

마찰 구동형 압전 작동기를 이용한 카메라 손떨림 진동보상 기법 연구

조명신¹ · 황재혁^{1†}

¹한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

On the Compensation of Camera Hand Shaking Using Friction Driven Piezoelectric Actuator

Myungsin Cho¹, Jaihyuk Hwang^{1†}

¹School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

Abstract : The focal plane image stabilization for a camera is one of the most effective method that can increase the digital camera's image quality by compensating the vibration disturbance. The optical image stabilization can be implemented by making the focal plane to trace the path of incident light. To control the position of focal plane motion compensating stage precisely, a nonlinear control algorithm has been applied by considering coulomb friction which is nonlinear behavior of the compensator system. In our study, we have analyzed the hand shaking vibration using the gyro sensor, and made a mathematical model of compensating stage containing optical sensor and piezo-actuator. Then the nonlinear control algorithm has been designed and its performance has been verified by experiment. In this study, a friction driven piezo-electric actuator with $1\mu m$ resolution and $10mm/s$ speed has been used for stage movement.

Key Words : Optical Image Stabilization, Nonlinear Control, Friction Driven Piezoelectric Actuator, Feedforward Control

1. 서 론

디지털 카메라로 영상을 촬영할 때, 삼각대와 같은 안정장치를 사용하지 않고 사람이 직접 손으로 들고 촬영하는 경우 촬영자의 손떨림이 초점면부의 영상센서로 전달되어 영상의 품질저하를 유발하게 된다. 현대의 디지털 제품은 반도체 및 MEMS 기술의 발달로 영상센서 및 영상장치의 소형화가 이루어지면서 영상의 품질은 높아졌지만 손떨림에는 더욱 민감해졌기 때문에 손떨림 진동외란을 영상센서로부터 분리 혹은 보상해 주는 보정장치를 필요로 하게 되었다.

손떨림 진동외란에 의해 흔들린 영상을 보정하는 방

법은 그 방식에 따라 두 가지로 나뉘는데, 첫 번째는 영상센서를 통해 왜곡된 영상을 취득한 후, 자이로 센서로 취득한 운동 데이터와 안정화 알고리즘을 이용하여 왜곡되기 전의 영상으로 복원해 내는 디지털 영상 안정화 기법이 있다. 이 방법은 영상 보정장치와 같은 하드웨어가 필요 없으므로 수반되는 비용이 절감되는 장점이 있는 반면 복원되는 영상의 품질은 제한적이라 할 수 있다. 두 번째로는 렌즈 광학계 혹은 영상센서가 위치하는 초점면부에 구동기를 장착하여 손떨림 진동신호에 따라 흔들리는 빛의 경로를 원하는 곳에 보상함으로써 안정화된 영상을 취득하는 광학적 영상 안정화 방식이 있다. 디지털 영상 안정화 기법의 경우 직접적인 하드웨어 구성이 없어 비교적 가벼운 소형 카메라에 많이 적용되어 왔지만, 최근 소형 구동기 기술이 발전함에 따라 더 우수한 품질의 영상을 획득할 수 있는 광학적 영상 안정화 기술이 대부분 채택 되고

있다. 광학적 영상 안정화 기법은 렌즈의 위치 및 각도를 움직이는 렌즈 시프트(Lens Shift) 방식과 영상 센서를 움직이는 센서 시프트(Sensor Shift) 방식으로 구분된다. 렌즈 시프트 방식의 경우 각 렌즈마다 구동기가 장착되는 반면에 센서 시프트 방식은 카메라의 초점면부에 영상센서 보정장치를 설치하고 구동하여 손떨림 진동외란을 보상하게 된다. 센서 시프트 방식은 동역학적 관점에서 보면 질량이 가장 작은 요소를 움직여서 손 떨림 진동외란을 보상 할 수 있기 때문에 에너지 효율 및 경량화 면에서 매우 우수하다고 볼 수 있다[1-2]. 최근 광학적 영상 안정화 방식에 적용되는 작동기의 특성은 일반적으로 응답속도가 빠른 소형, 저전력 소모형이다. 현재 적용되고 있는 대표적인 작동기는 압전 작동기로서 질량이 매우 작고 적은 전력으로 구동할 수 있는 장점을 갖고 있다.

