

외란 제거 제어기를 이용한 강인 제어기의 설계

여희주^{1*}

Design of a Robust Controller Using Disturbance Rejection Controller

Hee-Joo Yeo^{1*}

요 약 본 논문에서는 시스템 파라미터의 변동이나 모델의 불확실성 및 외부 외란 등에 강인한 외란 관측기에 기초로 한 강인 제어기의 설계를 제안한다. 제어기는 두 개 루프의 구조를 갖는 모델기반 보상기와 궤환 제어기 구조로 구성되어 있다. 내부 루프 보상기는 내외부의 외란을 제거하고, 외부 루프 궤환 제어기는 주어진 사양을 만족하도록 하는 역할을 수행한다. 결과적으로, 제안한 강인 제어기를 이용함으로써 외란에 대해 시스템을 안정화시킬 수 있으며, 제어 성능을 향상시킬 수 있음을 보인다.

Abstract This paper proposes the design of a robust controller based on disturbance observer which is strong to variation of system parameters, uncertainty of models or external disturbance. The controller consists of a mode based compensator and a feedback controller based on two-loop structure. The compensator in the internal-loop removes internal and external disturbances and a feedback controller in the external loop achieves performance along with given specifications. As a result, it shows that the proposed robust controller can stabilize a system against disturbance and improve controlling performance.

Key Words : robust controller, disturbance observer

1. 서론

산업현장에서 정밀한 작업을 위하여 고성능의 모터 제어시스템을 요구함에 따라 이에 대한 연구가 진행되었다. 정밀 제어시스템의 설계에 있어 어려운 점은 거의 대부분의 제어 대상에 존재하는 비선형적 특성, 파라미터 모델링의 부정확성과 상호 간섭 효과 등이 제어의 출력에 영향을 미쳐 정밀도를 떨어뜨리고 전체적인 시스템의 성능을 저하시키는데 있다. 따라서 선형 시스템에 적용되는 PID제어기와 같은 간단한 제어 알고리즘으로는 정밀한 제어가 어렵다. 따라서 이러한 요구와 문제에 의해 비선형적 특성에 대한 영향을 적게 하는 강인 제어기의 필요성이 증가함에 따라 이를 설계하는 여러 방법이 연구되고 있다. 여기에는 궤환 선형화(feedback linearization)제어기법[1], 슬라이딩 모드 제어(sliding mode control)[2], 적응제어(adaptive control)[3], 모델에 기초하여 실제 시

스템과 모델의 차를 이용하는 모델 참조 강인 제어(model reference robust control) 등이 있다. 궤환 선형화 제어기법은 시스템의 정확한 모델을 기초로 하며, 제어 시스템의 비선형 성분을 궤환하여 제거하고 전체시스템을 선형화시키는 제어기로 시스템의 모델을 정확히 알아야 하며, 복잡한 계산과정을 처리할 수 있어야 하는 단점을 가지고 있다. 적응제어는 제어기의 파라미터를 조정하는 알고리즘이 복잡하여 많은 연산 작용이 소모되기 때문에 실제 적용이 어려운 실정이다. 모델 참조 강인 제어 중에 외란 관측기(disturbance observer) [4]-[10]은 시스템을 선형적으로 모델링하고 선형적 특성과의 오차 및 비선형적 요소를 외란으로 간주하여 보상해 주는 것으로 구현 시 복잡한 계산이 없이 구현할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 복잡한 연산 없이 구현할 수 있으며 외란 제거 능력이 우수한 외란 관측기를 이용한 모션 제어를 설계하는 방법을 제안한다. 또한, 제안된 제어기의 우수성을 보이기 위하여 비선형 성분을 가지는 1-링크 평면 매니퓰레이터에 대하여 고전 선형 제어기인 PD 제어

¹대전대학교 전자공학과

*교신저자: 여희주(hyjeo@daejin.ac.kr)

기와 외란관측기에 기초한 강인제어기의 효용성을 비교자 한다.

2. 외란 관측기를 이용한 강인 제어기의 설계

2.1 외란 제거 제어기

고전 제어기는 피드백에 의하여 어느 정도 외란 제거 능력을 갖는다. 이때 외란 제어 능력을 증가시키기 위한 가장 단순한 방법은 시스템의 대역폭이 증가하도록 제어기를 설계 하는 것이고, 이는 주파수 영역에서 표현하는 방법으로 민감도 함수를 사용하여 확인 할 수 있다. 일반적으로 대역폭을 키우는 설계는 여러 가지 문제를 내포하고 있다. 대역폭의 증가는 높은 이득의 제어기를 의미하므로 고주파수 대역의 모델링되지 않은 동특성이 나타나거나, 공진이 발생할 수 있다. 또한 설계된 제어 알고리즘을 구현할 수 있는 빠른 샘플링 시간을 갖는 제어기를 구현하여야 한다. 따라서 추가 비용의 부담과 예측하기 어려운 다른 문제로 높은 대역폭의 제어기는 현실적이지 않다. 보다 적극적인 외란 제거 제어 방법으로 2 DOF 제어 구조를 사용한다. 이는 제어 명령에 대한 응답 특성과는 별도로 외란을 제거하는 별도의 제어기 구조를 갖는다. 그러나, 2 DOF 제어 구조가 외란 제거 및 명령 추종의 두 가지 목적을 동시에 구현하기에 적절한 구조로 알려져 있음에도 불구하고, 실제적인 설계 방법의 부재로 인하여 널리 사용되지 못하고 있다.

