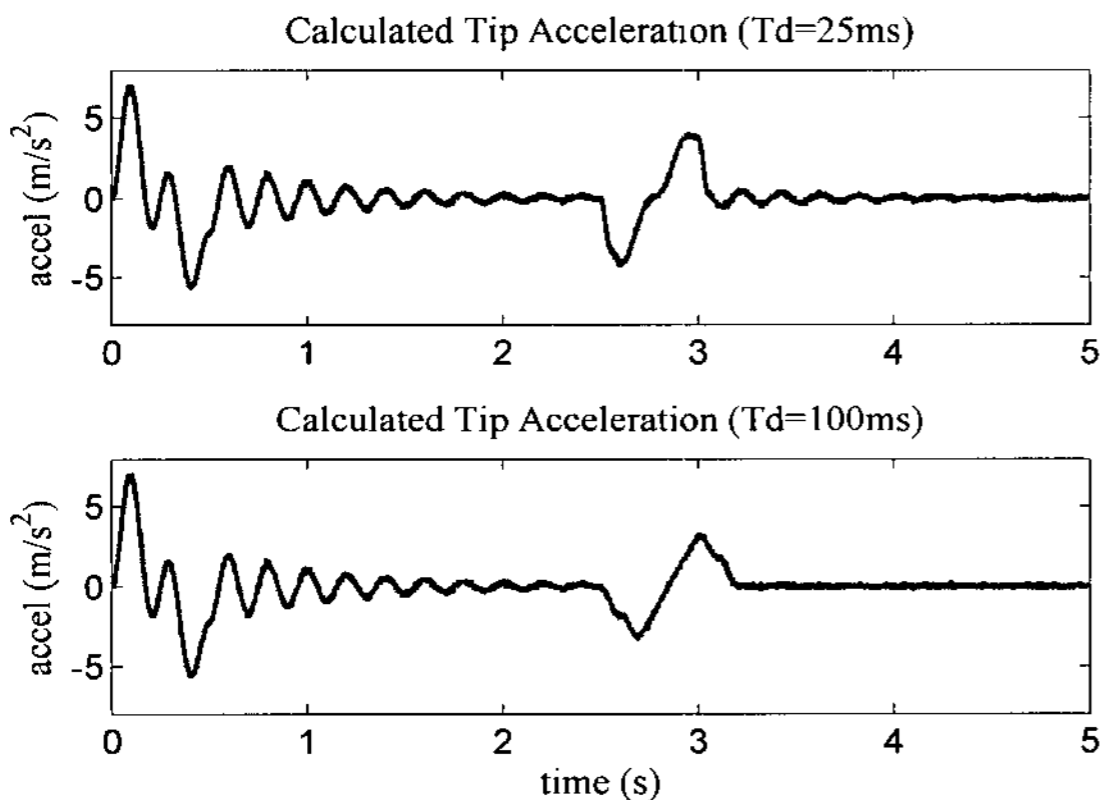


그림 9. 계산된 끝단의 가속도(Td = 25ms, Td = 100ms).
Fig. 9. Calculated tip acceleration(Td=25ms, Td=100ms).

습과정을 나타낸다. 필터의 계수들은 임의의 값 [1 0 0]을 초기값으로 하고, 링크가 잔류진동을 시작하는 0.5초부터 학습을 시작한다. 계산된 최적의 시간지연값 100ms가 적용되었을 때, 임의의 시간지연값 25ms가 적용되었을 때보다 조금 늦게 학습을 시작하지만, 보다 빠르게 최종 값에 수렴하고, 필터의 모든 계수값들이 0과 1사이의 양의 값을 갖는다.

