

하모닉 드라이브의 토크리플 감소를 위한 조인트 토크센서용 스위칭 노치필터

김준홍* · 김영렬* · 송재복*†

* 고려대학교 기계공학부

A Switching Notch Filter for Reducing the Torque Ripple Caused by a Harmonic Drive in a Joint Torque Sensor

Joon-Hong Kim*, Young-Loul Kim* and Jae-Bok Song**†

* School of Mechanical Engineering, Korea Univ.,

(Received August 10, 2010 ; Revised April 26, 2011 ; Accepted April 26, 2011)

Key Words : Torque Ripple(토크리플), Joint Torque Sensor(조인트 토크센서), Switching Notch Filter(스위칭 노치 필터), Harmonic Drive(하모닉 드라이브)

초록: 로봇 매니퓰레이터의 정밀한 제어를 위하여 하모닉 드라이브와 조인트 토크센서가 널리 사용되고 있다. 하모닉 드라이브는 구조적 특징으로 인하여 토크리플을 발생시키는데, 토크센서와 하모닉 드라이브가 직결된 경우에 토크리플은 토크센서에 전달되어 토크센서를 사용하는 제어기나 관측기의 성능을 저해한다. 본 논문에서는 토크리플과 하모닉 드라이브 속도의 관계를 도출하고, 이를 토대로 토크리플을 효과적으로 감쇄시키는 스위칭 노치필터를 제안한다. 제안된 스위칭 노치필터는 기존에 제시되었던 이론에 비하여 직관적이고, 추가적인 회로부나 기구부 구성이 필요 없으며, 연산량이 적은 장점이 있다. 또한 다양한 실험을 통하여 스위칭 노치필터의 필터링 성능, 빠른 응답속도와 스위칭 안정성을 검증하였다.

Abstract: Harmonic drives have been widely used in combination with joint torque sensors in order to facilitate accurate manipulator control. A harmonic drive causes a torque ripple because of its structural characteristics, and this torque ripple tends to deteriorate the performance of a controller or observer that uses torque sensors. This paper proposes a switching notch filter for reducing the torque ripple caused by a harmonic drive in a joint torque sensor; the functioning of this filter is based on the relationship between the frequency components of the torque ripple and the rotational velocity of the harmonic drive. The proposed switching notch filter is advantageous in that it requires less computational load and does not necessitate additional circuits or structures. Various experiments demonstrate that the proposed filter has good filtering performance, fast response, and good switching stability.

1. 서론

대부분의 중소형 로봇에서 감속기로 사용되는 하모닉 드라이브는 경량성, 고효율성, 고정밀성, 기어 유격의 제거 등 기존 감속기에 비해 많은 장점이 있다. 그러나 비선형적인 마찰과 감쇠 등으로 인하여 시간에 따라 마찰력이 변하는 이력현상(hysteresis)과 주기적인 진동 현상인 토크리플

(torque ripple)을 야기한다. 조인트 토크센서를 사용하여 로봇의 관절 토크를 측정하는 경우, 하모닉 드라이브에 발생하는 마찰력은 센서에서 측정되지 않으므로 이력현상에 대한 고려를 할 필요가 없다. 그러나 하모닉 드라이브와 토크센서가 직결된 경우 하모닉 드라이브에서 발생하는 토크리플은 토크센서에 영향을 주어 측정되는 토크신호를 왜곡시킨다. 토크리플에 의한 영향은 일반적인 매니퓰레이터 모델에 적용되기 힘든 불확실성으로서, 토크센서를 사용하는 관측기나 제어기의 성능을 저해하므로 제거되는 것이 바람직하다.

하모닉 드라이브의 다양한 특성을 모델링하기

† Corresponding Author, jbsong@korea.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

위한 연구들이 수행되었으나,^(1,2) 다축의 머니플레이터에 적용되는 경우에는 모델이 매우 복잡하게 된다. 또한, 하모닉 드라이브의 윤활 상태에 따라 모델이 변하게 되므로 지속적으로 시스템의 파라미터 추정을 수행하여야 한다. 이와 같이 모델 정보에 기반하여 토크리플을 제거하기는 어려우므로, 모델 정보에 기반하지 않은 토크리플의 제거 방법들이 다음과 같이 제시되었다. 두 개의 스트레인 게이지를 한 쌍으로 설치하여 토크리플에 의해 발생하는 영향을 상쇄시키는 방법이 제시되었으나,⁽³⁾ 스트레인 게이지를 정확히 반대 위치에 설치하여야 하는 어려움이 존재한다. 임의의 위치에 다수의 스트레인 게이지를 설치하여 토크리플을 보상하는 방법이 제시되었으나,⁽⁴⁾ 제작 비용이 증가하며, 별도의 이득 보정 작업이 필요하다. 칼만필터를 사용하여 토크센서의 드리프트 현상을 보상하고, 토크리플을 상쇄시키는 방식이 제시되었으나,⁽⁵⁾ 많은 연산이 필요하며 적절한 오차 모델의 설계가 필요하다는 단점이 있었다.