2.2 두개의 루프의 구조를 갖는 외란 제거 제어기

외란 관측기(disturbance observer, DOB), 적응 강인 제어기(adaptive robust control, ARC), 확장된 내부 모델 제어기(extended internal model controller), 강인 내부 보상기(robust internal-loop compensator, RIC), 그리고 모델 기반 외란 감쇠(model-based disturbance attenuation, MBDA) 등은 두 개의 루프를 갖는 구조를 이용하여 다른 형태의 2 DOF 제어기 설계 방법을 제시하였다. 여기서 두개의 루프를 갖는 제어기의 의미에 대하여 설명하고자 한다.

그림 1과 같은 두개의 루프를 갖는 모델 기반의 외란 제거 제어기에서 각각의 루프는 독립적인 설계 목적 및 규격에 따라 단계적으로 설계된다. 먼저, 외부 루프는 주어진 제어 성능 규격을 만족하도록 하는 제어기가 설계된다. 이는 보통의 제어기의 설계 방법과 같으나, 중요한 차이점이 존재한다. 일반적인 제어기의 설계에서 모델에

의하여 설계된 제어기를 사용하지 않고 또는 사용한다 하더라도 실제 실험적으로 제어기의 이득을 조정한다는 사실이다. 이는 실제 시스템과 설계에 사용하는 모델이 다르기 때문에 발생한다. 보편적으로는 보다 완벽한 모델링을 만들려고 시도하여 이를 기반으로 제어기를 설계하여 한다. 그러나, 반대로 생각을 하여, 만약 시스템과 유사한 모델을 결정한 후, 시스템이 이 모델과 같이 동작하도록 만들 수 있다면, 앞에서 발생하는 문제를 해결 할 수 있을 것이다. 바로 내부 루프가 이 역할을 담당하고 있다. 시스템과 모델의 차이를 보상기를 통하여 시스템 측에 인가함으로써 시스템을 모델처럼 동작하도록 하는 구조를 갖는다. 따라서 내부 루프의 설계 목적은 내부 루프의 입출력 특성을 사용된 공칭 모델의 입출력 특성과 가능한 근사하게 유지할 수 있는 내부 보상기를 설계하는 것에 있다. 따라서 모델에 근거하여 설계된 외부 제어기가 보다 잘 동작 할 수 있을 것을 기대할 수 있다.

내부 루프에 있어 더욱 중요한 것은 외란의 제거 능력이다. 내부 모델에는 외란이 존재하지 않기 때문에 시스템을 모델과처럼 동작하도록 만든다는 의미에는 시스템에 존재하는 외란을 제거한다는 의미가 포함되어 있다. 따라서 내부 루프의 보상기는 강력한 외란 제거 능력을 갖는 것이다. 여기서, 시스템과 모델의 차이에 모델링의 차이와 외란이 모두 포함되어 있다는 의미로 등가 외란이라는 용어를 사용한다. 이상적인 상태에서 등가 외란이 완벽하게 보상된 내부 루프는 공칭 모델이라고 생각할 수 있다. 그러나 현실에서는 관심 주파수 대역, 또는 시스템 대역폭 이하의 주파수 대역에서 공칭 모델과 같다고 생각할 수 있다.

전체 성능의 관점에서 볼 때 내부 루프의 성능 저하는 외란 제어 능력의 저하뿐만 아니라 외부 루프의 성능 저하에도 관련되기 때문에 매우 중요한 의미를 갖는다.

2.3 외란 관측기를 이용한 강인 제어기의 설계

앞에서 언급한 두개의 루프를 갖는 외란 제거 제어기 중에 Ohnishi에 의하여 제안된 외란 관측기(disturbance observer)는 가장 먼저 제안되었으며, 단순한 구조와 탁월한 외란 제거 능력을 보여 많은 연구결과를 보였다. 다른 방법은 보다 많은 설계 방법을 제공하고, 외란에 대한 정보를 보다 적극적으로 사용하는 장점이 있지만 설계에 많은 경험과 지식을 요구한다. 본 논문에서 단순한 설계 방법에도 좋은 성능을 보이는 외란 관측기의 구조를 이용하여 실제적인 설계 방법에 대하여 설명하고자 한다.