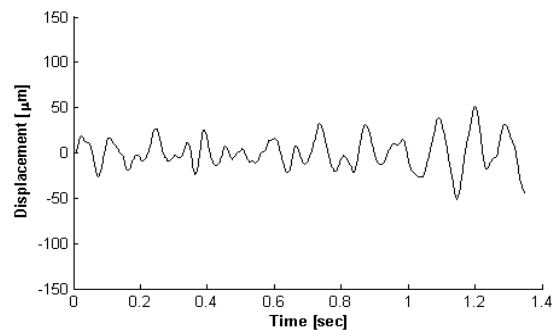
본 연구에서는 센서 시프트 방식을 사용한 초점면부 진동외란 보상기법을 다루었다. 이 방식에 적용된 마찰 구동형 압전 작동기(friction driven piezoelectric actuator)는 압전소자, 탄성판, 샤프트로 구성된 공진형 작동기이다. 압전소자의 굽힘 운동에 의해 샤프트의 왕복 선형운동이 발생하고, 샤프트와 이동 스테이지의 표면 마찰력에 의해 고착-미끄럼(stick-slip) 현상으로 인해 스테이지가 움직이게 된다. 본 연구에서 적용된 마찰 구동형 압전 작동기의 동특성은 본 연구진의 선행 연구에서 실험을 통해 규명되었다[3-4].

본 논문에서는 손떨림 진동신호의 주파수 스펙트럼을 통해 외란 분석을 수행한 후 진동외란을 보상하기에 적합한 대역폭을 결정하였다. 손떨림 진동외란을 보상하기 위해, 마찰 구동형 압전 작동기를 적용한 광학 보정장치를 구성하여 수학적 모델을 얻고, 비선형 작동기 특성을 고려한 초점면부 안정화 비선형 제어 알고리즘을 설계하였다. 설계된 알고리즘을 적용한 광학적 영상보정장치의 제어 성능을 시뮬레이션을 통해 외란 보상을 확인하였고, 최종적으로 손떨림 진동 외란을 이용한 실험을 통해 결과를 검증하였다.

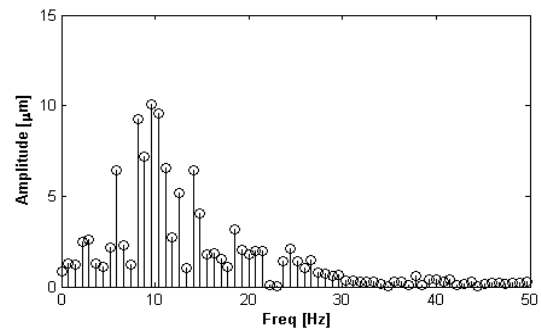
2. 손떨림 진동외란 분석

카메라를 손으로 들고 촬영할 때, 카메라에 가해지는 손떨림 진동이 영상센서를 움직여 영상품질의 저하

를 초래하게 된다. 따라서 카메라에 자이로 센서 등을 부착하여 진동외란을 감지할 수 있으면, 진동외란에 의해 발생하는 영상센서의 흔들림만큼 역방향으로 보상운동을 줄 수 있게 되고 영상품질 저하를 방지할 수 있다. 손떨림 진동외란을 보상하는 보정장치 및 제어기법을 설계할 때 손떨림 진동외란을 먼저 분석하는 것이 필요하다. 손떨림 진동외란의 주파수 및 진폭을 알아보기 위해 상용 카메라에 자이로 센서를 부착하여 진동을 측정하고, 이를 고속 푸리에 변환을 통해 진동 주파수별 성분으로 분해하고[5] 그 결과를 Fig.1에 나타내었다.



(a) Time series



(b) Frequency spectrum

Fig. 1 Hand shaking vibration data in yaw axis

진동외란은 일반적인 콤팩트형 디지털카메라에서 측정하였으며 최대진폭의 크기는 $100\mu\text{m}$ 이하이고, 10Hz 대역의 주파수에 대한 기여도가 가장 높다. 또한 20Hz 이상의 주파수에서 부터는 기여도가 급격하게 감소함을 확인할 수 있다. 따라서 보상하고자 하는 진동외란은 작은 진폭을 갖는 저주파수에 해당하는 진동이다. 초점면부 위치 보상제어의 특성상 반응속도가 빨라야 하므로 압전 작동기를 본 연구의 구동기로 선

정하였다.

