

DSP를 이용한 강인 제어기의 설계 및 구현

여희주^{1*}

Design and Implementation of a Robust Controller Using DSP

Hee-Joo Yeo^{1*}

요약 본 논문은 DSP를 이용한 외란제거 제어기에 기초로 한 강인제어기의 설계기법을 제안한다. 본 논문에서는 외란 관측기의 적용 과정을 살펴보고, 제어기의 효용성을 확인하기 위해 DSP 기반의 하드웨어로 구현하여 외란 관측기의 성능을 확인한다. 결과적으로, 제안한 강인 제어기를 이용함으로써 외란에 대해 시스템을 안정화 시킬 수 있을 뿐만 아니라, 제어 성능을 향상시킬 수 있다. 또한, 하드웨어로의 구현이 복잡하지 않기 때문에 산업 현장에 적용이 편리함을 보인다.

Abstract This paper suggests the design methodology of a robust controller based on disturbance rejection controller using DSP. In this paper, we discuss process to put the disturbance rejection controller into practice, and examine the performance of disturbance rejection controller by implementing it on DSP based hardware to evaluate usefulness of controller. As a result, the proposed robust controller can not only stabilize system against disturbance, but it improve controlling performance. And also, it shows convenient to put into practical use of industrial sites due to its easy implementation on the hardware.

Key Words : robust controller, disturbance rejection controller

1. 서론

로봇 제어시스템의 성능에 대한 관심도가 증가하면서 좀 더 정밀하고 강인한 움직임을 위한 제어기법의 개발이 요구되어 지고 있다. 정밀 제어시스템의 설계에 있어 어려운 점은 거의 대부분의 제어 대상은 파라미터·모델링의 부정확성과 상호 간섭효과 등이 제어의 출력에 영향을 미쳐 정밀도를 떨어뜨리고, 전체적인 시스템의 성능을 저하시키는데 있다. 따라서 선형 시스템에 적용되는 PID 제어기와 같은 간단한 제어 알고리즘으로는 정밀한 제어가 어렵다.

따라서 이러한 문제점을 극복하기 위하여 다양한 형태의 진보된 제어방법이 제안되었다. 외란관측기(disturbance observer, DOB)[1],[2],[3][4], 적응 강인제어기(adaptive robust control, ARC)[5] 모델에 기초한 외란억제 제어(model based disturbance attenuation, MBDA)[6], 그리고 강화된 강인성을 가지는 내부 모델 제어(enhanced internal

model control, EIMC)[7] 등이 좋은 예이다. 이러한 방법들은 일반적으로 2-루프(loop) 구조를 가지는 제어기 설계를 요구한다. 여기서 적응제어는 제어기의 파라미터를 조정하는 알고리즘이 복잡하여 많은 연산 작용이 소모되기 때문에 실제 적용이 어려운 실정이다. 모델 참조 강인 제어 중에 외란 관측기(disturbance observer)는 시스템을 선형적으로 모델링하고 선형적 특성과의 오차 및 비선형적 요소를 외란으로 간주하여 보상해 주는 것으로 구현시 복잡한 계산이 없이 구현할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 복잡한 연산 없이 구현할 수 있으며 외란 제거 능력이 우수한 DSP를 이용한 강인 제어기를 설계하는 방법을 제안한다. 특히, 실제 외란 관측기의 구조에서 제어 입력의 포화가 발생하면 전체 시스템이 불안정해질 수 있으므로 이를 해결하기 위한 방법을 제시한다. 또한, 제안된 제어기의 우수성을 보이기 위하여 비선형 성분을 가지는 1-링크 평면 매니퓰레이터를 제어하기 위한 DSP 기반의 하드웨어를 구성하여 고전 선형제어기인 PD, 시스템의 모델링을 이용한 귀환 선형화 제어기법과 비교 실험하여 제안된 강인제어기의 효용성을 보이고자 한다. 결과적으로, 제안한 강인 제어기를 이용함으로

¹대전대학교 전자공학과

*교신저자: 여희주(hjyeo@daejin.ac.kr)

써 외란에 대해 시스템을 안정화 시킬 수 있으며, 제어 성능을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 하드웨어로의 구현이 복잡하지 않기 때문에 산업 현장에 적용이 편리함을 보인다.

2. 외란제거 제어기를 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 설계하는 것이고, 이는 주파수 영역에서 표현하는 방법으로 민감도 함수를 사용하여 확인할 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[5].

2.2 두개 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 설계

된다. 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 결정된 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.

