

정밀 위치제어를 위한 상안정 외란관측기 설계

All stabilizing disturbance observer design for precise position control

서상민† · 김하용*

Sangmin Suh, Ha Yong Kim

1. 서론

외란 관측기(disturbance observer)는 제어 대상인 플랜트의 역함수(inverse transfer function)를 이용하기 때문에 고주파 노이즈에 약하며, 이러한 문제를 해결하기 위하여 Q-필터라는 저역통과 (low pass) 안정화 필터를 사용하여야만 한다. 게다가, 이 안정화 필터의 대역폭 (bandwidth)이 커짐에 따라 전체 폐루프 시스템(closed loop systems)의 안정도는 보장할 수가 없다는 문제점을 가지고 있다. 이 논문에서는 기존의 외란 관측기와는 다르게 안정화 필터가 따로 필요 없는, 선형 행렬 부등식 (linear matrix inequality) 기반의 상안정 외란 관측기 (all stabilizing disturbance observer)를 제안하고 실제 하드 디스크 드라이브의 외란 감소에 적용하여, 약 40%의 위치제어 성능 향상을 가져왔음을 실험적으로 검증하였다.

2. 상안정 외란 관측기 설계

2.1 절 기존 외란 관측기의 구조

외란 관측기란 추정된 외란을 제어입력신호에 대하여 차감시켜줌으로써 외부로부터 인가된 외란을 상쇄시켜주는 구조를 가진다(Fig.1).

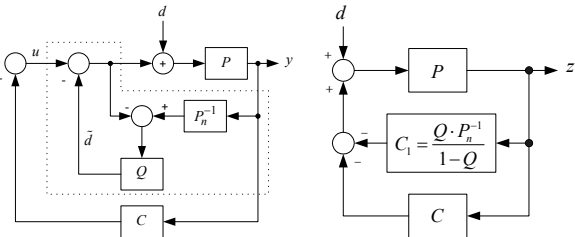


Fig. 1. Conventional disturbance observer and its equivalent parallel control structure

그러나, 전체 폐루프 시스템의 안정성을 보장 할 수

† 교신저자; 삼성전자

E-mail : sangmin.suh@samsung.com

Tel : (031) 200-8739, Fax : (031) 200-9882

* 삼성전자

없기 때문에, 반복적인 Q-필터의 설계와 반복적인 안정성 해석을 통한 여러 번의 시행착오(trial and error)를 통하여야만 안정한 시스템을 구할 수 있다. 그리고, 이 구조는 외부 루프를 안정화시키는 C 와 외란 관측기 부분인 C_1 이 완전히 분리되는 전형적인 병렬 제어 구조이다. 즉, 외란 관측기를 설계한다는 것은 주어진 P, C 에 대하여 전체 폐루프 시스템이 원하는 형상의 루프게인을 갖도록 C_1 을 구하는 문제로 귀착된다.

2.2 절 기존 외란 관측기의 구조

일반적인 병렬제어구조의 폐루프 외란 전달 함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{z}{d} &= \frac{P}{1+PC} \cdot \frac{1}{1+(1+PC)^{-1}PC_1} \\ &= \frac{P}{1+PC} \cdot \frac{1}{1+PC_1} \\ &= T \cdot T_1 \end{aligned} \quad (1)$$

T 는 제어기 C 에 의하여 이미 안정화된 시스템이기 때문에, T_1 이 안정화되기만 하면 전체 폐루프 시스템(z/d)은 항상 안정화된다.

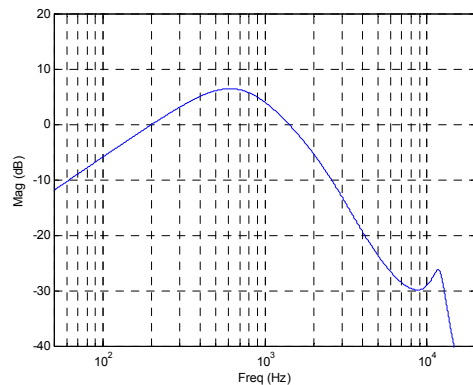


Fig. 2. Typical torque transfer function(T) without C_1

외란에 의한 영향을 줄이기 위해, $|T|_{dB} > 0$ 의 영역을 줄이는 방향으로 C_1 을 설계할 것이며, 그와 동시에 항상 안정한 T_1 이 되도록 설계한다. 그리고,

$T_1 = 1/(1+R_1 \cdot C_1)$ 을 설계한다는 것은 Fig. 3 의 시스템을 설계한다는 것과 동가이다. 그리고, 가중함수 W 를 잘 조정함으로써 원하는 형상의 T_1 을 얻을 수 있다.

