

이동통신 단말기 카메라의 손떨림 보정 장치의 H_∞ 제어이치범^{a*} H_∞ Control on the Optical Image Stabilizer Mechanism in Mobile Phone CamerasChibum Lee^{a*}^a Mechanical System and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	16	May	2014
Revised	9	June	2014
Accepted	10	June	2014

Keywords:

Optical image stabilization
Mobile phone
Camera module
 H_∞ control
Voice coil motor
Hall effect sensor

ABSTRACT

This study proposes a closed-loop shaping control method with H_∞ optimization for optical image stabilization (OIS) in mobile phone cameras. The image stabilizer is composed of a horizontal stage constrained by ball bearings and actuated by the magnetic force from voice coil motors. The displacement of the stage is measured by Hall effect sensors. From the OIS frequency response experiment, the transfer function models of the stage and Hall effect sensor were identified. The weight functions were determined considering the tracking performance, noise attenuation, and stability with considerable margins. The H_∞ optimal controller was executed using closed-loop shaping and limiting the controller order, which should be less than 6 for real-time implementation. The control algorithm was verified experimentally and proved to operate as designed.

1. 서론

최근에 출시되는 스마트폰 등의 이동통신 단말기는 모두 소형 카메라를 내장하고 있다. 이동통신 단말기의 고성능화 추세에 따라 요구되는 카메라의 성능도 증가하고 있는 데, 지난 수 년 동안 고화소의 이미지 센서 장착이 경쟁적으로 이루어졌다. 또한, 자동초점 (autofocus)과 플래시 (flashlight) 기능도 보편화 되었다. 최근에는 기존의 독립형 일반 카메라에서 이용되던 손떨림 보정 기능을 장착한 스마트폰도 등장하기 시작하였다.^[1,2] 손떨림 방지 기술은 기기의 움직임에 의한 영상의 흔들림을 방지하거나 보정하는 기술로, 독립형 카메라 보다 가볍고, 그림이 불안정한 이동통신 단말기에서 더 필요한 기능이다.

손떨림 방지 기술은 광학식 손떨림 방지(optical image stabilization:

OIS)와 디지털 손떨림 방지(digital image stabilization)로 나누어지며, 광학식 손떨림 방지는 다시 렌즈를 이동하는 방식과 이미지 센서를 이동하는 방식으로 나누어진다.

광학식 손떨림 방지는 자이로(gyro) 센서로부터 주로 피치(pitch)와 요(yaw)각을 측정하여 렌즈를 흔들림에 반대되는 방향으로 평면상으로 이동시켜 이미지의 블러링(blurring)을 방지하는 기술이다. 디지털 손떨림 방지는 이미지 프로세싱을 이용하여 선명도를 증가시키는 방식과 이미지 센서에 포착된 영상의 일부분을 사용하여 흔들리는 화상을 매끄럽게 이어 연결하는 방식(동영상 촬영에 많이 사용)이 있다.^[3,4] 일반적으로 OIS 방식이 더 우수한 보정 성능을 보이나, 구조가 복잡하고 가격이 비싸다. 또한, 이동통신 단말기에 적용하는 데에는 이동 스테이지가 추가되므로, 부피가 증가하는 것도 어려운 점이다.

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-9667

Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: chibum@seoultech.ac.kr (Chibum Lee).

이동통신 단말기의 초소형 카메라에 광학식 손떨림 보정 장치를 구현하기 위하여, 구동방식에 따라 압전 구동기(piezo-actuator)를 사용하는 방식,^[5] 보이스코일 모터(voice coil motor)를 이용하는 방식,^[6] MEMS로 제작한 콤드라이브(comb drive)를 사용하는 방식^[7] 등에 대한 연구가, 스테이지 체결방식에 따라 병진조인트를 사용하는 방식,^[8] 볼베어링을 사용하는 방식,^[9] 와이어 서스펜션을 사용하는 방식^[10]에 대한 연구가 이루어졌다. 본 연구에서는 이동부가 볼베어링으로 지지되고, 보이스코일 모터로 구동되는 초소형 카메라 OIS의 제어기 설계를 위하여 H_∞ 제어를 제안한다. 기존의 OIS 제어에 관한 연구들은 대부분 독립된 카메라^[11]에 관한 것이며, 전체 시스템을 제어하는 알고리즘에 관한 연구가 아니라, 입력 신호의 생성이나 자이로스코프로부터 추종신호를 만들어 내는 과정에 관한 것이다.

