

초소형 카메라 흔들림 보정장치의 동특성 개선

Improvement of Dynamic Characteristics of an Optical Image Stabilizer in a Compact Camera

송 명 규*. 손 동 훈**. 박 노 철†. 박 경 수***. 박 영 필***

Myeong-Gyu Song, Donghun Son, No-Cheol Park, Kyoung-Su Park and Young-Pil Park

(2010년 12월 17일 접수 ; 2011년 1월 26일 심사완료)

Key Words : Compact Camera Module(초소형 카메라 모듈), Optical Image Stabilizer(광학식 흔들림 보정장치), Notch Filter (노치 필터)

ABSTRACT

Optical image stabilization is a device to compensate the camera movement in the exposure time. The compensation is implemented by movable lens or image sensor that adjusts the optical path to the camera movement. Generally, the camera is moved by a handshake, thus the handshake is considered as an external disturbance. However, there are many other vibrations such as car and train vibration. In this paper, the optical image stabilization system in high frequency region is presented. Notch filter and lead compensator are designed and applied to improve the stability without changing the actuator. To verify the performance of the optical image stabilization system in high frequency region, the experiment equipment with moving object is established. It is confirmed that the optical image stabilization system does not diverge at the resonance frequency.

1. 서 론

흔들림 보정(image stabilization)은 노출 시간 중 카메라 흔들림에 의한 화질 저하를 막기 위한 기능으로 크게 광학식, 전자식, 디지털식으로 나뉜다. 광학식 흔들림 보정은 렌즈나 이미지 센서 등 광학계 부품을 기계적으로 이동시켜 흔들림에 대응한다. 일반적으로 카메라의 흔들림은 손떨림에 의해 유발되기 때문에 손떨림 보정이라고도 불리며, 광학식 흔들림 보정장치는 손떨림에 의한 진동을 고려해서 제작된다. 일반적인 흔들림 보정장치들은 작은 크기

의 진동에 대응한다. 큰 크기의 진동이나 움직임은 사용자의 의도된 카메라 조작 또는 장치가 감당할 수 없는 사용자의 잘못으로 간주하여 대응하지 않는다. 또한 카메라의 흔들림을 6축 진동 성분으로 나뉘었을 때, 흔들림 보정장치들은 2개의 회전운동 성분들에 대응한다. 카메라 진동이 매우 작을 때 선형 3축 성분들과 광축에 대한 회전성분의 움직임들은 화상 품질에 큰 영향을 끼치지 않기 때문이다. 현재 상용화된 광학식 손떨림 보정 장치들은 대체적으로 약 1° 내외의 각도와 1~25 Hz 정도의 주파수를 갖는 흔들림에 대응한다. 광학식 흔들림 보정은 Fig. 1과 같이 크게 4가지의 방식으로 분류할 수 있다. 첫째는 렌즈를 이동시키는 방식이며 이 논문의 흔들림 보정 장치도 이 방식에 속한다. 이 방식에서는 x축 방향의 카메라 회전운동에 대해서 렌즈를 y축으로 선형이동시켜서 대응하며, y축 카메라 회전에 대해서는 x축 렌즈 선형이동으로 대응한다. 둘째는 화상이 맺히는

† 교신저자; 정회원, 연세대학교 기계공학과
E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

Tel : (02)2123-4530, Fax : (02)365-8460

* 정회원, 연세대학교 정보저장기기연구센터

** 연세대학교 기계공학과

*** 정회원, 연세대학교 기계공학과

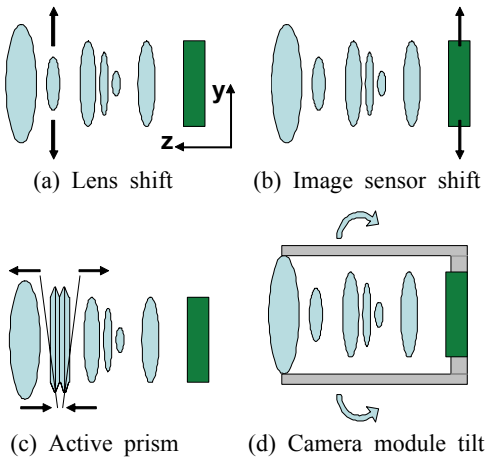
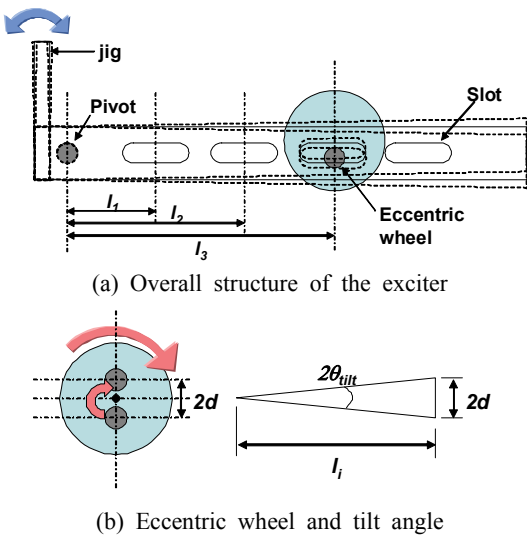