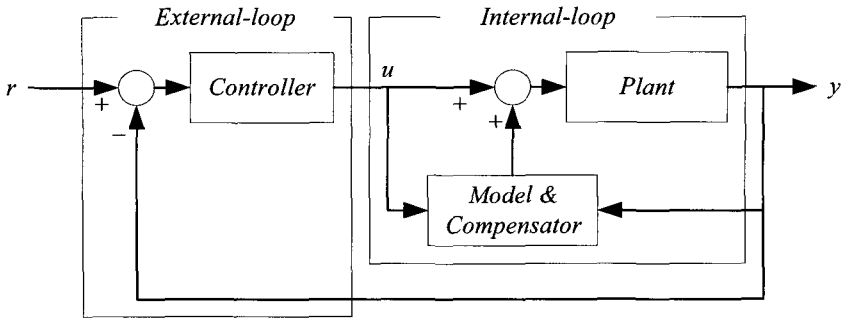


그림 1. 두개의 루프를 갖는 제어 시스템의 구조

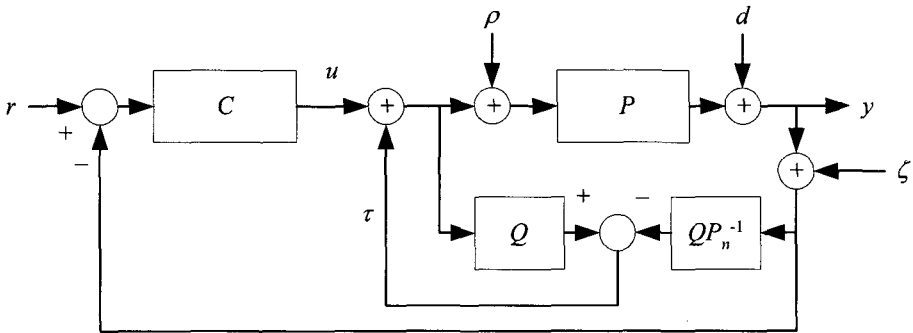


그림 2. 외란 관측기를 적용한 제어 시스템의 블록도

구조의 분명한 이해를 위하여 이상적인 경우를 생각해 보자. 이는 그림 2에서 Q 가 1일 경우에 해당한다. 내부 루프에서는 제어기의 출력과 역모델의 출력의 차가 앞쪽으로 보상이 되어진다. 여기서 역모델의 출력에는 제어기의 출력뿐만 아니라 외란과 모델링의 오차도 포함이 되기 때문에 이 차이가 결국 앞쪽에 더해져 제거 될 것으로 생각이 된다. Q 가 0인 경우는 외란 관측기가 없는 경우에 해당된다. 여기서 이상적이라는 의미는 QP_n^{-1} 이 Q 가 1인 경우에 Casuality에 의하여 구현이 불가능하기 때문이다. 따라서, 저역 통과 필터형태 Q 필터가 함께 구현된다. 전체 시스템이 동작하는 주파수 범위에서 저주파수 대역에서 Q 필터는 1에 가깝기 때문에 이의 성능은 이상적인 외란 관측기의 경우와 거의 유사하며, 주파수가 높아질수록 그 성능은 점점 줄어들어 Q 필터의 점점 주파수 이상에서는 성능 개선에 도움을 주지 못한다고 생각을 할 수 있다.

그림 2는 외란 관측기를 적용한 폐루프 제어 시스템의 블록도이다. 여기서 C, P, P_n, Q 는 각각 제어기, 시스템, 모델, Q 필터의 s-변환이며, $r, u, \tau, \rho, d, \zeta, y$ 는 각각 제어 명령, 제어 입력, 추정 외란, 토크 외란, 출력 외란, 측정 잡음, 출력의 s-변환이다.

이를 수식으로 보기 위하여 그림2에서 출력 y 와 제어입력, 토크 외란, 출력 외란, 측정 잡음사이의 전달함수를 다음 식(1)과 같이 나타내었다.

$$y = P_{uy} \cdot u + P_{\rho y} \cdot \rho + P_{dy} \cdot d + P_{\zeta y} \cdot \zeta \quad (1)$$

여기서 $P_{uy}, P_{\rho y}, P_{dy}$ 그리고 $P_{\zeta y}$ 는 다음 식(2), (3), (4), (5)와 같다.

$$P_{uy} = \frac{PP_n}{P_n + [P - P_n]Q} \quad (2)$$

$$P_{\rho y} = \frac{PP_n[1 - Q]}{P_n + [P - P_n]Q} \quad (3)$$

$$P_{dy} = \frac{P_n[1 - Q]}{P_n + [P - P_n]Q} \quad (4)$$

$$P_{\zeta y} = \frac{PQ}{P_n + [P - P_n]Q} \quad (5)$$

이미 언급한 바와 같이 Q 가 1일 때에는 $P_{uy} = P_n, P_{\rho y} = 0, P_{dy} = 0, P_{\zeta y} = P$ 이고, Q 가 0일 때에는 $P_{uy} = P, P_{\rho y} = P, P_{dy} = P, P_{\zeta y} = 0$ 이다.