위 결과를 바탕으로 시뮬레이션 및 실험에 사용할 초점면부 진동의란 입력은 각 $100\mu\text{m}$ 5Hz와 $50\mu\text{m}$ 10Hz의 두 가지 사인함수와 실제 손떨림 진동의란 입력으로 선정하였으며, 상용 콤팩트형 디지털 카메라의 영상센서 픽셀 사이즈를($2.5\sim 5\mu\text{m}$) 고려하여 목표 성능을 손떨림 진동에 대해 평균 추적오차 $1\mu\text{m}$, 표준편차 $4\mu\text{m}$ 로 선정하였다.

3. 마찰 구동형 압전 작동기를 갖는 보정 스테이지

3.1 작동원리

영상센서 스테이지를 진동의란 역방향으로 제어하기 위한 마찰 구동형 압전 작동기는 Fig. 3과 같이 압전 소자, 탄성판, 샤프트로 구성되어 있다. 탄성판 전후면에 바이모프(bimorph)형 압전소자가 부착되어 있고, 압전소자에 압전재료의 공명 주파수에 해당하는 전압 파형을 인가하면 압전소자와 탄성판은 굽힘운동을 반복하게 된다[6].

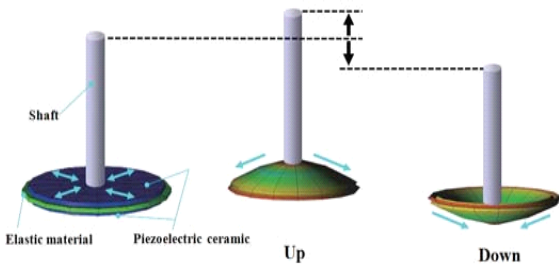


Fig. 2 Transference of vibration

탄성판(Elastic material)의 굽힘진동은 샤프트의 직선 왕복운동을 유발하게 되고, 이 왕복운동에 의해 샤프트와 이동 스테이지간의 표면 마찰력이 생기고 최대 정지마찰력과 운동 관성력과의 차이에 의해 발생하는 고착-미끄럼 현상을 이용하여 스테이지의 병진운동을 일으킬 수 있다. 최대 정지마찰력이 관성력 보다 큰 경우, 고착현상에 의해 스테이지는 샤프트와 같이 움직이게 된다{(a)→(b), (c)→(d)}. 최대 정지 마찰력이 관성력 보다 작은 경우 미끄럼 현상에 의해 스테이지는 움직이지 않는다{(b)→(c), (d)→(e)}. 이와 같이 압전소자의 굽힘 운동에 의해 샤프트는 왕복 직선운동을 하게 되고, 샤프트의 속도 변화에 따라 이동 스테이지

는 원하는 방향으로 고착-미끄럼 직선운동을 하게 된다. 스테이지의 평균 속도는 압전소자에 입력되는 전압의 크기, 주파수 및 듀티 비의 변화에 따라 결정된다[3-4].

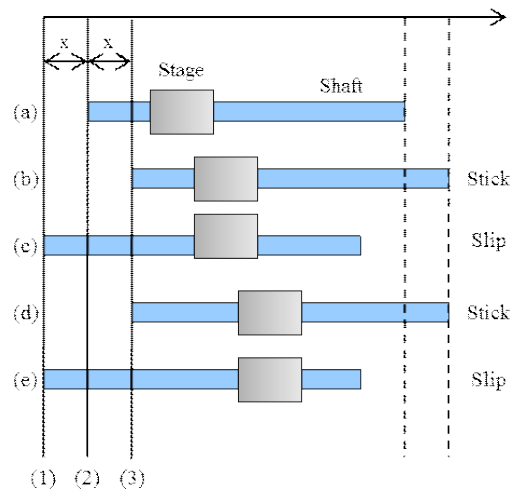
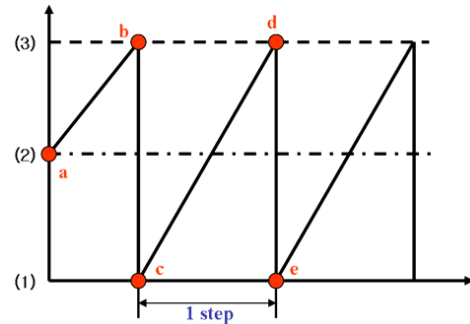


Fig. 3 Operating principle for stage movement

마찰 구동형 압전 작동기는 Fig. 4에 나타난 것과 같은 피에조테크사의 엔코더 센서 내장형 XDT70-102 Type 제품을 사용하였다. 이 압전구동기의 상세한 제원은 Table 1에 나타내었다[7].