본 논문에서는 하모닉 드라이브의 속도와 토크리플의 주기 사이의 관계를 구하고, 이를 바탕으로 토크리플을 효과적으로 상쇄시키면서, 빠른 응답속도를 갖는 스위칭 노치필터(*switching notch filter*)를 제안한다. 스위칭 노치필터는 토크리플의 주요 주파수만을 차단하기 때문에 빠른 응답성을 가지며, 적절하게 차단주파수를 변경시킴으로써 넓은 속도 범위에서의 토크리플 상쇄가 가능하다. 또한, 기존에 수행되었던 연구와 달리 디지털 필터로 구성하여 추가적인 기구부나 회로 구성이 필요하지 않고, 별도의 이득 보정 작업이 필요하지 않으며, 연산량이 적은 장점이 있다.

2장에서는 하모닉 드라이브의 속도와 토크리플의 주파수의 관계를 실험을 통하여 고찰한다. 3장에서는 토크리플을 차단하기 위한 노치필터의 설계에 대해 설명하고, 일반적인 머니플레이터에 적용시키기 위한 스위칭 노치필터를 제안한다. 4장에서는 실험 구성에 대해 설명하고, 실험을 통하여 제안한 필터의 성능에 대해 논한다. 마지막으로, 5장에서는 결론을 제시한다.

2. 하모닉 드라이브의 토크리플

하모닉 드라이브에서 나타나는 토크리플의 특성을 살펴보기 위하여 연구실에서 자체 제작한 토크센서를 사용하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 하모닉 드라이브는 100:1의 감속비를 가지며,

토크센서와 직결하였다. 자세한 실험 구성은 4장에서 설명한다. 하모닉 드라이브의 출력축 속도와 토크리플 사이의 관계를 구하기 위하여 하모닉 드라이브를 정속으로 동작시키고 시간에 따른 토크센서 측정값을 Fig. 1에 나타내었다. 토크센서의 증폭기는 자체적으로 1.6kHz의 차단주파수를 갖는 저역통과필터(*low-pass filter, LPF*)를 내장하고 있기 때문에, Fig. 1(a)에서처럼 조인트가 정지해 있을 때는 대부분의 전기적 잡음이 0.3Nm 이하로 무시할 수 있을 만큼 감쇄된다. Fig. 1(b-d)는 하모닉 드라이브의 출력축이 각각 60°/s, 120°/s, 180°/s의 속도로 회전할 때, 토크센서로부터 토크를 측정된 결과이다. 머니플레이터의 조인트가 등속운동을 할 경우, 이론적으로는 조인트에 걸리는 토크는 정지해 있을 때와 동일하여야 하지만, 실제 실험에서는 토크리플이 2Nm 정도로 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 하모닉 드라이브에서 발생한 토크리플이 토크센서로 전달되어 발생하는 현상으로, 이러한 하모닉 드라이브의 특성에 기인한 토크리플은 토크센서의 성능을 저해하는 중요한 요소가 된다. 또한, 시간영역에서 토크리플의 크기는 하모닉 드라이브의 속도와는 큰 연관성이 없음을 알 수 있다.