2. 시스템의 구성

Fig. 1은 본 연구에 사용된 OIS를 포함한 이동통신 단말기용 카메라모듈을 개략도와 사진을 보여준다. 고정부에 위치한 보이스코일 2개가 가동자석이 부착된 이동부를 각각 X와 Y 방향으로 이동시키며, 위치의 이동은 홀센서(Hall effect sensor) 2개에 의하여 측정된다. 이와 유사한 형태의 손떨림 보정 장치의 설계와 제작에 관한 연구는 이미 발표된 바가 있다.^[9,12] 본 카메라 모듈의 크기는 $11 \times 11.5 \times 5.5$ mm로, OIS가 장착되지 않은 기존 모듈과 유사하다. 본 시스템은 보이스코일 모터와 홀센서가 부착되어 있는 고정부, 렌즈와 가동자석이 부착되어 있는 스테이지, 이 둘을 연결하는 볼베어링으로 구성된다. 본 시스템의 제어 알고리즘 개발을 위하여

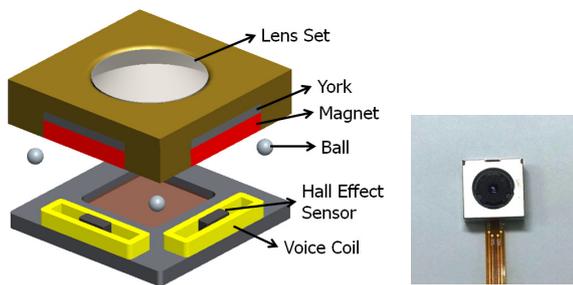


Fig. 1 Camera module with optical image stabilizer

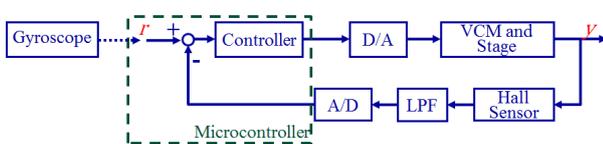
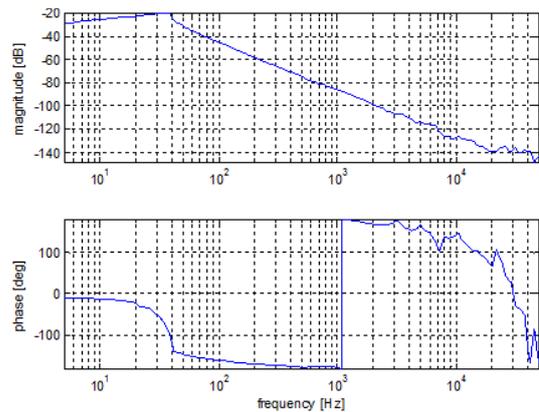


Fig. 2 Block diagram of OIS system

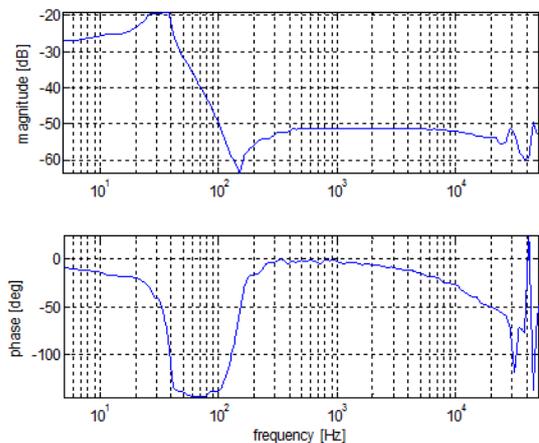
별도로 제작된 제어 보드를 이용하였으며, A/D 변환기를 포함한 마이크로컨트롤러(microcontroller)와 전원부, D/A 변환기, 통신부 등이 포함되어있다.

제어기 설계와 관련하여 중요한 시스템은 크게 보이스코일 모터로 구동하는 스테이지와 이동 변위를 측정하는 홀센서이다. Fig. 2는 OIS 시스템의 블록다이어그램을 보여준다. 자이로스코프 센서의 측정값을 신호처리하여 추종신호 r 를 생성하고, 이 값을 추종하기 위하여 제어기는 입력 신호를 생성하고, 이 값을 D/A 변환을 통한 후 VCM에 입력되어 스테이지를 이동시키게 된다. 스테이지의 움직임 y 는 홀센서에 의하여 측정된다. 홀센서 측정값은 노이즈 제거를 위하여 저주파 필터(low pass filter: LPF)를 통과하게 되고, 이 신호는 A/D 변환을 통하여 제어 신호에 사용되게 된다. 마이크로컨트롤러에서 동작하는 제어 알고리즘은 10 kHz로 샘플링된 이산제어기를 이용하였다. 본 연구에서는 자이로센서로부터 추종신호를 생성하는 부분은 고려하지 않았으며, 제어 알고리즘의 개발을 목적으로 하였다.