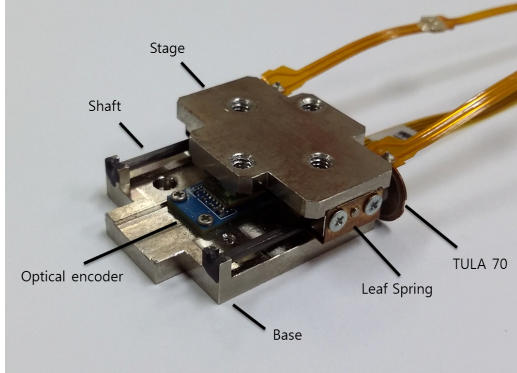


Fig. 4 Friction driven stage set (XDT70-102 Type)

Table 1 XDT70-102 Type Specification

Driving Speed	10 mm/s
Max Thrust	60 gf
Stroke	±5 mm
Holdinf Force	300 gf
Driving Voltage	25~40 V
Driving Frequency	35~60 kHz
Current	<20 mA
Power Consumption	<1500 mW
Operating Conditions	-10~50 °C
Encoder Resolution	1 μm
Size	22×28.5×8.68 mm

본 연구진의 선행연구 결과에 의하면 스테이지가 가장 빠른 속도로 이동할 수 있는 전압 파형은 크기 30V, 주파수 58 kHz, 듀티 비 23%(전진)/77%(후진)이다^[2-4]. 본 연구에서는 스테이지의 빠른 속도를 위해 이 파형조건을 그대로 적용하였다.

3.2 수학적 모델링

카메라 영상 품질에 미치는 손떨림 진동외란 효과를 보상하기 위해, 본 연구에서는 영상센서를 움직여 주는 센서 시프트 방식을 채택하였다. 이를 위해 초점면 부에서 영상센서를 움직여 주는 스테이지를 구성하였다. 영상센서는 스테이지의 중앙에 위치하게 되고 스테이지의 이동은 압전소자의 굽힘 운동에서 시작된다. 영상센서를 이동시키는 스테이지는 오직 샤프트와 접촉하고 있으므로, 스테이지에 가해지는 수직방향 힘은

중력 mg 과 스프링 힘 N_s 이고 이동방향으로 작용하는 힘은 샤프트와 접하는 부위의 쿨롱 마찰력만이 작용한다. 쿨롱 마찰력은 수직방향의 외력에 마찰계수 μ 만큼 비례하는 힘이다.

스테이지를 제어하는 신호는 On/Off 펄스이며, 신호가 On 일 때 마찰 구동력이 전진방향(듀티 비 23%) 혹은 후진방향(듀티 비 77%)으로 작용하게 된다^[3]. 마찰 구동력을 전진 혹은 후진 이동방향으로 작용시킬 때, 구동 마찰력은 고착-미끄럼 현상을 통해 스테이지를 이동시킨다[8]. 압전 작동기가 58 kHz 속도로 샤프트를 구동하면 스테이지는 고착-미끄럼 현상으로 일정한 이동속도를 갖게 된다. 이를 실험을 통해 확인하기 위해, 'On' 신호를 0.1 초 동안 스테이지에 가하는 동안 스테이지의 위치변화를 Fig. 5에 나타내었다.

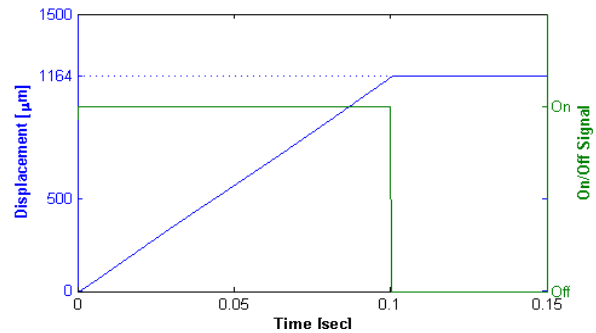


Fig. 5 Response of stage to 'On' input

Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 스테이지는 등속운동을 하게 되고, 이를 구동속도(Driving speed)라고 한다.

