

SPM-based Data Storage System 의 Feedforward Decoupling 기법을 적용한 제어기 설계 Controller Design for Feedforward Decoupling in SPM-based Data Storage System

정지영*, 문 준*, 이충우**, 정정주[†], 김영식***

Ji Young Jeong, Jun Moon, Choong Woo Lee, Chung Choo Chung and Young Sik Kim

Abstract

Scanning Probe Microscope (SPM) - based Data Storage (SDS)는 Atomic Force Microscope (AFM)을 이용하여 Cantilever Tip 이 저장 장치 미디어에 나노미터 단위로 비트를 읽고, 쓰고 지우는 저장 장치로써, x, y 두 축을 이용한다. 따라서 축간 coupling 의 영향이 크게 발생한다. 따라서 축간 coupling 의 영향을 고려하여 제어기를 설계하여야 한다. 본 논문은 coupling 요소를 제거하기 위하여 Feedforward Decoupler 를 설계하여 Stage 의 입력 앞 단에 추가하는 방법을 제안하였다. Feedforward Decoupler 를 추가함으로써 coupling 요소가 줄어드는 것을 모의 실험을 통해 확인한다. 이를 통해 나노급으로 보다 정밀한 제어가 가능함을 확인하였다.

Key Words : Probe Storage, SDS, AFM, Decoupling, Decoupler

1. 서 론

기존 저장 장치의 데이터 저장 밀도가 기하급수적으로 증가하고 있지만, 저장 밀도를 높이는 데 한계에 부딪혔다[1]. 기존의 저장 장치의 대표적인 예로는 Hard Disk Drive (HDD)와 같은 자기 저장 장치와 Optical Disk Drive (ODD)와 같은 광디스크, Dynamic Random Access Memory (DRAM)와 같은 반도체 메모리가 있다. HDD 의 경우 급속도로 저장 밀도가 높아지고 있지만, Superparamagnetic Effect 에 의하여, 저장 밀도를 높이는 데에는 한계가 있다. 이를 극복하기 위하여 Heat Assisted Magnetic Recording (HAMR) 방식과 Patterned Media 방식이 대안으로 떠오르고 있지만, HAMR 방식으로 대체할 새로운 물질 개발에 어려움이 있으며, Patterned

Media 는 가격이 비싸다는 단점이 있다. DRAM 은 빠른 접근 속도를 갖고 있지만, 자기 저장 장치에 비해 단위 용량당 가격이 비싸다는 단점이 있다 [2].

이러한 문제점을 극복하기 위해 최근에는 Scanning Probe Microscope (SPM) 을 이용한 SPM-based Data Storage (SDS) 시스템이 제안되었다. 따라서 SDS 는 자기 저장 장치의 장점인 높은 저장 밀도, 값싼 가격, 그리고 반도체 메모리의 빠른 처리 속도를 갖춘 저장 장치를 구현한 차세대 저장 장치이다. SDS 는 Atomic Force Microscope (AFM) 또는 SPM 방식을 적용한 나노미터 단위의 Cantilever Tip 을 이용하여 미디어에 이미지를 읽고, 쓰고 지울 수 있는 저장 장치이다. 이러한 방식을 사용한 SDS 는 작은 크기로 높은 저장 밀도를 가지며, 비용 또한 저렴하다는 장점을 갖고 있다. SDS System 은 비트 당 크기가 수십 나노미터이기 때문에 1Tbit/in^2 급의 저장 장치를 구현할 수 있다. 또한 병렬로 팁을 배열하여 한 번에 여러 개의 데이터를 읽고, 쓰고, 지우기 때문에 전송 속도를 높일 수 있다[3]-[5]. 하지만, SDS 시스템은 x 축과 y 축에 입력을 각각 인가하여 구동하는 구조로

[†] 한양대학교 전기제어생체공학부

E-mail : echung@hanyang.ac.kr

TEL : (02) 2220-1724

* 한양대학교 전기공학부

** 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과

*** LG전자기술원 소재재료연구소 MS 그룹

논문접수일 (2007년 1월 13일)

축간 coupling dynamics 영향이 존재한다. SDS 는 수 나노미터 단위로 정밀하게 tracking 이 이루어져야 하기 때문에, 이러한 영향을 제거할 필요가 있다. 따라서 적합한 decoupling method 를 적용하여 이를 제거하여야 한다. 이를 위하여 몇 가지 방법들이 고려되어왔다. [3]에서는 coupling dynamics 를 disturbance 로 간주하여 LQG 제어기를 통하여 제거하였다. 또한 [5]에서는 disturbance 로 간주한 coupling dynamics 를 H^∞ 제어기를 통하여 제거하였다.