모델 기반의 제어를 이용하기 위하여 실험을 통하여 주파수 응답



(a) Stage frequency response



(b) Stage and Hall effect sensor frequency response

Fig. 3 Experimental frequency responses

을 구하였다. Fig. 3은 X축 보이스코일 모터에 정현파 입력을 가하고, 레이저 바이브로미터(laser vibrometer)로 스테이지의 실제 X축 방향 이동 변위를 측정된 주파수 응답과 홀센서를 통해 측정된 주파수 응답을 보여준다. 즉, Fig. 3(a)는 스테이지(보이스코일 모터를 포함)의 주파수 응답이고, Fig. 3(b)는 스테이지와 홀센서 특성을 모두 포함한 주파수 응답이다.

모델 규명(model identification)은 두 주파수 응답으로부터 스테이지와 홀센서의 응답특성을 각각 독립적으로 구하였다. 홀센서의 주파수 응답은 복소영역에서 스테이지 주파수 응답을 나누어서 계산하였다. Fig. 4는 각각 공진점과 반공진점 주변에서 가중치를 부여하여 최소제곱회귀법(least square method)에 의해 얻어진 주파수 응답을 보여준다. 전달함수를 2차시스템으로 모델링하여 계산하였을 때, 실험결과와 잘 일치하였으며, 스테이지의 공진주파수는 31 Hz, 감쇄계수는 0.33 이며, 홀센서의 경우 반공진주파수가 154 Hz, 감쇄계수는 0.15이다. 동일한 방법으로 Y축 방향에 대하여 전달함수를 계산하면, 스테이지의 공진주파수는 30 Hz, 감쇄계수는 0.44 이며, 홀센서의 경우 반공진주파수가 134 Hz, 감쇄계수는 0.19이다.

특이하게 홀센서의 응답을 분리해서 살펴보면 영점만 2개 존재

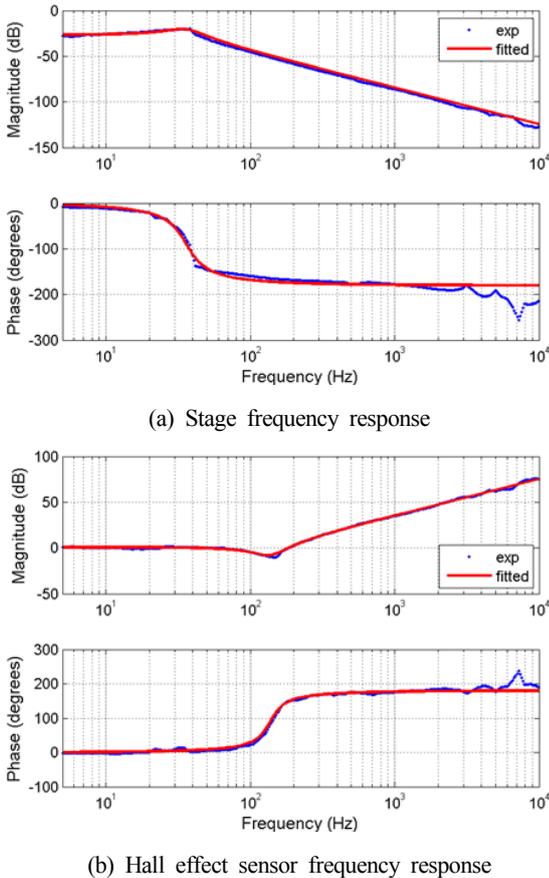


Fig. 4 Model Identification

하는 이상(improper)특성을 보인다. 이는 스테이지의 이동 변위를 측정해야하는 홀 센서가, 스테이지를 이동시키기 위해 보이스코일에 가해지는 입력 전류의 변화에도 영향을 받기 때문으로 추정되며, 기존의 연구 결과에서도 유사한 경향을 보인 경우가 있다.^[12]

3. 제어기 설계

전체 시스템은 Fig. 2에 나타난 바와 같으며, 본 연구에서는 H_{∞} 최적화를 통하여 제어기를 설계하였다. 제어에 관한 설계와 분석을 위하여, A/D, D/A 변환 개인, 증폭기 등을 포함시키고, 추종입력 r 과 스테이지 출력 y 이 동일한 단위를 가지도록 Fig. 5와 같이 구성하였다. 또한, A/D 변환이나 양자화(quantization)에서 발생할 수 있는 외란 d 과 센서 측정시 개입할 수 있는 전기적 노이즈 n 를 고려하였다.