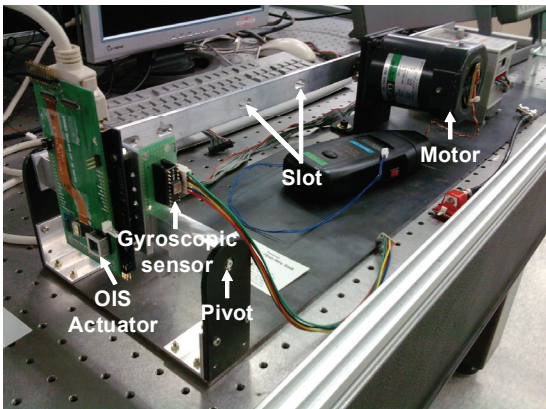
Fig. 1 Methods of optical image stabilization

이미지 센서를 선형으로 이동시키는 방식으로 첫째 방식과 유사한 부분이 많다. 셋째는 광 경로를 능동적으로 변경할 수 있는 능동프리즘과 같은 광부품을 이용하는 방식이다. 넷째는 렌즈 경통과 이미지 센서를 모두 포함한 카메라 광학계 전체를 움직여서 대응하는 방식이다. 넷째 방식은 매우 큰 각도에 대해서도 화질 저하 없이 보정할 수 있는 장점이 있다. 다른 세 방식들, 특히 첫째와 둘째 방식은 카메라가 기울어진 각도가 클수록 보정된 화상이 원본과 달라지는 문제가 있다. 하지만 광학계 전체를 움직여야 하는 만큼 크기가 커지는 문제가 있다. 일반적인 카메라에 적용된 광학식 흔들림 보정장치들은 주로 첫째와 둘째 방식을 채택하고 있다.

초소형 카메라는 보통 1000 mm^3 미만의 크기를 갖는 카메라로 휴대전화 카메라, 노트북 내장 웹캠 등으로 쓰이고 있다. 부피와 가격의 제한으로 인하여 기계적 구동이 요구되는 카메라 기능 중에서 자동초점 기능만이 적용되어 있지만 보다 높은 화질과 기능을 얻기 위해 기계식 셔터, 흔들림 보정 등의 적용이 연구되고 있다. 먼저 자동초점 기능을 위한 구동부를 통째로 움직여 제한된 부피 안에서 자동초점과 흔들림 보정을 동시에 구현한 방식이 연구되었는데, 구동부의 지지방식에 따라 기계적인 조인트를 이용한 방식⁽¹⁻³⁾, 볼베어링을 이용한 방식^(4,5), 와이어 서스펜션을 이용한 방식^(6,7)으로 구분된다. 이와는 달리 렌즈 경통을 움직이는 흔들림 보정장치를 내부에 구현하고, 외곽에서 이 장치 전체를 광축으로 이동시켜 자동초점 기능을 구현하는 방식도 연구되었다⁽⁸⁾. 한편 카메라 모듈 전체를 움직여 흔들림에 대응하는 기술도 연구되고 있는데⁽⁹⁻¹¹⁾, 이는 카메라 모듈의 크기가 매우 작은 초소형 카메라에 매우 효과적인 방법이다. 카메라의 흔들림을 유발시키는 손떨림을 규정하기 위해 다양한 연구가 진행되어 왔는데^(12,13), 손떨림은 진폭이 매우 작고 주파수가 약 25 Hz 이하로 낮다는 특징이 있다. 그러나 손떨림은 카메라의 흔들림을 유발시키는 무수히 많은 요소 중 하나일 뿐이다. 지금까지의 카메라 흔들림 보정장치는 손으로 들고 찍는 카메라를 대상으로 하였기 때문에 손떨림만을 고려했을 뿐 이보다 더 높은 주파수의 진동에 대한 고려는 이루어지지 않았다. 최근 급성장하고 있는 자동차 블랙박스에도 카메라가 장착되는데, 이 경우 자동차 진동이 카메라



