한국정밀공학회지 제 29 권 11 호 pp. 1207-1213 November 2012 / 1207
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 29, No. 11, pp. 1207-1213 http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2012.29.11.1207

실험계획법을 이용한 3 자유도 마이크로 병렬기구 플랫폼의 제어 이득 선정

Control Gain Tuning of the 3-DOF Micro Parallel Mechanism Platform Via Design of Experiment Methodology

서태원 [1,✉]
TaeWon Seo[1,✉]

1 영남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.)
✉ Corresponding author: taewon_seo@yu.ac.kr, Tel: 053-810-2442

Manuscript received: 2012.4.30 / Accepted: 2012.8.23

Typically commercial controllers do not give data of the controller gains. Therefore, it is very hard to determine the optimal controller gain even though the dynamic model is derived. In this case, design of experiment (DOE) methodology can be a powerful tool for gain tuning. In this research, gain tuning process is proposed based on the DOE. Micro parallel mechanism platform with 3 degrees-of-freedom (DOF) is used for the experiments. Controller gains are measured indirectly from the voltages of adjustable resistors. The controller gains of three actuators are optimized by two or three steps, respectively. The correlations of the controller gains are also analyzed. The process and methodology can be adopted in gain tuning of other mechanical systems.

Key Words: Gain Tuning (게인 튜닝), Design of Experiment (실험계획법), Parallel Mechanism (병렬기구), Correlation Analysis (상관관계 분석)

1. 서론

병렬기구 플랫폼은 정밀도, 강성, 분해능 등에서 직렬기구 플랫폼에 비해 장점이 있다.[1] 이러한 장점을 통하여 위치결정용 플랫폼, 모션 시뮬레이터, 공작기계 등 다양한 분야에 병렬기구 플랫폼들이 사용되고 있다.[2] 현재에도 과구동을 통한 강성 확대 등 다양한 연구가 진행되고 있으며, 여러 분야에서 직렬기구 플랫폼을 대체할 것으로 예상된다.[3]

병렬기구는 여러 개의 액추에이터가 서로 영향을 미치기 때문에 제어 이득 선정이 직렬기구에 비하여 복잡하고 어렵다. 보통 동역학 해석을 통하여 다중 입력, 다중 출력 (multi-input multi-output, MIMO) 구조의 제어기 들이 연구되고 있다.[4] 하지만, 상용 제품을 판매하는 경우에는 액추에이터가 다양한 분야에 사용되기 때문에 MIMO 제어기를 적용하기가 쉽지 않다. 따라서 보통 상용 제품은 비례-적분-미분 (proportional-integral-derivative, PID) 제어기가 기구학적 구속조건에 의거해 사용되고 있다. 이런 문제에서는 PID 제어기의 이득(gain)을 결정하는 것이 중요한 문제이다.

PID 제어 이득을 선정하는 다양한 연구가 진행되어 왔다. Lurie and Enright[5]는 기구학적 구속조건을 decoupling matrix 를 이용하여 분할 시킨 다음, 각각의 모델에 대하여 Bode technique 을 이용하여 게인을 선정하는 방법을 설명하였다. 위 방법은 decoupling matrix 가 완전히 모델을 분할하지 못하는

경우 큰 오차가 발생한다는 단점이 있다. Skogestad and Postlethwaite[6] 은 time delay 와 1 차 모델을 바탕으로 internal model control 을 이용하여 PID 제어이득을 선정하는 방법을 제시하였다. 하지만, 이 방법도 decoupling 이 확실하지 않은 경우에는 오차가 발생한다는 문제가 있다. Lee and Kim[7] 은 이와 같은 문제를 다구찌 방법론을 이용한 접근을 하여 tracking error 를 줄이는 연구를 수행하였다. 하지만, 이 방법은 각각의 이득에 대한 상관관계를 분석하지 않았고, 이득을 쉽게 측정할 수 없을 때에 대한 문제를 제시하지 않았다는 단점이 있다.