외란 관측기를 기반으로 한 전체 제어 시스템의 전달 함수를 식(6)과 같이 나타낼 수 있으며, 이때 각 전달 함수 P_{ry} , $P_{\rho y}$, P_{dy} 그리고 $P_{\xi y}$ 는 식 (7), (8), (9), (10)과 같다.

여기서 C 는 제어기 이며, P_n 을 기준으로 설계된다.

$$y = P_{ry} \cdot r + P_{\rho y} \cdot \rho + P_{dy} \cdot d - P_{\xi y} \cdot \xi \tag{6}$$

$$P_{ry} = \frac{CPP_n}{[1-Q]P_n + CPP_n + PQ} \tag{7}$$

$$P_{\rho y} = \frac{[1-Q]PP_n}{[1-Q]P_n + CPP_n + PQ} \tag{8}$$

$$P_{dy} = \frac{[1-Q]P_n}{[1-Q]P_n + CPP_n + PQ} \tag{9}$$

$$P_{\xi y} = \frac{CPP_n + PQ}{[1-Q]P_n + CPP_n + PQ} \tag{10}$$

Q 필터의 설계는 곧 외란 관측기의 설계를 의미한다. 이는 Q 필터의 설계 결과에 따라 외란 제거 성능의 차이가 있음을 의미한다. 이로 인하여 Q 필터의 설계에 대한 많은 연구 결과가 발표되었다. 그러나 복잡한 과정을 거쳐 설계된 경우와 기본적인 조건을 만족하는 경우의 성능 차이는 그리 크지 않다. 따라서 기본적인 방법에 의하여 Q 필터를 설계하여도 충분한 외란 제거의 성능을 얻을 수 있다.

조건 1 : 이미 설명한 바와 같이 Q 필터가 필요한 이유는 역모델을 구현할 수 없기 때문이다. 따라서 가장 기본적인 조건은 QP_n^{-1} 이 구현 가능하도록 만드는 것이다. 즉, 분모의 차수가 분자의 차수보다 같거나 커야함을 의미한다. 이 조건을 만족시키지 않은 경우는 causality를 만족하지 못하기 때문이다. 일반적으로 분모와 분자의 최대 차수의 차를 상대차수라고 한다. 따라서 Q 필터의 상대 차수가 모델의 상대 차수보다 같거나 커야 한다.

조건 2 : 특정한 상대 차수를 갖는 필터의 종류는 무한히 많다. 예를 들면, 상대 차수가 2인 경우, 분모가 3차이면 분자는 1차, 분모가 4차이면 분모는 2차가 될 수 있다. 어떤 차수의 필터를 선택할 것인가 하는 문제는 외란 제거 능력과 잡음 제거 능력에 관련이 있다. 필터가 절점 주파수에서 급격히 떨어지는 형태를 갖는 것이 잡음 제거에

유리하다.

조건 3 : 필터의 절점 주파수의 선정은 외란 제거가 가능한 주파수 대역을 결정하는 요소이나, 이것을 무리하게 높일 수는 없다. 이는 구현할 수 있는 샘플링 주파수의 제한이 있으며, 잡음의 영향이 커지는 단점도 발생할 수 있다.

이러한 조건들을 종합할 때 적절한 필터의 형태를 제안할 수 있다. 모델이 상대 차수가 2인 2차 시스템이라고 하면, 식 (11)과 같이 상대 차수가 2이고 분모의 차수가 3차인 필터가 가장 무난한 성능을 보이며, 절점 주파수는 전체 시스템의 대역폭 정도에서 결정할 수 있다.

$$Q(s) = \frac{3\tau s + 1}{(\tau s)^3 + 3(\tau s)^2 + 3(\tau s) + 1} \tag{11}$$

3. 강인 제어기 설계에 대한 모의실험

3.1 모의실험의 구성

모의실험은 PD, 귀환 선형화, 외란 관측기 각각에 대하여 Matlab의 Simulink를 사용하여 구현하였으며, 사용될 모터와 구동부로 구성된 페루프 시스템의 전달 함수는 Dynamic Signal Analyzer를 이용하여 Phase-continuous Swept Sine을 입력으로 실험적으로 보테 선도 그림 3을 구하고 이것으로부터 입력 전압과 모터의 각속도 사이의 전달함수를 식 (12)와 같이 구하였다.