(b) Eccentric wheel and tilt angle



(c) Photo of the exciter

Fig. 2 Tilt exciter

흔들림의 주원인으로 적어도 40 Hz까지의 진동이 고려되어야 한다. 이 논문은 손떨림보다 더 높은 주파수의 진동에서도 효과적으로 작동하는 카메라 흔들림 보정장치에 관한 것이다. 손떨림만을 고려하여 설계한 흔들림 보정장치를 기반으로 하여⁽⁷⁾, 구동장치의 기구적 변경없이 노치 필터와 앞섬보상기의 적용만으로도 고주파 영역에서도 안정적으로 작동하는 것을 확인하였다. 또한 카메라 대신 피사체를 진동시키는 실험 장치를 구현하여 흔들림 보정장치의 성능을 검증하는데 이용하였다. 이 실험 장치는 카메라에 진동을 가하지 않기 때문에 카메라 내부 구동장치의 움직임을 외부에서 측정하기 용이하며, 고주파 진동에 의한 카메라 변형을 막는 장점이 있다. 실제 선행개발 단계에서 카메라 모듈을 강건하게 만들기 어려운데 이 실험 장치를 이용하면 구조적으로 강건하지 않은 프로토타입의 카메라도 실험할 수 있다.

2. 흔들림 보정 검증을 위한 실험 장치 구축

흔들림 보정장치는 카메라의 흔들림에 대응하는 것이므로 일반적인 실험 장치는 카메라를 흔들도록 제작된다. 하지만 실험용 카메라가 구조적으로 강건하지 못할 경우 계속해서 가해지는 진동으로 인해 내부 광학계가 흐트러질 수 있으며, 카메라가 움직이기 때문에 카메라 내부 구동장치의 움직임을 외부의 측정장비로 측정하기 어려운 문제가 있다. Fig. 2는 카메라에 진동을 가해주는 실험 장치를 보여준다. 편심바퀴가 회전하면서 발생한 상하운동이 각운동으로 전환되어 지그(jig)에 고정된 카메라를 가진시킨다. 피벗(pivot)과 편심바퀴와의 거리 l_i 와 편심바퀴의 상하운동거리 d 에 의해 각운동의 크기가 식(1)과 같이 결정된다.

$$\theta_{tilt} = \tan^{-1}(d/l_i) \quad (1)$$

가진원인 모터가 편심바퀴를 회전시키며, 모터의 회전속도를 조정하여 진동 주파수를 조절할 수 있다. 해당 장치는 한 번에 가해줄 수 있는 주파수와 진폭이 고정되어 있어 다양한 주파수와 진폭이 섞인 진동을 만들어낼 수 없으며, 편심바퀴와 슬라이더 메커니즘으로 구성되어 있어서 고주파 영역에서 작동시킬 경우 각 메커니즘 부품들에서 원하지 않는

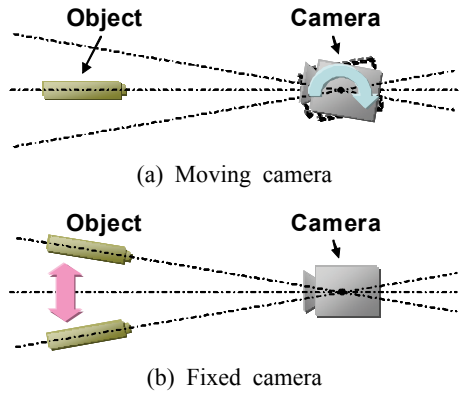
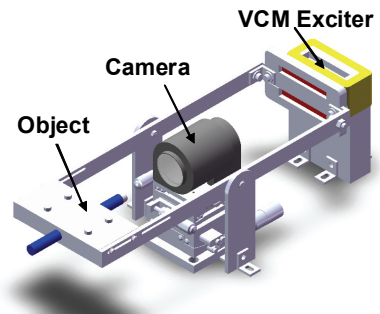
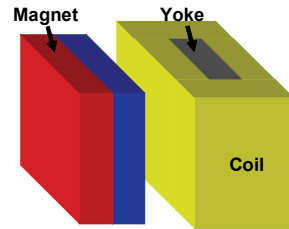


