

# 유연한 외팔보 끝단의 위치 추출 및 진동 저감에 대한 연구

## A Study for Position Detection and Vibration Suppression on the Tip of Flexible Cantilever

\*윤귀현, 김국환, #이순걸

\*K. H. Yoon, G. H. Kim, #S. G. Lee(soongeul@gmail.com)

경희대학교 기계공학과

Key words : gantry-type robot, flexible cantilever, command shaping filter

### 1. 서론

유연성을 갖는 구조물에서 발생하는 진동은 많은 분야에서 문제가 된다. 우주 정거장이나 인공위성 등 경량화가 불가피한 분야에 사용되는 대부분의 부품들은 유연성을 갖는다[1]. 또한 반도체 장비나 LCD 패널 제작공정 등에서 쓰이는 gantry-type 로봇의 경우에는 고속화 된 움직임에 따른 매니플레이터의 진동 문제를 수반하게 된다. 이러한 진동은 비선형성을 나타내는 복잡한 동적 특성을 갖게 되어 제어에 어려움이 따른다. 언급한 문제점들을 해결하기 위하여 유연 링크 모델링에 관한 연구가 진행되어 왔으며 진동제어를 위한 여러 가지 제어기법들이 개발되어 왔다.

그 중에서 FIR 형태 시간지연(time-delay) 필터인 명령성형(command shaping) 필터는 탄성모드 운동을 갖는 운동시스템에서 잔류진동의 억제를 위한 제어방법으로 상당히 많은 관심을 받아왔다[2]. 명령성형 필터를 설계하기 위해서는 시스템 매개변수들을 미리 알아야만 하는데 시스템 변수에 대한 불확실성이 존재할 때에 명령성형 필터의 성능을 유지하기 위한 방법은 필터의 매개변수들을 직접적 또는 간접적으로 적응하도록 하는 것이다[3]. 본 논문에서는 간접 적응 알고리즘보다 노이즈에 매우 강하고, 우수한 수렴특성을 가지며 현저히 낮은 계산 부하를 갖는 직접 적응 알고리즘을 사용하여 임펄스의 수와 임펄스간의 시간지연 값을 고정한 채 임펄스의 크기만을 학습하여 최적의 명령성형 필터를 생성하였다.

본 논문에서는 유연한 외팔보를 중력방향으로 구동하였을 때 발생하는 가진력과 중력에 의한 영향을 고려하였으며, 외팔보

의 끝단의 변위를 측정하기 위하여 초고속 카메라를 사용하였고, 이렇게 구해진 위치 정보를 이용하여 적응형 시간지연 명령성형 필터(adaptive time-delay command shaping filter)를 설계하여 잔류진동을 억제하였다.

### 2. 실험 장치

본 논문에서 제안 알고리즘을 검증하기 위해 2축의 gantry-type 로봇에 볼-스크류 타입의 리니어 모터를 부착하여 중력방향으로 이동이 가능하도록 구성하였고, 리니어 모터에 길이 500mm, 폭 30mm, 두께 1mm 의 스테인리스 스틸로 이루어진 유연한 외팔보를 구현하였다. 이때 유연한 외팔보는 약 3.5Hz의 진동주파수를 갖고 있다. 또한, 중력의 영향에 대한 가진 특성을 높이기 위해 외팔보의 끝단에 10g의 추를 달았다. 구현된 시스템은 fig. 1과 같다.

여기서 유연한 외팔보 끝단의 위치를 측정하기 위하여 1500 frame/s의 촬영 속도를 갖는 초고속 카메라를 이용하였다. 하지만 영상을 이용하여 정확한 외팔보 끝단의 위치를 추출하기가 어렵기 때문에 끝단과 액추에이터 부분에 마커를 붙여서 정확한 정보를 얻을 수 있도록 하였고, 이렇게 얻어진 영상 데이터는 전처리과정을 통하여 마커의 중심부분의 위치정보를 파악할 수 있도록 이용되었다.

### 3. 전처리과정 (Pre-processing)

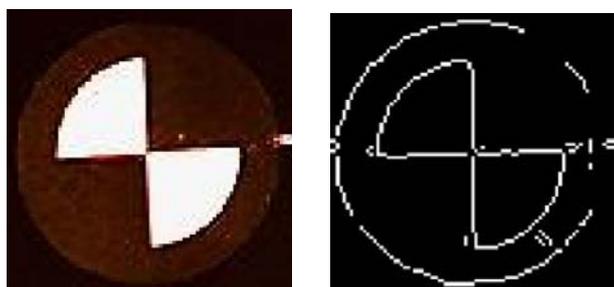
카메라를 통해 얻어진 영상은 fig. 2에서 보여진 바와 같이 원래 영상을 gray-scale 영상으로 변환하였고, 영상의 노이즈를 제거하기 위하여 가우시안 저역통과 필터를 사용하였으며, Sobel 알고리즘을 이용하여 마커의 에지를 추출하였다. 변환된 에지 영상(fig. 2 (b))은 십(+)자 형태의 패턴과 비교하는 방식으로 끝단의 정확한 위치 정보를 추출하는데 사용되었다. Fig. 3은 기준 입력에 대한 끝단의 위치 정보를 나타내고 있다. 이렇게 구해진 위치 정보는 직접 적응형 명령성형 필터를 설계하는데 이용하였다.

