

슬라이딩 모드 제어를 이용한 HDD 하이브리드 제어기 설계 및 안정성 평가

論 文

53D-10-1

Design and Stability Test of a HDD Hybrid Controller Using Sliding-Mode Control

卞 智 暎* · 郭 成 祐** · 劉 寬 鎬†

(Ji-Young Byun · Sung-Woo Kwak · Kwan-Ho You)

Abstract - This paper presents the design of a new controller for the read/write head of a hard disk drive. The general controller for seeking is the time-optimal control. However if we use only the time optimal control law, this could be vulnerable to chattering effect. To solve this problem, we propose a modified controller design algorithm in this paper. The proposed controller consists of bang-bang control for seeking and sliding-mode control for tracking. Moreover, to test the robustness and stability of control system, a bounded disturbance is selected to maximize a severity index. Simulation results show the superiority of the proposed controller through comparison with time optimal VSC(variable structure control).

Key Words : HDD (hard disk drive), VCM Actuator, Bang-Bang Control, Sliding-Mode Control

1. 서 론

현대 정보화 사회에서 정보의 수요 및 공급이 기하급수적으로 증가함에 따라, 대용량의 데이터 저장장치인 하드디스크 드라이브(HDD: hard disk drive)의 저장 밀도도 꾸준히 증가하고 있다. 그리고 사용자들은 HDD에 저장하는 데이터의 양이 많아질수록 더 빠른 속도를 요구하고 있다. 그러므로 HDD에 데이터를 읽고 쓰기 위한 헤드의 위치제어 문제가 HDD 작동의 핵심기술이라고 할 수 있다. HDD에서 헤드의 위치 제어는 트랙탐색제어(track seek control)와 트랙추종제어(track following control)로 나눌 수 있다. 트랙탐색제어란 데이터를 읽거나 쓰기 위하여 헤드를 현재 트랙에서 원하는 목표 트랙으로 가능한 빠른 시간 내에 이동시키는 것을 말하고, 트랙추종제어는 외부의 교란이 존재하더라도 헤드가 항상 목표 트랙의 정중앙에서 동작하도록 하는 것을 의미한다. HDD의 전체적인 데이터 처리속도를 향상시키기 위해서, 헤드의 탐색시간 단축은 아주 중요하다. 또한 HDD의 소형화, 대용량화의 기술적 추세에 따라 저장 밀도가 증가하면서 트랙밀도도 함께 증가하게 되므로, Read/Write 헤드 위치의 정밀도에 대한 중요도가 점차 높아지고 있다.

일반적으로 탐색시간 단축을 위하여 최적시간 제어기(time optimal controller)가 널리 사용되어 왔다 [1]-[2].

1974년에 Oswald에 의하여 뱅뱅 제어를 이용한 HDD의 탐색제어 알고리즘 [5]이 연구된 이후로 다양한 최적 시간 제어알고리즘이 연구되었다 [6]-[7]. 그러나 최적시간 제어를 사용하게 되면, 헤드가 목표 트랙으로 근접하였을 경우, 제어기는 전류의 급격한 변화로 인하여 헤드의 떨림 현상(chattering effect)을 발생시키므로, 헤드가 목표 트랙의 정중앙에서 동작하기 어렵게 만든다. 그러므로 고밀도의 하드 디스크에 적용이 불가능하다. 최적시간 제어의 문제점을 해결하기 위해 1987년에 Workman은 PTOS (proximate time optimal servomechanism) 알고리즘 [3]-[4]을 제안하였다. PTOS 알고리즘은 제어기의 제어 성능과 견실성사이의 관계를 조절할 수 있는 파라메타를 사용하여 제어 입력의 포화를 방지함으로써, 견실성을 보장한다. 그러나 교란신호(disturbance) 및 잡음(noise)의 영향이 큰 경우, 또는 시스템 모델링 과정에서 발생하는 모델 불확실성(model uncertainty)이 존재하는 시스템에 따라 파라메타 값을 변경해야 하므로 정확하고 신속한 위치 제어가 어려워진다. 제어기의 견실성을 높이기 위해 가변구조제어이론(variable structure control)이 연구되었고, Weerasooriya는 PTOS와 가변구조제어를 기반으로 한 슬라이딩 모드 제어를 결합한 형태의 HDD 제어를 제안하였다 [8].

