

셀프 서보 라이팅을 위한 상태공간 외란 관측기 기반의 제어기 설계

정연성*, 강현재*, 이충우**, 정정주***, 조규남****, 서상민****, 오동호****
 한양대학교 전기공학과*, 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과**, 한양대학교 전기제어생체공학부***, 삼성전자 스토리지 사업부****

State space disturbance observer based controller design for self servo writing

Youn Sung Jung*, Hyun Jae Kang*, Choong Woo Lee**, Chung Choo Chung***, Kyu Nam Cho****, Sang Min Suh****, Dong Ho Oh****
 Department of Electrical Engineering, Hanyang University*, Division of Electrical and Computer Engineering, Hanyang University**,
 Division of Electrical and Biomedical Engineering, Hanyang University***, Servo Group, Storage System Division Semiconductor
 Business Samsung Electronics Co., Ltd.****

Abstract - Self servo track writing(SSTW)은 servo track writer(STW)를 이용하지 않고 hard disk drive의 내부 VCM을 이용하여 servo track을 기록하는 방식이다. SSTW는 이전 servo track을 상대적인 reference로 하여 기록하게 되므로 초기에 발생된 error와 외부의 disturbance의 영향으로 error는 급속하게 증가된다. 이것을 radial error propagation 이라 한다. 본 논문에서는 radial error propagation을 억제하기 위한 correction signal을 설계하고 servo writing 과정에서 발생하는 disturbance의 영향을 제거하기 위하여 disturbance observer(DOB)를 add-on type으로 구성하여 tracking 제어기를 설계하였다. 또한 DOB를 적용한 경우와 유사한 gain margin, phase margin과 sensitivity function을 갖는 제어기를 설계하여 그 성능을 비교하였다. 제안된 방식은 radial error propagation을 억제 하였을 뿐만 아니라 disturbance의 최소화하여 쓰여진 track의 DC track spacing과 AC track squeeze가 개선된 것을 모의실험을 통하여 검증하였다.

1. 서 론

최근 hard disk drive(HDD)의 track에 고밀도화로 인하여 기존의 servo track writer(STW)를 이용하는 방법은 servo track을 쓰는데 많은 시간이 소비 된다. 또한 clean room과 STW 장비에 대한 비용 문제도 무시할 수 없다. 이러한 문제를 개선하기 위하여 STW를 사용하지 않고 HDD 내부의 voice coil motor(VCM) actuator와 head를 이용하여 servo 정보를 쓰는 self servo track writing(SSTW) 방식이 이미 제안 되었다[1][2].

SSTW는 seed track을 제외하고는 servo loop에 대한 절대 위치인 reference signal이 존재하지 않는다. 따라서 이전 servo track을 상대적인 reference로 하여 기록하게 되므로 error가 radial 방향으로 증가되는 radial error propagation 문제가 발생하게 된다[3]. Radial error propagation을 억제 하는 간단한 방법은 회전하는 disk의 runout 주파수에서 closed loop 응답의 magnitude를 1보다 작게 설계하는 것이다. 하지만 제어기의 낮은 bandwidth 때문에 disturbance rejection 능력이 떨어지게 된다[3]. 일반적으로 쓰이는 방식은 반복적인 runout을 추정하여 다음 track을 writing 할때 runout을 제거하는 방식이다. 하지만 RRO를 추정하기 위하여 추가로 디스크의 회전이 요구되기 때문에 시간적인 손실이 발생한다. 그 외에 vibration 및 disturbance modeling을 바탕으로 linear matrix inequalities(LMI) approach를 통한 mixed H_2/H_∞ feedback 제어기와 feedforward 제어기 설계 방법이 제안 되었다[4]. feedforward signal을 더해 주어 에러의 증가를 막는 방법을 제안하고 실험으로 검증하였다[5].

또한 disturbance의 영향을 최소화 하기 위해 disturbance observer(DOB)를 설계하는 방법들이 제안 되어 왔다. 일반적인 DOB는 Ohnishi에 의하여 처음 제안된 것으로 그 성능은 Q필터로 불리는 저역 통과 필터의 차수에 의존되며 강인성은 저역 통과 필터의 상대 차수와 분모 차수에 따라 결정 된다[6]. 이것과 다른 방식의 DOB로 add-on 타입의 방법이 제안 되었다[7]. 이 방법은 현재 상태 추정기의 출력과 측정된 출력의 차이를 disturbance라고 가정한다.