상용 드라이버를 포함한 액추에이터를 사용하는 경우에 내부 제어 이득을 알려주지 않는 경우가 대부분이다. 이러한 경우에는 내부 정보가 없기 때문에 기구구조에 대한 모델을 decouple 시키더라도 제어이득을 해석적으로 선정하는 것이 불가능하다. 제어기를 포함한 액추에이터 전체 시스템을 하나의 시스템으로 가정한 다음 시스템 식별 실험을 하는 것이 하나의 방법이겠으나, 이러한 실험은 많은 시간과 노력이 소요된다.[8]

본 논문에서는 신개념 마이크로 병렬기구 플랫폼에 대한 제어 이득 선정 문제를 다룬다. 실험계획법에 의거하여 총 3 개의 액추에이터에 대한 제어 이득이 최적화 된다. 액추에이터의 이득을 정확히 알 수 없는 구조이므로, 가변저항의 양단 값을 측정하여 간접적으로 제어 이득을 선정한다. 상관관계 분석을 통하여 제어 이득간의 영향에 대하여 분석한다. 결론적으로, ramp 입력에 대하여 추종 오차의 최대 최소값을 최적화하는 제어 이득을 선정한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 연구에 사용되는 마이크로 병렬기구 플랫폼의 기구구조에 대하여 설명한다. 3 장에서는 본 논문의 목적인 제어 이득 최적화 문제를 정의한다. 기능 변수, 설계 변수 및 사용 조건 등이 설명된다. 4 장에서는 최적화 실험 결과를 제시하며 그 결과를 분석한다. 5 장에서는 본 논문의 결론을 제시한다.

2. 마이크로 병렬기구 플랫폼

2.1 기구 구조

Fig. 1(a)-(b)에 마이크로 병렬기구 플랫폼의 기구구조와 실제 제작된 플랫폼의 사진이 도시되어 있다.[8] 기구구조는 빨간 화살표로 표시된 것 처럼 2 방향의 병진 운동과 1 방향의 회전 운동의 총 3 개의 자유도를 가지며, 조동과 미동 구동기가 장착되어 있는 이중서보 제어구조이다. 병진 방향으로는 5 mm 의 이동이 가능하며 회전 방향으로 100 도의 회전 능력을 가진다. 병렬기구로서 큰 회전 능력을 가지는 것이 특징이며, 이 큰 회전 능력 안에서 서브 미크론의 정밀도를 확보한다. 상부에는 기구움직임과 독립적으로 3 개의 센서가 부착되어 feedback control 을 구현한다.

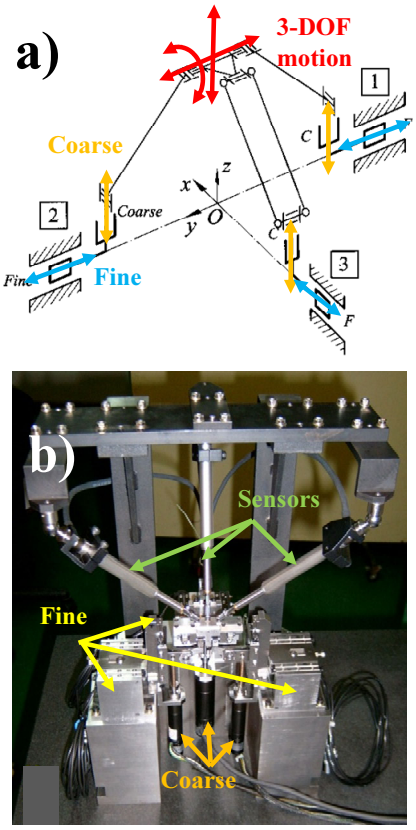


Fig. 1 3-DOF parallel mechanism platform. (a) Kinematic configuration (b) Assembled platform

앞서 설명된 대로 마이크로 플랫폼은 조동, 미동 구동기가 장착되어 있는 이중서보 제어구조이다. 조동 구동기로는 pulse 구동 방식인 Chiba Precision 의 MAS series(볼스크루+DC 모터)[9] 를 사용하였고, 미동 구동기로는 analog 구동 방식인 Piezojena 사의 PX38SG series(피에조 액추에이터)[10] 를 사용하였다. 두 개의 액추에이터 중 분해능이 높은 미동 구동기가 말단의 최종 위치 정밀도를 결정하게 되며, bandwidth 가 낮은 조동 구동기가

transient response 한계를 결정하게 된다. 제어기 이득의 크기는 최종 위치 정밀도와는 큰 관계가 없으며, transient response 에 큰 영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 조동 구동기의 제어 이득에 대하여 최적화를 수행한다.