제안된 제어기는 헤드의 떨림 현상을 최소화하기 위하여 최적시간 제어(time optimal control)와 슬라이딩 모드 제어(sliding-mode control)가 결합된 형태로 사용된다. 먼저, 최적시간 제어를 사용하여 최단 시간 내에 헤드를 목표 트랙 근처로 이동시킨다. 그리고 singular solution을 슬라이딩 면으로 사용하는 슬라이딩 모드 제어를 사용하여 떨림 효과를 최소화하고, 헤드를 목표 트랙의 정중앙에서 정확히 동작하게 한다. 또한 본 논문에서는 제안된 제어기의 안정성 및 견실성을 테스트하기 위해, 최적시간 제어의 반대 개념인

* 學生會員 : 成均館大學校 電氣電子工學部 碩士

** 正 會 員 : 鷄鳴大學校 電子工學科 專任講師 · 工博

† 교신저자, 正會員 : 成均館大學校 情報通信工學部 助教授 · 工博

E-mail : khyou@ece.skku.ac.k

接受日字 : 2004年 1月 13日

最終完了 : 2004年 4月 12日

최대시간 교란신호 (time maximum disturbance)를 설정한다 [12]. 이런 최대시간 교란 신호를 HDD 시스템의 입력에 추가시켜 모의실험을 하였으며, 결과를 통해 제안된 제어기가 우수한 성능을 가짐을 증명한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 최적시간 제어와 슬라이딩 모드 제어에 관하여 설명하고, 논문에서 제안한 HDD 제어기 설계에 대하여 살펴본다. 3장에서는 제안된 제어기의 성능을 테스트하기 위해, 최대시간 교란신호의 합성에 관해 설명한다. 4장에서는 제안된 알고리즘을 사용한 모의실험 결과를 보여주며, 마지막으로 5장에서는 논문의 결론에 대해 간단히 정리하였다.

2. HDD 제어기 설계

2.1 HDD 시스템 모델

HDD는 데이터를 읽고 쓰기 위한 자기 디스크, 디스크 회전용 스피들 모터, 헤드 위치 조절을 위한 보이시 코일 모터 (VCM: voice coil motor)와 헤드 장치로 구성되어 있다. 대부분의 HDD의 서보 시스템에서는 헤드의 위치를 조절하기 위해, VCM을 사용하여 rotary 액추에이터를 구동시킨다. VCM은 전자장 안에 놓여 있는 voice 코일로 구성되어 있으며, 이 코일을 통하여 전류가 흐를 때 생성되는 전자기력에 의해서 구동된다. 일반적으로 HDD의 모델은 아래와 같은 이차 적분기 모델 (double integrator model)로 표현할 수 있다 [3].

$$\frac{y(s)}{i(s)} = \frac{k_y k_v}{s^2} \quad (1)$$

여기서 y 는 헤드의 위치를 의미하며, i 는 VCM에 인가되는 전류를 나타낸다. 또한 k_y 는 위치 측정이득 (position measurement gain)이고, k_v 는 가속 상수 (acceleration constant)를 의미한다.

본 논문에서 사용하는 HDD 모델 (1)은 다음과 같은 상태 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k_y \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_v \end{bmatrix} u \quad (2)$$

여기서, $[x_1, x_2]^T \equiv [y_e, v]^T$ 로 정의한다. y_e 는 헤드의 위치 오차로써 $y_e = y - y_r$ 이며, y_r 은 목표 트랙 위치를 나타낸다. v 는 헤드의 속도를 나타내며, u 는 제어 입력으로 $|u| \leq u_{sat}$ 로 가정한다. u_{sat} 는 VCM에 인가되는 최대 전류이다.

2.2 최적 시간 제어기 설계

탐색시간 단축을 위하여 가장 효과적으로 사용될 수 있는 제어기는 일반적으로 최적시간 제어를 이용하여 설계할 수 있다. 최적시간 제어기에서 제어 입력은 시스템의 초기 상

태에서 최소 시간 내에 원하는 상태로 시스템 상태 변수를 움직이게 한다. 제어 입력의 크기가 정해져 있을 경우, 하나의 구간 내에서 아래의 비용함수를 최소로 하는 제어 입력을 구하는 것이 뱅뱅 제어 (bang-bang control)의 원리이다 [1]-[3].

$$J_1 = \min \int_0^{t_f} dt \quad (3)$$

뱅뱅 제어기에서 시스템의 상태 변수 값에 따라 제어 입력은 $+u_{sat}$ 또는 $-u_{sat}$ 의 값을 나타낸다. 제어 입력 $u(t)$ 값의 부호가 바뀌는 스위칭 시간을 찾기 위해서 아래와 같이 해밀토니안 (Hamiltonian)을 정의한다.