### 4. 적응형 명령성형 필터

시간지연 명령성형 필터는 탄성시스템의 공진이 발생하지 않도록 시스템의 입력 값을 성형하는 FIR(finite impulse response)



Fig. 1 Picture of experimental device



(a) Original image

(b) Sobel image

Fig. 2 Pre-processing for obtaining the position of the tip

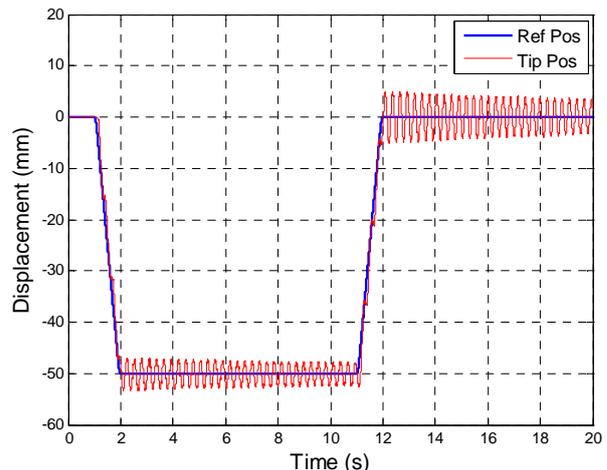


Fig. 3 Tip position measured by camera

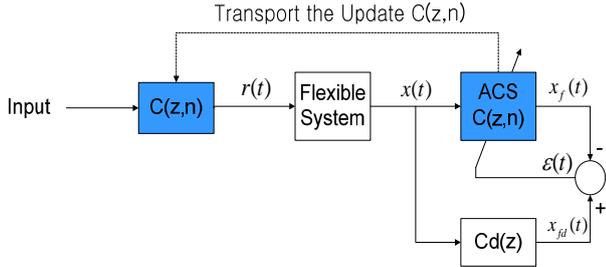


Fig. 4 Block diagram of adaptive command shaping filter

필터이고, 필터의 매개변수는 시스템 탄성모드의 공진주파수와 감쇠비에 의해서 결정이 된다. 하지만 시스템 변수의 불확실성이 있을 경우 fig. 4에서 보이는 것과 같은 적응형 명령성형 필터 (adaptive command shaping filter : ACSF)를 사용할 수 있다. 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. 이 계수 값들은 시스템 정보가 알려져 있지 않은 경우라도 임의의 시간지연 값 하나를 선택하여 고정하고, 단지 필터의 계수 값만을 학습하여도 충분히 잔류진동을 억제할 수 있게 된다. 이처럼 시간지연 값과 필터의 계수, 둘 모두를 학습하는 것에 비해 학습과정이 매우 간단해지며 매우 효과적인 선형학습 방법을 적용할 수 있게 된다.

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 얻고자 하는 이상적 시스템 출력 값  $y_{fd}(n)$ 는  $C_d(z), G_{cl}(z)$ , 그리고  $r(n)$ 에 의해서 아래와 같이 생성된다.

$$y_{fd}(n) = C_d(z)G_{cl}(z)r(n) \quad (2)$$

이상적인 명령성형 필터는 시스템 동특성과는 상관없이  $2\Delta$ 의 시간 이후인 잔류응답구간에서는 시스템 응답을 0으로 만든다. 즉, 우리가 얻고자 하는 시스템의 응답은 기준 가속도와 기준 속도 모두 0이 되는 잔류응답구간에서  $C_d(z)$ 와  $G_{cl}(z)$ 에 상관없이 0이 되어야 한다고 말할 수 있다. 입력 값  $r(n)$ 은 사용자로부터 사전에 주어진 값이고,  $\Delta$ 는 적응형 명령성형 필터 설계 시 임의로 정한 알려진 값이고, 잔류구간은 쉽게 파악할 수 있으므로 비록 제한적이긴 하나 시스템 특성과 무관한 이상적 시스템 출력 값의 특성을 이용하여 적어도 잔류응답구간에서만 ACSF를 학습할 수 있다. 최소사승 비용함수에 기초한 많은 적응형 알고리즘들 중에서도 RLS 방법은 해석이 쉽고 효과적이며, 비교적 빠른 수렴특성을 갖는다.