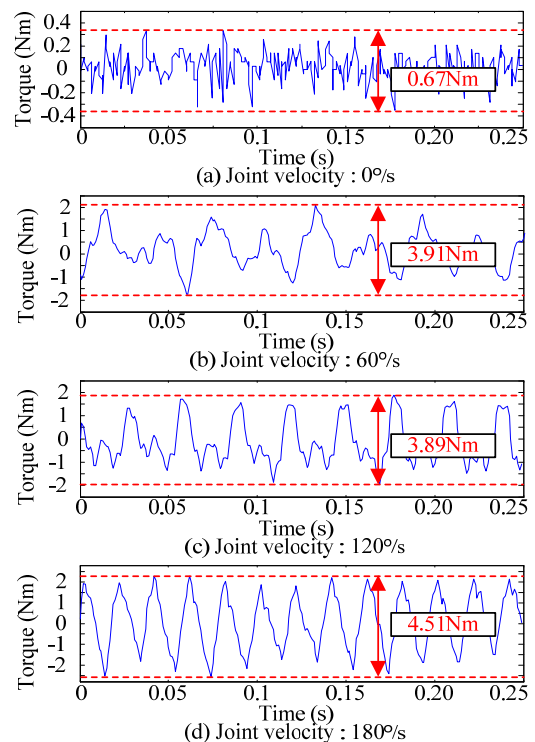


Fig. 1 Torque ripples for various velocities

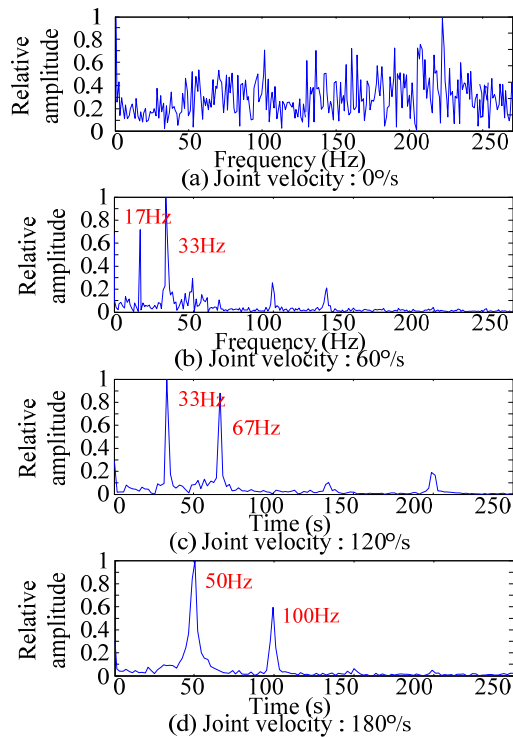


Fig. 2 Frequency analysis of torque ripple

Fig. 2는 하모닉 드라이브의 속도와 토크리플의 주기 사이의 관계를 확인하기 위하여, 위에서 얻은 토크센서 데이터를 Matlab의 Discrete Fourier transform 함수를 사용하여 주파수 해석한 결과이다. Fig. 2(a)와 같이 머니플레이터가 정지해 있는 경우 토크센서에서 들어오는 신호는 어떠한 주기적 경향도 보이지 않는다.

그러나 등속도로 움직이는 경우에는 특정 주파수 성분의 신호를 관찰할 수 있다. Fig. 2(b)는 하모닉 드라이브 출력축의 속도가 60°/s인 경우로, 입력축의 속도(100×60°/s ≈ 16.6Hz)에 해당하는 주파수(17Hz)와 두 배에 해당하는 주파수(33Hz)가 발생한다. Fig. 2(c) 및 2(d)에서도 입력축에 해당하는 주파수(33Hz 및 50Hz)와 이의 두 배에 해당하는 주파수 성분이 뚜렷함을 볼 수 있다. 이렇게 토크리플의 두 주파수 성분이 뚜렷이 발생하는 현상은 앞선 연구자들에게서도 공통적으로 발견되었다.⁽¹⁻⁵⁾ 두 주파수 성분 이외의 잡음은 시스템의 공진이나 제어의 영향에 의해 나타나는 현상이며, 그 크기가 상대적으로 작으므로 무시할 수 있다. 따라서 하모닉 드라이브의 출력축 속도와 주요 토크리플 주파수 사이의 관계는 다음과 같다.

$$f_1(\dot{\theta}_o) = \frac{K_g \dot{\theta}_o}{360}, \quad f_2(\dot{\theta}_o) = 2 \frac{K_g \dot{\theta}_o}{360} \quad (1)$$

여기서 f_1, f_2 는 각각 첫 번째와 두 번째 토크리플의 주파수(Hz), K_g 는 하모닉 드라이브의 기어비, $\dot{\theta}_o$ 는 하모닉 드라이브 출력축의 속도(°/s)를 의미하며, 360은 단위의 환산을 위한 계수이다.