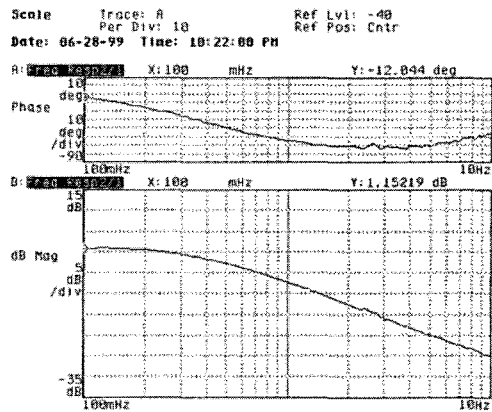


그림 3. 페루프 시스템의 주파수 응답

$$P(s) = \frac{7864.32}{s + 3.3} \tag{12}$$

여기서 설계된 외란 관측기는 제어대상 시스템의 상대 차수와 하드웨어로 구현할 때 계산량을 고려하여 구현 가능한 시스템이 되기 위해서는 $Q(s)P_n^{-1}(s)$ 의 분모 차수가 분자 차수보다 같거나 크게 선정하여야 하므로, 식 (13)과 같은 Q_{20} 형태의 Q -필터를 사용하였으며, 이때 τ 는 필터링하고자 하는 외란의 절점주파수로서 넓게하면 좋지만 너무 넓게하면 노이즈에 민감하다. 따라서 1kHz의 샘플링을 갖는 제어시스템이므로 1/10 배인 100hz로 하였다. 또한, 공칭 모델에 대하여 제어 성능을 얻기 위해 설계된 PD 제어기의 K_P, K_D 는 식 (14)와 같이 설정하였다.

$$Q(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)^2} \quad (13)$$

$$K_P = 0.6 (sine), 0.3 (step) \quad (14)$$

$$K_D = 0.001 (sine), 0.005 (step)$$

외란은 1-링크 평면 매니퓰레이터를 모터에 연결했을 때 발생하는 토크 외란을 인가하여 모의실험을 하였다.

3.2 PD, 강인 제어기에 대한 모의실험

1-링크 평면 매니퓰레이터를 모터에 연결했을 때의 동역학 방정식은 $\tau = ml^2\ddot{\theta} + mgl\sin\theta$ 이다. 여기서 $mgl\sin\theta$ 항의 비선형적 성분이 모터의 입력에 직접적인 영향을 미치는 토크외란으로 작용한다. 식으로부터 외란은 θ 가 0도일 때는 없으며, 90도일 때 가장 크게 나타나 정상상태 에러가 가장 클 것임을 예측할 수 있다. 모의실험은 명령의 변화에 대한 추종능력을 보기 위해 ± 45 도의 진폭을 갖는 단진동운동과 외란의 영향이 가장 큰 90도에서 95도로의 계단함수를 추종하도록 했다.

(1) PD 제어기에 의한 위치 응답

그림 4와 그림 5는 PD 제어기에 대한 블록선도와 모의실험을 위한 Simulink이다.

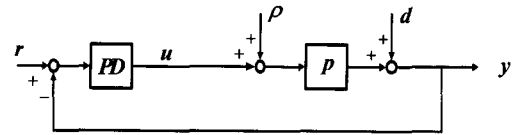


그림 4. PD제어기의 블록선도

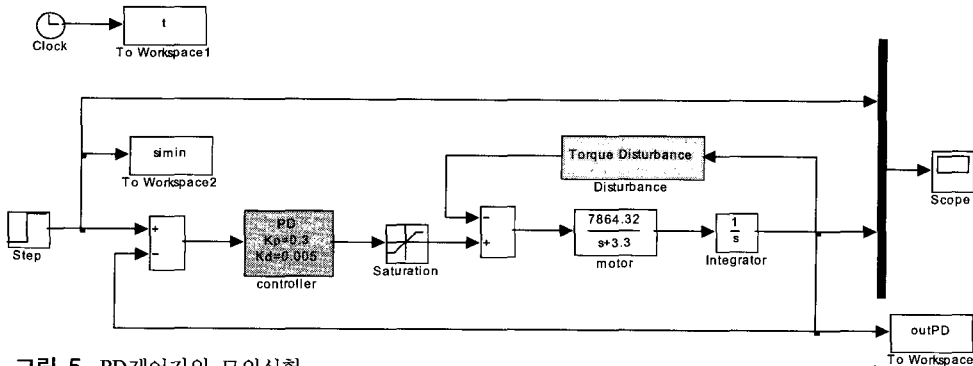
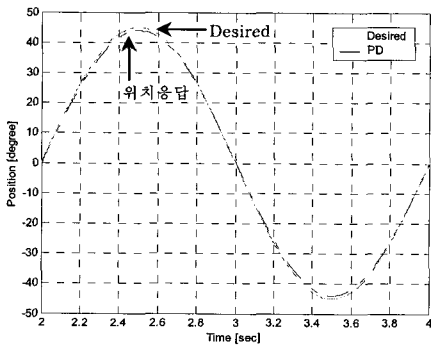
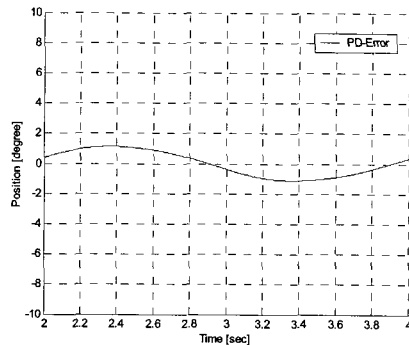


