

XPTOS에 의한 디스크 드라이브 서보메커니즘의 구성시 BESSEL 필터 표준 함수에 근거한 상태피드백이득 결정

한 권희* 이 자성
아주대학교 제어계측공학과

The determination of state feedback gains of XPTOS
for disk drive servomechanism based on BESSEL filter prototype

K. H. Han* J. S. Lee
Dept. of control & Instrumentation Eng. Ajou Univ.

Abstract

This paper presents the method of determining state feedback gains of XPTOS for disk drive servomechanism based on BESSEL filter prototype. A typical disk drive actuator can be modeled as second order dynamics for low frequencies. However, the response at higher frequencies shows resonant behavior which cannot be easily modeled. XPTOS consists of the nonlinear control region and the linear control region. In the linear control region, the poles of a second order nominal model of plant must be properly relocated by pole placement technique to attenuate resonant modes at high frequency and to attain minimum time state transition. It is difficult to select pole position to satisfy this object because velocity feedback gain is subjected to position feedback gain in XPTOS. Here poles of BESSEL filter prototype are selected to determine state feedback gains of XPTOS. Simulation results for disk drive servomechanism using XPTOS having state feedback gains by the proposed method are presented.

1. 서론

디스크 드라이브의 헤드포지셔닝 서보메커니즘은 크게 트랙 탐색 서보와 트랙 추종 서보로서 나누어진다. 디스크 드라이브의 헤드는 트랙 탐색 서보에 의해 현재의 트랙에서 임의의 선택된 트랙으로 이동되고, 트랙 추종 서보에 의해 데이터의 읽기/쓰기 처리 과정이 수행될 때 선택된 트랙의 중심을 계속하여 추종할 수 있도록 제어된다. 트랙 탐색 서보는 헤드가 목표 트랙까지 최단 시간 상태 전이를 할 수 있도록 설계되어야 하고, 위의 목적을 만족시키기 위한 방법으로 시간 최적 제어(Time optimal control: Bang-Bang control)가 선택되어질 수 있다. 뉴턴의 법칙을 따르는 시스템에 대하여 완전한 시간 최적 제어의 해는 이론상으로 유도되어 질 수 있다[1,2]. 시간 최적 제어의 해에 의해 제어되는 시스템은 목표 상태를 향하여 최대한 가속한 후, 위상 평면상에서 스위칭 함수와 접할 때 최대한 감속하여 목표 상태에 정확히 도달한다. 그러나, 디스크 드라이브 시스템과 같이 비선형요소와 고주파수 대역에서의 모델 불확실성을 가지는 경우, 시간 최적 제어의 해는 해석 함수로서 구해지지 않으며, 수치적으로 해를 구해서 적용하더라도 제어된 시스템은 전체적으로 불안정하게 되거나 제어 입력에 포함된 시그널 함수에 의해 작은 외란이나 센서의 잡음 신호에도 심한 떨림 현상을 가지게 된다[3]. 시간 최적 제어의 해가 가지는 단점을 보완하여 디스크 드라이브 시스템에 적용할 수 있는 방법으로 확장된 근사 시간 최적서보메커니즘(XPTOS: Extended Proximate Time Optimal Servo mechanism)이 제시되었다[3]. XPTOS는 시간 최적 제어에 의한 제어 입력이 가지는 시그널 함수를 포화 함수로 대체함으로써 시간 최적 제어가 가지는 단점을 보완한 것이다. XPTOS에 의해 제어되는 디스크 드라이브 서보메커니즘은 위상 평면에서 헤드의 현재 위치와 목표 트랙과의 오차에 따라 비선형 제어 영역과 선형 제어 영역으로 나뉘어진다. 헤드의 위치가 위상 평면에서 비선형 제어 영역에 속할 때에는 위

치 및 속도 제어가 선형 제어 영역을 향하여 시간 최적 경로를 추종할 수 있도록 XPTOS의 비선형 제어 입력에 의해 헤드가 최대한 가속된다. 헤드의 위치가 선형 제어 영역에 속할 때에는 고주파수대역의 불확실한 공진 모드들이 시스템에 미치는 영향을 최대한 줄이면서 시스템의 대역폭(bandwidth)을 충분히 확보할 수 있도록 위치 및 속도 피드백에 의해 시스템의 극점이 변경된다. 그러나, XPTOS에 의해 제어되는 시스템이 안정하기 위한 구조 조건으로 속도 상태 피드백이득이 위치 상태 피드백이득에 의해 결정되기 때문에 위치 및 속도 피드백에 의해 옮겨질 수 있는 극점들은 제한된다.