스테이지 전달함수에 D/A 변환비를 고려하여 제어 플랜트 $G(s)$ 로 구성하였고, 홀센서 전달함수에 A/D 변환, LPF를 고려하여 센서전달함수 $H(s)$ 로 구성하였다.

$$G(s) = \frac{3.013 \times 10^5}{s^2 + 127.6s + 3.772 \times 10^4} \quad (1)$$

$$H(s) = \frac{1.1936 \times 10^{13}(s^2 + 282.5s + 9.425 \times 10^5)}{(s + 5 \times 10^5)(s + 1 \times 10^5)(s + 1.5 \times 10^4)^2} \quad (2)$$

외부(exogenous) 신호 간의 입출력 관계를 정리하면 다음과 같다.

$$Y(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)H(s)}R(s) + \frac{G(s)}{1 + C(s)G(s)H(s)}D(s) - \frac{C(s)G(s)H(s)}{1 + C(s)G(s)H(s)}D(s) \quad (3)$$

$$E(s) = R(s) - Y(s) = \frac{R(s)}{1 + C(s)G(s)H(s)} - \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)H(s)}R(s) - \frac{G(s)}{1 + C(s)G(s)H(s)}D(s) + \frac{C(s)G(s)H(s)}{1 + C(s)G(s)H(s)}N(s) \quad (4)$$

제어기 설계에 있어서 고려되어야할 사항으로는 (1) 추종대역폭

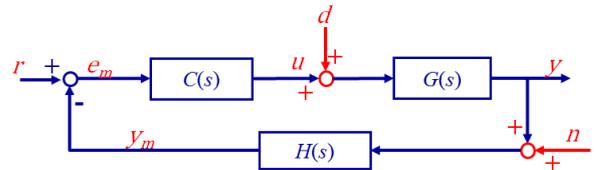


Fig. 5 Block diagram for control design and analysis

이 20 Hz 이상이어야 한다. (2) 마찰력을 극복하도록 저주파에서 제어기 게인이 충분히 높아야한다. (3) 상용 양산 제품에 이용되어야하므로 충분한 안정성을 확보해야 한다. 첫 번째 요구 사항은 사용자의 손떨림은 10~20 Hz에 주로 분포하므로,^[2,12] 손떨림보정장치는 이 주파수의 입력에 대해서 추종오차가 작아야하기 때문이며, 두 번째 요구 사항은 스테이지가 블베어링에 의하여 연결된 상태이고, 자기력이 예하중 역할을 하여 체결되어있으므로, 마찰력이 작용하기 때문이다. 블베어링 스테이지를 이용하는 이유가 마찰이 작아서 기민한 운동이 가능하기 때문이지만 마찰력을 0으로 만드는 것은 불가능하다. 예하중이 크면 고유진동수가 증가하여 시스템 특성에서 유리해지지만, 마찰력이 커지므로 저주파에서 매끄러운 운동이 불가능해진다. 대상이 되는 시스템은 상대적으로 작은 마찰력을 갖도록 예하중을 작게 설계한 시스템이다.

추종오차를 최소화하기 위하여, 제어기 설계의 목적은 추종입력 r 에 대한 오차 e 의 전달함수 $\frac{1+C(s)G(s)H(s)-C(s)G(s)}{1+C(s)G(s)H(s)}$, 외란 d 에 대한 오차 e 의 전달함수 $\frac{G(s)}{1+C(s)G(s)H(s)}$, 노이즈 n 에 대한 오차 e 의 전달함수 $\frac{C(s)G(s)H(s)}{1+C(s)G(s)H(s)}$ 가 최소가 되도록 설계해야 한다. 널리 알려진 바와 같이 Bode 적분법칙(integral law)와 대수적 한계(algebraic limitation)에 의해 전주파수에서 상기의 목적을 동시에 달성하는 것은 불가능하다. 따라서 주파수 별 가중함수를 사용하도록 한다.

본 연구에서는 페루프 전달함수 성형(closed-loop transfer function shaping)을 위하여 H_∞ 복합 민감도 합성법(stacked sensitivity synthesis)^[13]를 이용하였다.

