

HDD 액츄에이터를 위한 관측기 기반하의 견실 제어기 설계[†]

Observer-based Robust Controller Design for HDD Actuator

신동균*, 변지영**, 유관호***

(Dong-Kun Shin, Ji-Young Byun, Kwan-Ho You)

Abstract – The sliding mode control law provides a robust solution for general control problems. Most real systems which use a portable hard disk drive have to overcome disturbances and model uncertainties for proper operation. The chattering effect caused from unexpected oscillation can make the system be unstable. Therefore, we propose a robust control algorithm for the nonlinear second order systems with model uncertainties and disturbances. The proposed algorithm is designed following a sliding mode and observer based control. Thus the proposed algorithm has more expanded bounded region of control. Simulation results show the robustness of the proposed controller.

Key Words : discrete sliding-mode control, nonlinear systems, hard disk drive, robust actuator.

1. 서 론

현대 정보화 사회에서 고품질의 멀티미디어 자료의 수요 및 공급이 기하급수적으로 증가함에 따라, 대용량 데이터 저장장치인 HDD(hard disk drive)의 저장 밀도 또한 증가되어야만 한다. 하드디스크의 저장 밀도가 커질수록 트랙 밀도는 조밀해지므로 데이터를 읽고 쓰는 헤드의 위치를 보다 정밀하게 제어할 수 있어야만 한다. 따라서 이런 알고리즘을 설계하는 것이 핵심기술이 되었다. 지금까지 탐색시간 단축을 위하여 최적시간 제어기 (time optimal controller)가 가장 널리 사용되어 왔다[1]~[2]. 그러나 최적시간 제어기를 사용하면, 헤드가 목표 트랙으로 근접하였을 경우, 제어기는 제어입력의 급격한 변화에 의한 헤드의 떨림 현상(chattering effect)으로, 헤드가 목표 트랙의 정중앙 주위에서 떨게 된다. 그러므로 대상 시스템의 강인성을 높이기 위해 슬라이딩 모드 제어 (sliding mode control: SMC)가 연구되었다[3].

슬라이딩 모드 제어는 대부분 연속 시간 시스템에 근거하여 설계되어 왔으나, 실제 공학 시스템에 적용할 때 필연적으로 샘플링 과정을 수반하므로 이산시간 슬라이딩 모드 제어에 대한 연구가 필요하게 되었다[4]~[5]. 그러나 슬라이딩 모드 제어 역시 시스템의 상태가 슬라이딩 평면을 따라 움직일 때 떨림 현상이 발생하게 된다. 그러므로 본 논문에서는 이런 단점을 보완하기 위해, 슬라이딩 평면에 이웃하는 경계층을 두어 떨림 현상을 줄이고, 동시에 샘플링 과정

저자 소개

* 신동균 : 成均館大學 情報通信工學部 碩士課程

** 변지영 : 成均館大學 情報通信工學部 碩士課程

***유관호 : 成均館大學 情報通信工學部 助教授 · 工博

†본 연구는 한국과학재단 목적기초 연구(R05-2003-000-12262-0) 지원으로 수행되었음.

에서 발생할 수 있는 불확실성을 고려하여 관측기 기반하의 이산 시간 슬라이딩 모드제어기를 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 관측기 기반하의 이산 슬라이딩 모드(observer based discrete sliding mode)에 관하여 살펴보았다. 3장에서는 제안된 알고리즘을 HDD 모델링에 적용한 시뮬레이션 결과를 보였으며, 마지막으로 4장에서는 논문의 결론에 대해 간단히 정리하였다.

2. 관측기 기반하의 이산시간 슬라이딩 모드 제어

이산 시간 SISO(single input single output) 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\y(k) &= Cx(k)\end{aligned}\quad (1)$$

(A, B) 는 가제어성(controllable)을 가지고, (A, C) 는 가관측성(observable)을 가진다고 가정한다. 시스템의 상태를 예측, 추정하기 위해 칼만 필터(kalman filter)를 관측기 (observer)로 사용하므로, 시스템은 아래와 같은 추정된 상태값을 가진다.

$$\hat{x}(k) = (A - HC)\hat{x}(k-1) + Bu(k-1) + Hy(k-1) \quad (2)$$

여기서 $\hat{x}(k)$ 는 $x(k)$ 에 대한 상태 추정치이고, H 는 칼만 필터 이득이다[6].