본 논문에서는 XPTOS의 선형 제어 영역에서 디스크 드라이브 시스템의 극점이 BESSEL 필터 표준 함수의 극점과 일치하도록 상태 피드백이득(state feedback gain)을 결정하는 방법을 제시하고, 시뮬레이션 결과를 통하여 제시된 방법에 의한 디스크 드라이브 서보메커니즘의 성능을 확인한다.

2. 디스크 드라이브 서보메커니즘 구성

그림 1은 시뮬레이션에 사용된 디스크 드라이브 서보메커니즘의 블록 선도이다. 디스크 드라이브 서보메커니즘은 액츄에이터, 전력 증폭기, 상태 추정기(state estimator), 아날로그-디지털 전환기, 디지털-아날로그 전환기로 구성된다[4]. yr 은 헤드가 탐색해야 할 목표 트랙이고, $yr(t)$ 는 현재 헤드 위치에서 가장 가까운 트랙의 중심이다. 디스크 드라이브 서보메커니즘이 이용할 수 있는 센서 출력은 현재 헤드 위치에서 가장 가까운 트랙 중심과의 위치 오차(PES: position error signal)이다. 디스크 드라이브 액츄에이터는 리니어 혹은 로터리 VCM(Voice coil motor)이고, VCM과 연결된 유압한 빔에 의해 헤드가 장착된다[4]. ud 는 액츄에이터에 연결된 유압 케이블과 헤드-디스크 이송장치(HIDA)에 미치는 중력에 의한 바이어스 힘을 모델링한 것이다.

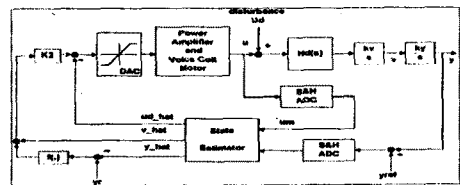


그림 1. 디스크 드라이브 서보메커니즘의 블록 선도

2.1 시스템 모델

입력(amps)에서 출력(PES)까지의 시스템 모델이 가지는 주파수 응답 특성은 그림 2와 같다[4]. 전체 시스템 모델은 10차 선형 동적 시스템 모델로서 저주파수대역에서 시스템 모델은 2차 혹은 VCM의 전기적 시상수를 고려해야 될 경우 3차선형 동적 시스템으로 모델링된다. 본 논문에서는 VCM의 전기적 시상수를 고려하지 않은 2차선형 동적 시

스텝 모델은 제어기 설계를 위한 공칭 모델(nominal model)로 하고, 고주파수대역에서의 모델 오차를 모델 불확실성으로 간주한다. 시뮬레이션에 사용된 공칭 모델의 연속 시간 상태 공간 식은 식(1)과 같다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & ky \\ 0 & -kl \\ & m \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ kv \end{bmatrix} u, \quad (1)$$

$$y = [1 \ 0] x$$

단,

k_v : 가속도 상수, k_l : 위치 측정 이득
 k : 선형화된 마찰 계수, m : 헤드 이송 장치 질량

위의 공칭 모델의 주파수 응답은 그림 2에서 보여진다. 시뮬레이션에 사용된 모델링 오차는 70[Hz], 2200[Hz], 4000[Hz], 9000[Hz]에서의 공진 모드들로 구성된다. 70[Hz]에서의 공진 모드의 이득은 매우 작기 때문에 그림 1에서 보이지 않는다.