본 논문에서는 radial error propagation을 억제하기 위하여 correction signal을 설계 하고 disturbance의 영향을 제거하기 위하여 DOB를 add-on 타입으로 설계 하였다. 또한 DOB를 적용한 경우와 유사한 gain margin, phase margin과 sensitivity를 갖는 제어기를 설계하여 DOB를 적용한 경우와 비교하였다. 제안된 방식은 radial error propagation을 억제 하였을 뿐만 아니라 기존의 correction signal만을 적용하였을 경우보다 servo writing 과정에서 발생할 수 있는 disturbance를 제거하여 DC track spacing, AC track squeeze가 줄어드는 것을 모의실험을 통해 검증 하였다.

2. 본 론

2.1 Disturbance observer(DOB) 설계

LQG 제어기에 DOB를 적용한 시스템의 구조는 그림 1과 같다. DOB의

$$H(z) = \sum_{i=0}^l \beta_i z^{-i} \quad (1)$$

전달함수는 식(1)과 같으며 β_i 는 DOB의 이득이다. 추정된 출력 $\hat{y}(t)$ 와 출력 $y(t)$ 의 차이 $\bar{e}(t)$ 가 DOB의 입력이 되며, 그것의 출력이 제어기의 출력

$-K\bar{x}(t)$ 에 더해지는 add-on형태로 구성하였다. 이 때, 전체 제어 입력 $u(t)$ 는 식(2)와 같다.

$$u(t) = -K\bar{x}(t) - \sum_{i=0}^l \beta_i [y(t-i) - \hat{y}(t-i)] \quad (2)$$

식(2)의 DOB의 이득 β_i 에 의해 제어기 dynamics는 변화된다[7]. 그림 2는 sensitivity function을 나타내며 저주파 영역의 sensitivity function이 DOB에 의해 낮아진 것을 볼 수 있으며 waterbed effect 효과로 고주파 영역에서 sensitivity가 높아진 것을 볼 수 있다. DOB를 설계할 때는 이러한 점을 고려하여 고주파 영역의 sensitivity가 허용할 수 있는 크기를 갖도록 설계하여야 한다[7].

2.2 Correction signal 설계

본 절에서는 radial error propagation을 억제하기 위한 correction signal 설계에 대하여 기술한다. 이것은 참고 문헌 [3]의 내용을 요약한 것이다. 그림 3은 voice coil motor(VCM)와 DOB가 포함된 제어기로 구성된 servo loop 블록도 이다. w_k 는 suspension windage와 flex bias disturbance를 나타내고 d_k 는 스프링들의 non-repetitive runout(NRRO)과 disk flutter, n_k 는 sensor noise를 나타낸다. Radial error propagation을 억제하기 위해 position error signal(PES)에 더해지는 correction signal은 c_k 이다. 그림 3의 reference track y_k 에서 PES e_k 까지 전달함수는 sensitivity function이고 correction signal c_k 에서 PES e_k 까지 전달함수는 동일한 sensitivity function이 된다. 그러므로 그림 3의 block diagram은 그림 4의 block diagram으로 동일하게 표현 된다. Sensitivity function의 state space model은 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_k(t+1) &= A_s x_k(t) + B_s \{c_k(t) + y_k(t) - n_k(t) + \zeta_k(t)\} \\ e_k(t) &= C_s x_k(t) + D_s \{c_k(t) + y_k(t) - n_k(t) + \zeta_k(t)\} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\zeta_k = Pw_k + d_k$ 이고 P 는 plant이다.

$$e_k = H_s (y_k + c_k - n_k + \zeta_k) + \Gamma_s x_k(0) \quad (4)$$

iterative leaning control(ILC) 방법 따라서 식(4)와 같이 e_k 에 대한 식을 얻을 수 있다. 식 (4)에서 $x_k(0)$ 는 다음 track의 burst를 쓰기 시작할 시점에 sensitivity function의 초기 상태이다.

$$H_s = \begin{bmatrix} D_s & 0 & \dots & 0 \\ C_s B_s & D_s & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ C_s A_s^{N-2} B_s & \dots & C_s B_s & D_s \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\Gamma_s = [C_s^T \quad (C_s A_s)^T \quad \dots \quad (C_s A_s^{N-1})^T]^T \quad (6)$$

H_s, Γ_s 는 식 (5), (6)과 같이 표현되고 self servo writing 과정의 dynamics는 식(7)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} y_{k+1} \\ c_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I - H_s & I - H_s \\ -MH_s & MH_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_k \\ c_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_s & -(I - H_s) \\ MH_s & -MH_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_k \\ n_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\Gamma_s \\ MT_s \end{bmatrix} x_k(0) \quad (7)$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} I - H_s & I - H_s \\ MH_s & MH_s \end{bmatrix} \in R^{2N \times 2N} \quad (8)$$