본 논문에서는, SDS stage 모델링을 하고, 모델링한 전달함수를 이용하여 극점배치법과 Luenberger Observer 기법을 적용하여 이산 제어기를 설계한다. 또한, coupling 요소를 제거하기 위하여 Feedforward Decoupler 를 설계한다. 모의 실험을 한 결과 Feedforward Decoupler 를 적용함으로써 coupling 요소가 무시할 수 있을 정도로 제거됨을 확인하였다.

2. SDS stage 모델링

2.1 SDS stage 모델링

SDS stage 는 2-inputs-2-outputs 의 Double Input Double Output(DIDO) 시스템이다. SDS stage 의 주파수 특성을 측정하여 그림 1 의 실선으로 나타내고, 점선은 모델링 한 전달 함수를 보드 선도를 통해 나타낸 것이다. 모델링을 위하여 Dynamic Signal Analyzer(DSA, 35560A, HP 사)와 Laser Doppler Vibrometer(LDV, OFV 3001, OFV 512, Polytec 사)를 통해 측정하였다.

본 논문에서는 공진점의 주파수와 Maximum Value of Magnitude(M_p)값을 식(1)에 대입하여 SDS 시스템을 x 축 dynamics, yx coupling dynamics(y 축에 입력을 인가하였을 때 y 축에 끼치는 영향), xy coupling dynamics(x 축에 입력을 인가하였을 때 y 축에 끼치는 영향), y 축 dynamics 를 각각 2 차로 식 (2)와 같이 모델링 하였다. DSA 와 LDV 를 이용하여 측정한 실험 결과와 모델링 결과는 전체적으로 유사한 형태를 보인다.