$$H_1(x, \eta, u) = 1 + \eta_1 k_y x_2 + \eta_2 k_v u \quad (4)$$

여기서 η_1 과 η_2 는 라그랑지 승수 (Lagrange multiplier)이다. Pontryagin의 최대치 원리 (maximum principle) [1], [12]로 부터 뱅뱅 제어기의 제어 입력은 아래와 같이 표현된다.

$$u^* = -u_{sat} \operatorname{sgn}(\eta_2^*) \quad (5)$$

u^* 는 비용함수를 최소로 유지하면서 즉, 최소시간으로 헤드를 목표 트랙으로 도달하게 한다. 여기서, $\eta_2^*(t) \equiv 0$ 이 되면 제어 입력의 스위칭 현상이 발생하는데 이 함수를 스위치 곡선 (switch curve)이라 한다. 시스템의 상태가 스위치 곡선 상에 도달하게 되면, 시스템의 상태 변수는 이 곡선을 따라 목표점으로 빠르게 수렴하게 된다. 아래의 그림 1은 주어진 시스템의 스위치 곡선과 등시곡선 (isochrones)을 보여준다.

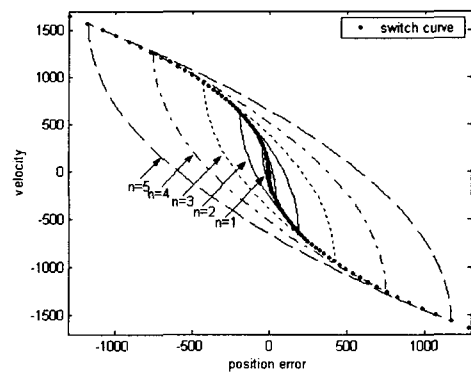


그림 1 스위치 곡선과 등시곡선, $T=0.1n$ 초, $n=0, 1, \dots$.
Fig. 1 Switch curve and isochrones, $T=0.1n$ sec, $n=0, 1, \dots$.

동일한 등시곡선위에 존재하는 시스템의 상태 변수들은 같은 소요 시간을 가지고 평형점인 원점에 도달한다. 예를 들면, 등시곡선 $T(x_1, x_2) = t = 0.1n$ (초)로 나타낼 수 있

다. 위의 그림 1에서, $n = 5$ 일 경우 $T(x_1, x_2) = 0.5$ (초)는 가장 바깥쪽 곡선이 된다. 이 곡선 상에 시스템의 상태 변수가 놓여 있다면, 곡선 위의 초기 위치에 관계없이 상태 변수가 원점까지 움직이는 데 소요되는 시간은 모두 0.5초로 동일한 시간이 걸림을 의미한다.

그러나 헤드가 목표 트랙 근처에 도달하게 되면, 목표트랙으로 정확히 수렴하지 않고 그 주위에서 진동하는 현상이 발생한다. 이것이 제어 입력의 빠른 변화로 인하여 발생하는 헤드의 떨림 현상(chattering effect)이다. 이런 상태는 singular condition과 관련이 있으며, 더 이상 뱅뱅 제어가 트랙추종 제어기로 사용될 수 없음을 의미한다. 이런 떨림 현상을 최소화하기 위해 본 논문에서는 singular condition을 이용한 슬라이딩 모드 제어를 사용한다.

2.3. 슬라이딩 모드 제어기 설계

최적시간 제어를 사용하여 HDD의 헤드가 목표트랙으로 근접함에 따라 발생하는 떨림 현상을 제거하기 위해, 본 논문에서는 목표트랙 근처에서 슬라이딩 모드 제어기를 사용한다. 슬라이딩 모드 제어기는 미리 정의되어 있는 슬라이딩 표면, $s(x_1, x_2) = 0$ 을 따라서 시스템의 상태변수를 움직이게 한다 [13]-[15]. 슬라이딩 모드 제어기가 singular condition에서 사용되므로, singular condition에서 구한 해를 이용하여 슬라이딩 면을 정의하고 슬라이딩 모드 제어기를 설계한다. 목표 트랙 근처에서는 HDD의 헤드가 원하는 트랙을 따라 계속해서 움직이어야 하며, 따라서 시스템 상태변수의 목표점인 평형점 주위에서 다음과 같이 비용함수를 재설정하여 헤드의 떨림 현상을 최소화하도록 한다.