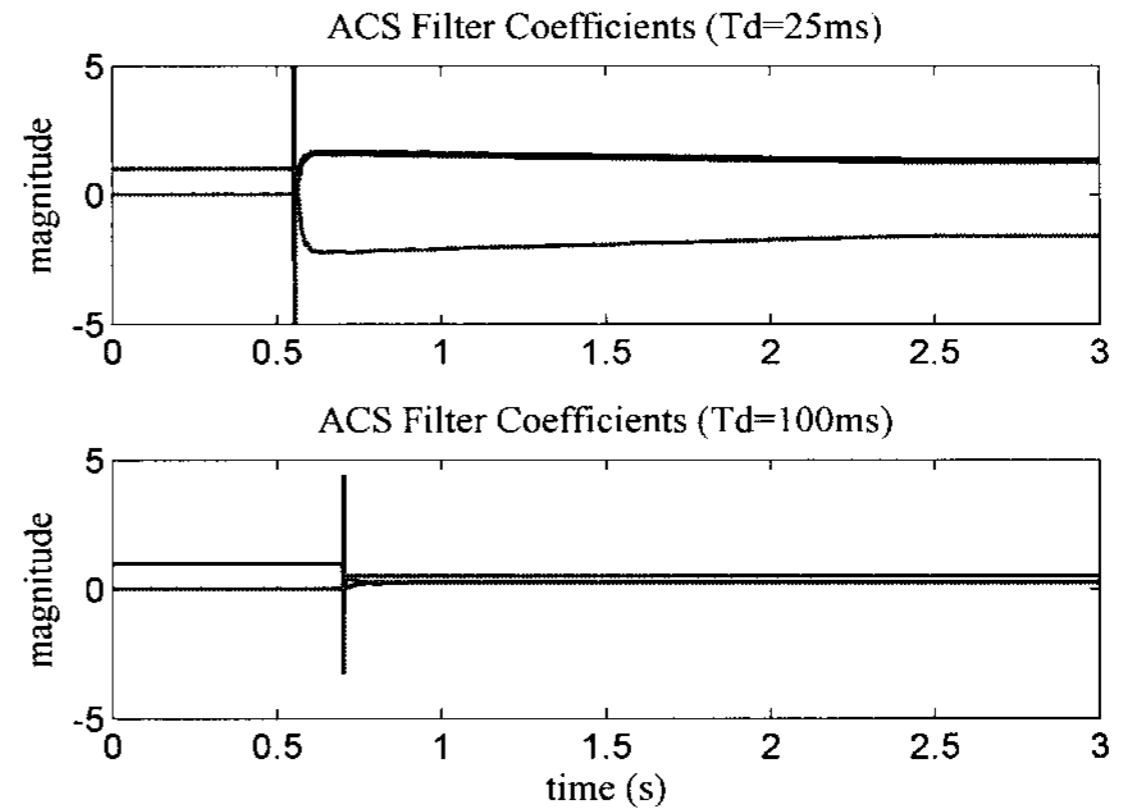
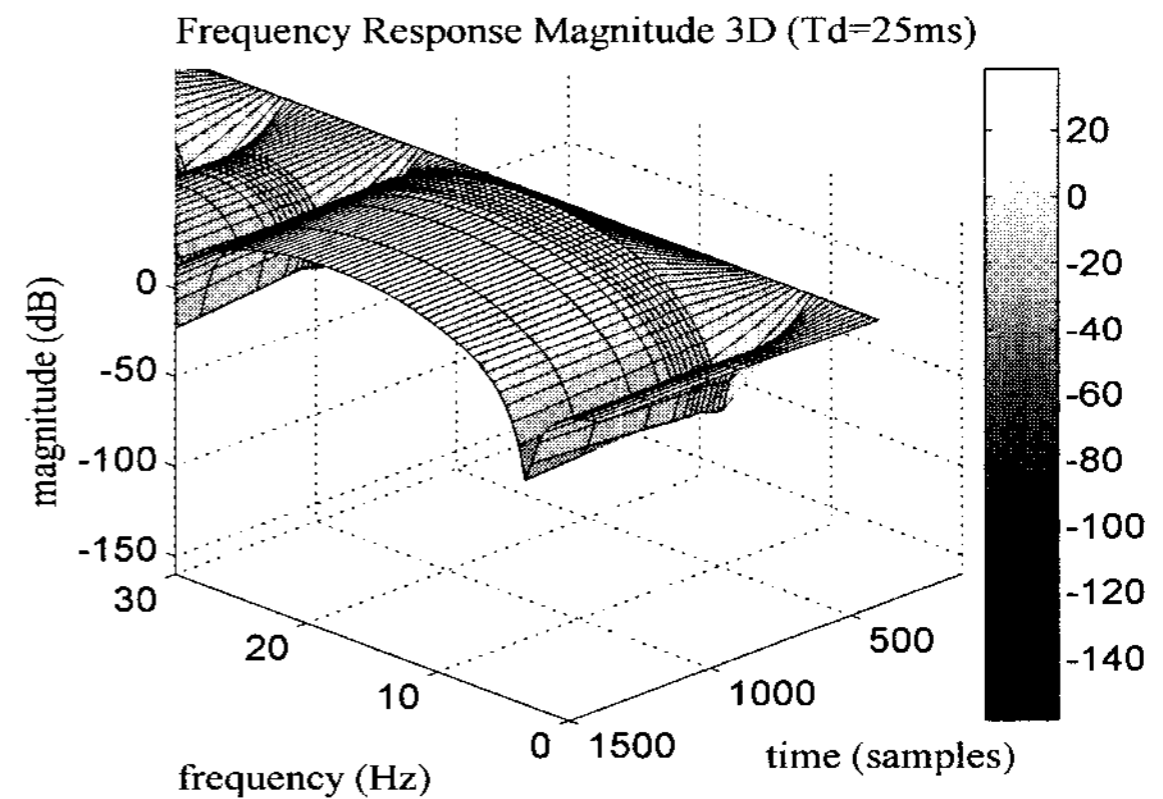