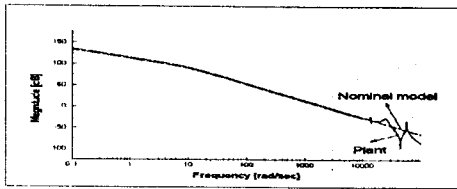


그림 2. 디스크 드라이브 시스템의 주파수 응답

2.2 BESSEL 필터 표준 함수에 근거한 XPTOS의 상태 피드백 설계

XPTOS의 상태 피드백 제어 법칙은 식 (2)와 같고, XPTOS에 의해 제어되는 시스템이 안정하기 위한 구속 조건은 식 (3)과 같다[4].

$$u = m \text{sat} (k_2(f(y_e) - v) / m),$$

$$f(y_e) = \begin{cases} k_1 / k_2 (y_e) & , \text{for } |y_e| \leq y_l \\ \text{sgn}(y_e) [((2m\sigma / k_1) |y_e|)^{1/2} - (m/k_2)] & , \text{for } |y_e| > y_l \end{cases} \quad (2)$$

$$k_2 = \left(\frac{2k_l k_y}{a} \right)^{1/2}, \quad y_l = \frac{m}{k_l} \quad (3)$$

단, $f(y_e)$: 스위칭 함수, y_e : 위치 오차
 m : 진원 포화 상한 값, k_l : 위치 상태 피드백 이득
 k_2 : 속도 상태 피드백 이득, v : 헤드의 현재 속도
 a : 가속도 할인 계수, a : 가속도 상수
 y_l : 선형 영역과 비선형 영역의 경계값
 k_y : 위치 측정 이득

XPTOS의 상태 피드백 제어 법칙을 구성하기 위해서는 위치 상태 피드백 이득과 속도 상태 피드백 이득 및 가속도 할인 계수(acceleration discount factor)를 결정하여야 한다. 가속도 할인 계수는 1 보다 작게 설정함으로써 선형 제어 영역을 향한 감속 구간에서 진원 포화가 일어나지 않으며, 디스크 드라이브 시스템의 공진 모드들이 시스템의 출력에 미치는 효과를 능동적으로 감소시키기 위한 제어 이동을 남겨 둔다. XPTOS의 상태 피드백 제어 법칙은 식 (2)로부터 위치 오차에 따라 두 부분으로 나누어짐을 알 수 있다. 현재의 위치가 위상 공간에서 선형 제어 영역에 속할 때 XPTOS의 제어 입력에 의해 시스템의 극점은 위치

및 속도 피드백이득, k_1, k_2 에 따라 임의의 극점으로 옮겨진다. 선형 제어 영역에서의 제어 입력은 다음 식과 같다.

$$u_{lin} = m \text{sat} ((k_l y_e - v) / m) \quad (4)$$

선형 제어 영역에서의 제어 입력에 의한 디스크 드라이브 시스템의 변경된 극점은 디스크 드라이브 시스템의 고주파수대역에 존재하는 진동 모드들의 효과를 최대한 제한하고, 서보메카니즘의 대역폭(bandwidth)을 충분히 확보할 수 있도록 설정되어야 한다. 본 논문에서는 상태 피드백에 의한 디스크 드라이브 시스템의 극점을 BESSEL 필터 표준 함수에 의한 2차 시스템의 극점과 일치하도록 위치 및 상태 피드백 이득을 결정하고, XPTOS의 구속 조건인 식 (3)을 만족하도록 가속도 할인 계수를 설정한다. 선형 제어 영역에서의 제어 입력에 의해 식 (1)의 공칭 모델이 가지는 연속 시간에서의 특성 방정식은 다음과 같다.

$$s^2 + \left(\frac{k_l}{m} + kv \right) s + kv k_l ky = 0 \quad (5)$$

차단 주파수가 1[rad/sec]일 때의 BESSEL 필터 표준 함수에 의한 2차 시스템의 극점은 $(-0.8660 \pm 0.5j)$ 이고, 임의의 차단 주파수에서 BESSEL 필터 표준 함수에 의한 2차 시스템의 특성 방정식은 다음과 같다.

$$s^2 + (2\omega_0 \sigma) s + \omega_0^2 = 0 \quad (6)$$

단,

ω_0 : 임의의 차단 주파수, σ : 0.8660

식(5)와 식(6)에서 디스크 드라이브 시스템이 BESSEL 필터 표준 함수에 의한 2차 시스템의 극점과 일치하기 위해서 연속 시간에서의 위치 상태 피드백이득과 속도 상태 피드백이득은 다음과 같다.