3. 스위칭 노치필터

3.1 노치필터

대역차단필터(band-reject filter)는 대부분의 주파수 대역을 통과시키고, 특정 주파수 대역만을 차단시킨다. 이때 차단주파수 대역을 매우 좁게 설정하여, 특정 주파수 성분만을 감쇄시키는 필터를 노치필터라 한다. 대표적인 노치필터인 Twin-tee notch filter의 전달함수는 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$H(s) = \frac{s^2 + \frac{1}{R^2 C^2}}{s^2 + \frac{4}{RC} s + \frac{1}{R^2 C^2}} \quad (2)$$

여기서 R 과 C 는 아날로그 필터회로의 저항 및 커패시턴스를 의미하며, 본 논문에서 구성할 디지털 필터의 필터 파라미터이다. 이 때 차단주파수는 $\omega_c = 2\pi RC$ 이 된다. 식 (1)과 같이 토크리플은 두 주파수 성분으로 구성되어 있으며, 각 주파수는 조인트의 속도를 통해 구할 수 있다. 따라서 차단주파수가 $\omega_{c1} = 2\pi f_1$ 과 $\omega_{c2} = 2\pi f_2$ 인 두 개의 노치필터를 사용하면 하모닉 드라이브에서 발생하는 토크리플을 제거할 수 있다. 일반적으로 넓은 영역을 차단하는 필터는 응답속도가 느리므로, f_1 과 f_2 사이의 주파수 대역을 차단하는 대역차단필터보다는, 특정 주파수 성분 f_1 과 f_2 만을 차단하는 노치필터를 사용하는 것이 효과적이다.

3.2 스위칭 노치필터

노치필터를 적용하여 하모닉 드라이브에서 발생하는 토크리플을 제거하기 위해서는 하모닉 드라이브의 속도에 따라 노치필터의 차단주파수를 가변하여야 한다. 그러나 차단주파수를 실시간으로 가변하기 위해서는 노치필터의 파라미터를 변경해야 하며, 이를 위해서는 복잡한 해석 과정이 필요하다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 고정된 차단주파수를 갖는 여러 개의 노치필터를 설계하고, 조인트 속도에 따라 설계된 후보 필터 중 하나를 선택하여 사용하는 스위칭 노치

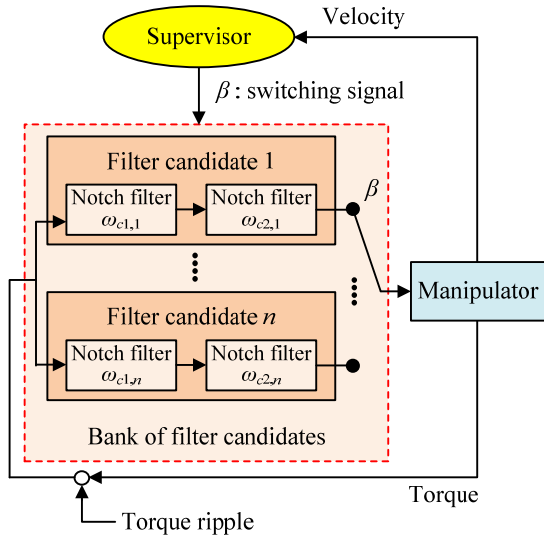


Fig. 3 Block diagram of switching notch filter

필터를 제안한다.

Fig. 3은 스위칭 노치필터의 개념도이다. 머니풀레이터에서 측정되는 토크신호는 하모닉 드라이브의 토크리플에 의해 영향을 받는다. 토크리플을 상쇄시키기 위하여, 토크리플의 주된 주파수 성분 f_1 및 f_2 를 제거하는 두 개의 노치필터로 후보 필터(filter candidate)를 구성한다. Supervisor는 여러 개의 후보 필터 중에서 현재 조인트 속도에 가장 적합한 필터를 판단한다. 만약, supervisor가 판단한 후보 필터와 사용 중인 필터가 일치하지 않을 경우, 스위칭 신호(switching signal)를 발생시켜서 사용 중인 필터를 교체한다. 이러한 스위칭 방법은 적응제어에 사용되는 PID gain scheduling⁽⁷⁾이나 supervisory control⁽⁸⁾과 유사한 방법이다.

스위칭 노치필터의 차단주파수를 Fig. 4에 도시하였다. 식 (1)과 같이 하모닉 드라이브의 속도와 토크리플의 주파수는 비례하므로 하모닉 드라이브의 속도가 증가하면 필터의 차단주파수도 같이 증가하여야 한다. 스위칭 기법을 응용하여, 고정된 차단주파수 $\omega_{c1,i}$ 및 $\omega_{c2,i}$ ($i = 1, 2, \dots, n$)를 갖는 두 개의 노치필터로 구성된 후보 필터를 설계하고, 조인트 속도 $\dot{q}(t)$ 가 $\dot{q}_i < \dot{q}(t) \leq \dot{q}_{i+1}$ 인 경우, 해당하는 후보 필터를 선택하여 사용한다.