$$M_p = -20 \log 2\zeta \text{ (dB)} \quad (1)$$

$$T(s) = \frac{Kw_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (2)$$

여기서 K 는 이득, ζ 은 감쇠비, w_n 은 고유

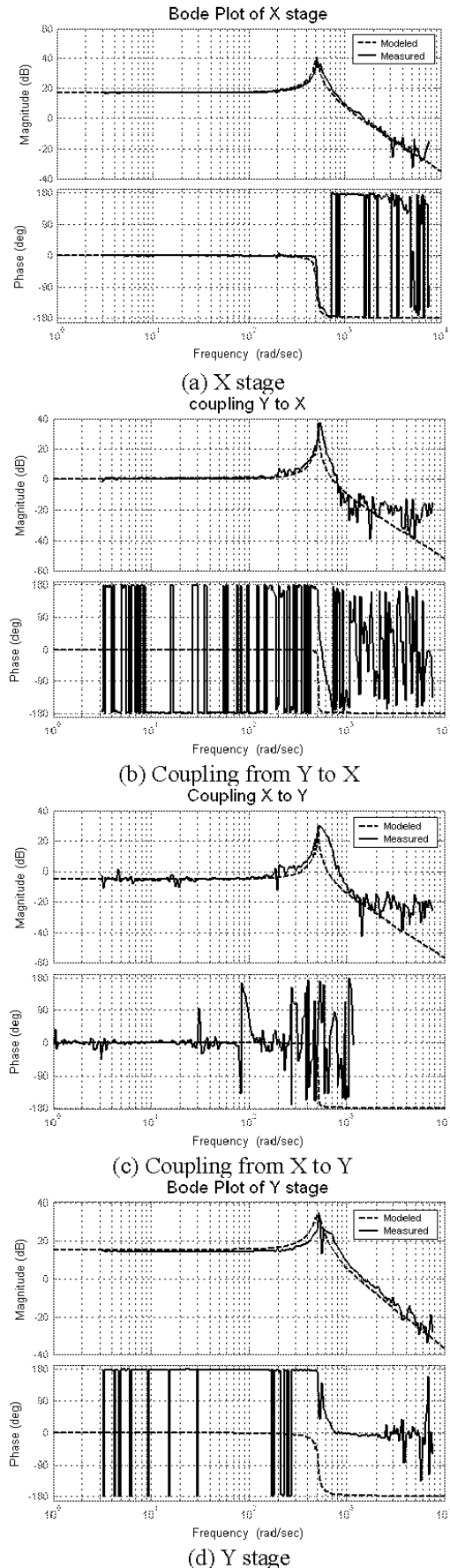


Fig. 1 SDS stage 의 보드 선도

Table 1 전달함수의 상수

	K	ζ	w_n
$T_x(s)$	7.079	0.003597	508.94
$T_{yx}(s)$	1.000	0.006295	508.94
$T_{xy}(s)$	0.5624	0.008891	508.94
$T_y(s)$	5.624	0.05	508.94

주파수이며 이를 통해 구한 $T(s)$ 를 전달함수라 하며, Table 1 에 각각 4 가지 전달함수의 상수를 표시하였다. 각각 Stage 에 대하여, $u_x(k)$ 는 x 축 입력, $u_y(k)$ 는 y 축 입력, $y_x(k)$ 는 x 축 전압 출력, $y_y(k)$ 는 y 축 전압 출력, $T_x(s)$ 는 x 축의 전달함수, $T_{yx}(s)$ 는 yx coupling 전달함수, $T_{xy}(s)$ 는 xy coupling 전달함수, $T_y(s)$ 는 y 축의 전달함수를 나타낸다.

2.2 SDS stage 의 상태 공간 모델링

2.2.1 상태 공간 모델링

식 (2)에서 모델링한 전달 함수를 가지고 상태 공간으로 변경한다. 4 가지 전달함수에 대하여 식 (2)의 형태로 상태 공간 모델로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Fx(k) + Gu(k) \\ y(k) &= Hx(k) + Ju(k) \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 $x(k) \in \mathbb{R}^4$, $u(k) \in \mathbb{R}^2$, $y(k) \in \mathbb{R}^2$ 이며, F 는 시스템 행렬, G 는 입력 행렬, H 는 출력 행렬, J 는 순방향 이득 행렬이고, 각각의 내부 행렬들은 다음과 같다.

$$F = \begin{bmatrix} F_x & F_{yx} \\ F_{xy} & F_y \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} G_x & G_{yx} \\ G_{xy} & G_y \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} H_x & H_{yx} \\ H_{xy} & H_y \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} J_x & J_{yx} \\ J_{xy} & J_y \end{bmatrix}$$

본 논문에서 Feedback 제어기는 coupling dynamics 를 고려하지 않고, 각 축의 제어기를 독립적으로 설계한다. F_m, G_m, H_m, J_m 은 이를 적용한 행렬을 나타낸다.

$$F_m = \begin{bmatrix} F_x & 0 \\ 0 & F_y \end{bmatrix}, G_m = \begin{bmatrix} G_x & 0 \\ 0 & G_y \end{bmatrix}$$

$$H_m = \begin{bmatrix} H_x & 0 \\ 0 & H_y \end{bmatrix}, J_m = \begin{bmatrix} J_x & 0 \\ 0 & J_y \end{bmatrix}$$

2.2.2 이산 시간 상태 공간 모델링

연속시간 영역 모델을 이산 시간 영역 모델로 변화시키기 위해 ZOH(zero order hold) approximation 을 사용했다. 이는 LTI System 에서 효율적으로 변환할 수 있다. 식 (4)를 이산 시간 모델로 나타내면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Phi x(k) + \Gamma u(k) \\ y(k) &= Hx(k) + Ju(k) \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, Φ 는 상태변환 행렬, Γ 는 이산 시간 입력 행렬이라 하며, 식 (5)와 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \Phi &= e^{F_m T} \\ \Gamma &= \int_0^T e^{F_m \eta} G_m d\eta \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 T 는 샘플링 시간이다[5].

3. 제어기 설계

3.1 제어기 목표

원하는 시스템의 사양을 만족하는 제어기를 설계하기 위해 극점배치법을 적용하여 제어기를 설계한다. Observer 를 사용하여 모든 상태 변수를 추정한다. 또한 Reference Input Tracking 을 위하여 Feedforward 요소를 추가하였다. 이러한 제어기는 coupling 요소를 무시한 채 설계하기 때문에, 이에 대한 보상이 필요하다. 이러한 제어기에 Feedforward Decoupler 를 설계하여 coupling 요소에 대한 보상을 고려하여 제어기를 Fig.2 와 같이 설계한다.