샤프트의 마찰로 구동되는 스테이지의 운동방정식을 수학적으로 표현하면 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x} + c_{eq}\dot{x} = \pm \mu(mg + N_s) \quad (1)$$

이 식에서 m, c_{eq}, x, μ 는 각각 스테이지의 질량, 등가 선형감쇠계수, 스테이지의 변위, 마찰계수이며, 실험을 통해 변수 값을 추정하였고 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 System Parameter Estimation

m	10g
N_s	20 N
c_{eq}	34.7 kg/s
μ	0.02

쿨롱마찰력의 가장 큰 특징은, 마찰력의 크기가 일정하다는 점과, 충분한 힘이 주어지기 전에는 물체의 움직임이 없는 데드 존(Dead Zone)가 같은 비선형 양상을 보인다는 점이다. 실험을 통해 마찰 구동형 압전 작동기가 움직이기 위한 임계 시간은 0.3ms 임을 확인하였다. 식(1)로 표현된 수학 모델은 비선형성이 고려되지 않은 선형 모델이다. 이 수학모델로 인해 발생하는 모델링 오차는 제어 알고리즘의 강인성을 통해 보상하고자 한다.

4. 스테이지 제어기 설계 및 실험

4.1 피드포워드 제어기 설계

본 절에서는 손떨림 진동외란을 보상하기 위해, 센서 시프트 개념의 스테이지를 구동하는 제어기법을 설계하고 실험으로 성능을 검증하였다. 마찰 구동 압전 작동기에 가하는 전압파형은 스테이지가 가장 빠른 속도로 움직일 수 있는 최적 파형으로 고정하였다. 각 샘플링 시간마다 스테이지의 위치 이동을 위해 내부적으로 입력신호에 대해 펄스 폭 변조(Pulse Width Modulation, PWM)를 이용하였다.

실시간으로 변하는 진동외란을 추적 보상하기 위해서는 우선적으로 진동외란 입력의 역방향으로 진동외란 크기만큼 스테이지를 이동시켜야 된다. 그러나 이 산시간 제어를 하게 되면 연속시간 제어와 다르게 샘플링타임(Δt) 만큼의 위상차가 발생하므로, Fig.6 에 나타나 있는 개념도와 같이 피드포워드 제어기를 통해 샘플링 타임 이후의 스테이지 위치를 추정하여 거리 오차를 보상해야 한다[9~11].

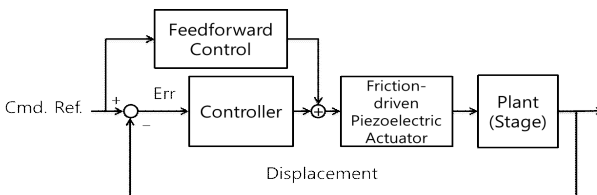


Fig. 6 Control Block Diagram

이를 위해, 매 시간 t_i 마다 엔코더 센서를 통해 측정

된 스테이지의 위치와 진동외란 입력신호의 오차 e_i 를 계산하여 비례제어를 하였고, 추가적으로 진동외란 입력신호의 속도 v_{ref} 및 가속도 a_{ref} 를 계산하여 피드포워드 제어기를 설계 하였다. 피드포워드 제어 알고리즘으로는 이차 테일러 근사식을 통해 다음 시간 t_{i+1} 에 위치해 있을 스테이지의 위치를 추정하였고, 샘플링타임(Δt)동안 스테이지의 요구 이동거리 δx_i 를 계산하였다.

$$\delta x_i = e_i + v_{ref,i}\Delta t + \frac{1}{2}a_{ref,i}\Delta t^2 \tag{2}$$

즉 t_i 에서 식 (2)를 통해 계산한 δx_i 만큼 스테이지가 위치 이동을 한다면, t_{i+1} 시간에서의 오차를 최소화 할 수 있다. 스테이지는 등속운동을 하므로 이동거리를 마찰구동기의 속력 v 으로 나누면 시간 t_i 에서 스테이지를 계산된 이동거리 만큼 움직이기 위해 'On' 신호를 인가할 시간 δt_i 을 계산할 수 있다.