4. 실험 결과

4.1 실험 구성

Fig. 5는 실험 장치 및 실험에 사용된 토크센서를 보여준다. 토크센서는 연구실에서 자체 제작한 전브리지(full-bridge) 방식의 센서이다.⁽⁹⁾ 일반적으로

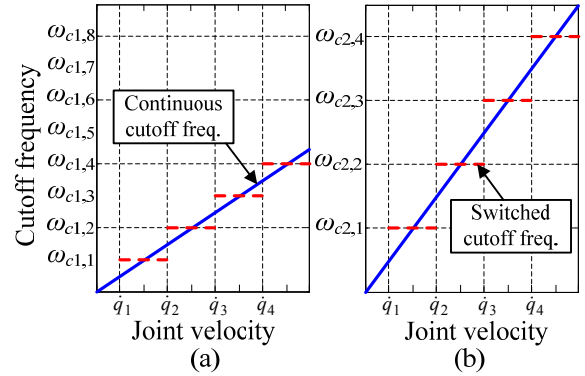


Fig. 4 Cutoff frequency of switching notch filter: (a) notch filter for f_1 , and (b) notch filter for f_2

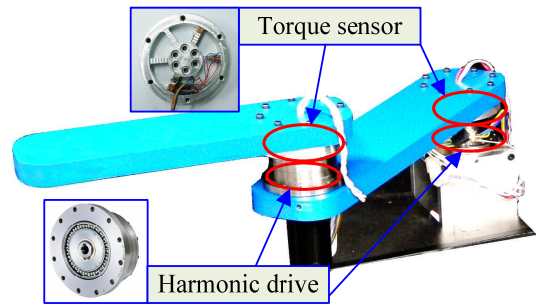


Fig. 5 Two link manipulator

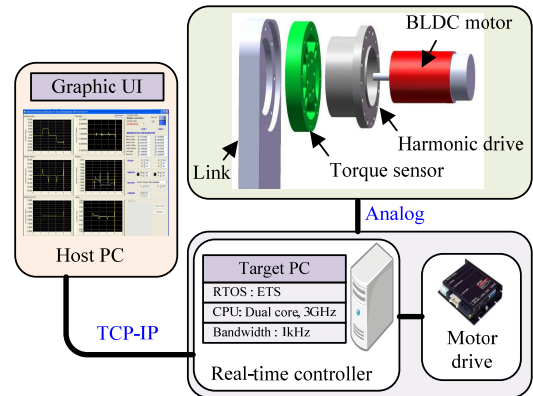


Fig. 6 Control system structure for experiments

로 토크센서의 스트레인 게이지는 저항의 변화가 매우 작으므로, 이를 증폭하기 위하여 증폭기를 사용하는데, 여기서는 1.6kHz의 LPF를 내장한 National Instrument의 SCC-SG24 모델을 사용하였다. 액츄에이터는 Maxon 모터의 70W BLDC 모터를 사용하고, 감속을 위하여 100:1 기어비를 갖는 HDS의 CSG-17-100 모델의 하모닉 드라이브를 사용하였다. 그림에서 보듯이 토크센서는 하모닉 드라이브에 직결되도록 구성하였다.

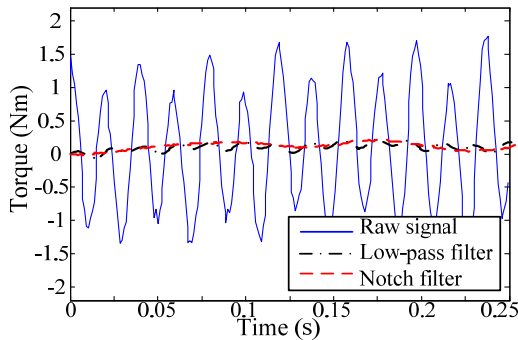


Fig. 7 Filtering performance of notch filter and low-pass filter

Fig. 6은 전체적인 시스템의 구성도를 나타낸 것이다. National Instrument의 실시간 운영체제인 ETS를 설치한 Target PC(제어기용 데스크탑)는 위치 및 속도 제어와 토크센서 측정을 수행하고, 실험 데이터를 ftp 서버에 저장하며, Host PC에서는 실험 결과를 실시간으로 확인할 수 있도록 제작되었다.