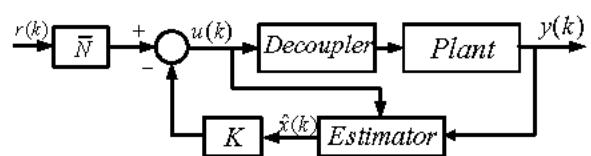


Fig. 2 SDS 시스템의 구성

3.2 제어기 설계

시스템의 이산 시간 영역 모델 (5)에서, 극점 배치법에 의하여, $u(k)$ 는 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$u(k) = -K\hat{x}(k) + r(k) \tag{6}$$

모든 상태 변수가 측정 가능하지 않기 때문에 Current Estimator 를 사용하여 측정 불가능한 상태 변수를 추정한다.

$$\hat{x}(k) = \bar{x}(k) + L_c[y(k) - H\bar{x}(k)] \tag{7}$$

$$\bar{x}(k) = \Phi\hat{x}(k-1) + \Gamma u(k-1) \tag{8}$$

여기서, $\hat{x}(k) \in \mathbb{R}^4$ 는 현재 측정 값인 $y(k)$ 에서 Current Estimate 값을 나타내며, $\bar{x}(k) \in \mathbb{R}^4$ 는 이전 상태의 추정된 모델을 이용하여 추정한 값이다.

이를 통해 Estimator Error 의 방정식을 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$\tilde{x}(k+1) = [\Phi - \Phi L_c H] \tilde{x}(k) \tag{9}$$

여기서, $\tilde{x}(k) \in \mathbb{R}^4$ (추정 에러 값)은 식 (10)과 같다.

$$\tilde{x}(k) = \bar{x}(k) - x(k) \tag{10}$$

Reference Input 이 인가될 때, 이를 정상 상태에서 error 없이 Tracking 하기 위하여 Reference Input tracking 방법을 추가한다. Reference Tracking 은 $y(k) = r(k)$, 즉 reference 값이 출력과 동일한 조건을 만족하는 feedforward 요소, N_x, N_u 를 식 (11)을 만족하도록 정하는 것이다.

$$\begin{bmatrix} \Phi - I & \Gamma \\ H_v & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \tag{11}$$

Feedforward factor 를 식 (11)로부터 만들어 식

(12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{N} = N_u + KN_x \tag{12}$$

따라서 극점배치법에 의하여 새로운 식은 다음 식 (13)과 동일하다.

$$\begin{aligned} u(k) &= -K(\hat{x}(k) - x_v(k)) + N_u r(k) \\ &= -K\hat{x}(k) + \bar{N}r(k) \end{aligned} \tag{13}$$

Plant 와 Estimator 의 Augmented 시스템의 특성은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x(k+1) \\ \hat{x}(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \Phi & -\Gamma K \\ L_c H \Phi & \Phi - \Gamma K - L_c H \Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \hat{x}(k) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \Gamma \bar{N} \\ \Gamma \bar{N} + L_c H \Gamma \bar{N} \end{bmatrix} r(k) \\ y(k) &= \begin{bmatrix} H & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \hat{x}(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{14}$$

3.3 Feedforward Decoupler 설계

Feedforward Decoupling 이란 Fig.3 에서 $T_{xy}(s)$, $T_{yx}(s)$ 에 의하여 $y_x(k)$, $y_y(k)$ 가 영향을 받지 않는 것을 의미하며 [7], 본 논문은 SDS stage 입력 앞 단에 Feedforward Decoupler 를 설계하여 coupling 현상을 최소화하였다. Fig.3 은 Feedforward Decoupler 를 Feedforward Term 으로 stage 앞에 넣어준 것이다. SDS stage 가 decoupling 이 되기 위해서는, Fig.3 의 구조에서 식(15)를 만족해야 한다.