본 제어기 설계는 양산품에 적용하는 것이 목적이므로, 경제적인 마이크로프로세서에서 적용될 수 있는 5~6차 이내의 제어기로 제한하였다. 제어기의 차수를 줄이기 위하여, 추종입력 r 에 대한 오차 e 의 전달함수인 $\frac{1+C(s)G(s)H(s)-C(s)G(s)}{1+C(s)G(s)H(s)}$ 를 직접 최소화하는

대신에 $\frac{1}{1+C(s)G(s)H(s)}$ 를 최소화하는 방법을 이용하였다. 이러한 가정의 근거는 추종입력 r 의 주파수 영역이 앞서 기술한 대로 손떨림 주파수인 20 Hz 이내이고 Fig. 4에서 보는 바와 같이 이 주파수 영역에서 $H(s) \approx 1$ 로 근사할 수 있기 때문이다. 페루프 성형을 위한 블록다이어그램은 Fig. 6와 같다. $\frac{Y_m(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)H(s)}{1+C(s)G(s)H(s)}$ $\equiv T$ 와 $\frac{E_m(s)}{R(s)} = \frac{1}{1+C(s)G(s)H(s)} \equiv S$ 라 하면 다음의 최적화 문제로 귀결된다.

$$\min_{C \in K} \left\| \begin{matrix} w_p S \\ w_T T \end{matrix} \right\|_\infty \quad (5)$$

여기서, w_p 와 w_T 는 각각 그 역수가 S 와 T 의 형태를 제시하는 가중치 함수로 주파수별로 각각 추종 오차와 노이즈 영향을 최소화 하고, 높은 안정성을 지니도록 설정하였다. w_p 는 추종제어 구간인 0~20 Hz 영역에서 작은 값을 갖고, 정상 상태 게인이 -120 dB이하, $\|S\|_\infty$ 가 1.5이하가 되도록 $w_p(s) = \frac{0.8414(s+2539)}{(s+0.002136)}$ 로 설정하였다. w_T 는 200 Hz 이상의 주파수(주로 전기적 노이즈)에 영향을 받지 않도록 $w_T(s) = \frac{1000(s+22240)^2}{(s+7.948 \times 10^4)^2}$ 로 설정하였다.

Fig. 7은 H_∞ 복합 민감도 합성법의 결과를 보여준다. 가중치 함수의 역수인 $1/w_p$, $1/w_T$ 와 유사한 형태로 S , T 전달함수가 성형된 것을 알 수 있으며, 이때 $\left\| \frac{w_p S}{w_T T} \right\|_\infty = 1.62$ 이고, 최적화로 구해진 제어기는 다음과 같다.

$$C(s) = \frac{2.2146 \times 10^{-6}(s+6.582 \times 10^8)}{(s+3.367 \times 10^5)(s+5771)} \times \frac{(s+7.948 \times 10^4)^2(s^2+127.6s+3.772 \times 10^4)}{(s+0.002136)(s^2+282.5s+9.425 \times 10^5)} \quad (6)$$

Fig. 8 제어기 설계에 따른 개루프와 민감도 전달 함수를 보여준다. Fig. 8(a)에서 게인 여유는 17.3 dB, 위상여유는 63.6 deg이며, 플랜트의 극점과 영점을 고려한 제어기 덕분에 부드럽게 변한 것을 알 수 있다. Fig. 8(b)를 살펴보면 $\|S\|_\infty = 1.36$ 으로 안정성이 우수한 것으로 나타난다. 0~20 Hz에서 r 에 대한 오차 e 의 전달함수