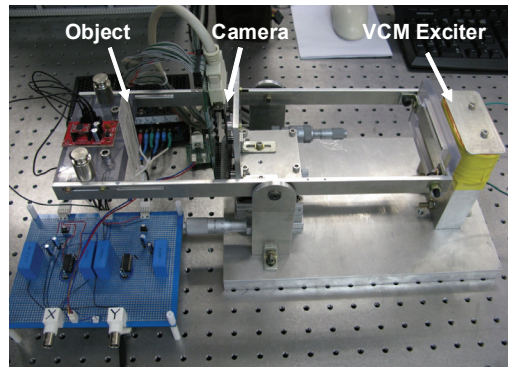
Fig. 3 Experiment methods for OIS



(a) Structure of the experiment equipment



(b) Structure of the VCM Exciter



(c) Photo of the experiment equipment

Fig. 4 Fabricated exciter

진동들이 발생하기 때문에 고주파 가진기로 적합하지 않다.

이와 같은 기존 실험 장치의 문제를 극복하기 위해 Fig. 3과 같은 피사체 가동방식을 고안하였다. 기존의 방식이 피사체를 고정시키고 카메라를 회전

시켰던 것과 반대로 카메라를 고정시키고 피사체를 이동시키는 방식이다. 카메라가 항상 고정되어 있기 때문에 기구적으로 강건하지 못한 프로토타입 카메라 모듈도 실험할 수 있으며, 외부 측정 장비로 구동장치의 움직임을 측정할 수 있다. Fig. 4는 제작된 실험 장치를 보여준다. 중앙에 고정되는 카메라를 기준으로 우측은 구동력을 발생시키는 구동부이고, 좌측은 피사체를 고정시키는 부분이다. 기존 장비와 비교해서 동력을 전달하는 메커니즘을 최소화하였기 때문에 고주파 진동을 발생시키는데 적합하며, 진폭과 주파수를 입력전기신호를 통해 조절할 수 있으므로 훨씬 더 다양한 진동을 발생시킬 수 있다. Fig. 5는 제작된 실험 장치의 주파수 응답이다. 100 Hz 근처에 공진주파수가 있음을 확인할 수 있다. Fig. 6은 각 주파수별 사인과 입력에 대한 출력변위를 나타낸다. 입력 파형에 비해 약간의 일그러짐이 있지만 80 Hz까지의 진동을 발생시키는 가진기로서 무난하게 사용할 수 있음을 확인하였다.

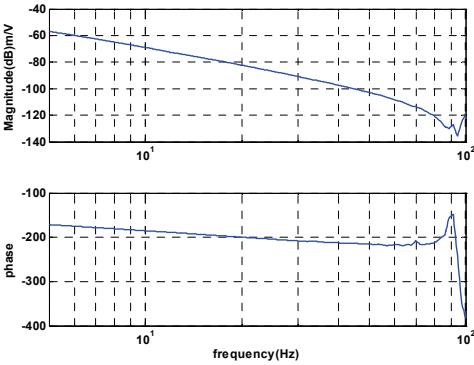
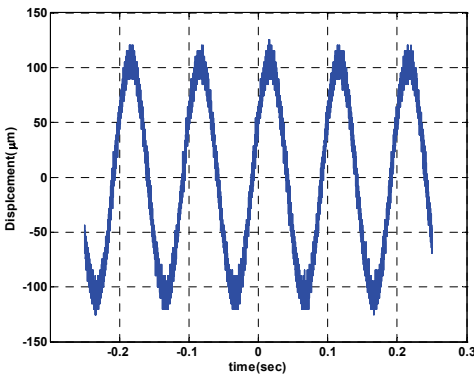
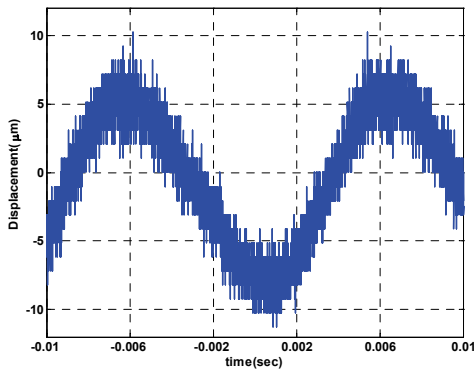