그림 5. PD제어기의 모의실험



(a) 위치응답



(b) 위치오차

그림 6. 정현파 입력에 대한 PD제어기의 모의실험 결과

그림 6에서의 위치오차를 보면 각도에 따라서 변화하는 것을 볼 수 있으며 약45도 근방에서 1.2도 정도의 에러가 발생함을 알 수 있다. 그리고 외란의 크기가 가장 크게 나타나는 90도에서는 정상상태의 에러가 약 3.2도 정도 나타남을 확인할 수 있다. 위의 결과를 바탕으로 PD 제어기가 외란의 인가에 적절하게 보상하지 못함을 알 수 있다.

(2) 외란 관측기를 추가한 강인 제어기에 의한 위치 응답

외란 관측기가 추가된 블록선도와 모의실험을 위한 Simulink는 각각 그림 7과 그림 8이며, 정현파와 계단함수에 대한 위치응답에 대한 모의실험 결과는 그림 9 이다.

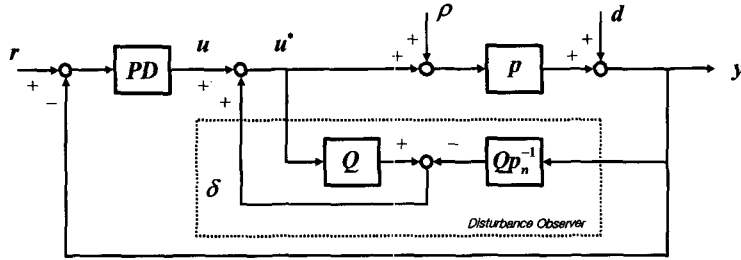


그림 7. 외란 관측기를 추가한 강인 제어기의 블록선도

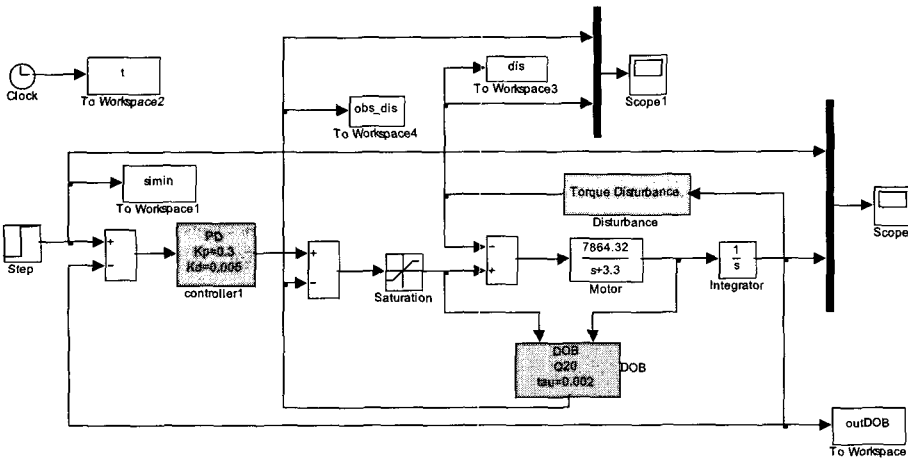


그림 8. 외란 관측기를 추가한 강인 제어기의 모의실험

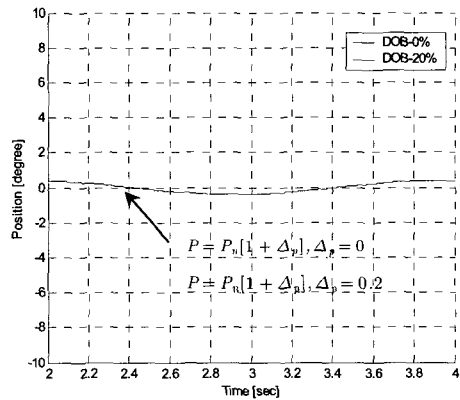
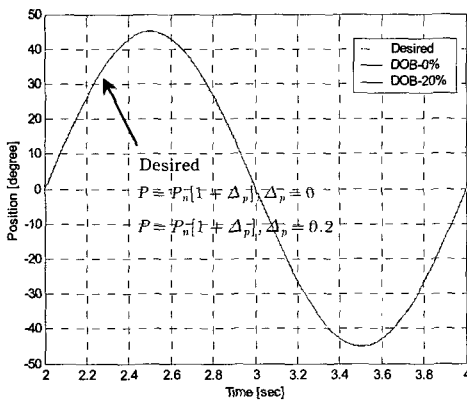


