

압전소자를 이용한 정밀 스테이지의 운동제어

김인수[#], 김영식^{*}, 황윤식^{*}

Motion Control of the Precise Stage using Piezoelectric Actuator

In-Soo Kim[#], Yeung-Shik Kim^{*}, Yun-Sik Hwang^{*}

(Received 7 June 2011; received in revised form 4 August 2011; accepted 8 August 2011)

ABSTRACT

LQG/LTR control scheme is applied to the two axes stage using piezoelectric actuator for tracking reference input and suppressing hysteresis effect in this paper. The plant is combined with an integrator to improve the tracking ability. LQG/LTR controller is designed by making desirable target filter loop remove all poles except for an integrator included in new design plant model and loop transfer recovery. Decoupler in the shape of FIR filter is added to remove the coupling effect between the two axes motion and so feedback control loop is designed independently for the each axis motion.

Key Words : APrecise Stage(정밀 스테이지), Piezoelectric Actuator(압전 작동기), LQG/LTR(루프전달회복을 갖는 선형가우스 제어), Coupling Effect(연계 효과)

1. 서 론

초정밀 이송 기구는 반도체 제작공정, 초정밀 공작기계, 우주항공, 세포 생물학에서 제품의 소형화, 경량화, 첨단화됨에 따라 그 활용도가 끊임없이 높아지고 있다. 나노기술의 중요한 역할을 하고 있는 스마트 재료의 하나가 압전소자^[1]이며 압전소자는 기계적 입력을 전기적 출력으로, 혹은 전기적 입력을 기계적 출력으로 변환시킬 수 있으며, 이와 같은 특징을 이용하여 작동기 뿐만 아니라 센서로서도 활용되고 있다^[2]. 그러나 압전소자는 작동기 자체의 비선형으로 인해 반복 정밀도가 저하되며 강유전성으로 인한 히스테리시스(hysteresis)특성

과 입력 전압의 변화 없이도 시간에 따라 변위가 증가하는 크리프(creep)특성을 가진다. 이런 압전소자의 비선형특성을 보완하고 구동 정밀도를 향상시키기 위해 압전소자에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔다^[3-5]. 정밀 스테이지는 높은 정밀도 및 반복성을 유지하기 위해 오차가 최소화되도록 이동 메카니즘을 설계해야 하고 높은 분해능이 필요하다^[6]. 최근에는 유연 힌지 및 압전소자를 이용하여 작동되는 정밀 이송 스테이지가 개발되었으며 스테이지의 동특성 해석을 통한 최적화된 힌지 설계법이 제시 되었고 스테이지의 모델링 및 슬라이딩 모드기법에 의한 운동제어 방법이 기술되었다^[7,8].

본 논문에서는 정밀 스테이지 구동을 위한 2축 스테이지를 설계 및 제작하고 압전소자를 작동기로 이용한다. 2축 스테이지의 동적특성은 주파수영역에서의 커브피팅(curve fitting) 방법으로 모델링 한다.

2축 스테이지의 운동 간에 발생하는 연계효과

* 금오공과대학교 기전공학과

교신저자 : 금오공과대학교 기전공학과

E-mail : kiminsoo@kumoh.ac.kr

(coupling effect)는 스테이지의 주요 운동오차 요인이 될 수 있다^[9]. 이에 따라 본 연구에서는 연계효과에 의해 생기는 제어계의 정상상태오차와 과도오차를 FIR 필터 형태의 비연계기(decoupler)를 추가하여 최소화 시키도록 하는 방안을 제시한다.

또한 LQG/LTR(Linear Quadratic Gaussian control with Loop Transfer Recovery) 제어를 통하여 모델링 오차, 외란 및 불확실성을 제거하고 다양한 형태의 기준입력신호에 대한 스테이지 운동의 명령 추종성을 높이도록 한다.

2. 스테이지 모델링

2.1 스테이지의 동적 특성

Fig. 1(a)에 보인 2축 스테이지 구조는 스테인레스강으로 제작되었으며 Fig. 1(b)는 스테이지의 정밀 위치제어를 구현하기 위한 제어계의 구성도이다.