실험은 2자유도 머니플레이터의 2축을 고정된 상태로 1축만을 구동하여 수행하였다. 그 이유는 2장에서 설명한 내용과 같이 각 조인트의 토크리플 주파수는 각 조인트 속도에 의해서만 결정되고, 다른 축에서의 조인트 속도에는 영향을 받지 않기 때문이다.

4.2 응답속도 검증 실험

제안된 노치필터의 응답속도 성능을 검증하기 위하여, 토크리플에 대한 동일한 잡음 감쇄 성능을 가지는 저역통과필터(LPF)와 비교한다. Fig. 7은 하모닉 드라이브의 출력축 속도가 90°/s일 때, 토크센서에서 발생하는 토크리플을 각각 LPF와 노치필터를 사용하여 감쇄시킨 결과이다. 식 (1)에 의하면, 90°/s의 출력축 속도에 의해서 25Hz와 50Hz 주파수 성분의 토크리플이 발생하므로, 각각 25Hz와 50Hz의 차단주파수를 갖는 두 개의 노치필터를 사용하여 토크리플을 제거하였다. LPF의 차단주파수는 실험을 통하여, 노치필터와 동일한 잡음 제거 성능을 갖도록 13Hz로 설정하였다.

Fig. 7과 같이 이들 필터에 의해서 토크리플은 0.3Nm 이하로 감쇄되는데, 이는 Fig. 1(a)에서 측정된 전기적 잡음과 비슷한 크기로, 토크리플의 대부분이 상쇄되는 것을 알 수 있다. 그러나 LPF의 경우 25Hz 및 50Hz의 주파수 성분의 토크리플이 여전히 관찰되지만, 노치필터의 경우 이들 주파수 성분이 모두 상쇄되었음을 알 수 있다.

위에서 설계된 LPF와 노치필터의 응답속도를 확인하기 위하여 계단입력과 경사입력에 대한 응

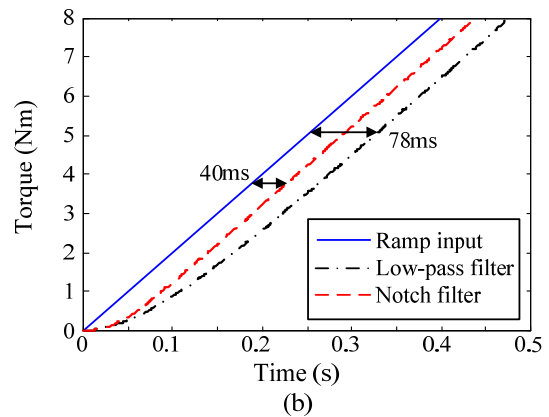
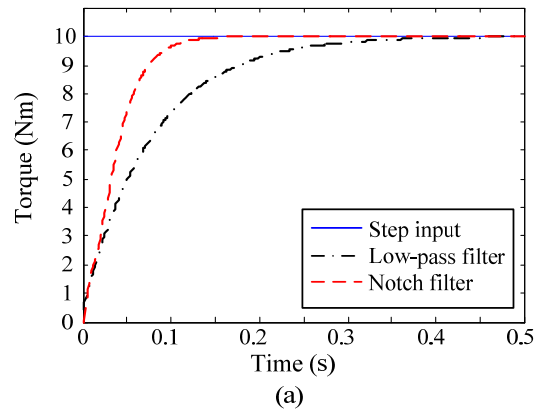


Fig. 8 Responses of notch filter and low-pass filter: (a) Step response, and (b) Ramp response

답을 확인하였다. Fig. 8(a)는 10Nm의 계단입력에 대한 응답인데, LPF는 정상상태에 도달하는데 약 400ms가 걸리지만, 노치필터의 경우 150ms 이내에 정상상태에 도달하였다. Fig. 8(b)는 20Nm/s의 기울기를 가지는 경사입력에 대한 응답으로, LPF는 78ms의 시간 지연이 발생하지만, 노치필터의 경우 40ms의 시간지연이 발생하였다. 센서에서의 시간지연은 해당 센서를 사용하는 관측기나 제어기의 성능에 큰 영향을 미치지 않기 때문에, 토크리플을 없애기 위해서는 LPF 대신 시간지연이 작은 노치필터를 사용하는 것이 효과적이다.