$$k_l = \frac{\omega_0^2}{kvky} \quad (7)$$

$$k_2 = \frac{2\omega_0 \sigma m - k_l}{kv m} \quad (8)$$

식 (8)은 XPTOS의 구속 조건인 식(3)을 만족해야 한다. 디스크 드라이브 시스템이 BESSEL 필터 표준 함수에 의한 2차 시스템의 극점을 갖도록 하기 위해서 가속도 할인 계수는 식 (3)과 식 (8)의 연립 방정식의 해로 구해진다. 가속도 할인 계수는 다음 식에서 구할 수 있다.

$$a = \frac{2\omega_0 \sigma m^2}{(2\omega_0 \sigma m - k_l)^2} \quad (9)$$

가속도 할인 계수가 1 보다 작도록 하기 위해서 임의의 차단 주파수는 다음의 구속 조건을 가진다.

$$\omega_0 > \frac{k_l}{0.3178 m} \quad (10)$$

식 (7)과 식(8) 및 식(9)에 의해 XPTOS의 상태 피드백 제어 법칙을 구성하는 데 필요한 연속 시간에서의 위치 및 속도 상태 피드백이득과 가속도 할인 계수는 임의의 차단 주파수 ω_0 의 함수로 주어진다. 디스크 드라이브 서보메카니즘은 디지털 제어 방식으로 구성된다. 그림 1과 같이 디지털 제어 방식으로 서보메카니즘을 구성하였을 때에는 식 (8)과 식 (9) 및 식 (10)을 사용하여 위치 및 속도 상태 피드백이득과 가속도 할인 계수를 결정해서는 안되고, 식 (1)을 ZOH에 의해 이산 시간 상태공간식으로 바꾸어 BESSEL 필터 표준 함수에 의한 이산 시간 특성 방정식과 일치하도록 위치 및 속도 상태 피드백이득을 결정하고, 구속 조건인 식 (3)에 의해 가속도 할인 계수를 결정한다. 시뮬레이션에 사용된 식 (1)의 이산 시간 상태 공간 식은 다음과 같다.

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & 5.2783 \\ 0 & 0.9993 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0.0131 \\ 0.0049 \end{bmatrix} u(k) \quad (11)$$

$$y(k) = [1 \ 0] x(k)$$

2.3 상태 추정기

디스크 드라이브 서보 메카니즘에서 이용할 수 있는 유일한 센서 출

력은 현재의 헤드 위치와 가장 가까운 트랙 중심과의 오차이다. 헤드의 트랙 위치와 속도는 XPTOS의 상태 피드백 제어 범칙을 구하기 위하여 상태 추정기에 의해 추정된다. 현재의 센서 출력은 기준으로 헤드의 현재 트랙 위치 및 속도 상태를 추정하기 위해 현재상태추정기(current estimator)를 구성한다. 충분히 작은 계산시지연(calculation time delay)을 가진 때 현재상태추정기는 보다 더 정확한 상태 추정 값을 가진다.[4]. 디스크 드라이브 시스템에 존재하는 바이이스 외란에 대한 오차를 감소시키기 위해 바이이스 외란을 추정하고, 상태 추정기의 차수는 3차로 증가된다. 상태추정기 이득은 상태추정기의 극점이 시스템 극점보다 3배 이상 빠르게 설정함으로써 시스템 극점에 의하여 전체 시스템이 지배되도록 한다. 시뮬레이션에 사용된 이산 시간 현재상태추정기의 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{x}(k) &= \bar{x}(k) + Le[y(k) - He \bar{x}(k)] \\ \bar{x}(k) &= Fe \hat{x}(k-1) + Ge u(k-1) \end{aligned} \quad (12)$$