그림 9. 정현파 입력에 대한 강인 제어기의 모의실험 결과

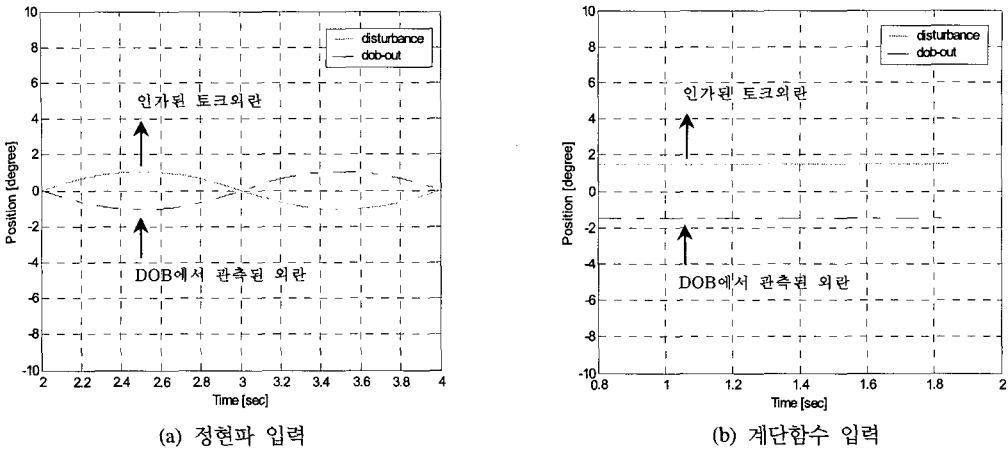


그림 10. 인가된 외란의 형태와 외란 관측기에 의해 관측된 외란

모델링 오차가 없는 경우와 모델링 오차가 20% 발생한 각각의 경우에 정현파에 대한 위치응답 그림 9에서 나타난 결과에서 외란 관측기가 외란의 영향을 제거하여 제어 명령을 잘 추종해 나감을 확인 할 수 있으며, 이러한 외란 제거의 근거를 그림 10에서 잘 나타내고 있다. 그림 10에서 나타나는 것과 같이 어느 정도의 모델링 오차 상관없이 관측된 외란이 인가된 외란과 거의 일치하므로 이를 더하여 외란을 제거할 수 있게 되는 것이다. 즉, 외란 관측기가 모델링 오차 및 토크 외란을 포함하는 비선형 성분을 제거하는 역할을 충실히 수행하고 있음을 증명한다.

정현파에 대한 위치응답에서 위치 오차가 발생하는 이유는 제어시스템의 형이 작기 때문이다. 따라서 이러한 오차를 줄이기 위해 적분제어기를 추가하여 제어시스템의 형을 증가시킬 필요성이 있다.

3.3 모의실험 결과의 분석

3.2절의 결과를 주파수 영역에서 해석하기 위하여 제어 명령, 토크 외란 그리고 출력 외란과 출력의 관계를 보대선도로 나타내었다. 각 보대선도에서 PD에 대한 보대선도는 실선, PD+DOB에 대한 보대선도는 점선으로 나타낸다.

그림 11은 제어명령과 출력과의 관계를 나타낸 것으로 제어 명령이 출력에 어떠한 영향을 미치는지를 확인할 수 있으며, 이상적인 시스템에서 제어 명령과 출력은 같아야 한다. 그림 11의 두 제어 시스템이 정확히 일치함을 보아서 외란관측기가 출력에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러나 0dB보다 높은 부분이 있는 것으로 봐서 제어가 약간 잘못 설계되었음을 알 수 있다.

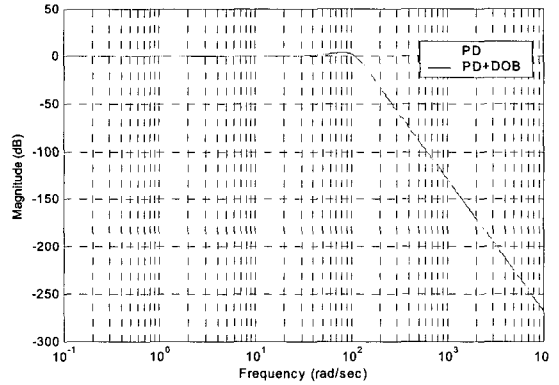


그림 11. 제어 명령과 출력과의 관계

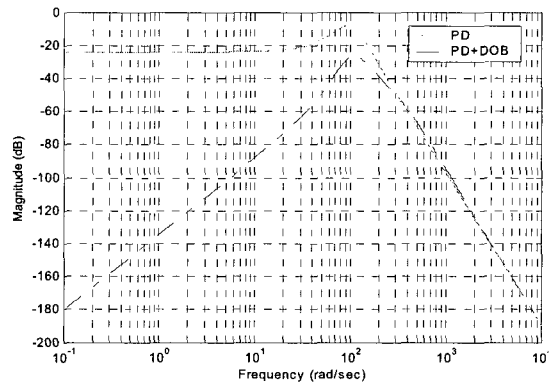


그림 12. 토크 외란과 출력과의 관계

그림 12는 토크 외란과 출력과의 관계를 나타낸 것이다. 즉, 토크 외란이 출력에 미치는 영향이다. 따라서 이상적인 시스템에서 토크 외란에 대한 출력은 0이어야 한다.