### 3. 실험 및 결과

Gantry-type 로봇에 부착된 리니어 모터를 중력방향으로 50mm/s의 속도로 구동하였을 때 외팔보의 끝단에서 발생하는 진동을 초고속 카메라를 이용하여 측정하였다. 이때 영상은 1024 x 512의 해상도, 500frame/s의 속도로 촬영되었고, 보다 정확한 위치 정보를 얻기 위해 외팔보의 양 끝단에 십자모양의 원형 마커를 부착하여 촬영한 후, 전처리과정을 거쳐 끝단의 위치를 추출하였다. 이때 추출한 위치 정보는 신뢰성을 위하여 레이저 변위 센서를 사용하여 검증하였다.

이렇게 추출한 위치 정보를 이용하여 직접 적응형 명령성형 필터를 설계하였다. 이때 ACSF는 세 개의 항을 갖고, 임의의 시간지연 값  $T_d$ 를 50ms로 선택하였다. 학습을 위하여 필터를 적용하지 않았을 때의 끝단의 위치 값을 얻은 다음 이를 학습시키고, 학습 후 구해진 계수 값들을 이용하였을 때 줄어든 잔류

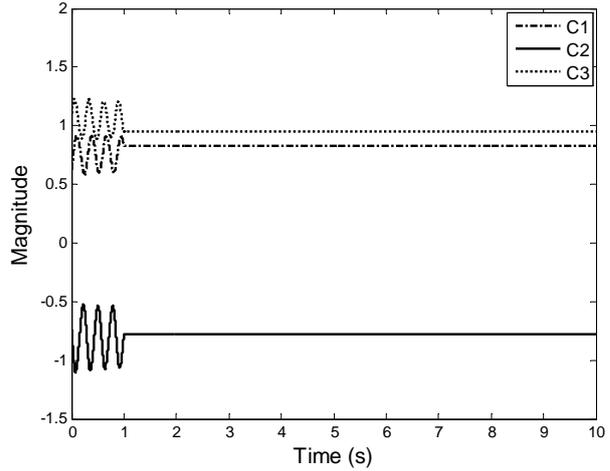


Fig. 5 Three-term command shaped single impulse response

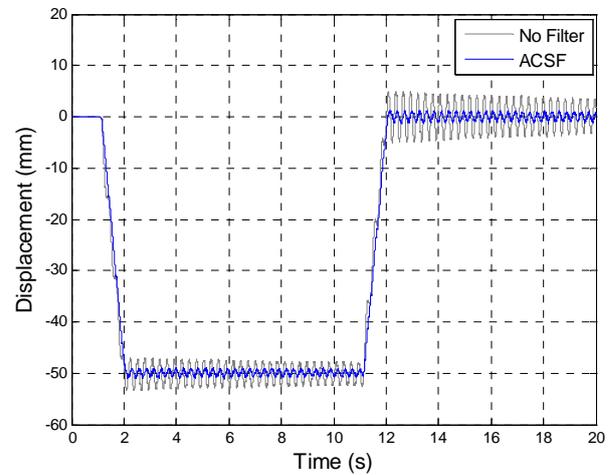


Fig. 6 Comparison of tip positions between no filter and ACSF

진동에 대한 결과를 구하였다. 학습을 통해 구해진 계수 값은 fig. 5에, 학습 전후의 잔류진동에 대한 비교는 fig. 6에 나타내었다. 필터가 적용되지 않았던 경우엔 진폭이 7~10mm 정도로 나타났지만 필터를 적용한 후에는 진폭이 2mm 이내로 현저히 작아진 것을 알 수 있다.

### 4. 결론

본 논문은 초고속 카메라를 사용하여 위치 정보를 추출하였고, 이를 이용하여 직접 적응형 명령성형 필터(ACSF)를 설계하였다. 임의의 시간지연 값을 사용하여 학습한 필터 계수를 실제 시스템에 적용하여 실험한 결과 끝단의 잔류 진동을 현격하게 억제시킬 수 있었다. 하지만 보다 정밀한 제어를 위해 남아 있는 비선형요소마저 삭제시킬 수 있는 제어기에 대한 연구를 진행 중에 있다.

### 참고문헌

1. 조택동, 남기정, “유연한 외팔보의 진동제어에 관한 연구”, Research Institute of Industrial Technology Vol.10, No.1, June 1995
2. N.C. Singer and W.P.Seering, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112 (1990), p. 76.
3. 박주한, 임성수, 이순걸, “유연체 모션시스템의 진동억제를 위한 명령성형필터의 시간지연 값 학습”, 한국정밀공학회 학술대회 논문집, 2006