다음으로 아래와 같이 상태 추적 오차 값과 슬라이딩 평면을 정의한다.

$$\tilde{x}(k) = x_d(k) - \hat{x}(k) \quad (3)$$

$$s(k) = G\tilde{x}(k) \quad (4)$$

$x_d(k)$ 는 목표하는 상태 궤적이고, G 는 슬라이딩 평면을 정의하는 열벡터이다. 이산 시간 시스템에서 슬라이딩 모드 존재 조건은 다음과 같다.

$$|s_i(k+1)| < |s_i(k)|, i = 1, 2, \dots \quad (5)$$

식 (5)으로부터 유도되는 슬라이딩 모드 제어 입력은 다음과 같다[7].

$$u(k) = (GB)^{-1}[G((I-A)\hat{x}(k+\Delta x_d)) + K_{sat}(s(k)/\phi)]^{-1}$$

$$\Delta x_d(k) = x_d(k+1) - x_d(k)$$

$$sat(s(k)/\phi) = \begin{cases} 1, & \text{if } s > \phi \\ s/\phi, & \text{if } |s| \leq \phi \\ -1, & \text{if } s < -\phi \end{cases} \quad (6)$$

여기에서 K 는 슬라이딩 이득, ϕ 는 경계층(boundary layer)의 두께를 나타낸다.

또한, 위의 식 (1)-(6)으로부터 아래의 식을 유도해 낼 수 있다.

$$z(k+1) = (A - HC)z(k) \quad (7)$$

$$\tilde{x}(k+1) = [A - BG(GB)^{-1}(A - I)\tilde{x}(k)]$$

$$- B(GB)^{-1}[K_{sat}(s(k)/\phi)$$

$$+ G(I - A)z(k)]$$

$$s(k+1) = s(k) - K_{sat}(s(k)/\phi) \quad (9)$$

식 (7)에서 $z(k)$ 는 측정 오차로, $z(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ 로 정의된다. 여기서 슬라이딩 평면 G 의 열벡터가 가져야 할 안정성 조건은 다음과 같다.

조건 1) 식 (7)로부터 슬라이딩 평면 G 는 $A - BG(A - I)/GB$ 의 고유치들이 단위원(unit circle)의 내부에 존재하도록 결정되어야 한다.

그리고 식 (3)의 상태 추적 오차 값이 슬라이딩 평면 경계 층 내부에 존재할 경우 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$sat(s(k)/\phi) = \frac{s(k)}{\phi} = \frac{1}{\phi}G\tilde{x}(k) \quad (10)$$

그러므로 식 (8)은 다음과 같이 다시 표현된다.

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k+1) &= [A - BG[A - (1 - K/\phi)I]/GB]\tilde{x}(k) \\ &+ (I - BG/GB)(x_d(k+1) - Ax_d(k)) \quad (11) \\ &- HCz(k) \end{aligned}$$

여기서 우리는 조건 1과는 형태가 조금 다른 슬라이딩 평면 G 를 구하는 조건을 얻을 수 있다.

조건 2) 식 (11)로부터 슬라이딩 평면 G 는 $A - BG/GB[A - (1 - K/\phi)I]$ 의 고유치들이 단위원(unit circle)의 내부에 존재하도록 결정되어야 한다.