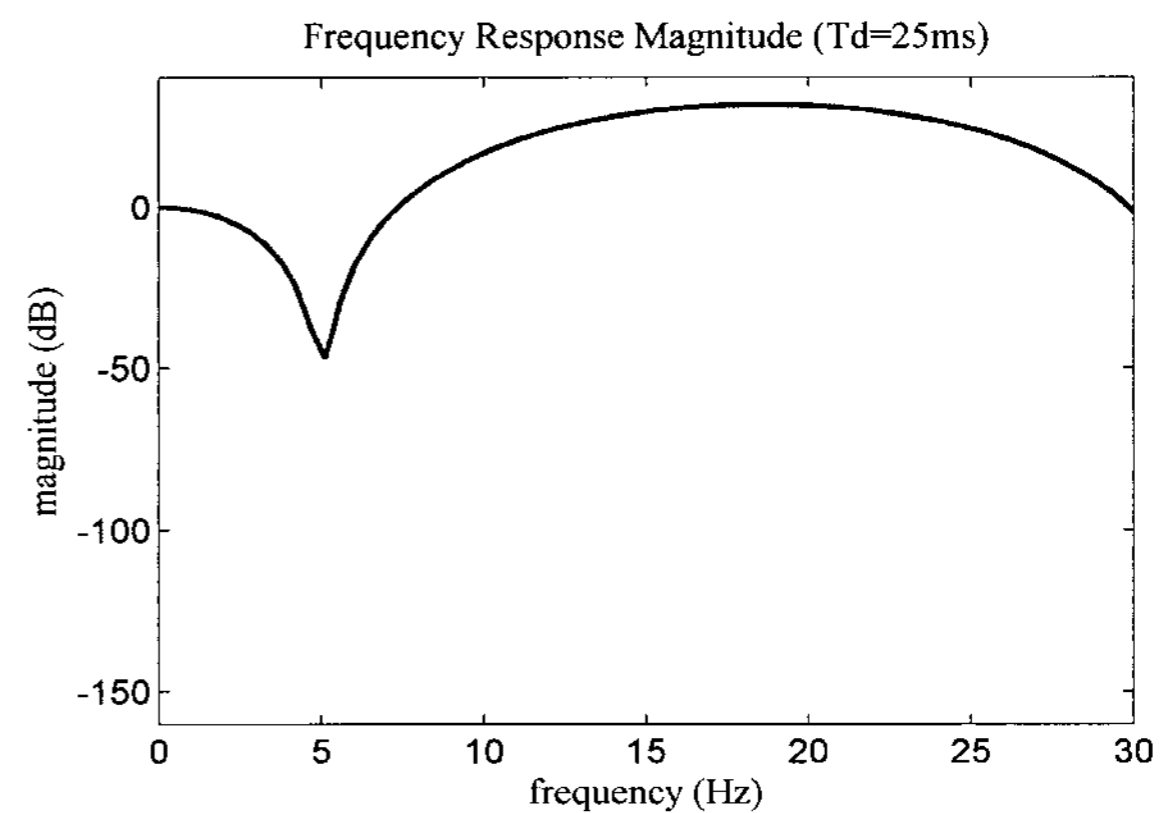