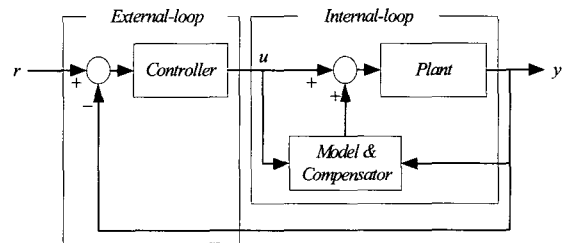


그림 1. 두개의 루프를 갖는 제어 시스템의 구조

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 외란의 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 제거 제어기에 기초한 강인 제어기

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.

구조의 분명한 이해를 위하여 이상적인 경우를 생각해 보자. 이는 그림 2에서 Q 가 1일 경우에 해당한다. 내부 루프에서는 제어기의 출력과 역모델의 출력의 차가 앞으로 보상이 되어진다. 여기서 역모델의 출력에는 제어기의 출력뿐만 아니라 외란과 모델링의 오차도 포함이 되기 때문에 이 차이가 결국 앞으로 더해서 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 causality에 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 절점 주파수 이상에서는 성능 개선에 도움을 주지 못한다고 생각할 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 , τ , ρ , d , ζ , y 는 각각 제어 명령, 제어 입력, 추정 외란, 토크 외란, 출력 외란, 측정 잡음, 출력의 s-변환이다.

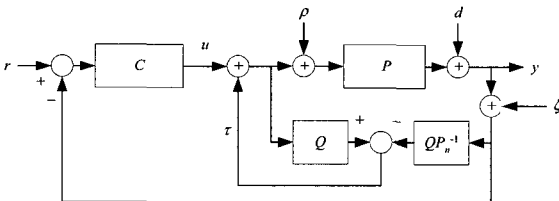


그림 2. 외란 제거 제어기를 적용한 제어 시스템의 블록도

이를 수식으로 보기 위하여 그림2에서 출력 y 와 제어 입력, 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_{uy} , $P_{\rho y}$, P_{dy} 그리고 $P_{\zeta y}$ 는 식 (7), (8), (9), (10)과 같다.

여기서 C 는 제어기 이며, P_n 을 기준으로 설계된다.

$$y = P_{ry} \cdot r + P_{\rho y} \cdot \rho + P_{dy} \cdot d + P_{\zeta y} \cdot \zeta \quad (6)$$

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

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

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

$$P_{\zeta y} = \frac{CPP_n + PQ}{[1-Q]P_n + CPP_n + PQ} \quad (10)$$

외란 관측기는 구조의 특성으로 볼 때 제어명령이 0 이라도 모델과 시스템의 차이 그리고 외란에 의하여 이를 제거하려는 제어입력을 발생한다. 이때 제어명령에 의하여 제어입력이 발생하면, 쉽게 제어입력이 포화가 되는 상황이 발생한다. 또한 외란이 커져서 제어 입력이 이를 제거하기 위한 노력으로 제어 입력이 포화되기도 한다. 실제 외란 관측기의 구조에서 제어 입력의 포화가 발생하면 전체 시스템이 불안정해질 수 있다. 이는 다음 그림

3에서 직관적으로 이해 할 수 있다. 모든 제어 시스템의 제어 입력을 제한하는 제어 입력의 포화 요소를 가지고 있다. 만약 시스템에 인가되는 제어 입력은 제한이 되면서 그림 3의 굵은 선으로 표시된 내부의 피드백에 제어 입력이 제한되지 않는다면 양의 피드백에 의하여 이 루프의 신호는 발산할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 외란 관측기는 내부 안정도를 가지고 있지 않다. 이를 해결 하기위한 방법으로 그림 4에서와 같이 Q 필터의 입력에도 시스템이 가지고 있는 것과 동일한 제어 입력의 포화요소를 구현해 주는 기법을 제안한다. 이것이 제어입력이 발산하는 것을 방지해 주는 중요한 역할을 한다.