$$J_2 = \min \frac{1}{2} \int_0^{t_f} (x_1^2 + x_2^2) dt \quad (6)$$

변경된 비용함수 J_2 의 해밀토니안 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H_2(x, \eta, u) &= \frac{1}{2} x_1^2 + \frac{1}{2} x_2^2 + \eta_1 k_y x_2 + \eta_2 k_x u \\ &= u\Phi(x, \eta) + \Psi(x, \eta) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $\Phi(x, \eta) = \eta_2 k_x$, $\Psi(x, \eta) = \frac{1}{2} x_1^2 + \frac{1}{2} x_2^2 + \eta_1 k_y x_2$

이다. 이 때 사용되는 보조방정식(adjoint system equation)은 아래와 같다.

$$\dot{\eta}_1 = -\frac{\partial H_2}{\partial x_1} = -x_1 \quad (8)$$

$$\dot{\eta}_2 = -\frac{\partial H_2}{\partial x_2} = -x_2 - k_y \eta_1 \quad (9)$$

앞 절에서 언급한 singular condition은 $\Phi(x, \eta) = 0$ 에서 발생한다. Transversality condition으로부터 아래의 시스템 상태 변수 사이의 관계를 유도해 낼 수 있다 [9]-[10].

$\Phi = \dot{\Phi} = \ddot{\Phi} = 0$, $\Psi = \dot{\Psi} = \ddot{\Psi} = 0$ 이므로, 식 (7)로부터 $\Phi = 0$ 이면 $\eta_2 = 0$ 이 되고, $\dot{\Phi} = 0$ 이면 $\dot{\eta}_2 = 0$ 가 성립한다.

그러므로 식 (9)로부터 $\eta_1 = -\frac{1}{k_y} x_2$ 가 된다. 마지막으로,

$\Psi = 0$ 이면 식 (7)에서 $\frac{1}{2} x_1^2 + \frac{1}{2} x_2^2 + \eta_1 k_y x_2 = 0$ 이 되므로, 상태 변수 x_1, x_2 사이의 관계는 아래와 같이 나타난다.

$$x_1^2 - x_2^2 = 0 \quad (10)$$

위 식은 $x_1 - x_2 = 0$, $x_1 + x_2 = 0$ 인 2개의 singular sub-arc를 가지게 된다. $x_1 - x_2 = 0$ 은 시스템을 불안정하게 만들기 때문에, 최적해가 될 수 없다. 그러므로 singular condition에서 최적해는 $x_1 + x_2 = 0$ 이 되고, $\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = 0$ 이 된다. $x_1 + x_2 = 0$ 와 $\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = 0$ 의 조건들을 시스템 상태 방정식 (2)에 대입하여 정리하면, 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$u(t) = \frac{k_y}{k_x} x_1 \quad (11)$$

제어 입력 $u(t)$ 는 $|u| \leq u_{sat}$ 으로 가정하였으므로, 식 (11)은 아래와 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$|x_1| \leq \left| \frac{k_x}{k_y} u_{sat} \right| \quad (12)$$

그러므로 singular surface는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$|x_1| \leq \left| \frac{k_x}{k_y} u_{sat} \right|, x_1 + x_2 = 0 \quad (13)$$

식 (13)의 singular surface를 이용하여 아래와 같이 슬라이딩 표면을 정의한다.

$$s(x_1, x_2) \equiv x_2 + x_1 \quad (14)$$

다음으로, Lyapunov 함수를 $V = \frac{1}{2} s^2$ 라고 둔다. 이를 미분하여 평형점(x_1^*, x_2^*)에 대해 $V(x_1^*, x_2^*) > 0$, $\dot{V}(x_1^*, x_2^*) < 0$ 이면, 시스템은 점근적으로 안정하다고 말할 수 있다. 그러므로, 주어진 HDD 상태 방정식(2)의 안정성을 보장하는 슬라이딩 모드의 제어 입력을 구하기 위하여, Lyapunov 함수를 미분한다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(x_1^*, x_2^*) &= ss \\ &= s[\dot{x}_2 + \dot{x}_1] \\ &= s[k_x u + k_y x_2] \end{aligned} \quad (15)$$

$\dot{V}(x_1^*, x_2^*) < 0$ 을 만족하는 슬라이딩 모드 제어기의 최적 제어 입력은 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$u^* = \frac{k_y}{k_r} x_1 - Y \text{sat}(s, \epsilon) \quad (16)$$

여기서, $Y > 0$, $|\epsilon| \leq \left| \frac{k_c}{k_y} u_{sat} \right|$ 이며, $\text{sat}(s, \epsilon)$ 는 saturation 함수를 의미하며, 제어 입력의 급격한 변화를 방지하기 위하여 사용된다.

$$\text{sat}(s, \epsilon) = \begin{cases} 1, & s > \epsilon \\ s/\epsilon, & -\epsilon \leq s \leq \epsilon \\ -1, & s < -\epsilon \end{cases}$$

2.4. HDD 하이브리드 제어기 설계

제안된 HDD 제어기는 2개의 다른 제어기로 구성되어 있으며, 다음과 같은 2개의 시스템 상태 공간 영역을 가진다. 이 상태 영역을 그려보면 그림 2와 같이 표현된다.