2.2 조동 구동기

앞서 간략히 설명된 바와 같이 조동 구동기는 볼스크루와 DC 모터를 이용하여 직선운동을 구현하는 방식이다. Table 1 에 조동 구동기의 specification 이 도시되어 있다. 1 번, 2 번 액추에이터와 3 번 액추에이터는 분해능의 차이가 있지만 같은 구동 방식을 사용한다. 위의 액추에이터에 Chiba precision 의 BSD series driver 를 부착하면 1 pulse 에 하나의 분해능을 이동하는 pulse 방식으로 구동이 된다.

Table 1 Specification of the coarse actuators

	MAS-D16H20	MAS-D23H25
Actuator #	1 번, 2 번	3 번
Size (mm)	Φ16×82	Φ23×114
Stroke (mm)	20	25
Resolution (μm)	0.25	0.016
Max speed (mm/s)	4	5

3. 최적화 문제 정의

3.1 기능 변수

최적 성능을 구현하기 위하여 기능변수의 선정이 매우 중요하다. 본 연구에서는 아래와 같은 식으로 기능 변수를 선정하였다.

$$y_i = \max(y_m - y_r) - \min(y_m - y_r) \qquad (1)$$

여기서 y_r 은 ramp input reference 이며, y_m 은 측정된 output 을 의미한다. Fig. 2 는 시간에 대한 그래프이며 예상 response 는 time delay 로 인해 초기 오차가 발생한 후 입력값을 따라가는 형상이다. 기준의 ramp 입력을 주었을 때, 측정값과의 차이를 측정한 후, 이 값의 위아래 폭을 측정한 값을 기능변수로 선정하였다. 결과적으로, 추종 오차의 절대값을 최소화하는 것이 목적이다.

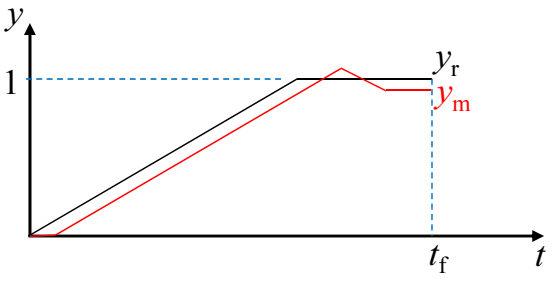


Fig. 2 Objective function for the optimal design

3.2 설계 변수 및 측정 방법

본 연구의 목적은 액추에이터의 이득을 최적화하는 것이다. 제어기를 직접 설계하는 경우도 있겠지만, 액추에이터와 제어기를 같이 구매하여 사용하는 경우가 대부분이다. 앞서 설명했듯이, 본 연구의 MAS series 액추에이터도 BSD series driver 와 연동하여 pulse 를 입력하는 방식으로 구동된다.

BSD series driver 의 매뉴얼을 보면 총 5 개의 이득값을 튜닝할 수 있다. 각각의 이득은 가변저항을 이용하여 튜닝할 수 있으며, 절대적인 값은 알 수가 없다. Fig. 3(a)-(b)에 전체 이득들과 제어 구조가 도시되어 있다. 본 연구에서는 기능변수에 가장 큰 영향을 미치는 속도 제어 루프의 P-gain 과 Loop-gain 을 설계변수로 선정한다. 여기서 Loop-gain 은 PID 제어기에서 적분 항에 해당된다.