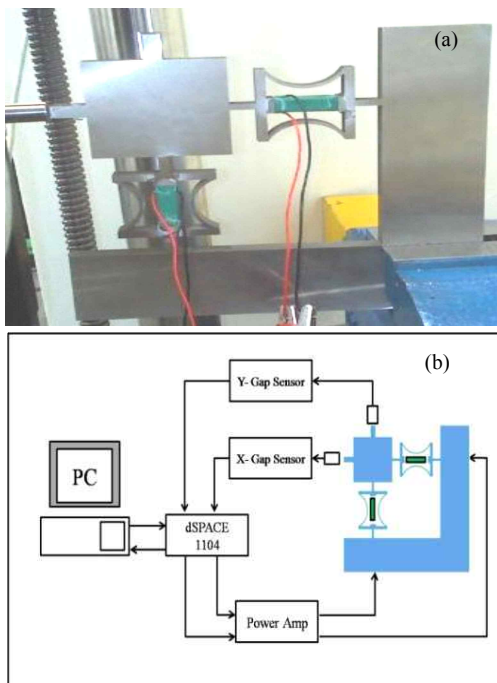


Fig. 1 (a) Setup of the two axes stage, (b) Schematic diagram of experimental device

기준입력 신호에 따라 이산 신호 처리장치(dSPACE 1104)는 제어기 출력신호를 발생시키고 이는 파워 증폭기(AVL 790)를 거쳐 압전 작동기에 인가된다. 스테이지의 X축과 Y축의 변위를 측정하기 위하여 스테이지 끝단에는 2개의 갭 센서(gap sensor : ADE technologies 5130)를 설치하였다. 제어 샘플링 주파수는 정밀 스테이지의 공진주파수를 고려하여 5kHz로 정하였다.

Fig. 2는 스테이지의 동적특성을 확인하기 위해 하나의 축 작동부에는 30V, 1Hz 사각파형의 기준입력신호를 주어 동작시키고 또 다른 축 작동부에는 0V 기준입력 신호를 주어 비 동작시켰을 때의 두 축의 응답을 보인 것이다. 계단 입력에 대한 축의 응답에 있어 잔류진동 발생으로 인하여 정착시간이 지연되고 최대 오버슈트(overshoot)가 동작축이 X축인 경우에 26.5%, 동작축이 Y축인 경우에는 25.8%로 나타났다. 비동작축의 운동은 2축 간의 연계효과로 인해 X축으로 0.63 μm , Y축으로 0.71 μm 의 정상상태오차와 X축으로 0.83 μm , Y축으로 0.96 μm 크기의 최대과도오차가 발생하여 2축 스테이지 운동 정밀도가 저하되고 있다.