단, $\hat{x}(k) = \begin{bmatrix} \hat{y} \\ \hat{v} \\ \hat{u}_d \end{bmatrix}$, \hat{y} : 추정 위치, \hat{v} : 추정 속도, \hat{u}_d : 추정 외란,

$$Fe = \text{상태 추정기 이득}, \quad Fe = \begin{bmatrix} 1 & 5.3316 & 0.0133 \\ 0 & 0.9993 & 0.0050 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Ge = \begin{bmatrix} 0.0133 \\ 0.005 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad He = [1 \ 0 \ 0]$$

3. 시뮬레이션

그림 2와 같은 주파수 응답 특성을 가지는 디스크 드라이브 시스템에 대하여 직접한 차단 주파수 ω_0 는 약 2000[rad/sec]이었고, 그 때의 위치 상태 피드백이득과 속도 상태 피드백이득은 각각 0.5951과 42.7253 이었다. 속도 상태 피드백이득이 XPTOS의 구속 조건을 만족하기 위하여 가속도 할인 계수는 0.60로 설정된다. 상태 추정기 이득은 상태 추정기 극점이 시스템 극점보다 3배 빠르게 설정하였다. 다음 식은 구해진 상태 피드백이득과 가속도 할인 계수에 의한 XPTOS의 상태 피드백 제어 범칙과 상태 추정기 이득이다.

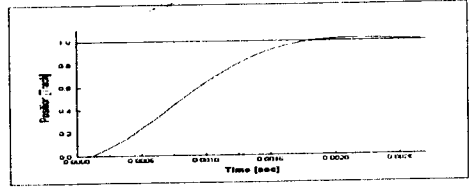
$$u = 4 \text{ sat} (42.7253(f(y_e) - \hat{v})/4),$$

$$f(y_e) = \begin{cases} 0.0139(y_e) & , \text{for } |y_e| \leq 6.722. \\ \text{sgn}(y_e) [(0.0053 |y_e|)^{1/2} - 0.094] & , \text{for } |y_e| > 6.722 \end{cases} \quad (13)$$

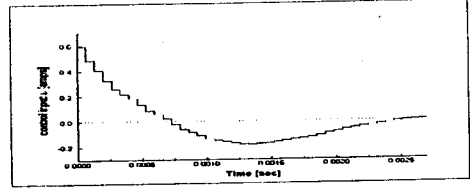
$$Le = [0.6182 \ 0.0461 \ 0.2492].$$

본 논문에서는 SIMNON에 의한 하이브리드 시뮬레이션을 수행하였다. 디스크 드라이브 시스템에서 가장 빈번히 일어나는 트랙 탐색은 1 트랙 탐색으로, 1 트랙 탐색에 걸리는 시간은 구성된 디스크 드라이브 서보메카니즘의 성능을 결정한다. 제시된 방법에 의한 상태 피드백이득을 가지는 XPTOS에 의해 디스크 드라이브 서보메카니즘을 구성했을 때, 1 트랙 탐색은 약 2[ms]정도에 이루어짐을 그림 3으로부터 알 수 있다. 식 (13)로부터 XPTOS의 선형 제어 영역은 6.722트랙 오차 이내이다. 결과적으로 1 트랙 탐색은 디스크 드라이브 시스템의 공칭 모델이 가지는 변경된 극점에 의한 과도 응답을 가지며, 전위 포화 없이 이루어진다. 변경된 극점은 2차 BESSEL 필터 표현 함수가 가지는 극점과 일치함으로써 1 트랙 탐색 시간 응답은 오버 슈트가 거의 없다. 약간의 오버슈트는 실제 디스크 드라이브 시스템이 가지는 고주파수대역에서의 진동 모드들의 영향이다. 그림 4는 762 트랙을 탐색했을 때의 시간 응답이다. 목표 트랙을 향하여 최대한 가속하기 위하여 가속 구간에서는 전위 포화가 일어나지만, 감속 구간에서는 디스크 드라이브 시스템의 진동 모드들이 시스템에 미치는 효과를 능동적으로 감소시키기 위하여 전위 포화 없이 감속함을 제어 입력 시간 응답으로부터 알 수 있다.

그림 5는 디스크 드라이브 서보메카니즘이 할 수 있는 가장 긴 트랙 탐색을 했을 때의 시간 응답이다. 약 25[ms]정도에 트랙 탐색이 이루어짐을 알 수 있다.