4.3 안정성

스위칭 노치필터의 성능 및 효과를 검증하기 위하여, 연속적으로 조인트의 속도가 변할 때 토크센서로부터 토크를 측정하고, 스위칭 노치필터를 사용하여 토크리플을 제거하였다. Fig. 9는 실험에 사용된 조인트의 6차 다항식 경로이다. 90°에서 -90°로 2초 동안 이동할 때, 조인트의 속도와 가속도는 시간에 대하여 부드럽게 변하며, 각각 0 ~ 171°/s, 0 ~ 260°/s²의 범위를 갖는다. 실험은 1축 머니플레이터를 통해 수행되었으며, 100:1의 하모닉 드라이브를 사용하였다. 따라서 토크리플의 두 주

과수 성분과 머니플레이터의 조인트 속도의 관계는 식 (1)에 따라서 다음과 같이 얻어진다.

$$f_1(\dot{\theta}_o) = \frac{100}{360} \dot{\theta}_o, \quad f_2(\dot{\theta}_o) = \frac{200}{360} \dot{\theta}_o \quad (3)$$

Table 1은 후보 필터의 주파수 간격 $\Delta\omega_{c1} = 5\text{Hz}$, $\Delta\omega_2 = 10\text{Hz}$ 로 하였을 경우, 조인트 속도에 따른 후보 필터의 차단주파수다. 하모닉 드라이브에서 발생하는 2개의 주파수 성분을 차단하기 위하여 각각의 후보 필터는 2개의 노치필터로 구성되어 있다. 스위칭 노치필터는 현재 조인트 속도에 적합한 필터를 후보 필터 중에서 선택하여 사용하게 된다.

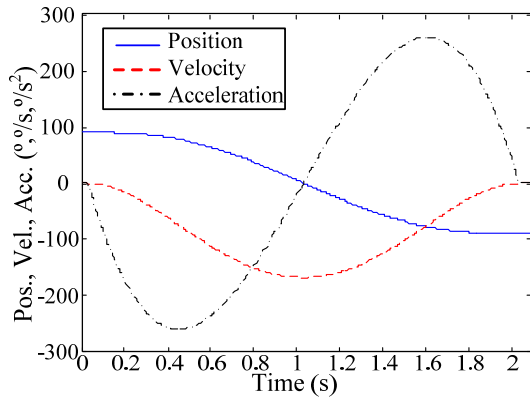


Fig. 9 Desired trajectory of joint

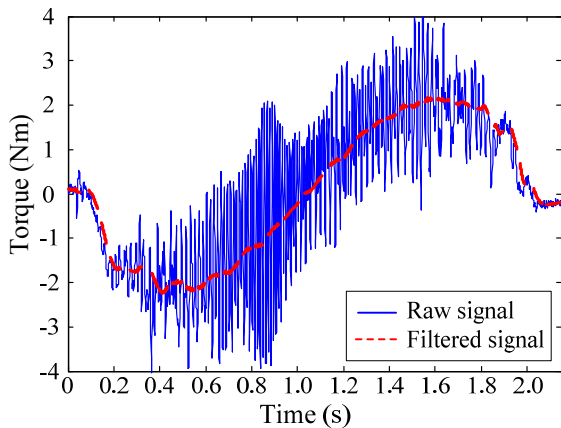


Fig. 10 Raw and filtered torque signals. (Experiments)

Fig. 10은 머니플레이터가 주어진 경로를 이동할 때, 측정된 토크 신호와 스위칭 노치필터를 사용하여 토크리플을 감쇄시킨 결과로, 대부분의 토크리플이 거의 사라지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 스위칭 전략에 의하여 노치필터의 차단주파수가 연속적으로 가변되더라도 원하는 토크리플 상쇄 성능을 얻을 수 있음을 보여준다.

본 실험은 중력에 대해 수직 방향으로 놓여져서 중력의 영향을 받지 않는 1축 머니플레이터를 이용하여 수행되었으므로, 조인트 토크는 조인트의 가속도에 비례하게 된다.

$$M \cdot \ddot{q} = \tau \quad (4)$$

제안된 필터로부터 얻은 토크 신호의 정확성을 확인하기 위하여, Fig. 11에 머니플레이터의 스위칭 노치필터를 통해 얻은 조인트 토크 신호와 조인트의 가속도 경로를 비교하였다. 직관적인 비교를 위하여 가속도 경로는 조인트 토크와 동일한 크기를 갖도록 도시하였다. 경로의 처음과 마지막 부분에서 발생하는 오차는 정적 마찰을 이기기 위한 PID 제어기의 오버슈트에 의한 것이며, 대부분의 경로에서 식 (4)처럼 토크신호와 가속도 경로가 비례하는 것을 볼 수 있다. 즉, 스위칭 노치필터에 의해 얻어진 토크신호가 실제 조인트에 작용하는 토크와 일치하는 것을 확인할 수 있다.