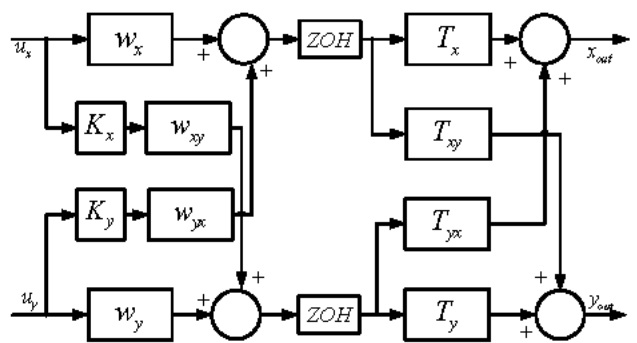


Fig. 3 Feed Forward Decoupling

$$y(k) = T_m(s) \cdot u(k) \quad (15)$$

여기서, $T_m(s)$ 는 다음과 같다.

$$T_m(s) = \begin{bmatrix} T_x(s) & 0 \\ 0 & T_y(s) \end{bmatrix}$$

이를 통해 식 (15)를 만족시키는 $W(s)$ 를 구하면 식 (16)와 동일하다.

$$W(s) = T^{-1}(s) \cdot T_m(s) \quad (16)$$

여기서, $W(s)$ 는 Fig.3 에서 다음과 같다.

$$W(s) = \begin{bmatrix} w_x(s) & w_{yx}(s) \\ w_{xy}(s) & w_y(s) \end{bmatrix}$$

전달함수 행렬 $T(s)$ 가 non-minimum-phase 시스템일 경우, $W(s)$ 가 unstable 시스템이 될 수 있다. 이러한 경우에는 $T_m(s)$ 를 선정할 때, Right-Half Plane(RHP) zero 를 포함하여, internal stability 를 보장할 수 있다[7].

식 (16)을 통해 $W(s)$ 각각의 요소를 구하면 식 (17)과 동일하다.

$$W(s) = \frac{1}{T_x(s) \cdot T_y(s) - T_{yx}(s) \cdot T_{xy}(s)} \times \begin{bmatrix} T_x(s) \cdot T_y(s) & -T_{yx}(s) \cdot T_y(s) \\ -T_x(s) \cdot T_{xy}(s) & T_x(s) \cdot T_y(s) \end{bmatrix} \quad (17)$$

식 (17)에 의해 구한 식은 z-transform 에 의한 수치 에러 값이 발생하기 때문에, control factor K_x , K_y 의 값을 구하여 제어기를 설계하였다.

4. 모의 실험 결과

4.1 모의 실험 환경

SDS Stage 모의 실험을 위하여 Matlab, Simulink 를 사용하였으며, C-code 를 이용한 S-function 을 이용하였다. ADC, DAC 는 16bit 를 사용하였다. 제안된 기법을 이용하여 x 축은 Step Response, y 축은 Ramp Response 의 경우 모의 실험을 하였다. Step Response 를 살펴보기 위해서는 100nm 의 움직임을 의미하는 200mV 를 인가하였으며, 이는 한 트랙이 움직임을 의미한다.

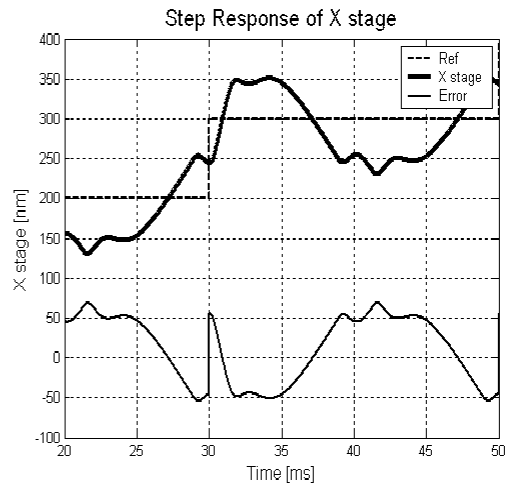
또한 y 축의 경우에는 Ramp Response 를 인가하였는데, peak to peak 값은 -8~8V 이며, 이는 80bits 를 스캔 한 것을 의미한다. 또한 x 축이 한 트랙을 이동하는 동안 y 축은 변화를 주지 않게 하기 위하여 사다리꼴의 파형을 인가하였다. Reference tracking 은 한 비트의 크기가 100nm 이기 때문에, 5% 이내의 error 값, 즉 5 nm 이내여야 하며, 이는 10mV 를 의미한다.