그림 10. 계수의 학습과정(Td = 25ms, Td = 100ms).
Fig. 10. Learning process of filter coefficients(Td=25ms, Td=100ms).

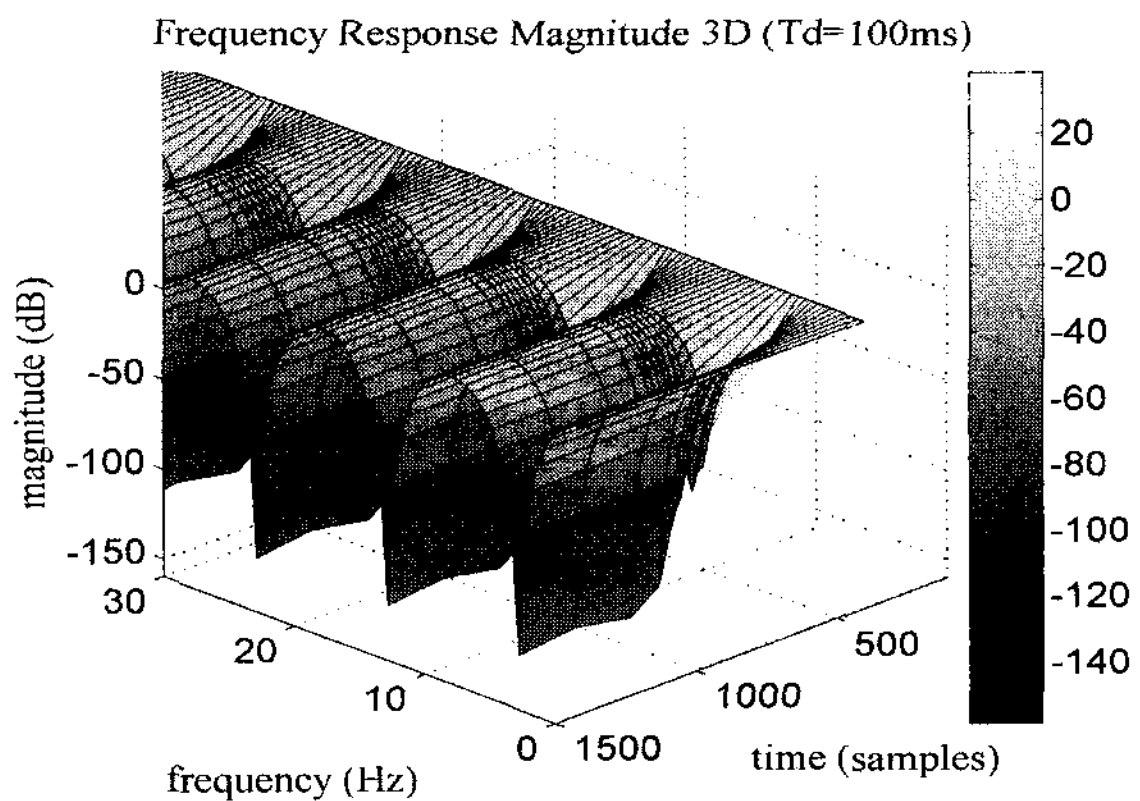


(a)