식 (7)로부터 radial error propagation 억제 할 수 있는 M 을 구해야 한다.

$$M = \begin{bmatrix} \alpha_0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \alpha_0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_0 & \alpha_1 & \ddots & \alpha_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \alpha_2 \\ \alpha_2 & \alpha_3 & 0 & \dots & \vdots & \ddots & \alpha_1 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \dots & 0 & 0 & \alpha_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

식(8)에서 \bar{A} 에 해당된 M 은 radial error propagation을 억제하기 위하여 eigenvalue들이 unit circle안에 위치하도록 결정하면 된다. 본 논문에서는 안정화된 M 을 simulation을 바탕으로 식(9)의 toeplitz structure로 얻을 수 있다.

$$c_{k+1}(t) = \alpha_0 e_k(t) + \alpha_1 e_k(t+1)_{N-1} + \alpha_2 e_k(t+2)_{N-1} + \alpha_3 e_k(t+3)_{N-1} \quad 0 \leq t \leq N-1 \quad (10)$$

식 (10)에서 $\alpha_i, i = 0, \dots, 3$ 이며 적당한 constant를 갖는다. Correction signal은 $c_k = M e_{k+1}$ 구하며 식 (10)로 표현된다.

2.3 모의실험 결과

본 논문에서는 SSTW의 구성을 MATLAB/Simulink 를 이용하여 제안된 제어기를 설계하였다. Simulation에 사용한 disk drive의 parameter는 disk drive size 3.5 inch이며 disk 회전수는 7200 rpm, 섹터 수는 200, sampling time은 41.67 μ s 이다. 모의실험을 위한 TMR source는 suspension windage, flex bias, disk flutter와 spindle NRRO를 포함하고 있다. Sensor noise는 white noise 이며 트랙의 0.52%의 표준편차 갖도록 하였으며 seed track은 3.4%의 표준편차를 갖도록 하였다.

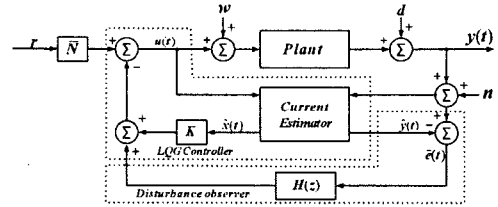
본 논문에서는 DOB의 성능을 검증하기 위하여 LQG1과 DOB를 함께 적용한 경우와 유사한 gain margin, phase margin과 sensitivity function을 갖는 LQG2를 그림 2와 같이 설계하여 그 성능을 비교하였다. 그림 5와 그림 6은 LQG1, LQG2, LQG1+DOB 각각의 제어기에 correction signal을 적용하고 20 track까지의 servo track writing을 진행한 후의 PES의 FFT 결과와 10000 track까지 servo track writing을 진행한 후의 쓰여진 track의 DC track spacing 과 AC track squeeze의 히스토그램을 나타낸다. 그림 5에서 LQG1에 비해 LQG1과 DOB를 적용한 경우 저주파 영역에서 disturbance를 제거하여 PES의 크기가 줄어든 것을 볼 수 있다. 또한 LQG2의 경우 보다 LQG1에 DOB를 적용한 경우가 disturbance의 제거 영향으로 저주파 영역의 PES 크기가 LQG2에 비교하여 상대적으로 낮게 나타난 것을 볼 수 있다. LQG2와 같이 제어기만으로 sensitivity를 낮추어 저주파 disturbance를 제거할 수 있지만 reference 입력에 대한 과도응답 특성이 떨어지게 된다[8]. 하지만 two degree of freedom 제어기인 DOB는 과도응답의 영향을 주지 않고 disturbance 제거 할 수 있다[7]. 그림 6에서 (a)는 DC track spacing을 히스토그램을 나타낸 것이며 (b)는 AC track squeeze를 히스토그램으로 나타낸 것이다. DC track spacing은 두 개의 인접하게 쓰여진 track의 평균값의 차이를 이상적인 경우 100이라고 정의한다. AC track squeeze는 두 개의 인접한 트랙에서 각 sector별 track spacing의 최소값을 의미한다. 그림 6의 (a)에서 DC track spacing은 LQG1과 DOB를 적용한 경우가 disturbance 제거로 인하여 가장 많이 개선되었으며 그림 6의 (b)에서 AC track squeeze는 correction signal만 적용한 경우의 LQG1은 평균 91.6%이며 LQG2는 평균 92.5%, LQG1에 DOB를 적용한 경우 평균 93.7%로 가장 많은 개선을 보이는 것을 모의실험을 통하여 검증 하였다.