4.2 Tracking 성능 모의 실험

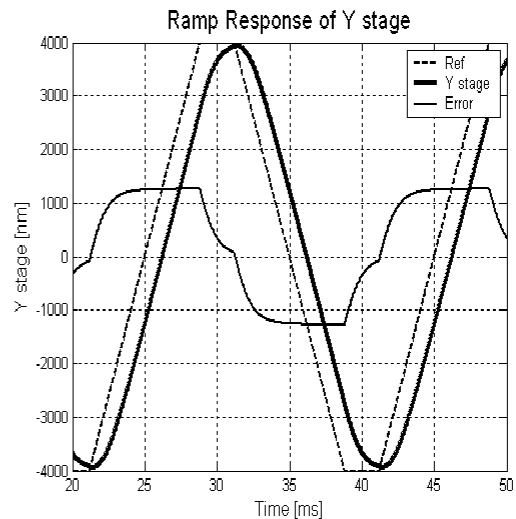
4.2.1 Feedforward Decoupler 를 적용하지 않은 제어기 모의 실험

Fig.4 는 Feedforward Decoupler 를 적용하지 않은 제어기의 tracking 의 성능 모의 실험이다.

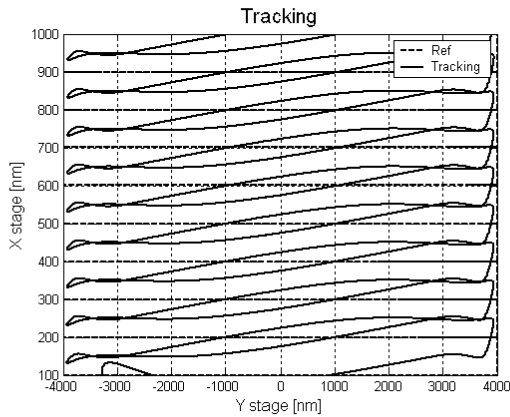
전체적으로 reference tracking 이 x 축의 한 행을



(a) X stage의 Step Response

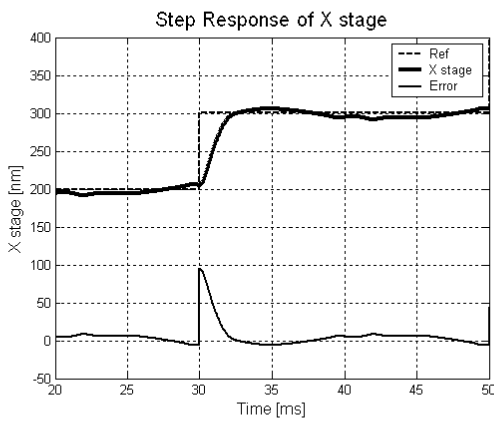


(b) Y stage의 Ramp Response

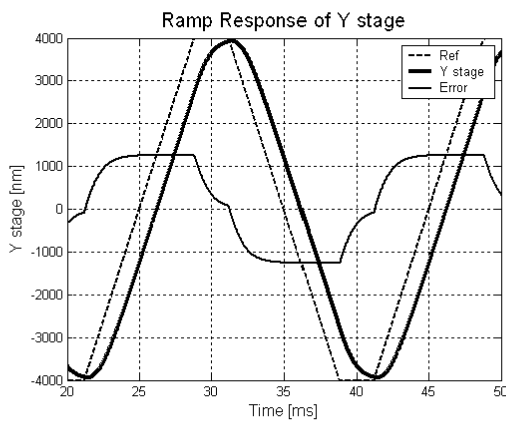


(c) Reference Tracking

Fig. 4 Feedforward Decoupler 를 적용하지 않은 제어기의 Tracking 성능 모의 실험

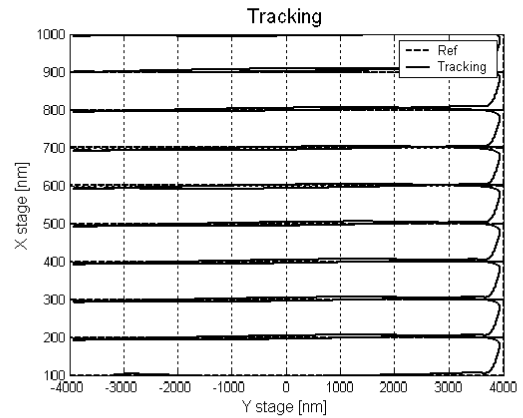


(a) X stage의 Step Response



(b) Y stage의 Ramp Response

움직이기 위한 필요 전압 값에 비하여, y축의 80bits를 스캔 하기 위한 전압 값이 크다. 이로 인하여 yx coupling값이 상대적으로 크게 되고, 이는 200mV의 resolution을 갖는 x축의 큰 영향을 주게 된다.