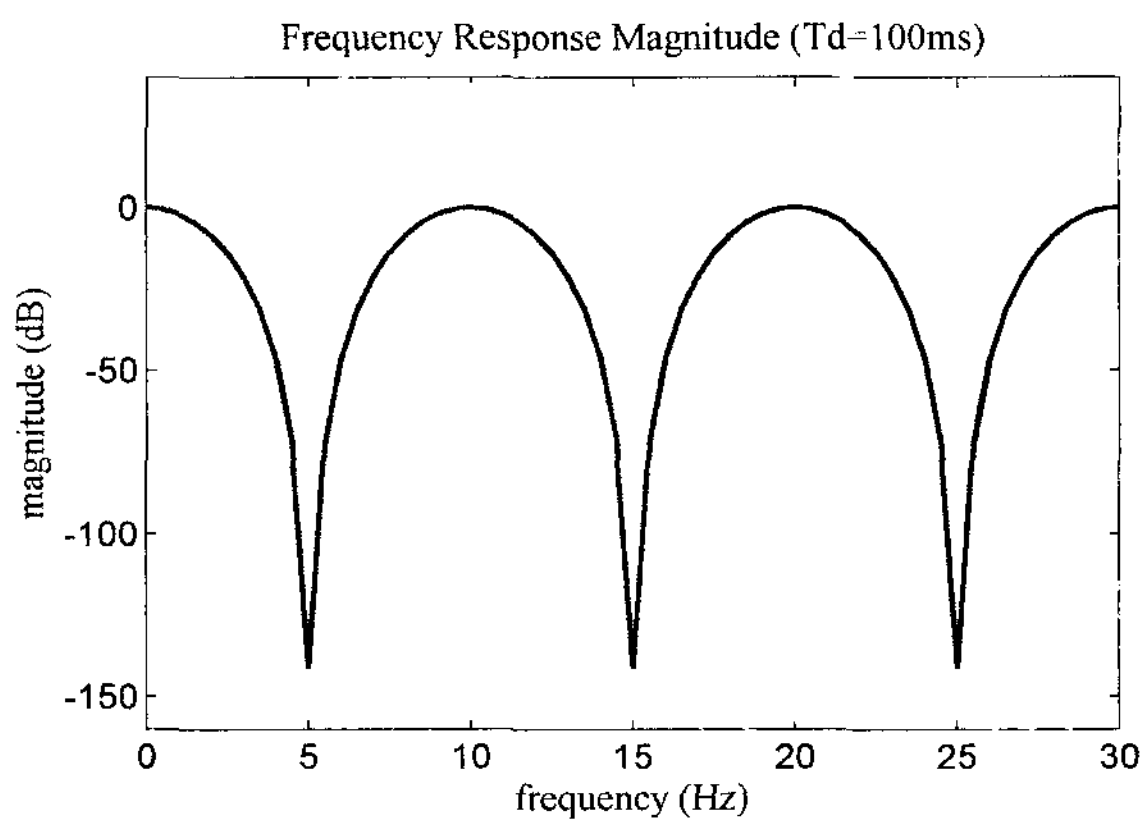


(b)

그림 11. 수렴된 주파수응답 곡선(Td = 25ms).
Fig. 11. Frequency response magnitude change during adaptation.



(a)



(b)

그림 12. 수렴된 주파수응답 곡선($T_d = 100\text{ms}$).
 Fig. 12. Frequency response magnitude change during adaptation.

시간지연 값으로 25ms가 사용된 경우와 100ms가 사용된 경우 모두 잔류진동 억제 효과를 보이기는 하였으나, 최적의 시간지연 값 100ms로 학습된 필터가 적용되었을 때, 임의로 선택된 시간지연 값 25ms의 경우에 비해 잔류진동이 현격히 감소된 것을 확인할 수 있다.

그림 11과 그림 12는 두 개의 다른 시간지연 값 25ms와 100ms를 사용한 적응형 명령성형필터의 주파수 응답선도를 나타낸 것이다. 그림 11(a)에 보인 3차원 그래프는 25ms의 시간지연 값을 사용한 ACSF의 시간에 따른 학습진행 추이를 보여 준다. 시간이 지남에 따라 ACSF는 시스템의 탄성 모드 공진주파수 주위에 notch를 발생하기 시작한다. 그러나 공진주파수 주변을 벗어나면, 신호증폭 특성을 갖게 되는 것을 확인할 수 있다. 그림 11(b)은 수렴된 ACSF의 주파수응답선도로서, 임의의 시간지연 값을 사용한 ACSF가 가질 수 있는 바람직하지 않은 신호증폭현상을 나타낸다.