다. 그림에서 보듯이 DOB의 강력한 외란 제거 능력을 확인할 수 있다. 즉, 입력된 토크 외란이 해당하는 주파수의 값만큼 감쇄되어 출력에 영향을 미친다고 해석된다.

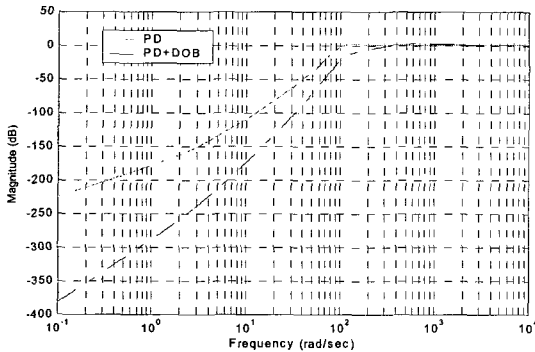


그림 13. 출력 외란과 출력과의 관계

그림 13은 출력 외란과 출력과의 관계를 나타낸 것으로 토크 외란과 마찬가지로 이상적인 시스템에서 토크 외란에 대한 출력은 0이어야 한다. 그림에서 보듯이 PD 제어기의 외란 제거 능력과 비교하여 DOB의 외란 제거 능력이 훨씬 뛰어남을 알 수 있다.

모의실험의 결과 외란 관측기가 기존의 제어기에 비해 서 외란을 제거하는 능력이 뛰어남을 확인할 수 있었다.

4. 결론

비선형 성분을 갖는 시스템의 정밀 위치제어를 위하여 모터의 부하변화, 모델링 오차 및 기계적 비선형 성분과 같은 공칭 모델과의 오차를 외란으로 간주하여 보상하는 외란 관측기 기반 강인제어기의 설계방법을 제안하였다. 그리고 제안한 제어기가 외란에 대해 성능이 뛰어남을 모의실험을 통하여 중력에 대해 외란을 발생시키는 1-링크 매니퓰레이터에 대하여 확인하였다. 모의실험 결과 외란 관측기가 PID제어기 및 궤환 선형화기가 추가된 제어기보다 외란에 대하여 안정성이 뛰어남을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] John J. Craig, "Introduction to Robotics : Mechanic and Control", Addison_Wesley, 1986
 [2] K. K. D. Young, "Controller Design for a Manipulator

Using Theory of Variable Structure Systems", IEEE Trans. on Syst., Man, Cybern., Vol SMC-8, pp.101-109, Feb. 1978

[3] T.C.Hsia, "Adaptive Control of Robot Manipulators : A Review", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, pp.183-189, 1986
 [4] K. Ohnishi, "A New Servo Method in Mechatronics", Trans. Japanese Society of Electrical Engineering, Vol.107-D, pp.83-86, 1987
 [5] S. Lee, "Robust Digital Tracking Controllers for High-Speed / High-Accuracy Positioning System", Ph.D. Dissertation, U.C Berkeley, 1994
 [6] K. Ohnishi, Masaaki Shibata, and Toshiyuki Murakami, "Motion Control for Advanced mechatronics", IEEE/ASME Trans. On Mechatronics, Vol.1, No.1, March 1996
 [7] Lee, H. S. and Tomizuka, M., "Robust Motion Controller Design for High-Accuracy Positioning Systems", IEEE Tans, on Industrial Electronics, Vol.43, No.1, pp.48-55, 1996
 [8] C. Bohn, and etc., "An Analysis Package Comparing PID Anti-windup Strategies", IEEE Control Systems Magazine, Vol.16, No.2, April, 1995
 [9] Manfred Morari, Evangelhos Zafiriou, "Robust Process Control", Prentice-Hall, 1989
 [10] H. T. Choi, "Analysis and Design of Model-based Internal-loop Compensation", Ph.D. Dissertation, 2000

여 희 주(Hee-Joo Yeo)

[정회원]



- 1988년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)
- 1990년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 한양대학교 전자공학과(공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 대전대학교 전자공학과 부교수

<관심분야>

모터제어, 머신비전, Sensor-Based 로봇제어, 다중로봇 시스템의 협조제어, 임베디드시스템