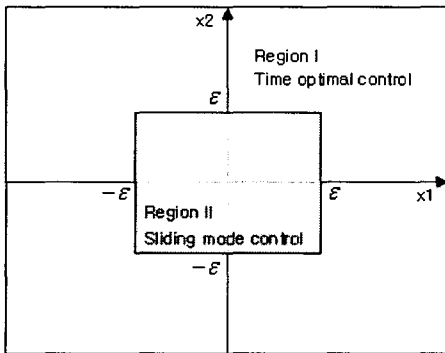


그림 2 상태 공간 영역 정의.
Fig. 2 Definition of state space regions.

상태 공간 영역 I에서는 비용함수 J_1 을 최소화 하는 뱅뱅 제어기를 사용하고, 영역 II에서는 비용함수 J_2 를 최소화 하는 슬라이딩 모드 제어기를 사용한다. 이 영역에서 설계된 슬라이딩 모드 제어기(u^*)를 사용할 경우, 평형점(x_1^*, x_2^*)에 대해 $V(x_1^*, x_2^*) > 0$, $\dot{V}(x_1^*, x_2^*) = -\gamma \text{sat}(s, \epsilon) s < 0$ 를 만족하므로 시스템의 안정성은 보장된다. 이것은 시스템의 상태 변수가 영역 1을 지나 영역 2로 진입한 경우 상태 변수의 궤적은 영역 2에 머물며 평형점(목표 트랙)을 향해 수렴하게 됨을 의미한다. 각 영역에 따라 해당 제어기를 사용함으로써, 최소의 시간으로 시스템의 상태 변수가 목표 트랙으로 도달하게 하고, 목표 트랙 근처에서 발생하는 진동을 제거하여 목표 트랙에 정확히 찾아갈 수 있게 된다.

제안된 제어기는 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$u^* = \begin{cases} \frac{k_y}{k_c} x_1 - Y \text{sat}(s, \epsilon), & \text{for } |x_1|, |x_2| \leq \left| \frac{k_c}{k_y} u_{sat} \right| \\ -u_{sat} \text{sgn}(\eta_2^*), & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

3. 최대시간 교란신호 설계

2장에서 제안된 제어기의 성능을 알아보기 위하여, 시간 지연 기법을 이용한 교란신호 (time maximum disturbance signal)를 제작하고, HDD 시스템에 또 다른 입력신호로 인가하여 제어기의 성능을 평가한다. 최대시간 교란신호 (disturbance)는 평형점에 도달하려는 상태 변수들을 평형점으로부터 멀어지게 하여, 결국에는 발진(oscillation)을 유도하도록 설계되었다. 즉, 최대시간 교란 신호가 시스템에 인가될 경우, 시스템의 상태변수는 가장 나쁜 노이즈 환경 하에서 움직이게 된다. 그러므로 본 논문에서는 최대시간 교란신호를 HDD 시스템의 입력에 추가하여 제안된 제어기의 안정성 및 견실성을 테스트한다. 최대시간 교란신호를 구하기 위해 사용되는 비용함수는, 최소시간 제어에 사용되는 비용함수의 반대되는 개념이므로 아래와 같은 비용함수를 설정한다.

$$J_3 = \max \int_0^t dt \quad (18)$$

HDD 상태 방정식 (3)에 교란신호 (w)를 추가하여 다음과 같은 상태 방정식으로 표현한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k_y \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_r \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ k_d \end{bmatrix} w \quad (19)$$

여기서, w 는 교란신호를 나타내며, $|w| \leq |w_{sat}|$ 로 제한된다고 가정한다. 최대시간 교란신호 (w)를 구하기 위해 아래와 같이 해밀토니안 방정식을 정의한다.

$$H_3(x, \eta, u) = -1 + \eta_1 k_y x_2 + \eta_2 k_r u + k_d w \quad (20)$$

Pontryagin의 최대치 원리로부터 최대시간 교란신호 (w^*)는 다음과 같이 구해진다.

$$w^* = u_{sat} \text{sgn}(\eta_2^*) \quad (21)$$

식 (21)에서 $\eta_2^* \equiv 0$ 이 될 때 최대시간 교란신호의 스위치 곡선이 그려진다. 최소시간 제어의 스위치 곡선은 시간의 역순으로 구해지며, 최대시간 교란신호의 스위치 곡선은 시간의 순방향으로 구하게 된다.