그림 12(a)에 보인 3차원 그래프는 100ms의 시간지연 값을 사용한 ACSF의 시간에 따른 학습진행 추이를 보여 준다. 시간이 지남에 따라 ACSF는 시스템의 탄성모드 공진주파수 주위에 notch를 발생하기 시작한다. 그러나 그림 11(a)의 경우와는 달리 공진주파수를 주변을 벗어난 영역에서도

신호증폭효과를 갖지 않는다. 그림 12(b)는 수렴된 ACSF의 주파수응답선도로서, 100ms의 시간지연 값을 이용한 ACSF의 긍정적 특성을 나타낸다.

VI. 결론

본 논문은 명령성형 필터의 주파수응답 특성에 미치는 시간지연 값의 효과를 분석하였고, 적응형 명령성형 필터 (Adaptive Command Shaping Filter: ACSF) 사용 시 임의의 시간지연 값을 사용하여 학습한 필터계수로부터 최적의 시간지연 값을 추출하는 방법을 제안하였다. 한 개의 유연 링크를 갖는 직교좌표 로봇 모델을 이용한 시뮬레이션 결과는 제안된 방법이 시스템 변수의 불확실성과 유연체 모션 시스템의 규정되지 않은 공진주파수가 존재함에도 불구하고 유연체 링크의 잔류진동을 억제하는데 매우 효과적이라는 것을 보여준다.

참고문헌

[1] N. C. Singer and W. P. Seering, "Preshaping command inputs to reduce system vibration," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 112, pp. 76-82, 1990.

[2] N. C. Singer, W. Singhose, and W. Seering, "Comparison of filtering methods for reducing residual vibrations," *European J. of Control*, vol. 5, pp. 210-218, 1999.

[3] A. Tzes and S. Yurkovich, "An adaptive input shaping control scheme for vibration suppression in slewing flexible structures," *IEEE Trans. on Control System Technology*, vol. 1, pp. 114-121, 1993.

[4] D. P. Magee and W. J. Book, "Optimal filtering to minimize elastic behavior in serial link manipulators," *Proc. of American Control Conference*, PA, USA, pp. 2652-2656, 1998.

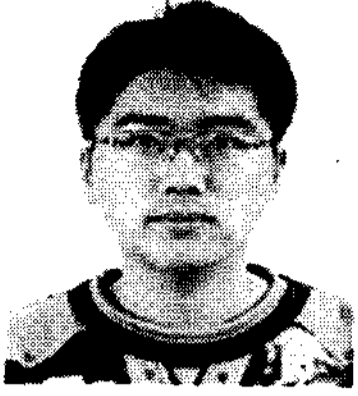
[5] M. Bodson, "An adaptive algorithm for the tuning of two input shaping methods," *Automatica*, vol. 34, pp. 771-776, 1998.

[6] S. Rhim and W. J. Book, "Vibration suppression of a flexible manipulator using adaptive time-delay command shaping filter," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 9, pp. 619-626, 2004.

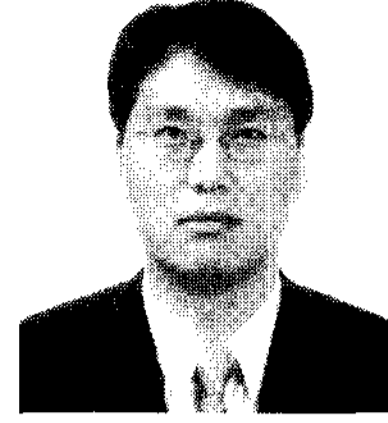
[7] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, NJ, USA, Prentice Hall, 1996.

[8] L. Ljung, *System Identification-Theory for the User*, NJ, USA, Prentice Hall PTR, 1996.

[9] S. Rhim and W. J. Book, "Noise effect on time-domain adaptive command shaping methods for flexible manipulator control," *IEEE Trans. on Control System Technology*, vol. 9(1), pp. 84-92, 2001.

**박 주 한**

2005년 경희대학교 기계공학과 졸업.
2007년 경희대학교 대학원 기계공학과 석사 졸업. 2007년~현재 동 대학원 박사과정 재학중. 관심분야는 로봇제어, 진동제어.

**임 성 수**

1990년 서울대학교 기계설계학과 학사.
1992년 동 대학원 기계설계학과 석사.
2000년 미국 Georgia Institute of Technology 기계공학 박사. 2003년~현재 경희대학교 기계공학과 조교수. 관심분야는 로봇제어, 시스템동역학, 진동제어.