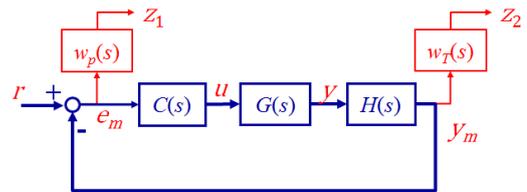


Fig. 6 Design of single axis four bar linkage stage

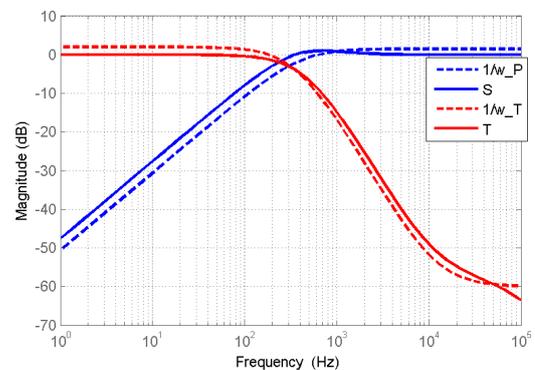
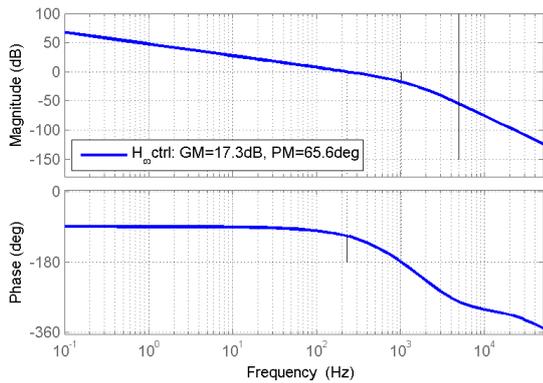
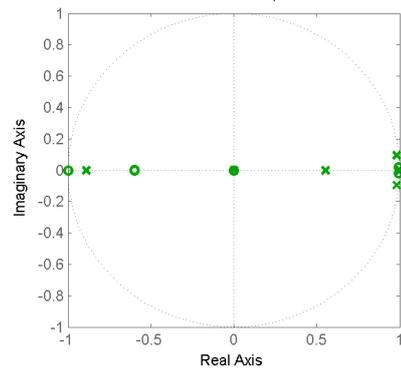


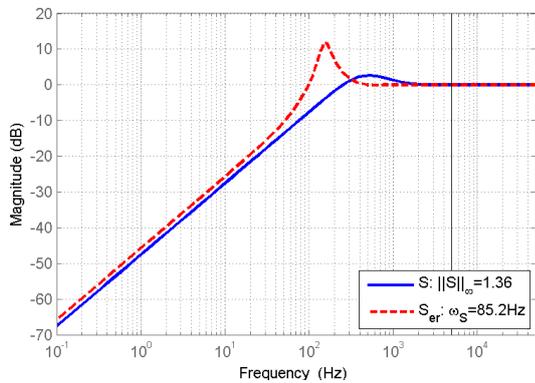
Fig. 7 Stacked synthesis result



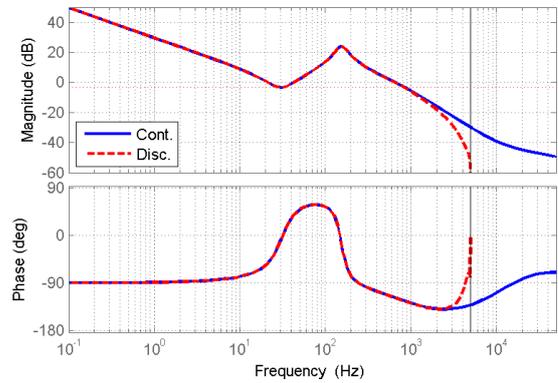
(a) Open-loop transfer function



(a) Pole-zero map



(b) Sensitivity and noise-to-error transfer functions



(b) Continuous and discrete controllers

Fig. 8 Closed-loop transfer functions

Fig. 9 Discrete controller

$S_{er} = \frac{1 + C(s)G(s)H(s) - C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)H(s)}$ 이 S 와 거의 유사하므로, 설계 시 가정이 유효한 것으로 알 수 있다.

4. 실험 결과

앞서 설계한 제어기를 포함한 페루프 시스템에 대하여 실험을 수행하였다. 설계한 제어기가 마이크로컨트롤러에서 동작하도록 10 kHz 이산제어기(discrete controller)로 변환하였다. Fig. 9(a)에 나타난 것과 같이 이산 제어기의 극점과 영점이 모두 안정 단위 원(unit circle) 내에 존재하며, Fig. 9(b)에 따르면, 이산화전후의 제어기의 전달함수는 Nyquist 주파수인 5 kHz까지 동일하다.

주어진 OIS는 X축과 Y축이 대칭으로 설계되었으나, 2장에서 언급한 것과 같이 주파수 응답 시험 결과 Y축 특성이 X축과 정확히 일치하지 않았다. 그렇지만, 앞서 설계한 제어기의 안정성이 높으므로, 동일한 제어기를 X축과 Y축에 적용하였다.