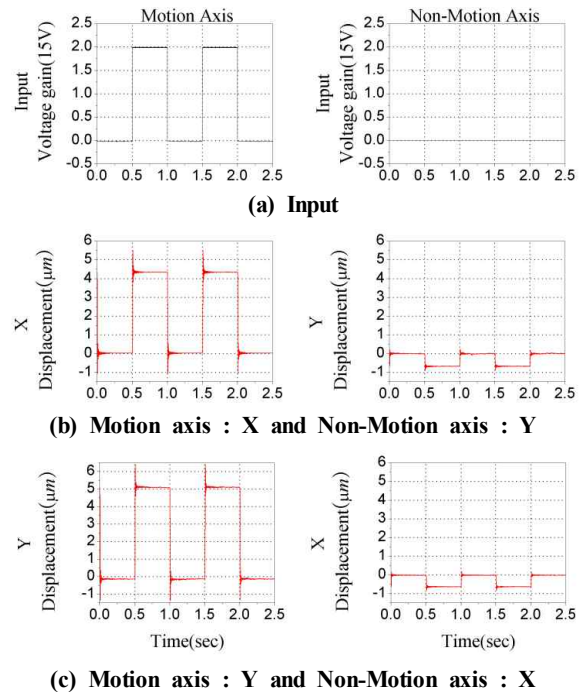


Fig. 2 Measured response of the uncontrolled system to step input

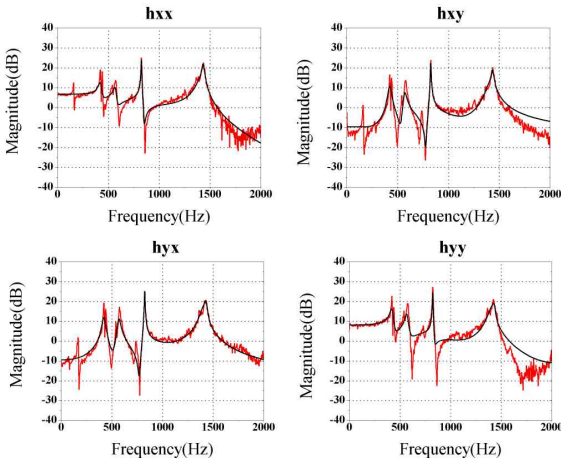


Fig. 3 Measured and simulated FRF of the two axes stage

2.2 시스템 모델링

복잡한 형태의 시스템에 대한 실시간 제어를 위해서는 가능한 낮은 차수의 수학적 모델이 요구된다. 이는 행렬분수 표현법(matrix-fraction description)을 이용하는 주파수영역에서의 동특성 규명법을 통해 실현될 수 있다^[10]. Fig. 3은 백색잡음 입력신호에 대한 스테이지의 출력 응답을 측정하여 얻어진 주파수 응답 곡선과 커브피팅을 통해 규명된 스테이지 모델의 주파수 응답 곡선을 보인 것이다. 스테이지는 시스템 모델 차수가 15차인 2×2 입출력계로 표현되었고 모델링 과정에 포함된 관심 주파수 영역은 2kHz로 정하였다.

2축 스테이지는 구조적으로 대칭인 관계로 Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 동작축 전달함수 h_{xx} (X 방향 입력에 대한 X방향 출력)와 h_{yy} 가 매우 유사하게 나타나고 있으며 축 간의 연계효과를 나타내는 전달함수 h_{xy} (X방향 입력에 대한 Y방향 출력)와 h_{yx} 도 유사하게 나타나고 있다. 스테이지 동작부의 물성적인 불균질성 등으로 인해 각 전달함수에 포함된 모델 오차는 제어기 구조를 강인구조로 설계함으로써 극복할 수 있다.

3. 제어기 이론 및 설계

외란에 대하여 정상상태 오차가 없고 임의의 기준

입력에 대한 명령 추종성이 높은 제어시스템을 설계하기 위해 Fig. 4와 같이 모델링된 전달함수에 적분요소를 첨가한 새로운 플랜트를 설계 플랜트모델로 정의하기로 한다.

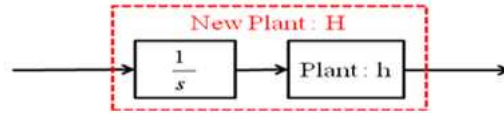


Fig. 4 New plant combined with an integrator

본 연구에서는 2×2 다중 입출력계로 표현된 스테이지의 모델에 2축 스테이지의 운동 간에 발생하는 연계효과(coupling effect)를 제거하는 비연계기(decoupler)를 추가하여 스테이지의 모델을 2개의 독립된 단일 입출력계로 분리하기로 한다. 스테이지의 운동제어는 단일 입출력계로 분리된 각 축계에 피드백 제어기를 구성함으로써 이루어진다. Fig. 5에 보인 바와 같이 2축의 비연계기 D_{xy} 와 D_{yx} 는 다음과 같은 특성을 갖도록 설계되어야 한다.

$$\begin{aligned} D_{xy}H_{yy} &= H_{xy} \\ D_{yx}H_{xx} &= H_{yx} \end{aligned} \quad (1)$$

D_{xy} 와 D_{yx} 의 설계 시에 H_{xx} 와 H_{yy} 에 비최소 위상특성이 포함된 경우에는 특이값 분리를 통한 역변환 필터 구현 방식^[11]을 이용하여 연계효과를 최소화하도록 하는 FIR 필터 형태의 비연계기를 설계할 수 있다.