위의 조건에 따르는 슬라이딩 평면 G 를 결정하기 위해, 고유치 배치문제를 풀어본다[8]. 식 (1)의 주어진 이산 시간 시스템 행렬 (A, B) 가 가체어성을 가진다고 가정하고, 식 (12)를 만족시키는 직교 행렬 T 를 다음과 같이 정의한다.

$$T^{-1}B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

시스템의 행렬 A 를 표준형(canonical form)으로 변환하기 위해, $x = Tw$ 로 상태천이를 적용하면 아래의 식 (13)으로 표현된다.

$$w(k+1) = T^{-1}ATw(k) + T^{-1}Bu(k) \quad (13)$$

그리고 식 (13)은 다시 아래의 식 (14)로 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} w_1(k+1) \\ w_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1(k) \\ w_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}u(k) \quad (14)$$

그러므로 식 (4)에서 정의한 슬라이딩 평면은 $s(k) = GTw(k)$ 가 되므로, 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$s(k) = [G_{1T} \mid G_{2T}] \begin{bmatrix} w_1(k) \\ w_2(k) \end{bmatrix} \quad (15)$$

만약 실제로 슬라이딩이 일어나게 되면, 상태 w_1 과 관계된 서브시스템의 상태방정식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} w_1(k+1) &= A_{11}w_1(k) + A_{12}w_2(k) \quad (16) \\ w_2(k) &= -G_{2T}^{-1}G_{1T}w_1(k) \end{aligned}$$

여기서 우리는 상태 w_1 이 실제 제어 입력 u 의 영향을 받지 않는다는 것과 서브시스템에서 w_2 에 의해 상태 되먹임 시스템(constant state feedback system)이라는 것을 알 수 있다. 그러므로 $w_2(k) = -Fw_1(k)$, $F = G_{2T}^{-1}G_{1T}$ 로 표현하는 것이 가능하다. $G_{2T} = 1$ 이라고 가정한다. 그러므로 슬라이딩 평면 G 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} GT &= [F \mid 1] \\ G &= [F \mid 1] T^{-1} \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 F 는 Ackermann's formula 방법을 이용하여, $(A_{11} - A_{12}F)$ 가 원하는 고유치를 가질 수 있도록 선택되어진다[9].

3. 시뮬레이션

일반적으로 HDD의 VCM모델은 다음과 같은 이차적분기 모델(double integrator model)로 표현될 수 있다.

$$\frac{y(s)}{i_c(s)} = \frac{k_y k_v}{s^2} \quad (18)$$

여기서 y 는 헤드의 위치를 의미하며, i_c 는 VCM에 인가되는 전류를 나타낸다. 그리고 k_y 는 위치측정이득 (position measurement gain)이고, k_v 는 가속 상수 (acceleration constant)를 의미한다. 다음은 이산 시간 제어기 설계를 위해 식 (18)을 이산 시간 시스템 모델로 변환한다.

$$\begin{bmatrix} y(k+1) \\ v(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & k_v T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_e(k) \\ v(K) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_v k_v T^2 / 2 \\ k_v T \end{bmatrix} u(k) \quad (19)$$

여기서 v 는 헤드의 속도, u 는 제어 입력으로 $|u(k)| \leq U_{\max}$ 이다. U_{\max} 는 보이스 코일 모터 (VCM: voice coil motor)에 인가되는 최대 전류이고, T 는 샘플링 주기이다. 그리고 식(19)의 변환관계를 이용하여, 본 논문에서 적용할 HDD 시스템 모델 (20)을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \tilde{y} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -(k_v T / 2) \\ 0 & 1/k_v T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_e \\ v \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}(k+1) \\ \tilde{v}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & k_y k_v T^2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{y}(k) \\ \tilde{v}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (20)$$

제안된 HDD 엑추에이터의 성능을 평가하기 위해, 아래 표의 HDD 파라미터를 사용하여 모의실험을 하였다.

표 1. 하드디스크 파라미터.

Track Pitch		$0.8 \mu m$
Sampling period	T	$66.7 ms$
Maximum current	U_{\max}	$4.0 A$
Acceleration coefficient	K_v	$100 ms^{-2} A^{-1}$
Measurement gain	K_y	$1 250 000 track m^{-1}$
High-Order resonance mode	w_1	$4.1 kHz$

HDD 시스템 모델 식 (20)에 제안된 제어기를 사용하였을 때 우리가 목표 트랙에 안정적으로 찾아가는 가를 모의실험하였다. 이 때 제어 입력에 랜덤 노이즈(random noise)를 부여함으로 HDD 시스템에 많은 스트레스를 부여하였다.