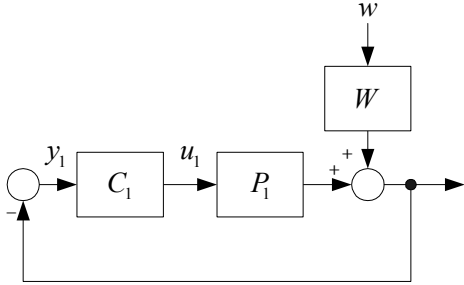


Fig. 3. Control structure for T_1 design

이 논문에서, 주파수 가중함수로서 다음을 제안한다.

$$W = \alpha \cdot \frac{s + \omega_{c1}}{s + \omega_{c1} \cdot \alpha} \cdot \frac{s/\alpha + \omega_{c2}/\alpha}{s + \omega_{c2}/\alpha} \quad (2)$$

여기서, $\omega_{c1} < \omega_{c2}$ 은 T 가 0dB 와 만나는 두 차단주파수들이고, $\alpha > 0$ 는 W 의 최대값을 조절하는 게인 조절 변수이다. 따라서, W 는 Fig. 2.의 T 에서 0dB 보다 큰 주파수함수를 대략적으로 표현하고 있다. 식 (5)는 T 의 주파수 특성을 정확하게 표현 할 수는 없지만, $|T|_{dB} > 0$ 인 영역을 줄인다는 원래의 목적에는 충분히 만족할 만한 최저 차수의 가중함수이다. 선형 행렬 부등식 기반의 H_∞ 제어기 설계 표준형을 만들기 위하여 상태 공간 표현법으로 표현하면, $W = (A_W, B_W, C_W, D_W)$ 과 $P_1 = (A_{P_1}, B_{P_1}, C_{P_1}, D_{P_1})$ 이 된다. 그리고, 이를 이용하여 전체 페루프 시스템을 구하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1w + B_2u_1 \\ z_1 &= C_1x + D_{11}w + D_{12}u_1 \\ y_1 &= C_2x + D_{21}w + D_{22}u_1 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\dot{x} = [\dot{x}_R^T \quad \dot{x}_W^T]^T$,

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} A_{P_1} & 0 \\ 0 & A_W \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ B_W \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} B_{P_1} \\ 0 \end{bmatrix} \\ C_1 &= \begin{bmatrix} C_{P_1} & C_W \end{bmatrix}, D_{11} = D_W, D_{12} = D_{P_1} \quad \text{이다.} \\ C_2 &= -\begin{bmatrix} C_{P_1} & C_W \end{bmatrix}, D_{21} = -D_W, D_{22} = -D_{P_1} \end{aligned}$$

그리고, 식(3)은 선형 행렬 부등식 기반의 제어기 설계를 위한 표준형이므로, 최적 H_∞ 기반의 제어기 C_1 을 구할 수 있다.

3. 실험 결과

제시하는 방법은 86.806usec 의 샘플링 주기 (sampling period)를 갖는 실제 하드 디스크 드라이

브에 적용하였다. Fig. 2 의 주파수 특성을 이용하여, $\alpha = 2.5$, $\omega_{c1} = 2\pi \cdot 191$, $\omega_{c2} = 2\pi \cdot 2 \cdot 10^3$ 을 얻어서 주파수 가중함수 식(2)를 구성하여 최적제어 C_1 을 구하였다. Fig. 4 는 C_1 에 의하여 분명히 $|T|_{dB} > 0$ 인 영역이 줄었고, Fig.5 에서 보이는 것과 같이 안정도 여유(stability margin)가 증가하였기 때문이다. 또한, Fig.6 에서는, 증가된 안정도는 더욱 빨리 외란의 영향을 제거한다는 것을 보인다. Fig. 7 은 600 회 의 반복 실험으로 얻어진 출력값(z)의 주파수 밀도 함수와, 그 값의 고속 푸리에 변환 (fast fourier transform:FFT)값의 누적치를 연속적으로 표기한 그림이다. 약 1.7KHz 이하의 주파수 영역에선 주파수 밀도 함수가 현저히 개선이 되었으나, 그 이상의 주파수 영역에서는 C_1 에 의하여 외란의 영향이 약간 증가하였다. 하지만, 전체적으로 볼 때 누적 FFT 의 값은 0.95 에서 0.45 로 크게 줄어 들어서, 약 45%의 위치제어 성능개선을 이루었다.

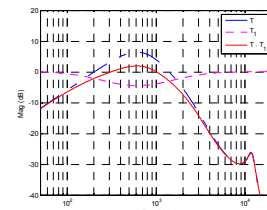


Fig. 4. $T, T_1, z/d$

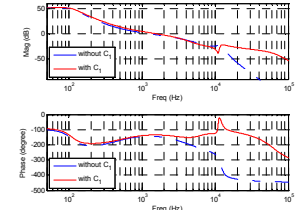


Fig. 5. Open loops

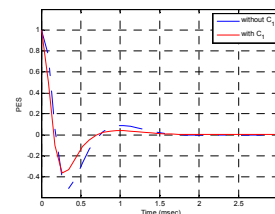


Fig. 6. Time responses

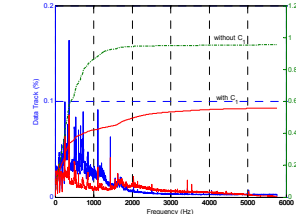


Fig. 7. PSD

4. 결론

정밀 위치 제어를 위한 새로운 형태의 외란 관측기를 제안하였다. 먼저, 기존의 외란 관측기는 병렬 제어구조와 등가라는 것을 보였고, 제안하는 방법은 특별한 안정화 필터 없이도 전체 페루프 시스템을 항상 안정화시킨다는 것을 증명하였다. 또한 제안하는 제어기는 페루프 시스템을 기존 시스템보다 더욱 안정하게 만들어, 외란이 인가되었을 때 더욱 빠르게 그 외란에 대한 영향을 줄인다는 것을 보였다. 여러 차례의 반복 실험을 통하여, 외란에 대한 영향이 기존 대비 약 40%이상 개선됨을 보임으로써, 그 효용성을 검증하였다.