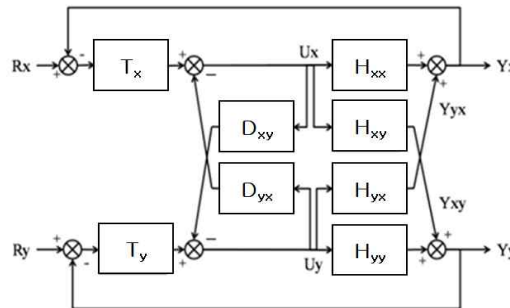


Fig. 5 Schematic diagram of the system with decoupler and LQG/LTR controller

피드백 제어기 구성을 위해 본 연구에서 사용된 방법은 LQG/LTR 제어기법이다. 이 방법은 시스템의 주파수역 성능사양과 안정도-강인성 문제를 제어기 설계 시에 직접적으로 고려하기 위하여 개발된 대표적인 제어기법으로 LQG 최적제어로부터 발전된 강인 최적제어 기법이다. 제어시스템의 설계절차는 크게 2 단계로 구분된다. 먼저 설계 플랜트모델에 대하여 바람직한 루프형성이 되도록 목표피드백루프(target feedback loop)를 설계하고 다음으로 루프전달회복(loop transfer recovery)을 통하여 설계된 피드백 제어 시스템의 루프형상을 목표피드백루프의 형상으로 회복시킨다.

3.1 목표피드백루프 설계

적분기가 포함된 스테이지의 각 동작축의 모델은 다음의 상태방정식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + L\xi(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + \mu\zeta(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 A, B, C, D 는 설계 플랜트모델에 대한 시스템 행렬, x 는 상태변수, ζ 와 ξ 는 가상적인 백색잡음인 외란 및 센서 잡음이고 μ 와 L 은 설계 플랜트모델의 외란 및 센서 잡음의 상호분산 크기이다. 목표필터루프를 설계하기 위해 가상적인 센서잡음에 대한 Kalman 필터를 사용해서 필터이득 행렬 F 를 구한다.

$$\hat{\dot{x}} = A\hat{x} + Bu + F[y - c\hat{x} - Du] \quad (3)$$

$$F = \frac{1}{\mu} PC^T \quad (4)$$

여기서 \hat{x} 는 관측된 상태변수이고 P 는 식 (5)의 필터대수 Riccati 식으로 부터 구한다.

$$AP + PA^T + LQ_1L^T - \frac{1}{\mu} PC^T CP = 0 \quad (5)$$

설계파라미터 Q_1 은 가중행렬이고 Q_1, μ, L 을 선정하기 위해 Kalman 필터 주파수역 등가(Kalman filter frequency domain equality)^[12] 결과를 이용하여 목표필터루프의 전달함수 행렬 G_F 를 근사적으로 구한다.

$$G_F \approx \frac{1}{\sqrt{\mu}} C(sI - A)^{-1}L + D \quad (6)$$

최적루프형성^[13]을 이용하여 첨가되어 있는 적분요소만 남겨놓고 시스템의 모든 극점을 제거하여 바람직한 목표필터루프를 형성하는 설계파라미터 L 을 선정한다.

3.2 루프전달회복

다음의 가격함수 J 를 최소화 하는 LQR(Linear Quadratic Regulator)제어법으로 제어이득 행렬 G 를 구한다.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T Q x + u^T \frac{1}{\rho} u] dt \quad (7)$$

$$G = \frac{1}{\rho} B^T K \quad (8)$$

식 (8)의 제어이득 행렬 G 를 구하기 위해서 K 를 구해야 하는데 이는 $\rho \rightarrow 0$ 인 다음의 제어대수 Riccati 식으로 구한다^[14].

$$KA + A^T K + Q_2 - \frac{1}{\rho} KBB^T K = 0 \quad (9)$$

설계변수인 식 (9)의 Q_2 값과 ρ 를 조정함으로써 바람직한 목표피드백 루프를 설계할 수 있다. 목표필터루프 설계과정에서 구한 F 와 루프전달회복 과정에서 선정된 G 를 식 (10)으로 결합시켜 제어기 전달함수 T 를 구한다.