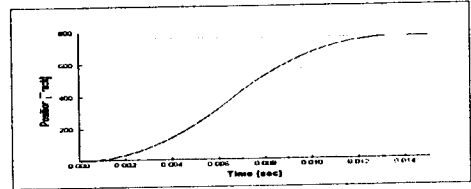


(a) 위치 출력시간 응답

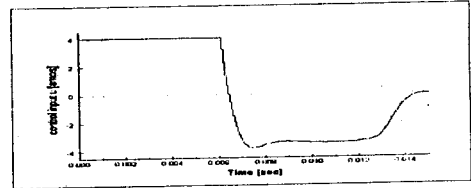


(b) 제어 입력 시간 응답

그림 3. 1 트랙 탐색 시간 응답

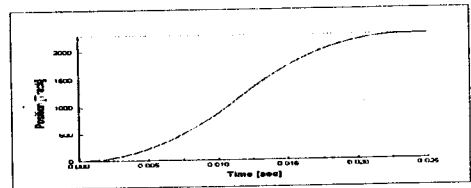


(a) 위치 출력시간 응답

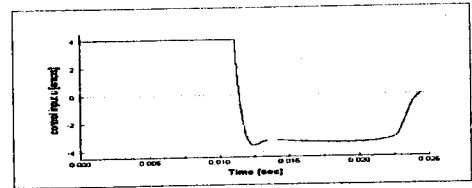


(b) 제어 입력 시간 응답

그림 4. 762 트랙 탐색 시간 응답



(a) 위치 출력시간 응답



(b) 제어 입력 시간 응답

그림 5. 2286 트랙 탐색 시간 응답

4. 결 론

XIPTOS에 의한 디스크 드라이브 서보메커니즘을 구성하는데 있어서 중요한 점은 디스크 드라이브 시스템이 가지는 고주파수대역의 진동 모드들이 출력에 미치는 효과를 최소화하면서 최단 시간 상태 천이를 할 수 있도록 XIPTOS의 상태 피드백 이득을 결정하는 것이다. 그러나, XIPTOS 가 가지는 구속 조건에 의한 속도 피드백이득이 위치 피드백 이득에 의해 결정됨으로 인해 적합한 XIPTOS의 상태 피드백이득을 결정하는 것은 용이하지 않다. 본 논문에서는 디스크 드라이브 시스템의 공칭 모델의 극점을 BESSEL 필터 표준 함수에 의한 극점과 일치하도록 함으로써 하나의 파라미터의 조절에 의해 디스크 드라이브 시스템을 위한 XIPTOS의 상태 피드백이득을 설정하는 방법을 제시하였다.

5. 참고 문헌

- [1] Bryson and HO. Applied Optimal Control. Halsted Press, 1025 Vermont Ave., N.W., Washington, D.C. 20005, 1975
- [2] Lewis, Frank, L., Applied Optimal Control And Estimation, Prentice-Hall, 1995.
- [3] Workman, M.L., Adaptive Proximate Time-Optimal Servomechanisms, Ph.D. thesis, Stanford University, 1987.
- [4] G.F. Franklin, J.D. Powell, and M.L. Workman, Digital Control of Dynamic Systems. 2nd ed. Reading, MA: Addison-Wesley, 1990.
- [5] G.F. Franklin, J.D. Powell, and A. Emami-Naeini, Feedback Control of Dynamic Systems, Addison-Wesley, 3rd ed., 1994.
- [6] Workman, M.L., R.L. Kosut, and G.F. Franklin, "Adaptive Proximate Time-Optimal Control: Discrete Time Case," Proceedings of the Conference on Decision and Control, 1987, pp 1548-12553.
- [7] Abdullah Al-Mamun., and C. T. Tan, "Internal Model Control (IMC) Approach for Designing Disk Drive Servo-Controller," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 42, 3, pp 248-256, June, 1995.
- [8] Newman, Wyatt S., and Souccar, K., Robus, "Near Time-Optimal Control of Nonlinear Second-Order Systems: Theory and Experiments", ASME: Journal OF Dynamic Systems, Measurement, AND Control, Vol. 113, 1991, pp.363-370.