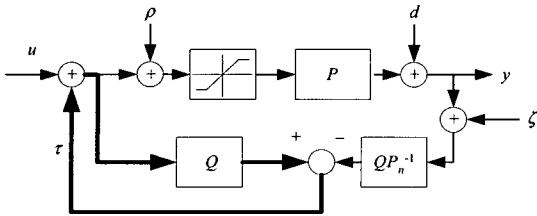


그림 3. DOB의 제어 입력 포화 문제의 직관적인 이해

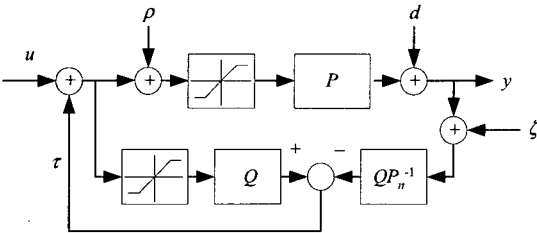


그림 4. DOB에서 포화문제를 해결하기 위한 방법 제안

3. 외란 제거 강인제어기의 설계에 대한 실험

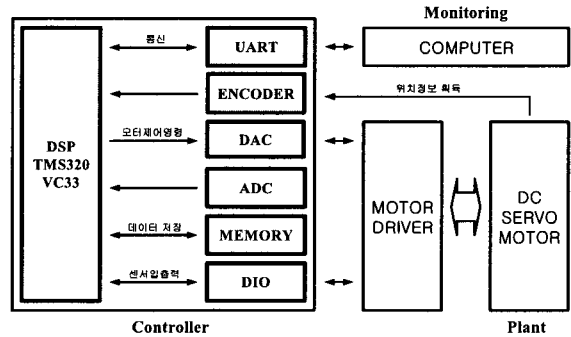
3.1 실험장치의 구성

실험을 위한 시스템은 그림 5와 같이 구성하였다. 구성을 살펴보면 알고리즘 수행을 위한 DSP 보드(TMS320VC33-150), 모터를 구동하기 위한 모터 드라이브(advanced motion controls사의 25A8 series), SANYO사의 DC Servo Motor 그리고 비선형 성분을 테스트하기 위한 1-링크 매니플레이터로 구성되어 있으며, 위치 명령에 대한 추종 상태를 확인하기 위한 데이터는 시리얼 통신으로 컴퓨터에서 받아서 HP VEE로 처리한다. 실험은 계단함수 입력에 대한 위치응답의 측정이며, 제어를 위한 샘플링 시간은 1msec이며, K_p 와 K_u 는 실험적으로 각

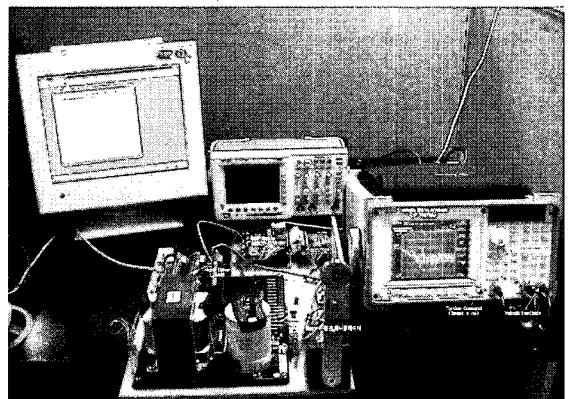
각 최적의 값인 0.3, 0.005로 설정하였다. 또한, Q-필터는 구현 가능한 시스템이 되도록 하기 위해서 $Q(s)P_n^{-1}(s)$ 의 분모 차수가 분자 차수보다 같거나 크게 하기 위하여 Q-필터의 상대차수가 2인 $Q_{20}(s) = \frac{1}{(0.002s + 1)^2}$ 을 사용하였다.

표 1. 모터 드라이브의 제원

No.	사 양	수치값
1	모델	25A8
2	DC 전압	20~80 V
3	피크 전류	±25 A
4	최대 전류	±12.5 A
5	스위칭 주파수	22 kHz ± 15%
6	온도 범위	0° to +65°C
7	셋 다운 오버 전압	86 V
8	대역폭	2.5 kHz
9	크기	129.3 x 75.8 x 25.1 mm
10	무게	0.28kg
11	기준 입력	Max. ±15 V