$$T(s) = G(sI - A + BG + FC)^{-1}F + D \quad (10)$$

4. 스테이지 운동제어 실험

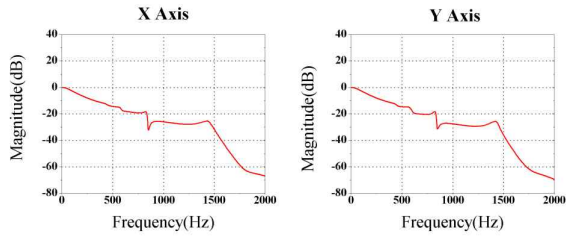
4.1 2축 스테이지의 LQG/LTR 제어

바람직한 목표필터루프의 설정과 회복을 위한 설계값들을 시행착오법을 통해서 Table 1과 같이 설정하였고 이를 기초로 설계되어진 주파수역에서의 성능사양은 Fig. 6과 같다.

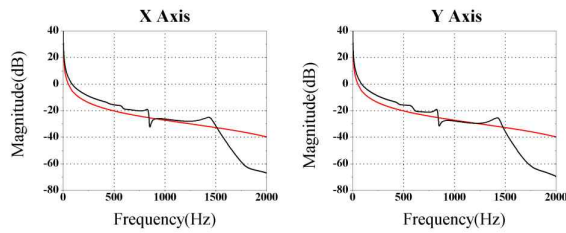
Fig. 7은 Table 1의 제어계수로 설계된 제어기와 FIR필터 형태로 설계된 비연계를 적용한 제어시스템에 동작축으로 30V, 1Hz 사각파, 비동작축으로 0V를 기준입력으로 인가했을 때의 2축 스테이지의 응답을 보인 것이다. 정착시간은 X축 0.019sec, Y축 0.018sec이고 오버슈트는 X축에 대해 0.8%, Y축에 대해 1.8%로 나타남을 알 수 있다. 비동작축에 대해서도 기준입력(0V)에 대한 정상상태오차가 나타나지 않은 우수한 명령 추종성을 볼 수 있고 동작축의 기준입력이 급격히 변하는 위치에서 X축으로 0.13 μm , Y축으로 0.14 μm 크기의 미미한 최대 과도오차만이 발생하는 것을 알 수 있다.

Table 1 Design parameters of LQG/LTR control

Parameter	X axis	Y axis
μ	1e-5	1e-5
Q_1	$5 \times CC^T$	$5 \times CC^T$
ρ	1e-8	1e-8
Q_2	$1 \times C^T C$	$1 \times C^T C$



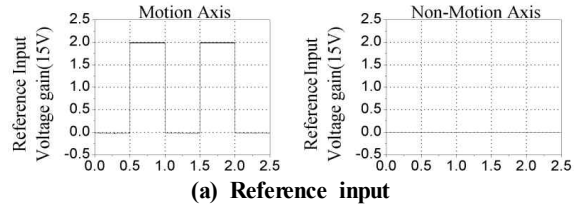
(a) Target feedback loop design and loop transfer recovery



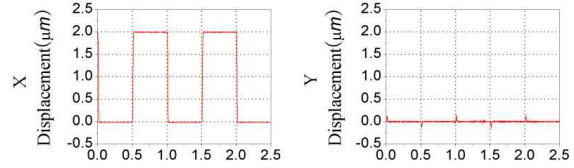
(b) Frequency response of the closed-loop controlled system
Fig. 6 Designed frequency response of stage system

Fig. 8은 계단함수, 램프, 정현파 등이 포함된 복잡한 형태의 기준입력에 대한 각 축의 제어시스템 응답을 나타낸 것으로 압전소자 작동기의 히스테리

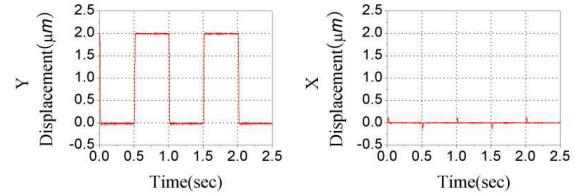
시스특성에도 불구하고 기준입력에 대한 추종성이 매우 우수한 제어 성능을 나타냄을 알 수 있다.