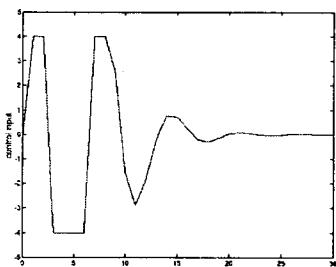


그림 1. 제어입력 변화.

그림 1에서는 교란 신호가 존재하는 조건하에서 제어입력을 나타내었으며 헤드가 목표트랙으로 이동하기 시작할 때 큰 제어입력이 인가되고 헤드가 목표트랙에 위치한 후에는 무작위 잡음이 존재하는 조건에서도 거의 일정한 제어 입력 값이 유지됨을 보여주고 있다.

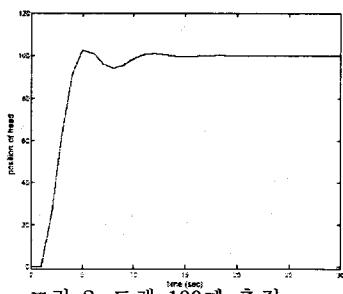


그림 2. 트랙 100ms 추적.

그림 2는 랜덤 노이즈가 존재하는 조건하에서 제어 입력이 인가되었을 때 헤드가 목표했던 100번 트랙으로 이동하는 동안의 헤드 위치를 나타내었다. 헤드가 멀림 현상 없이 목표 트랙 100번에 정확히 위치함을 알 수 있다.

4. 결 론

오늘날 HDD의 저장 밀도가 점차 증가함에 따라 트랙 밀도 또한 급속히 증가하고 있다. 그러므로 보다 정밀하고 견실한 트랙 추종 제어기가 요구되고 있다. 따라서 본 논문에서는 HDD 헤드의 위치 제어에 관한 슬라이딩 모드 제어 알고리즘을 제안하였다. 일반적인 슬라이딩 모드 제어는 시스템의 상태가 슬라이딩 평면을 따라 움직일 때 발생하는 멀림 현상이라는 단점을 가지므로 제어기의 안정성 및 견실성을 보장하기 어렵다. 그러므로 견실한 HDD 헤드 위치 제어를 위한 관측기 기반의 슬라이딩 모드 제어 알고리즘이 제안되었다. 모의실험 결과를 통해 노이즈 환경 하에서 제안된 제어기를 사용하면, 제어기의 멀림 현상이 제거될 뿐만 아니라 HDD 헤드는 정확히 목표 트랙을 추종함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Lewis F.L. and Syrmos V.L., Optimal Control, Wiley, N. Y., 1995.
- [2] Bell D.J. and Jacobson D.H., Singular Optimal Control Problem, Academic Press, London, 1975.
- [3] Slotine J.J. and Sastry S.S., "Tracking control of non-linear systems using sliding surface, with application to robot manipulators," Int. J. Control, vol. 38, no. 2, pp. 465-492, 1983.
- [4] Hanz R, "Hyperplane Design in observer Based Discrete-Time Sliding Mode Control" Oklahoma State University Press, Oklahoma, 1997.
- [5] Furuta, K. "Sliding Mode Control of a Discrete System", System & Control Letters, Vol 14, pp. 145-52, 1990.
- [6] Saab, S.S. "Discrete-Time Kalman filter under incorrect noise covariances", American Control Conference, Vol.2, pp.1152-1156, 1995.
- [7] Utkin, V.I. Sliding Modes in Control Optimization, Springer-Verlag, N. Y. 1992.
- [8] Zinober, A. "An Introduction to Sliding Mode Variable Structure Control", in Variable Structure and lyapunov Control, pp.1-22, Springer-Verlag, London, 1994.
- [9] Ackermann, Utkin,V.I. "Sliding mode contro design based on Ackermann's formula", Automatic Control, IEEE Transactions on, Volume: 43, pp.234-237, Issue: 2, 1998.