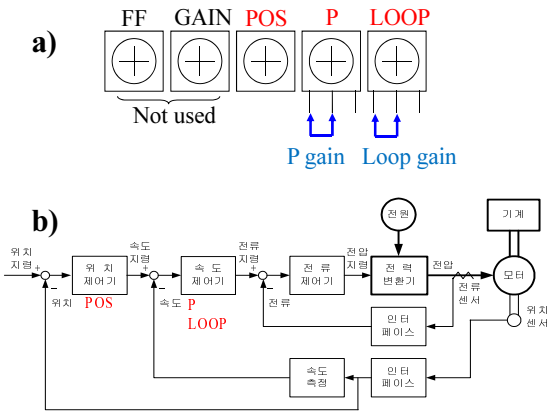


Fig. 3 (a) Gains of BSD drivers and (b) controller structure

앞서 설명한 대로, 제어 이득은 가변 저항을 이용하여 튜닝을 하기 때문에 절대적인 이득값을 알 수가 없다. 본 연구에서는 Fig. 3(a)에 파란색 화

살표로 도시된 바와 같이 가변저항 양단의 전압을 측정하여 그 값을 기준으로 이득 튜닝을 실시한다. 제품을 구매할 당시의 초기 값은 (1, 2 번 액추에이터: P-gain = 1.205 V, Loop-gain = 0.465 V) 와 (3 번 액추에이터: P-gain = 1.027 V, Loop-gain = 0.772 V) 와 같다. 이와 같이 직접적인 이득이 주어지지 않더라도, 가변저항 값을 이용하여 간접적으로 이득의 튜닝이 가능하다.

3.3 사용 조건의 선정

본 연구에서는 액추에이터의 구동 속도를 사용 조건으로 선정하였다. 액추에이터의 성능을 고려하여 최저 속도 (0.5 kHz for 10 sec), 중간 속도 (4 kHz for 1.5 sec), 최고 속도 (12 kHz for 0.5 sec) 의 사용 조건을 선정하였다. 총, 세 조건에서 실험을 수행하였으며, 이 세 조건에서의 결과를 바탕으로 다음과 같은 Smaller-the-better SN ratio 를 이용하여 결과를 분석한다.

$$SN = -10\log\left|\frac{\sum y_i^2}{n}\right| \quad (2)$$

3.4 수직 행렬 및 선형 그래프

3.2 절에서 설명되었듯이, 본 연구에서 최적화할 설계 변수는 각 액추에이터의 P-gain 과 Loop-gain 이다. 두 이득은 상관관계가 있을 것으로 예상되기 때문에 상관관계를 분석하는 것이 필수적이다. 따라서, Fig. 4 의 선형 그래프를 바탕으로 Table 2 과 같은 실험계획을 도출하였다.[11] Table 2 의 실험계획은 $L_9(3^4)$ array 를 이용한 것이다.

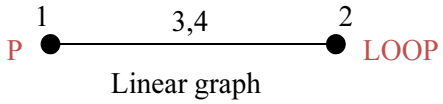


Fig. 4 Linear graph of $L_9(3^4)$ array for correlation

Table 2 $L_9(3^4)$ orthogonal array for experiments

#	P-gain	Loop-gain	P×Loop$_1$	P×Loop$_2$
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

4. 실험 및 분석

4.1 1 번과 2 번 액추에이터 실험 결과

1 번과 2 번 액추에이터는 같은 액추에이터를 사용하였으며, 서로 대칭 형상으로 설계되어 있다. 따라서, 두 액추에이터는 같은 제어이득 설계변수를 사용하여 최적화를 수행한다.

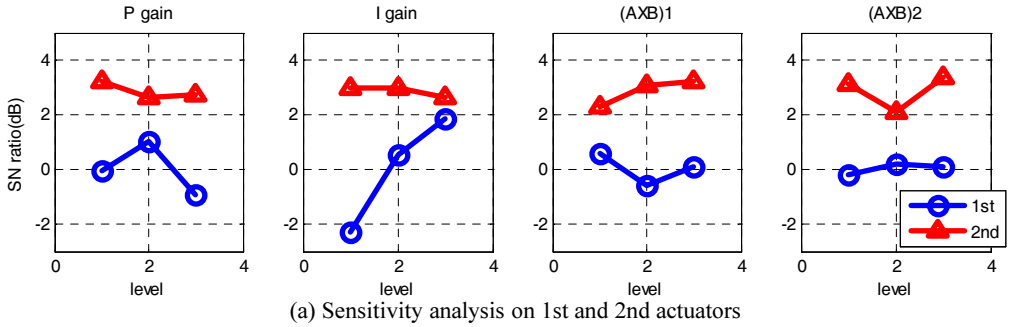
Fig. 5(a)에 실험 결과를 도시하였다. 총 2 단계의 최적화를 수행하였으며, 단계가 계속될수록 설계 변수의 level 크기를 변화시키며 실험을 수행하였다. 그림에 보이듯이 2 단계에 이르렀을 때에는 SN ratio 에 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 각각 단계에 대하여 $L_9(3^4)$ 배열의 3, 4 번 열을 통해 상관관계 분석을 하여 최적화에 이용을 하였다. 상관관계 분석에 대한 예시가 Fig. 6(a)-(b)에 도시되어 있으며 1, 2 번 액추에이터에 대한 상관관계가 3 번 액추에이터에 비해 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