그림 3은 주어진 상태 방정식의 스위치 곡선과 최대시간 교란신호의 스위치 곡선을 나타낸다. 교란신호는 최적제어 이론의 반대의 개념이기 때문에 그림 3과 같이 두 곡선이 반대의 모양으로 나타난다.

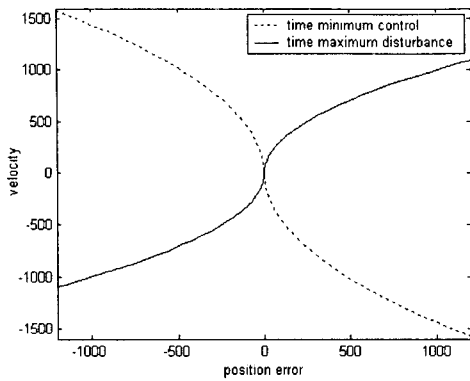


그림 3 최적시간 제어의 스위치 곡선과 최대시간 교란신호의 스위치 곡선.

Fig. 3 Switch curve for time optimal control and time maximum disturbance.

4. 모의실험

제안된 HDD 하이브리드 제어기의 견실성 및 안정성을 평가하기 위해, 아래 표의 HDD 파라미터를 사용하여 모의 실험을 하였다. 최적시간 가변구조 제어기(time optimal VSC)[8]와 제안된 제어기의 성능을 비교함으로써 제안된 제어기의 우수성을 증명한다. 앞 절에서 설계된 최대시간 교란신호를 시스템의 입력에 추가하여, 제안된 제어기와 뱅뱅 제어기의 안정성 및 견실성을 비교한다.

표 1 하드디스크 파라미터.

Table 1 Parameters of the hard disk drive.

Measurement gain	k_y	1174 ($ms^{-1}A^{-1}$)
Acceleration coefficient	k_v	118100 ($track m^{-1}$)
Maximum current	u_{sat}	0.25 (A)
Disturbance coefficient	k_d	50000 ($track m^{-1}$)
Disturbance magnitude	u_{sat}	0.25 (A)
Target track	y_r	100 ($track$)

식 (19)에서 처럼, 제안된 제어기 성능을 알아보기 위해 최대시간 교란신호를 추가하여 모의실험을 하였다. 최대시간 교란신호를 부여함으로써 HDD 시스템에 가장 많은 스트레스를 부여하게 된다. 최적시간제어의 스위치 곡선과 시스템 상태 변수 (y_r, v)의 궤적을 그림 4에 나타내었다. 시스템의 상태변수인 position error (y_r)가 0으로 수렴함을 볼 수 있다.

그림 5는 0번 트랙에서 목표 트랙인 100번 트랙으로 찾아가기 위한 헤드의 위치를 나타낸다. HDD 트랙탐색제어로 제안된 제어기는 뱅뱅 제어기를 사용하고, 최적시간 가변구조 제어기는 PTOS를 사용한다. 두 제어기 모두 트랙 탐색 제어로 최적시간제어기를 사용하고 있으므로, 목표트랙인 100번 트랙으로 찾아가는데 소요되는 시간이 거의 유사함을 알 수 있다.

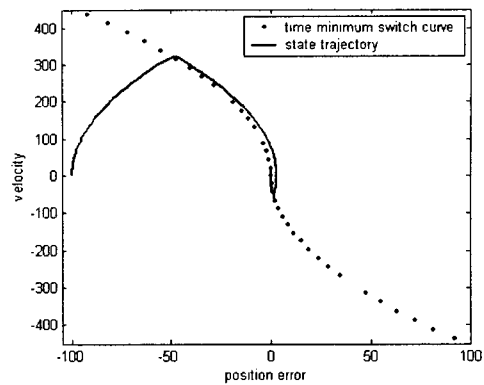


그림 4 상태변수 궤적과 스위치 곡선.

Fig. 4 State trajectory and switch curve.