Fig. 5 Frequency response of the fabricated exciter



(a) 10 Hz



(b) 80 Hz

Fig. 6 Time response of the fabricated exciter

3. 흔들림 보정 장치의 고주파 특성 개선

3.1 흔들림 보정 장치의 요구성능

기존 광학식 흔들림 보정장치들이 손떨림의 주파수인 1~25 Hz의 흔들림에 대응했지만 이 논문의 흔들림 보정장치는 그 이상의 진동이 가해지는 상황, 특히 자동차나 열차와 같은 차량 탑재 카메라를 가정하고 있다. 자동차의 진동은 자동차 속도와 노면 성질에 따라 달라지므로 정확히 규정하기가 어렵지만 0.5~1000 Hz의 주파수를 가지며 진동에너지의 95% 이상은 40 Hz 이내로 본다⁽¹⁴⁻¹⁷⁾. 흔들림 보정 장치의 요구성능을 결정하는 데에는 진동뿐만이 아니라 카메라의 이미지 센서의 성능 역시 고려되어야 한다. 이미지 센서의 반응속도는 광량과 광학계 등에 따라 다르지만 광학계가 작은 초소형 카메라는 외부에서 수집하는 광량이 작아 비교적 긴 노출시간이 필요하다. 카메라가 초당 30프레임의 동영상 촬영할 경우 노출시간은 약 33.3 ms를 넘어서면 안 되며 일반적으로 초소형 카메라나 웹캠이 최대 15, 30프레임 동영상 촬영을 지원하는 것을 감안하면 조도가 높은 상황에서도 어렵잖아 20 ms 미만의 노출시간을 갖기 어렵다고 추측할 수 있다. 흔들림 보정 구동기의 지연시간이 품질에 지대한 영향을

끼친다는 사실을 밝힌 연구가 있었는데⁽¹⁸⁾, 이 논문에서 다루는 고주파 진동이 아니므로 직접적으로 적용하기 어렵다. 따라서 이 논문에서는 구동기의 지연시간을 앞서 추측한 최소 노출 시간의 1/10인 2 ms 이내로 맞추는 것을 목적으로 하였다.

3.2 기존 흔들림 보정 구동기의 문제점

광학식 흔들림 보정장치는 광학계 부품을 이동시켜 카메라 흔들림에 대응하므로 광학계 부품을 이동시켜줄 구동기가 필요하다. 이 논문에서는 이전 연구에서 이미 설계된 구동기를 기반으로 한다⁽⁷⁾. 해당 구동기는 와이어 서스펜션 구조를 통해 마찰로부터 자유로워 위치되먹임센서 없이 광학식 흔들림 보정을 구현할 수 있는 것이 특징이다. 해당 구동기의 1차 공진주파수는 약 100 Hz이다. 만약 카메라에 공진주파수에 가까운 주파수를 가진 진동이 가해질 경우 구동기는 공진하여 정상적으로 작동하지 않는 것은 물론 장치가 손상될 수도 있다. 사람의 손떨림은 약 0~20 Hz의 주파수를 갖고 있기 때문에 100 Hz의 공진주파수는 충분한 여유를 갖고 정해진 값이라 할 수 있지만 자동차, 철도 등 손떨림보다 훨씬 높은 주파수의 진동이 가해지는 상황에서는 문제가 될 수 있다. 이런 경우 구동기 구조 변경을 통해 공진주파수를 높이거나 감쇄를 통해 공진봉의 크기를 줄이는 방법이 있다. 하지만 공진주파수를 높이기 위해 스프링 강성을 증가시키면 변위감도가 떨어지게 되어 최대보정각도가 작아지고 전력소비량이 커지며, 감쇄재(damping material)를 적용하는 방법 역시 와이어 서스펜션 구조는 감쇄재를 적용하여도 공진봉을 완전히 제거하지 못하며 공간 문제와 추가공정을 요구하는 등의 문제가 있다. 다시 말해 이와 같은 구동기의 공진주파수 결점을 기계적인 방법으로 해결하는 것은 어려우며, 따라서 제어회로에서 이 결점을 메워주는 방법이 동원되어야 한다. 이 논문에서는 일상적으로 사용되는 노치 필터와 앞섬보상기를 이용하여 이와 같은 문제를 보완하였다.

3.3 노치 필터와 앞섬보상기 설계

노치 필터는 특정주파수 영역을 제거하는 필터로 구동기의 공진주파수 영역을 제거하는 역할로 사용될 수 있다. 단 노치 필터를 사용할 경우 위상지연이

발생하므로 앞섬보상기를 통해 이를 보상할 필요가 있다. 4개의 와이어(wire)로 지지되는 음성코일구동기는 질량과 강성, 감쇄를 가지며 구동력에 의해 구동하므로 강제진동하는 MCK 시스템으로 간주하여 다음과 같이 구동기의 전달함수를 정의할 수 있다.

$$G = F / (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) \quad (2)$$

식 (2)에서 이 논문에 사용된 구동기의 ζ 는 0.0496, ω_n 은 785이다. 이에 맞는 노치 필터의 전달함수는 다음과 같다⁽¹⁹⁾.