4.2 3 번 액추에이터 실험 결과

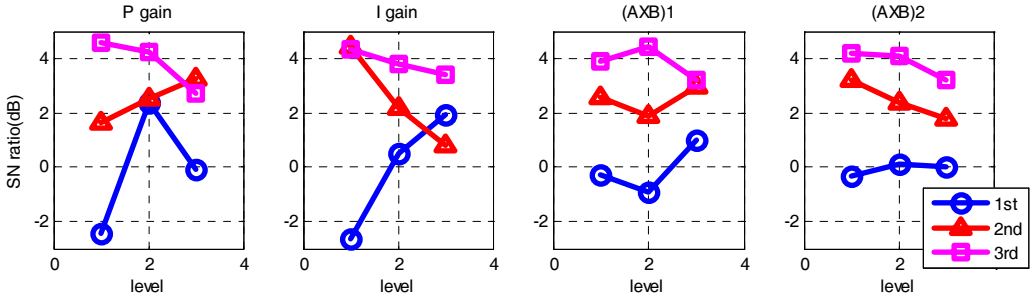
3 번 액추에이터에 대한 실험 결과가 Fig. 5(b)에 도시되어 있다. 총 3 단계의 최적화가 수행되었으며, 결과적으로 단계가 계속될수록 SN ratio 가 상승하는 모습을 볼 수 있다. 앞서 설명한 대로 상관관계 분석(Fig. 6(b))도 이용을 하였는데, 3 번 액추에이터의 경우 상관관계가 크지 않음을 확인하였다.

4.3 최적화 결과 실험 및 분석

앞서 설명된 대로 1, 2 번 액추에이터에 대한 2 단계 실험과 3 번 액추에이터에 대한 3 단계 실험을 통하여 최적값을 도출하였다. 간접적으로 측정한 초기 이득과 최종 이득값이 Table 3 에 도시되어 있다. Fig. 7 에 시간에 대한 실험 측정 데이터가 도시되어 있다. 이득 튜닝을 통하여 오차의 오버슈트(overshoot)와 절대값이 확연히 줄어들었음을 확인할 수 있다.



(a) Sensitivity analysis on 1st and 2nd actuators



(b) Sensitivity analysis on 3rd actuator

Fig. 5 Sensitivity analysis. (a) 1st and 2nd actuators, and (b) 3rd actuator

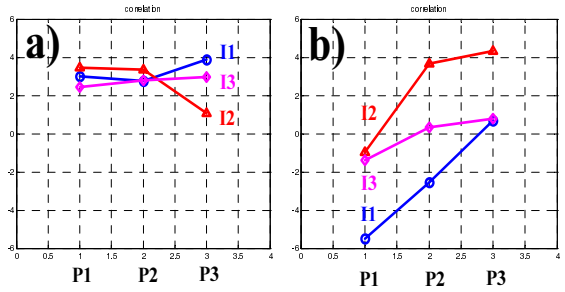
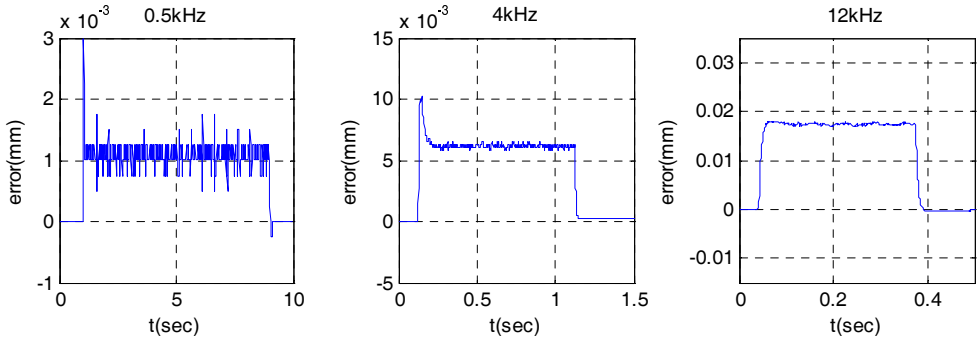