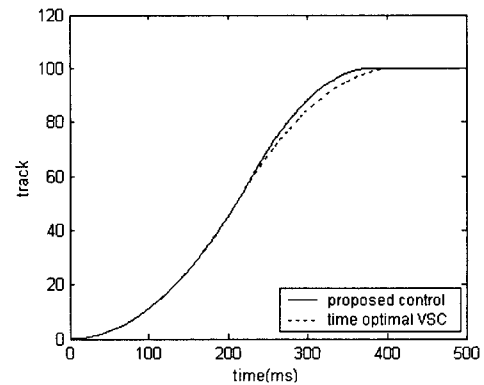


그림 5 100번 트랙 탐색.

Fig. 5 History of 100-track seek.

다만 논문의 주요 관심인 떨림 현상을 살펴보기 위해 100 번째 트랙 주위를 확대하여 살펴보면, 그 차이를 확인할 수 있다. 헤드가 목표 트랙인 100번째 트랙에 도달한 경우, 헤드가 100번 트랙 중앙에서 동작하고 있는지 살펴보기 위해, 그림 5에서 수렴된 부분을 확대하여 그림 6에 나타내었다.

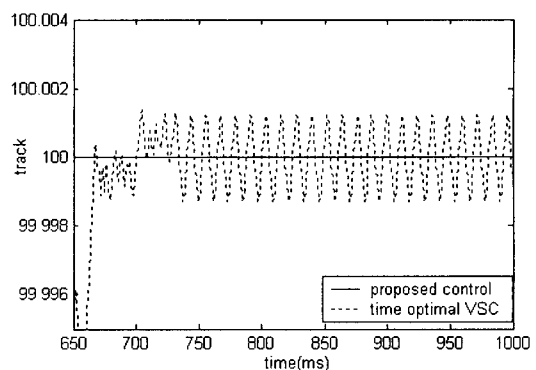


그림 6 100번 트랙추종 비교.

Fig. 6 Comparison of 100-track following mode.

최적시간 가변구조 제어기를 사용하여 헤드의 위치를 제어할 경우, 아래의 그림과 같이 100번 트랙으로 정확히 수렴하지 못하고 100번 트랙 주위에서 심하게 진동하고 있음을 볼 수 있다. 즉, 떨림 현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 그

러나 제안된 제어기를 사용할 경우, 시스템에 최대시간 교란 신호를 인가하여도 헤드는 정확히 100번 트랙을 추종하고 있음을 알 수 있다.

아래의 그림 7은 최적시간 가변구조 제어기와 제안된 제어기의 제어 입력을 비교한 그림이다. 그림에서 보면 시스템에 최대시간 교란신호가 인가된 상황에서, 최적시간 가변구조 제어기의 경우 헤드가 목표 트랙 근처에 도달하였을 때, 제어 입력값의 변화가 나타나게 된다. 그러므로 그림 6에서와 같이 헤드가 목표 트랙을 정확히 추종할 수가 없게 된다. 그러나 제안된 제어기의 경우 헤드가 목표트랙에 근접하게 되면 제어 입력의 값을 서서히 낮추다가, 최종적으로 헤드가 목표 트랙에 도달할 경우 제어 입력값이 0으로 수렴함을 알 수 있다.

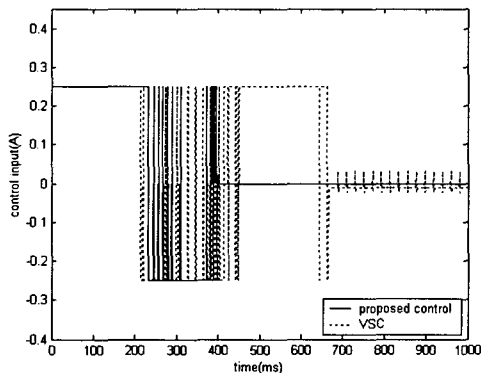


그림 7 제어 입력 비교.

Fig. 7 Comparison of control input.