$$C_n = \frac{s^2 + \frac{2d}{c}\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + \frac{2}{c}\omega_n s + \omega_n^2}, \left(\frac{d}{c} = \zeta \right) \quad (3)$$

위 식에서 c , d , ω_n 이 설계변수지만 d 와 c 는 ζ 에 종속되는 종속변수이고, ω_n 역시 구동기의 공진주파수에 대응되므로 실제로 독립변수는 1개이다. 식 (2)의 분모와 식 (3)의 분자가 서로 같으므로 노치 필터를 적용하면 다음과 같다.

$$GC_n = \frac{F}{s^2 + \frac{2}{c}\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

식 (4)는 식 (2)와 비교해 보았을 때 ‘1/c’를 변경하여 전체 시스템의 감쇄 크기를 조절할 수 있다. 다시 말해서 노치 필터로 감쇄를 늘려 공진봉의 크기를 줄일 수 있다. 앞섬보상기의 전달함수는 다음과 같이 정의할 수 있다⁽²⁰⁾.

$$C_l = \frac{1}{\beta} \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\beta T}} \quad (5)$$

흔들림 보정장치에서 주로 고려해야 하는 성능은 위치오차와 지연시간 등이 있다. 위치오차는 작을수록 좋으며, 광학계에 따라 다르지만 5백만화소 초소형 이미지 센서의 픽셀크기가 1~2 μm 수준임을 감안하면 2 μm 이하의 위치오차는 무시할 수 있다. 또한 흔들림 보정장치는 진동을 추종하는 장치로, 위치오차의 절대값을 작게 하는 것보다 위치오차의 변화값을 작게 하는 것이 훨씬 더 중요하다. 따라서

제어기 설계의 목적함수는 다음과 같이 지연시간 최소화로 정의하였고, 오버슈트 20% 이하를 제약으로 설정하였다.

$$\text{Minimize : } f = \frac{t_d}{2(ms)} \quad (6)$$

$$\text{Subject to: } OS \leq 20\% \quad (7)$$

위와 같은 설정을 바탕으로 설계한 노치 필터와 앞섬보상기의 설계변수 및 주파수응답이 Table 1과 Fig. 7에 표현되어 있다. Fig. 8은 기존 구동기의 주파수응답과 노치필터 및 앞섬보상기가 적용된 이후의 주파수응답이다. 구동기의 움직임은 레이저도플러진동계(laser doppler vibrometer)로 측정하였으며, 노치필터와 앞섬보상기는 dSPACE CP1005로 구현하였다. 노치필터의 적용으로 공진봉을 효과적으로 억제했고, 앞섬보상기 덕분에 노치필터로 인한 위상지연도 방지할 수 있었다. 70 Hz까지 magnitude에 큰