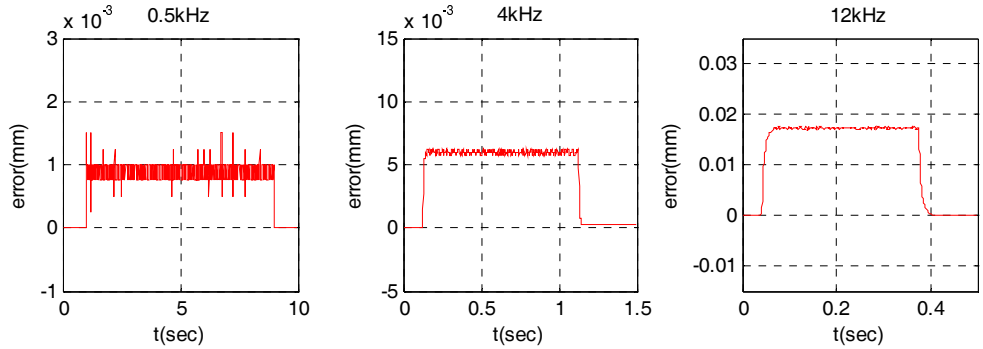
Fig. 6 Example of the correlation analysis (a) 1st and 2nd actuators (b) 3rd actuator

Table 3 Initial and optimized gain values

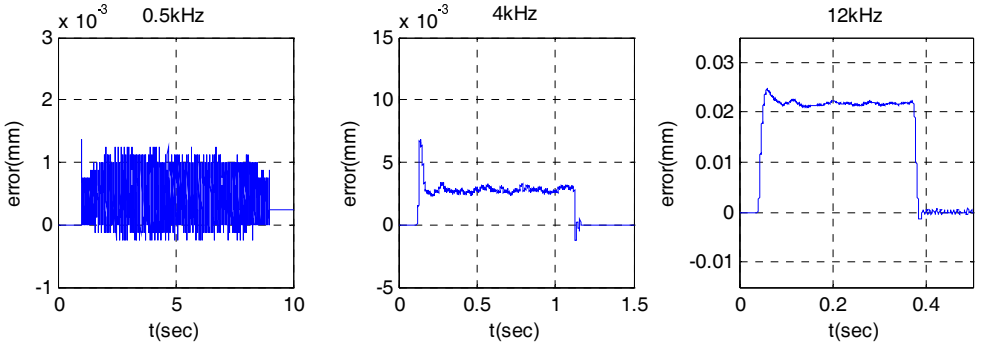
	P-gain (V)	Loop-gain (V)	SN ratio (dB)
1st actuator			
Initial	1.205	0.465	-1.855
Optimized	0.955	1.965	3.889
2nd actuator			
Initial	1.205	0.465	-3.741
Optimized	0.955	1.965	4.092
3rd actuator			
Initial	1.027	0.772	3.681
Optimized	1.152	1.022	5.461