5. 결 론

HDD 헤드의 정밀 위치 제어는 HDD의 성능을 평가하는데 있어서 중요한 요소이다. 본 논문에서는 HDD 헤드의 위치 제어에 관한 새로운 알고리즘을 제안하였다. 일반적으로 탐색 시간을 줄이기 위하여 최적시간 제어가 가장 성능이 뛰어나지만, 제어입력의 떨림 효과를 발생시키므로 제어기의 안정성 및 견실성을 보장하기 어렵다. HDD의 저장 밀도가 점차 증가함에 따라 트랙 밀도도 증가하므로, 보다 정밀한 트랙 추종 제어가 요구된다. 그러므로 제안된 제어기는 헤드의 탐색시간을 줄이기 위해 탐색 모드에서 최적시간 제어기를 사용하고, 트랙 추종 모드에서는 제어기의 안정성 및 견실성을 보장하기 위해 슬라이딩 모드 제어기를 사용하였다. 최적시간 제어에서 제어기의 떨림 현상이 발생하는 singular condition에서의 최적해를 구한 뒤 이를 슬라이딩 평면으로 이용함으로써 제어기의 떨림 현상을 감소시킨다. 그리고 제안된 제어기의 안정성 및 견실성을 테스트하기 위해, 시스템 성능 테스트 신호를 설계하였다. 테스트 신호로서 사용되는 최대시간 교란신호의 목적은 시스템에 최대의 스트레스를 인가하는 것이다. 모의실험 결과를 통하여 제안된 제어기를 사용하였을 경우, 시스템이 가장 스트레스를 많이 받는 환경에서, 최적시간 가변구조 제어기보다 빠른 탐색 시간을 가지고, 트랙 추종 제어에서는 최적시간 가변구조 제어기보다 훨씬 우수함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R05-2003-000-12262-0) 지원으로 수행되었으며, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] F.L. Lewis and V.L. Syrmos, Optimal Control, Wiley, N. Y., 1995.
- [2] E.B. Lee and L. Markus, Foundations of Optimal Control Theory, Wiley, N. Y., 1967.
- [3] G.F. Franklin, J.D. Powell and M.L. Wrokmán, Digital Control of Dynamic Systems, Addison Wesley, 1990.
- [4] M.L. Wrokmán, Adaptive proximate time-optimal servomechanisms, Ph.D. dissertation, Stanford Univ. CA, 1978.
- [5] R.K. Oswald, "Design of a disk file head-positioning servo," IBM J. Res. Dev., 1974, pp. 506-512.
- [6] K.S. Ananthanarayanan, "Third-order theory and bang-bang control of voice coil actuators," IEEE Trans. Magn., Vol. 18, 1982, pp. 888-892.
- [7] W.N. Patten, H.C. Wu and L. White, "A minimum time seek controller for a disk drive," IEEE Trans. Magn., Vol. 31, 1995, pp. 2380-2387.
- [8] S. Weerasooriya, T.S. Low and A. Al-Mamum, "Design of a time optimal variable structure controller for a disk drive actuator," Proc. of the IECON' 93., vol. 3, 1993, pp. 2161-2165.
- [9] S.A. Dadebo, and K.B. McAuley, "On the computation of optimal singular controls," IEEE Conf. Control Application, 1995, pp. 150-155.
- [10] D.J. Bell and D.H. Jacobson, Singular Optimal Control Problem, Academic Press, London, 1975.
- [11] D. Yu, S. Yu and Z. Liu "An optimal control method for fast valving using maximum principle," IEEE Conf. Computer, Communication, Control and Power Engr., 1993, pp. 155-157.
- [12] K.H. You and E.B. Lee, "Time maximum disturbance design for linear stable systems: a model predictive scheme", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 46, 2001, pp. 1327-1332
- [13] V.I. Utkin, Sliding Modes in Control Optimization, Springer-Verlag, N. Y., 1992.
- [14] Y. Li, "Model reference sliding control of nonlinear system," Proc. 31th IEEE Conf. Decision Contr., 1992, pp. 289-290.
- [15] J.J. Slotine and S.S. Sastry, "Tracking control of non-linear systems using sliding surface, with application to robot manipulators," Int. J. Contr., vol. 38, no. 2, 1983, pp. 465-492.

저 자 소 개



변지영 (卞智暎)

1979년 3월 3일생. 2001년 창원대 전자공학과 졸업. 2003년~현재 성균관 대학원 전자공학과 석사과정

Tel : 031) 290-7984

E-mail : mam1203@skku.edu



유관호 (劉寬鎬)

1970년 2월 24일생. 1993년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공석). 2000년 University of Minnesota 전자공학과 졸업(공박). 2000년~2001년 Texas A&M University-Kingsville 전자공학과 조교수. 2001년~현재 성균관대학교 정보통신공학부 조교수.

Tel : 031-290-7148, Fax : 031-290-7231

E-mail : khyou@ece.skku.ac.k



곽성우 (郭成祐)

1970년 3월 10일생. 1993년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공석). 2000년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공박). 2001년~ 2002년 한국과학기술원 인공위성연구센터 연구 조교수. 2003년~현재 계명대학교 전자공학과 전임강사.

Tel : 053-580-5926, Fax : 053-580-5165

E-mail : ksw@kmu.ac.kr