Table 1 Designed notch filter and lead compensator

c	d	T	β
1.0168179	0.0504	0.002542	0.1016818

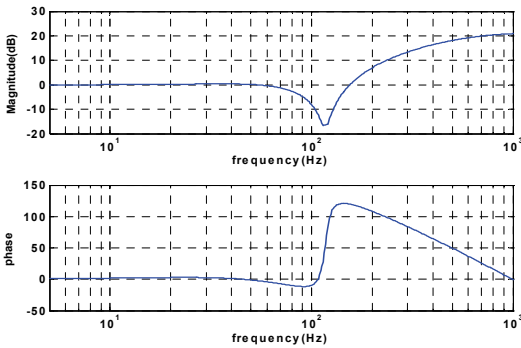


Fig. 7 Frequency response of the lead compensator with the notch filter

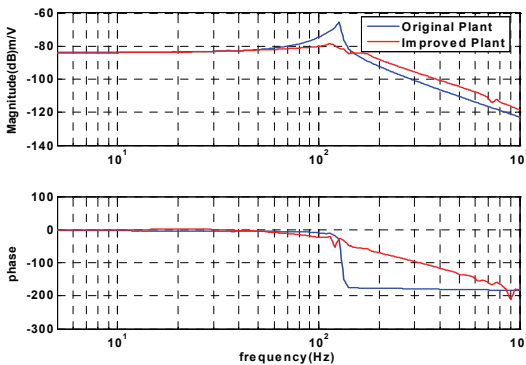
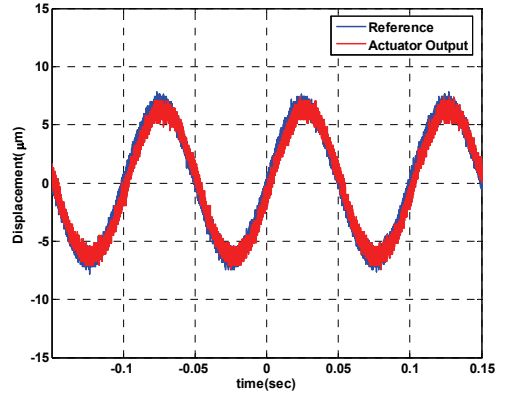
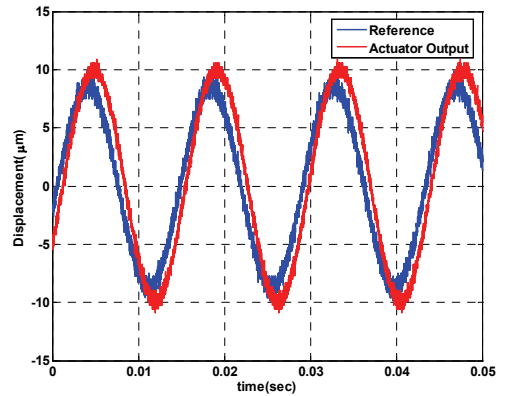


Fig. 8 Comparison between frequency responses



(a) 10 Hz



(b) 70 Hz

Fig. 9 Time responses of the OIS system

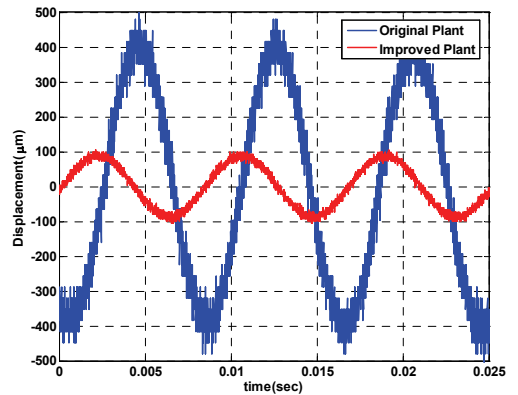


Fig. 10 Time response at the resonance frequency

변화가 없고 위상지연도 무시할 정도로 작으므로 0~70 Hz 대역의 진동을 개루프 제어로 추종할 수 있다고 판단된다.

Fig. 9는 각 주파수별 사인과 입력에 대한 출력을 시간에 따라 보여준다. Fig. 9에서 확인한 것처럼 저주파 입력은 잘 추종하며, 70 Hz 입력에 대해서는 0.459 ms의 시간지연이 발생하지만 앞서 정의한 2 ms에 비하면 매우 작다. Fig. 10은 공진 주파수인 125 Hz 사인 입력에 대한 순수 구동기의 출력과 노치필터 및 앞섬보상기 적용된 구동기의 출력을 비교한 것이다. 노치필터의 적용으로 구동기의 공진주파수 입력에 대해서도 공진하지 않는 것을 보여준다. 다시 말해, 이 논문에서 설계한 흔들림 보정장치는 구동기의 공진주파수 노이즈가 입력되더라도 발산하지 않고 안정성을 유지하는 것을 확인하였다.

4. 결 론

이 논문에서는 사람의 손떨림만을 고려한 초소형 카메라 흔들림 보정장치가 손떨림보다 높은 주파수의 진동이 가해지는 환경에서도 안정적으로 작동할 수 있도록 고주파 동특성을 개선하는 과정을 다루었다. 최근 급성장 중인 차량 블랙박스를 감안하여 카메라에 가해지는 고주파 진동으로 자동차 진동을 고려하였고 초소형 카메라 이미지 센서의 성능을 감안하여 흔들림 보정장치가 갖춰야 할 요구 성능을 정의하였다. 또한 기존 실험장치가 고주파 가진기로서 적합하지 않았기에 피사체를 움직이는 새로운 개념의 실험 장치를 제안하고 제작하여 흔들림 보정장치 검증에 사용되었다. 기존에 설계된 흔들림 보정 구동기는 개선하기 어려웠으므로 구동기에 변경을 가하지 않고 노치 필터와 앞섬보상기 적용하는 것만으로 전체 시스템의 고주파 영역에서의 안정성을 확보하였다. 정의된 요구성능을 만족시키는 노치필터와 앞섬보상기를 설계하였으며, 이를 실험적으로 검증하였다. 개선된 흔들림 보정장치는 0~70 Hz 대역의 흔들림에 대응할 수 있으며, 구동기의 공진주파수인 125 Hz의 입력에서도 발산하지 않고 안정성을 유지하므로 자동차 진동에 대해서도 충분히 대응할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2008-0060616).