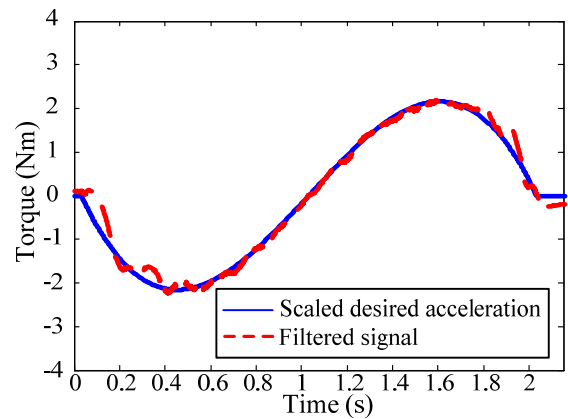


Fig. 11 Desired acceleration trajectory and filtered torque signal

Table 1 Cutoff frequencies of candidate filter

Filter no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\dot{\theta}_o$ ($^\circ/\text{s}$)	18 ~ 36	36 ~ 54	54 ~ 72	72 ~ 90	90 ~ 108	108 ~ 126	126 ~ 144	144 ~ 162	162 ~ 180
ω_{c1} (Hz)	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5
ω_{c2} (Hz)	15	25	35	45	55	65	75	85	95

5. 결 론

토크센서를 하모닉 드라이브에 직결하는 경우, 하모닉 드라이브에서 발생하는 토크리플은 토크센서의 신호를 왜곡시켜, 토크센서를 사용하는 제어기나 관측기의 성능을 저해시킨다. 본 논문에서는 토크리플과 하모닉 드라이브의 속도 사이의 관계를 통하여 토크리플에 의한 영향을 효과적으로 감소하는 스위칭 노치필터를 제안하였다. 실험을 통하여 제안한 필터가 효과적으로 토크리플을 상쇄시키면서, 저역통과필터에 비하여 시간지연이 작은 것을 검증하였다. 또한, 제시한 필터는 기존에 제시된 필터들에 비하여 추가적인 회로부나 기구부의 구성이 필요 없으며, 이득 보정 등의 작업이 필요하지 않고, 연산량이 적은 장점이 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 인간-로봇 협업 머니플레이션 기술 개발사업 및 융복합형 로봇전문인력 양성사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Timothy, D. T. and Warren, P. S., 1996, "A Nonlinear Model of Harmonic Drive Gear Transmission," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 3, pp. 368~374.
- (2) Richard, D., Fathi, H. G. and Prasanna, S. G., 2003, "A New Dynamic Model of Hysteresis in Harmonic Drives," *IEEE Trans. on Industrial electronics*, Vol. 50, No. 6, pp. 1165~1171.
- (3) Ivan, G., Tamotsu, N. and Masashi, H., 2001, "Ripple Compensation for Torque Sensors Built into Harmonic Drives," *IEEE Trans. on instrumentation and measurement*, Vol. 50, No. 1, pp. 117~122.
- (4) Jonathon, W. S. and Richard, F., 2006, "Improved Torque Fidelity in Harmonic Drive Sensors Through the Union of Two Existing Strategies," *IEEE/ASME Trans. on mechatronics*, Vol. 11, No. 4, pp. 457~461.
- (5) Hamid, D. T. and Belanger P. R., 1998, "Torque Ripple and Misalignment Torque Compensation for the Built-In Torque Sensor of Harmonic Drive Systems," *IEEE trans. on instrumentation and measurement*, Vol. 47, No. 1, pp. 309~315.
- (6) Thede, L., 2004, *Practical Analog and Digital Filter Design*, Artech House, Boston, pp. 98~103.
- (7) Zhen Y. Z., Masayoshi. T. and Satoru. I., 1993, "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 23, No. 5, pp. 1392~1398.
- (8) Hespanha, J. P., Liberzon, D. and Morse, A. S., 2001, "Multiple Model Adaptive Control, Part 2: Switching," *Int. Journal of Roboust Nonlinear Control*, No. 11, pp. 479~496.
- (9) Nam, K. H. and Song, J.-B., 2009, "Joint Torque Sensor Based on Hub-Spoke Type Structure for a Service Robot," *Conf. on the KSME*, pp. 247~249.