$$\delta t_i = \frac{e_i + v_{ref,i}\delta t + \frac{1}{2}a_{ref,i}\delta t^2}{v} \tag{3}$$

좀 더 정확한 추정을 위해서는 진동외란 입력신호의 고차 미분 항을 고려해 볼 수 있지만 손 떨림 진동의 특성상 10Hz 대역의 저 주파수 신호에 대한 기여도가 지배적이므로 이차 근사식만으로 충분히 피드포워딩을 할 수 있을 것으로 판단하였다. 실제 실험에서는 자이로센서로 취득한 손떨림 진동외란 입력신호에는 저역 필터(Low Pass Filter)를 작용시켜 잡음신호로부터 분리된 신호를 사용하였다.

Δt 동안 δt_i 만큼의 신호를 인가하여 δx_i 를 진행할 때에 단일펄스로 이동하는 것 보다 $\delta t_i/n$ 만큼의 신호를 n 번 인가하는 것이 보다 적은 오차를 가지면서 이동할 수 있다. 그러나 이동거리 $\delta x_i/n$ 가 구동기의 해상도 보다 작은 값이 되는 경우에는, 마찰구동기의 특징인 데드존 비선형성을 극복하기 위한 최소시간 보다 작은 입력을 가하게 되고 따라서 스테이지는 이동하지 않게 된다. 그러므로 δx_i 가 구동기의 해상도 부근일 경우에는, 단일펄스를 이용하여 스테이지 이동을 하도록 알고리즘을 설계하였다.

손떨림 외란진동에 대한 스테이지 제어성능 검증

실험에서는 $n=4$ 로 선정하여 δx_i 를 이동하기 위해 한 샘플링 시간동안 'On' 신호를 네 번 가하도록 하였다. 단 δx_i 가 $7\mu\text{m}$ 보다 작은 경우 단일펄스를 인가하도록 설계하였다.

4.2 시뮬레이션 및 실험결과

앞 절에서 분석된 바와 같이 손떨림 진동외란은 20Hz 이내의 성분을 갖고 있기 때문에, 손떨림 진동 외란을 제어하기 위한 제어기의 샘플링 타임은 최소 40Hz 이상은 되어야 하지만, 여유를 고려하여 손떨림 진동수의 5배에 해당하는 100Hz를 샘플링 타임으로 정하였다[12].

수학모델과 제어 알고리즘의 안정성 및 성능을 검증하기 위해, 두 가지 사인함수 형태의 진동외란신호에 대한 영상센서 스테이지 제어 시뮬레이션을 실행하여 이를 각각 Fig.7과 Fig.8에 나타내었다. 여기서 레퍼런스(reference)는 진동외란을 상쇄하기 위한 스테이지 이동에 대한 명령이다. 붉은색 선은 스테이지 이동을 나타낸 시뮬레이션 결과이다.

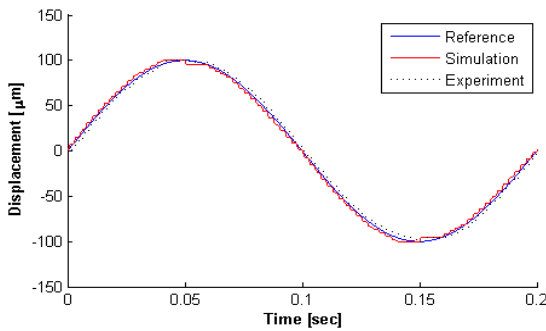


Fig. 7 Tracking result for sine function type vibration disturbance(5 Hz)

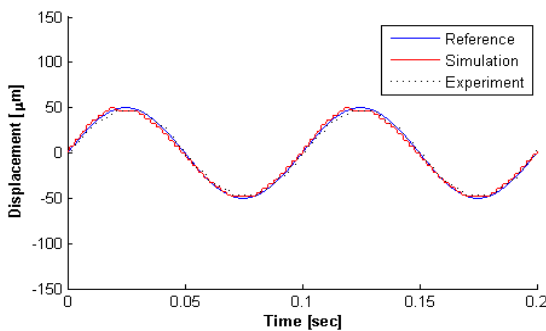


Fig. 8 Tracking result for sine function type vibration disturbance(10 Hz)