Fig. 10은 각 입력 주파수 별 정현파 입력에 대한 페루프 시스템의 추종제어 실험 결과를 보여준다. 주기 1 Hz, 진폭 50 μm 입력에 대한 응답은 정확한 추종 성능을 보이며, 최대 오차도 1 μm

이내로 이는 제어를 수행하지 않았을 경우에 나타나는 전기적 노이즈 수준이다. 반면 진폭 100 μm 입력에 대해 주기 10 Hz의 경우 최대 오차가 5 μm , 주기 20 Hz의 경우 최대오차가 5 μm 수준이다. 이 결과는 Fig 8.(b)의 분석 결과보다 1~2 μm 정도 큰 것으로 전기적 노이즈와 볼베어링의 마찰 등 외부 요인이 있는 것으로 추정된다. Fig. 10(b)와 (c)의 오차가 정현파 형태가 아닌 것으로부터 제어 알고리즘이외에 외란이나 노이즈가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 최대오차 5 μm 는 이미지 센서의 1 픽셀인 4 μm 보다 크므로, 시스템 요구 사항에 약간 못 미치는 수준이다.

Fig. 11은 X축과 Y축에 위상차를 두고 정현파 입력을 주고 추종 실험을 수행한 결과이며, 이는 X축 모델을 기반으로 설계한 제어기가 Y축에 대해서도 문제없이 작동하는 지와, 두 축 간의 연계 효과(coupling)를 확인하기 위함이다. 실험 결과에 따르면, Y축에 대해서도 설계된 제어기가 X축과 동일한 성능을 보여주었으며, 위상차를 변경하면서 수행한 실험에서도 유사한 결과를 보였다. 따라서 두 축간의 연계효과는 크지 않은 것으로 판단된다.

추종 성능을 현재보다 향상하기 위해서는 민감도 전달함수가 더 우수하도록 이동하도록 페루프 성형을 하여야 하지만, 이 경우 Bode 적분 법칙에 의해 상대적 안정성이 감소하게 되는 결과를 가져오게

된다. 본 시스템은 양산을 목표로 개발 중이므로, 제작 샘플마다 동일한 주파수 특성을 가지지 못한 상태이므로, 상대적으로 큰 안정성이 필요하다. 향후, 안정적으로 양산되면 동일한 방법을 이용하여서 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

이동 통신 단말기의 초소형 카메라에 사용되는 광학식 손떨림 보정 장치의 제어기 설계 방법으로 H_∞ 최적화를 통한 페루프 성형을 제안하였다. 대상이 되는 OIS는 볼베어링으로 구속된 스테이지 부를 보이스코일과 자석을 이용하여 이동시키고, 홀센서를 통해 변위를 측정한다.

본 연구에서는 스테이지부의 주파수 응답특성 실험으로부터 모델 확인을 통하여 스테이지와 홀센서의 전달함수를 구하였다. 제어 시스템 분석을 통하여, 추종 오차 및 노이즈 감소를 목적으로 일정 수준 이상의 안정성을 갖도록 가중치 함수를 설정하였다. 양산에서 사용할 마이크로컨트롤러의 성능을 감안하여 제어기를 6차 이내로 제한하였고, H_∞ 페루프 성형을 통하여 제어기를 구하였다. OIS 시스템의 실험을 통해 설계된 제어기를 검증하였으며, 설계와 동일하게 안정적으로 작동함을 확인할 수 있었다.

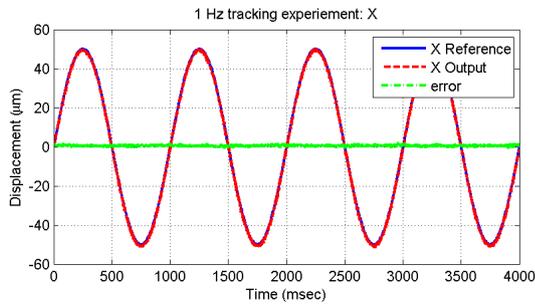
기구부의 향상과 더불어, 향후 제어기 보드의 전기회로를 개선하여 전기적 노이즈를 줄이고, 볼베어링의 마찰을 보상하는 알고리즘^[4]을 포함시켜서 최대오차를 더 줄이도록 개선할 예정이다. 또한, 실제 가진 실험 장치를 구성하여 이미지의 보정 성능을 검증할 예정이다.

후기

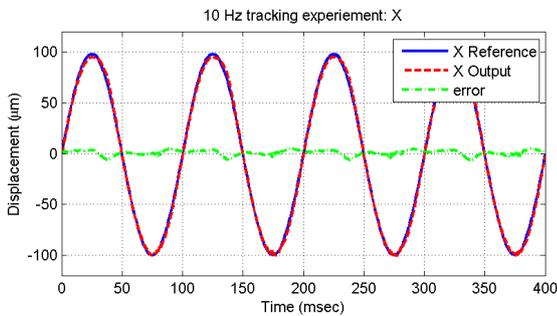
이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