(a) Reference input



(b) Motion axis : X and Non-Motion axis : Y



(c) Motion axis : Y and Non-Motion axis : X

Fig. 7 Measured response of the controlled system to step reference input

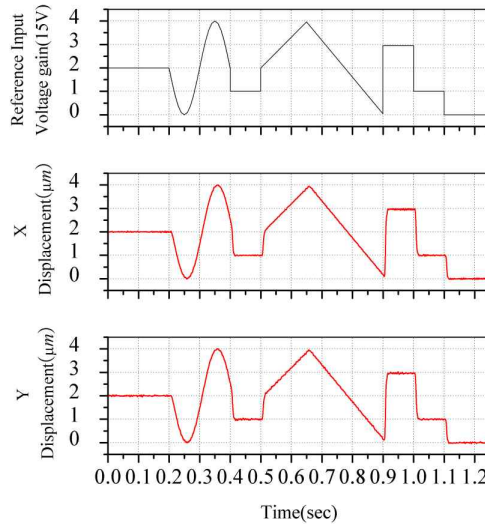


Fig. 8 Measured response of the controlled system to complex reference input

Fig. 9는 X축과 Y축으로 30V, 1Hz 사각파의 기준 입력을 동시에 인가했을 때의 응답이다. 각축을 동시에 동작시켰을 때에도 Fig. 7에서의 제어응답과 같은 결과가 나왔으며 연계효과에 의한 최대과도오차는 각축의 독립제어로 인해 제거되었음을 알 수 있다.

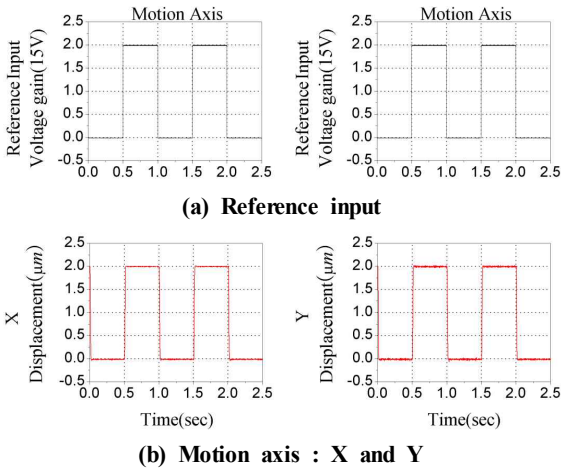


Fig. 9 Measured response of the controlled system to two axes step input

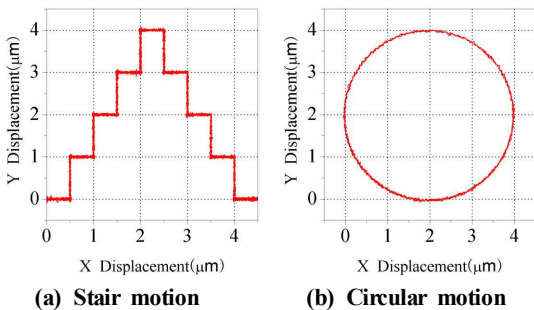


Fig. 10 Measured response of the controlled system to stair and circular reference input

X축과 Y축의 기준입력을 미리 설계함으로써 평면 상에서의 2축 스테이지 운동궤적을 제어할 수 있다. Fig. 10은 X축과 Y축을 동시에 제어하여 2축 스테이지가 계단운동(stair motion)과 원형운동(circular motion)을 수행한 결과를 보인 것으로서 두 가지 경우 모두 높은 작동 정밀도를 가지고 2축 스테이지가 목표지점으로 이동함으로 인하여 운동경로 왜곡현상이 발생되지 않음을 알 수 있다.

Table 2는 기준입력신호로 계단신호가 가해진 경우의 스테이지 운동제어 전후의 성능지표를 비교한 것으로서 모든 부분에서 스테이지의 작동 정밀도가 향상되었음을 알 수 있다.