3. 결 론

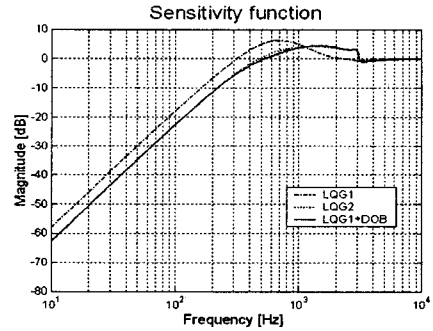
본 논문에서는 self servo writing시 발생하는 radial error propagation을 억제하기 위하여 correction signal을 설계하고 servo writing시 발생하는 disturbance를 최소화 하기 위하여 DOB 설계하였다. 또한 DOB의 성능을 검증하기 위하여 DOB를 적용한 경우와 유사한 gain margin, phase margin,과 sensitivity를 갖는 제어기를 설계하여 그 성능을 비교하였다. 제안된 방식은 disturbance의 제거로 인하여 DC track spacing과 AC track squeeze가 개선된 것을 모의실험을 통하여 확인하였다.

[참 고 문 헌]

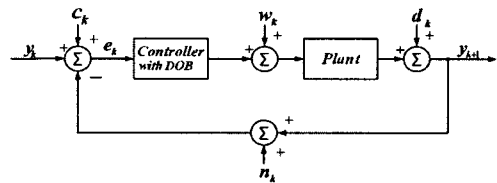
- [1] E. J. Yarmchuk, M. D. Schultz, B. C. Webb, and T. J. Chainer, "Radial self-propagation pattern generation for disk file servo writing," U.S. Patent 5 907 447, 1999.
- [2] D. F. Cribbs, M. L. Ellenberger, and J. W. Hassler Jr, "Self-servo writing disk drive and method," U.S. Patent 5 448 429, 1995
- [3] H. Melkote, R. J. McNab, "Modeling and control for self-servowriting in hard disk drive: a repetitive process approach," *American Control Conference*, pp. 2005-2010, June 2006.
- [4] C. Du, J. Zhang, and G. Guo, "Vibration Modeling and Control Design for Self-Servo Track Writing," Data Storage Institute, Singapore, Tech. Rep., ISSN 0218-4877, 2002.
- [5] H. Ye, V. Sng, C. Du, J. Zhang, G. Guo, "Radial error propagation issues in self-servo track writing technology," *IEEE Transactions on Magnetics*, 38, 2180-2182, 2002.
- [6] S. H. Lee, "Design and Analysis Dual Disturbance Observer of Optical Disk Drive System," unpublished, 2006.
- [7] S. -M. Suh, C. C. Chung and S. -H. Lee, "Discrete-time track following Controller design using a state-space disturbance observer," *Microsystem Technologies*, Vol. 9, No. 5, pp. 352-361, 2002.
- [8] S. Skogestad, I. Postlethwaite, "Multivariable Feedback Control Analysis and Design Jhon Wiley & Sons." 1996.



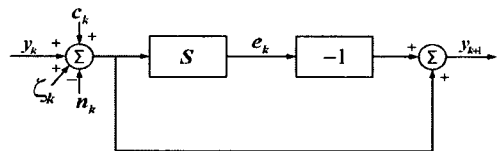
<그림 1> Close loop system with DOB



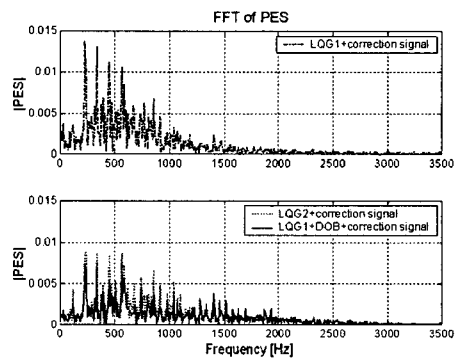
<그림 2> Sensitivity function



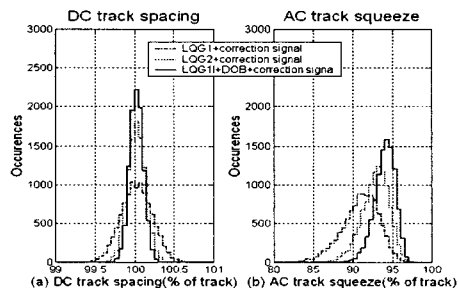
<그림 3> Block diagram of system self-servowrite



<그림 4> Equivalent block diagram of system



<그림 5> FFT of PES



<그림 6> DC track spacing and AC track squeeze