이 결과로부터 두 가지 진동 외란신호에 대하여 스테이지는 안정적으로 보상운동이 이루어졌음을 확인할 수 있다. 진동수 5Hz 및 진폭 $100\mu\text{m}$ 를 가지는 진동외란에 대해서는 평균오차 $0.02\mu\text{m}$ 와 표준편차 $1.25\mu\text{m}$ 의 성능을 보였고, 진동수 10Hz 및 진폭 $50\mu\text{m}$ 를 갖는 외란진동에 대해서는 평균오차 $-0.01\mu\text{m}$ 와 표준편차 $1.21\mu\text{m}$ 의 성능을 보였다.

제 2절에서 사용하였던 실제 손떨림 진동외란 입력에 대한 스테이지의 위치제어 시뮬레이션 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 손떨림 진동외란 입력에 대해 스테이지 위치제어 시뮬레이션 결과는 평균오차 $-0.03\mu\text{m}$ 와 표준편차 $1.28\mu\text{m}$ 의 성능을 보였다.

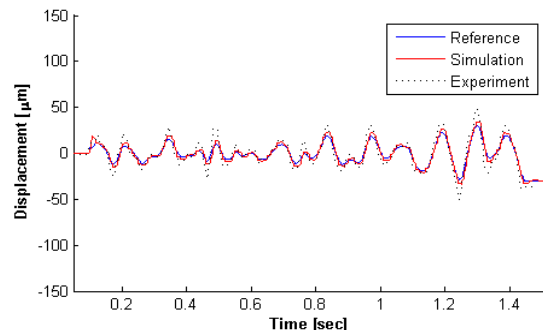


Fig. 9 Tracking result for a real hand shaking vibration disturbance

설계된 알고리즘을 적용한 광학적 영상보정장치의 제어 성능을 실험을 통해 검증하기 위한 실험장치 구성도는 Fig. 10에 나타내었다.

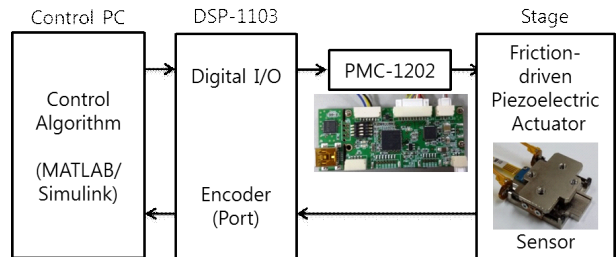


Fig. 10 Experimental Configuration

실험장치를 구동하기 위한 제어기 보드는 dSPACE사의 DSP-1103 DSP 보드를 사용하였고, 이 제어기 보드를 구동하는 제어 알고리즘은 MATLAB/Simulink를 사용하여 작성되었다. 제어 알고리즘에 의해 계산

된 값에 따라 전진/정지/후진에 해당하는 디지털 신호가 PMC-1202 보드로 전송된다. PMC-1202 보드는 설계된 최적 전압파형 형태로 On/Off 명령을 마찰구동형 압전 작동기에 인가하게 된다. 이렇게 구성된 실험 장치에 스테이지 제어 시뮬레이션에 사용된 두가지 사인함수 진동외란 입력을 적용시키고 외란 보상제어 실험을 수행하였고, 그 실험결과를 각각 Fig.7과 Fig.8에 나타내었다.

Fig. 7-8에서 점선이 스테이지 제어 실험결과이며, 시뮬레이션과 매우 일치하는 결과를 보여주고 있다. 진동수 5Hz 및 진폭 100 μm 를 갖는 진동외란에 대한 실험결과는 평균오차 -0.28 μm 와 표준편차 1.79 μm 의 성능을 보였으며, 진동수 10Hz 및 진폭 50 μm 를 갖는 진동외란에 대해서는 평균오차 -0.06 μm 와 표준편차 2.47 μm 의 제어성능을 보였다. 두가지 경우 모두 시뮬레이션과 일치하는 실험결과를 보였고 진동외란 입력을 안정적으로 보상하고 있음을 확인하였다.