(c) Reference Tracking

Fig. 5 Feedforward Decoupler 를 적용한 제어기의 Tracking 성능 모의 실험

또한 tracking 이 되고 있으나, track 을 50%이상 벗어나는 구간이 발생하므로 정확한 위치 제어가 불가능할 뿐만 아니라, 다른 열의 비트를 오인할 수 있는 가능성을 가지고 있다.

4.2.2 Feedforward Decoupler 를 적용한 제어기 모의 실험

Fig.5 는 Feedforward Decoupler 를 적용한 제어기의 tracking 의 성능 모의 실험이다. 전체적으로 reference 와 유사하게 tracking 이 되고 있음을 확인할 수 있다. Feedforward Decoupler 에 의하여 yx coupling 값이 현저히 줄어들어서, 계단파 응답이 5nm 오차 범위 내에서 reference tracking 이 이루어짐을 알 수 있다. 이는 10nm 이내의 오차 범위를 갖는 tracking 을 만족하므로, 제안한 Feedforward Decoupler 의 성능을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문은 SDS stage 를 극점 배치법과 current estimator 를 이용하여 제어기를 설계하였다. 또한 MIMO 시스템이기 때문에, 이로 인해 발생하는 coupling 요소를 줄여주는 기법을 제안한다. Feedforward Decoupler 를 통하여 coupling 이 영향을 주는 만큼 SDS stage 의 x 축, y 축 입력을 변화시켜서 coupling 요소를 제거할 수 있으며, 모의 실험을 통해 step response, ramp response 각각의 경우 나온 성능을 보임을 확인하였다. 또한 tracking 의 성능 모의 실험을 통해 실제 tracking 과 유사한 환경에서 모의 실험 결과를 비교하였다. 이 때 Feedforward Decoupler 를 적용한 제어기는 reference 를 tracking 오차없이 coupling 요소가 제거됨을 확인할 수 있었다. 따라서 실제 SDS 시스템에 적용

이 용이하며, 특히 track 의 이동이 클 경우 coupling 요소에 대한 영향이 커지는데 이에 대한 보상을 별도의 추가 비용 없이 동일한 제어기를 통해 처리할 수 있다.

Acknowledgement

This work is supported by “The program for the Development of the Next Generation Ultra-High Density Storage” of the Ministry of Commerce, Industry and Energy.

참고문헌

- [1] E. Eleftheriou, T. Antonakopoulos, G. K. Binnig, G. Cherubini, M. Despont, et al., 2003, “Millipede-A MEMS-Based Scanning-Probe Data-Storage System,” *Magnetics. IEEE Transactions on*, Vol.39, pp.938-945.
- [2] E. M. Kurtas, M. F. Erden and X. Yang, 2005, “Future Read Channel Technologies and Challenges for High Density Data Storage Applications,” *ICASSP*, Vol.5, pp. 737-740, March.
- [3] A. Sebastian, A. Pantazi, G. Cherubini, E. Eleftheriou, M. A. Lantz, et al., 2005, “Nanopositioning for Probe Storage”, *American Control Conference*, pp. 4181-4186.
- [4] A. Pantazi, M. A. Lantz, G. Cherubini, H. Pozidis, and E. Eleftheriou, 2004, “A servomechanism for a micro-electro-mechanical-system-based scanning-probe data storage device,” *Nanotechnology*, pp.612–621.
- [5] A. Pantazi, A. Sebastian, H. Pozidis and E. Eleftheriou, 2005, “Two-sensor-based H_∞ control for nanopositioning in probe storage”, *Conference on Decision and Control and European Control Conference* pp.1174-1179.
- [6] G. F. Franklin, J. D. Powell, M. Workman, 1998 , “Digital Control of Dynamic Systems, 3rd Edition,” Addison-Wesley..
- [7] P. Albertos and A. Sala, 2004, “Multivariable Control Systems,” Springer.