참 고 문 헌

- (1) Baek, H. W., Hur, Y. J., Song, M. G., Park, N. C., Park, Y. P., Park, K. S., Lim, S. C. and Park, J. H., 2008, Development of OIS Actuator to Compensate for Trembling, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 509~511.
- (2) Song, M. G., Hur, Y. J., Park, N. C., Park, K. S., Park, Y. P., Lim, S. C. and Park, J. H., 2009, Design of a Voice-coil Actuator for Optical Image Stabilization Based on Genetic Algorithm, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 10, pp. 4558~4561.
- (3) Song, M. G., Hur, Y. J., Park, N. C., Park, K. S., Park, Y. P., Lim, S. C. and Park, J. H., 2009, Development of Small Sized Actuator for Optical Image Stabilization, International Symposium on Optomechatronic Technologies, pp. 152~157.
- (4) Son, D. H., Baek, H. W., Song, M. G., Park, N. C., Park Y. P., Park, K. S., Lim, S. C. and Park, J. H., 2009, Development of Ball-bearing Type OIS Actuator for Mobile Phone Camera, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 513~514.
- (5) Song, M. G., Son, D. H., Park, N. C., Park, K. S., Park Y. P. and Lim, S. C., 2010, Design of Ball Bearing Type OIS Actuator for Mobile Camera Module, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 361~372.
- (6) Woo, J. H., Song, M. G., Baek, H. W., Son, D. H., Park, N. C., Park, K. S., Park Y. P. and Lim, S. C., 2009, Development of Wire-suspension Type OIS Actuator for Mobile Phone Camera, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn

Conference, pp. 381~382.

(7) Song, M. G., Baek, H. W., Park, N. C., Park, K. S., Yoon, T., Park, Y. P. and Lim, S. C., 2010, Development of Small Sized Actuator With Compliant Mechanism for Optical Image Stabilization, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, No. 6, pp. 2369~2372.

(8) Hysonic, Co., Ltd, 2009, Compact camera device, KR Patent, 0992193.

(9) Nidec-Sankyo Co., Ltd, 2009, Optical Unit Having Deflection Correction Function, and Photographing Optical Device, WO Patent, WO09/133690.

(10) Nidec-Sankyo Co., Ltd, 2009, Optical Unit Vibration Correction Function, WO Patent, WO09/133691.

(11) Chiu, C., Chen, Y., Huang, T. and Chao, P., 2010, Robust Design of a Novel Optical Image Stabilizer with Suppressing Magnetic Torque Variations, 11th Joint MMM-INTERMAG Conference, GG-07, pp. 1620.

(12) Kauhanen, P. and Rouvinen, J., 2006, Actuator for Miniature Optical Image Stabilizer, ACTUATOR 2006, 10th International Conference on New Actuators, pp. 549~552.

(13) Golik, B. and Wueller, D., 2007, Measurement Method for Image Stabilizing Systems, Proceedings of the SPIE, Vol. 6502, p. 650200.

(14) Baek, W. K., Yang, B. S., Lee, J. S., Kang,

T. H. and Ryu, S. W., 2005, 1/4 Car Vibration Simulation Using and Empirical MR Damper Model, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 15, No. 9, pp. 1016~1022.

(15) Lee, T. K. and Kim, B. S., 2006, The Vibration Study on Car Compact Disk Player, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 283~288.

(16) Jeong, M. G., Kim, K. S. and Kim, K. J., 2006, A Study on Determination of Complex Stiffness of Frame Bush for Ride-comfort Improvement of Body-on-frame Vehicle, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 16, No. 6, pp. 619~626.

(17) Griffin, M. J., 2007, Discomfort from Feeling Vehicle Vibration, Vehicle System Dynamics, Vol. 45, No. 7, pp. 679~698.

(18) Choi, H., Kim, J. P., Song, M. G., Kim, W. C., Park, N. C., Park, Y. P. and Park, K. S., 2008, Effects of Motion of an Imaging System and Optical Image Stabilizer on the Modulation Transfer Function, Optics Express, Vol. 16, No. 25, pp. 21132~21141.

(19) Norman, S. N., 2008, Control Systems Engineering, John Wiley & Sons, Hoboken, pp. 473~475.

(20) Norman, S. N., 2008, Control Systems Engineering, John Wiley & Sons, Hoboken, pp. 613~615.