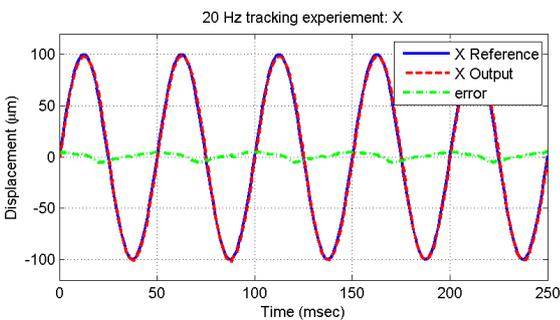
- [1] Volpe, J., 2012, viewed 6 May 2014, Nokia Lumia 920 official: Dual-core 1.5GHz Snapdragon S4 CPU, 8MP PureView camera, Windows Phone 8, <<http://www.engadget.com/2012/09/05/nokia-lumia-920-official-dual-core-1-5ghz-snapdragon-s4-cpu-wi/>>
- [2] Galstian, T. V., 2013, Smart Mini-Cameras, CRC Press, USA
- [3] Hader, O., Robbins, M., Novogrozky, Y., Kaplan, D., 1996, Image Motion Restoration from a Sequence of Images, Opt. Eng. 35 2898-2904.
- [4] Chereau, R., Breckon, T. P., 2013, Robust Motion Filtering as an Enabler to Video Stabilization for a Tele-operated Mobile Robot, Proc. SPIE Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications VII, 8897:1 1-17.
- [5] Kauhanen, P., Rouvinen, J., 2006, Actuator for Miniature Optical



(a) 1 Hz tracking



(b) 10 Hz tracking



(c) 20 Hz tracking

Fig. 10 Experimental results of sinusoidal tracking

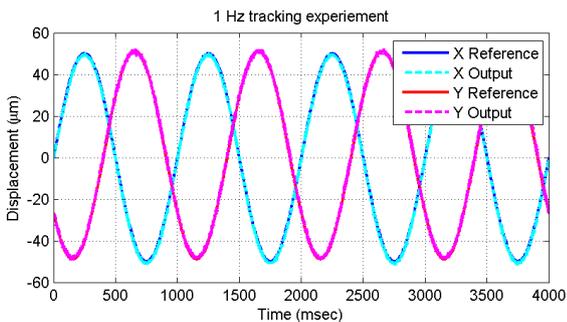


Fig. 11 Tracking experimental in both X and Y axes

- Image Stabilizer, 10th International Conference on New Actuators, 549-552.
- [6] Chiu, C. W., Chao P. C-P., Wu, D. Y., 2007, Optimal design of magnetically actuated optical image stabilizer mechanism for cameras in mobile phones via genetic algorithm, *IEEE Transactions on Magnetics* 43:6 2582-2584.
- [7] Lin, C. Y., Chiou, J. C., 2011, MEMS-based thermally-actuated image stabilizer for cellular phone camera, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 22:11 115029
- [8] Song, M. G., Hur, Y. J., Park, N. C., Park, K. S., Park, Y. P., Lim, S. C., Park, J. H., 2009, Design of a Voice-coil Actuator for Optical Image Stabilization Based on Genetic Algorithm, *IEEE Transactions on Magnetics* 45:10 4558-4561.
- [9] Son, D. H., Baek, H. W., Song, M. G., Park, N. C., Park, Y. P., Park, K. S., Lim, S. C., Park, J. H., 2009, Design of Ball Bearing Type OIS Actuator for Mobile Camera Module, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering* 20:4 361-372.
- [10] Song, M. G., Baek, H. W., Park, N. C., Park, K. S., Yoon, T., Park, Y. P., Lim, S. C., 2010, Development of Small Sized Actuator With Compliant Mechanism for Optical Image Stabilization, *IEEE Transactions on Magnetics* 46:6 2369-2372.
- [11] Shimohata, T., Tsuchida, Y., Kusaka, H., 2002, Control technology for optical image stabilization, *SMPTE Mot. Imag. J.* 111:12 609-615.
- [12] Yeom, D. H., 2009, A Method to Prevent Transfer Device of Image Stabilizer from Blunting by Artificial Vibration, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems* 15:11 1076-1079.
- [13] Doyle, J. C., Glover, K., Khargonekar, P., Francis, B., 1989, State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems, *IEEE Transactions on Automatic Control* 34:8 831-847.
- [14] Yeo, D. Y., Han, S. I. Lee, K. S., 2010, Backstepping Control-Based Precise Positioning Control Using Robust Friction State Observer and RFNN, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering* 19:3 394-401.