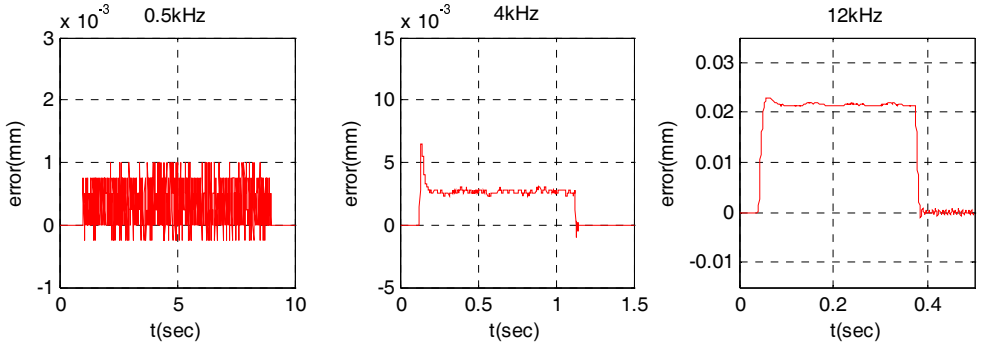
(a) Tracking error of 1st and 2nd actuators before gain tuning



(b) Tracking error of 1st and 2nd actuators after gain tuning



(c) Tracking error of 3rd actuator before gain tuning



(d) Tracking error of 3rd actuator after gain tuning

Fig. 7 Tracking error of before and after gain tuning experiments

5. 결론

본 논문에서는 실험계획법을 이용하여 마이크로 병렬기구 플랫폼의 제어 이득을 최적화 하는 방법을 제시하였다. 다양한 사용조건에서 추종 오차를 최소화하는 제어 이득을 정할 수 있었다. 상용 제어기의 특성상 이득 측정이 불가능하였는데, 가변저항의 전압을 이용하여 최적화를 수행하였다. 결과적으로 1, 2 번 액추에이터는 5.755 dB, 7.833 dB 의 성능 향상을, 3 번 액추에이터는 1.780 dB 의 성능 향상을 보였다. 제어이득에 대한 상관관계도 분석되었다.

본 연구는 실용적인 이득 튜닝 방법을 제시하였다는 데에 있어 의미가 있다. 직접 측정이 불가능한 이득도 저항 양단의 전압을 측정하는 방법을 이용하여 간접적으로 측정을 하였다. 제시된 제어

이득 선정 방법은 다른 위치결정용 병렬기구 플랫폼에 응용될 수 있다.

후 기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (원자력기술개발사업, No. 2012043785).

참고문헌

1. Ahn, C. S., Seo, T., Kim, J., and Kim, T.-W., “High-tilt Parallel Positioning Mechanism Development and Cutter Path Simulation for Laser Micro-machining,” Computer-Aided Design, Vol. 39, No. 3, pp. 218-228, 2007.
2. Merlet, J. P., “Parallel Robots, 2nd ed.,” Springer, 2006.
3. Jin, S., Kim, J., and Seo, T., “Theoretical analyses on actuator stiffness and structural stiffness of non-redundant and redundant symmetric 5R parallel mechanisms,” J. of the KSPE, Vol. 29, No. 9, pp. 971-977, 2012.
4. Kim, H. S., Cho, Y. M., and Kim, J., “Ultra-precision micro stage for active vibration control,” Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 543-544, 2006.
5. Lurie, B. J. and Enright, P. J., “Classical Feedback Control with Matlab, 1st ed.,” CRC Press, 2000.
6. Skogestad, S. and Postlethwaite, I., “Multivariable Feedback Control: Analysis and Design, 2nd ed.,” Wiley, 2005.
7. Lee, K. and Kim, J., “Control gain tuning of a simultaneous multi-axis PID control system by Taguchi method,” J. of the KSPE, Vol. 16, No. 6, pp. 25-35, 1999.
8. Seo, T., Kang, D. S., Kim, H. S., and Kim, J., “Dual Servo Control of a High-tilt 3-DOF Micro Parallel Positioning Platform,” IEEE-ASME Transaction on Mechatronics, Vol. 14, No. 5, pp. 616-625, 2009.
9. Citizen Chiba Precision Co. Ltd., http://ccj.citizen.co.jp/english/
10. Piezosystem Jena, “Equipment of Nano Positioning,” http://www.piezosystem.com/, (Accessed 29 April 2012).
11. Peace, G. S., “Taguchi Methods,” Addison-Wesley, 1993.