Table 2 Control performances of two axes stage

	Axis	Before control	After control
Maximum overshoot (%)	X	26.5	0.8
	Y	25.8	1.8
Settling time(sec)	X	0.066	0.019
	Y	0.058	0.018
Steady state error(μm)	XY	0.71	0
	YX	0.62	0
Maximum transient error(μm)	XY	0.83	0.14
	YX	0.96	0.13

5. 결 론

본 연구에서는 압전 작동기를 이용한 2축 고정밀 스테이지를 구성하였고 스테이지의 동적특성을 규명하고 운동 제어실험을 해 본 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 스테이지의 2축 동적 특성은 가진 실험을 통해 주파수 응답특성을 측정하고 행렬분수 표현법을 이용하는 커브핏팅을 통해 체계적으로 2×2 입력력계로 규명될 수 있다. 2축 운동사이의 스테이지 연계특성은 스테이지 모델에 기초하여 설계된 FIR필터 형태의 비연계기를 통하여 제거될 수 있다.
2. 2축 스테이지의 제어계에 적분기를 추가하고 외란 및 모델 오차에 강인한 LQG/LTR 기법을 적용하여 스테이지 제어계를 구현하면 계단파를 포함한 다양한 기준입력 신호에 대해 잔류진동이 발생되지 않고 우수한 명령 추종성을 갖도록 할 수 있다. 이에 따라 구현된 2축 스테이지는 2축 기준입력을 미리 설계함으로써 운동경로의 왜곡 없이 평면상에서 운동궤적을 적절히 제어할 수 있다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 교수연구년제에 의해 연구된 실적임.

참고문헌

1. Robers, C. A., "Smart Materials, Structures, and Mathematical Issues", Technomic Publishing Co., Inc, pp. 147-155, 1988.
2. Park, K. W., "Robust Control for a Ultra-Precision Stage System", The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 344-349, 2006.
3. Yang, K. Y., Hwang Y. S., Kim, Y. S. and Kim, I. S., "Precise Position Control of Inchworm Using Robust Control Technique and Input Shaping", The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 169-175, 2009.
4. Goldfarb, M. and Celanovic, N., "A Lumped Parameter Electromechanical Model for Describing the Nonlinear Behavior of Piezoelectric Actuators", Transaction of the ASME, Vol. 119, pp. 478-485, 1997.
5. Ping, G. and Jouaneh, M., "Modeling Hysteresis in Piezoceramic Actuators", Precision Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 211-221, 1995.
6. Yang, R., Jouaneh, M. and Schweizer, R., "Design and Characterization of a Low-profile Micro Positioning Stage", American Society for Precision Engineering, Vol. 18, pp. 20-29, 1996.
7. Ryu, J. W., Gweon, D. G. and Moon, K. S., "Optimal Design of a Flexure Hinge Based XYθ Wafer Stage", American Society for Precision Engineering, Vol. 21, pp. 18-28, 1997.
8. Kang, J. O., Seo, M. H., Han, C. S. and Hong, S. W., "Development of 3-axis Fine Positioning Stage : Part1. Analysis and Design", Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 147-154, 2003.
9. Kim, Y. S., Kim, J. I. and Kim, I. S., "Modeling and Motion Control of the Precision Positioning Stage with Flexible Hinge Mechanism", Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 9, No. 6, pp. 51-58, 2010.
10. Jung, J. N., Applied System Identification, Prentice Hall, 1994.
11. Hashemi, S. and Hammond, J. K., "The Interpretation of Singular Values in the Inversion of Minimum and Non-minimum Phase Systems", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 10, No. 3, pp. 225-240, 1996.
12. Athans, M., Lecture Notes on Multivariable Control System, M.I.T, 1986.
13. Kim, J. S., "Nonlinear Multivariable Control Using Statistical Linearization and Loop Transfer Recovery", Ph. D. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, M.I.T, 1987.
14. Han, S. I. and Kim, J. S., "Nonlinear Quadratic Gaussian Control with Loop Transfer Recovery", Mechatronics 13, pp. 273-293, 2003.