실제 손떨림 진동외란 입력에 대한 스테이지 제어 실험 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 이 경우 실제 손떨림 진동외란을 평균오차 -0.84 μm 와 표준편차 3.03 μm 의 제어성능으로 보상할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 소형 카메라에 적용할 수 있는 초점면부 영상안정화 장치의 제어부 설계를 위해, 실제 손떨림 진동에 대해 주파수 분석을 실시하고 진동외란 특성을 분석하였다. 분석결과를 토대로 외란보상 설계 목표를 선정한 후 그에 알맞은 마찰 구동형 압전 작동기를 선정하였다. 손떨림 진동외란을 보상하기 위해, 마찰 구동형 압전 작동기를 적용한 광학 보정장치를 구성하고, 보정장치의 수학적 선형모델을 실험적으로 구하였다. 실제 시스템의 비선형성에 기인하는 모델링 오차 및 실험에서 나타나는 위상차를 보상하기 위해 피드포워드 제어 기법을 설계하였다.

설계된 알고리즘을 적용한 광학적 영상보정장치의 제어 성능을 시뮬레이션을 통해 외란 보상효과를 확인하였고, 최종적으로 실험을 통해 결과를 검증하였다. 실험 결과는 수학적 모델을 이용한 시뮬레이션 결과와 매우 일치하는 것을 확인하였으며, 또한 사인함수 형태의 진동외란 입력 및 실제 손떨림 진동외란 입력에

대하여 모두 설계 목표를 만족시키는 성능을 확인하였다. 차후 마찰계수에 대한 적응제어 알고리즘을 고려하면 보다 나은 성능을 얻을 것으로 기대한다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 우주핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF2013MIA3A3A02042321).

참 고 문 헌

- [1] K. Janschek, V. Tchernykh, S. Dyblenko, "Performance analysis of opto-mechatronic image stabilization for a compact space camera," Control Engineering Practice, Vol. 15, pp. 333-347, 2007.
- [2] J.H. Hwang, J.Y. Yang, J.H. Park, J.B. Cho, M.S. Kang, J.S. Bae, "Design of the Active Optical Compensation Movements for Image Stabilization of Small Satellite", Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol. 43, No. 5, pp. 472-478, 2015.
- [3] D.G. Kwag, J.S. Bae, J.H. Hwang, "Dynamic Characteristic of Vibration Compensation using Piezoelectric Driven Stick-Slip Actuators," The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 2008 Annual Fall Conference, pp. 376-377, 2008.
- [4] D.G. Kwag, J.S. Bae, J.H. Hwang, "Dynamic Characteristic of Vibration Compensation using Piezoelectric Driven Stick-Slip Actuators for Focal Plane Image Stabilization," The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol. 37, No. 4, pp. 399-405, 2009.
- [5] D.F. Elliott, K.R. Rao, "Fast transforms: Algorithms, analysis, applications," Academic Press, New York, 1982.
- [6] Hyun-Phill Ko, Sangsig Kim, Sergius N. Borodinas, "A novel tiny ultrasonic linear motor using the radial mode of a bimorph," Sensors and Actuators, A 125, 477-481, 2006.
- [7] www.piezo-tech.co.kr.
- [8] Daniel Inman, "Engineering Vibrations," 4th Ed.,

Pearson Education, New Jersey, 2014.

- [9] Meckl, P.H., Seering, Warren P., "Feedforward Control Techniques Achieve Fast Settling Time in Robots," American Control Conference, pp 1913-1918, 1986.
- [10] J. Scott Armstrong, Fred Collopy, "Causal Forces: Structuring Knowledge for Time Series Extrapolation," Journal of Forecasting, Vol 12, pp. 103-115, 1993.
- [11] John G. Proakis, Dimitris K. Manolakis, "Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Application," Macmillian Publishing Co., Indianapolis, 2006.
- [12] J. Huang, K. Padmanabhan, O.M. Collins, "The sampling theorem with constant amplitude variable width pulses," IEEE transactions on Circuits and Systems, Vol. 58, pp. 1178-1190, 2011.

저 자 소 개



조 명 신

2015년 한국항공대 항공우주공학과 졸업. 2015년~현재 서울대학교 수리과학부 석박통합과정.



황 재 혁

1980년 한국항공대학교 항공기계공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 기계공학 석사. 1990년 미국 UC Berkeley 박사. 1991년~현재 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 교수. 관심분야는 진동제어, 동역학 시스템 제어.