(a) 제어기 성능 테스트를 위한 H/W 구성도



(b) 제어기 성능 테스트를 위한 실험 장치

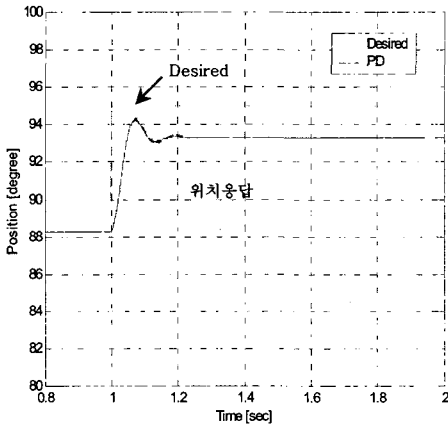
그림 5. 제어기 성능 테스트를 위한 실험 환경

3.2 PD, 궤환 선형화, 강인 제어기에 대한 실험

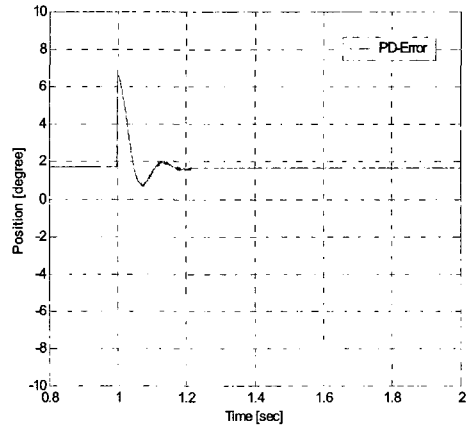
1-링크 평면 매니플레이터를 모터에 연결했을 때, $mg\sin\theta$ 항의 비선형적 성분이 모터의 입력에 직접적인 영향을 미치는 토크외란으로 작용한다. 따라서 실험은 명령의 변화에 대한 추종능력을 보기 위해 외란에 대한 보상능력을 확실하게 볼 수 있도록 외란의 영향이 가장 큰 90도에서 95도로의 계단함수를 추종하도록 하였으며, 이때의 위치오차를 측정하였다.

(1) PD 제어기에 의한 위치 응답 실험

그림 6은 계단함수 입력에 따른 PD 제어기의 위치 응답과 오차의 결과이다. 결과와 같이 외란이 가장 큰 90도에서 95도로의 계단함수 입력 시 약 1.85도 정도의 에러를 나타내고 있다. 위의 결과를 바탕으로 PD제어기가 외란의 인가에 적절하게 보상하지 못함을 알 수 있다.



(a) 위치응답

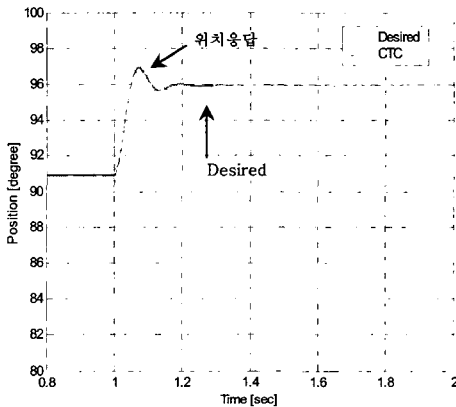


(b) 위치오차

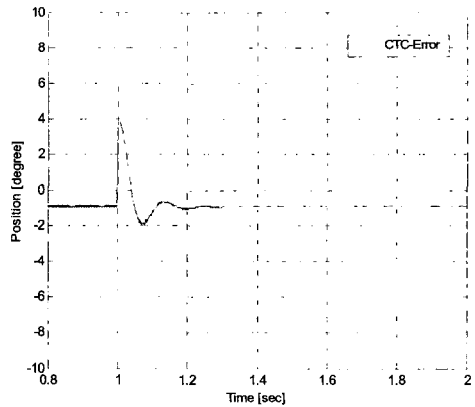
그림 6. 계단함수 입력에 대한 PD제어기의 실험결과

(2) 궤환 선형화기를 추가한 제어기에 의한 위치 응답 실험

궤환 선형화 제어기에 대한 실험결과는 그림 7과 같다.



(a) 위치응답



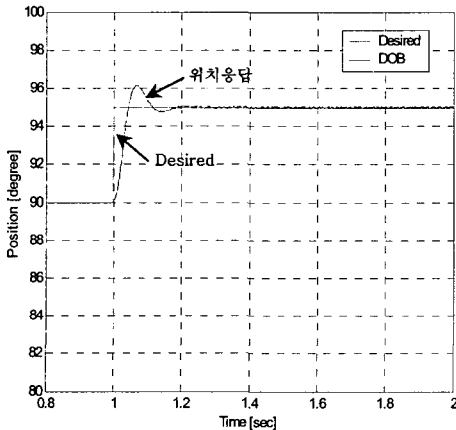
(b) 위치오차

그림 7. 계단함수 입력에 대한 궤환 선형화기의 실험결과

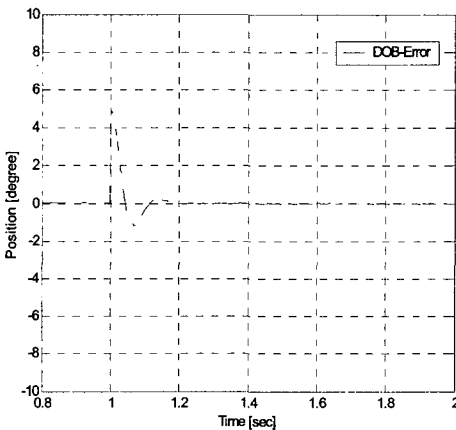
결과와 같이 외란이 가장 큰 90도에서 95도로의 계단 함수 입력 시 약 0.9도 정도의 위치오차가 생겼다. PD제어기에 의한 결과보다 개선되었음을 알 수 있으나 마찰 성분과 같은 모델링이 쉽지 않은 외란 성분에 의해 제어 명령을 정확하게 추종하지는 못하고 있다.

(3) 외란 제거 강인 제어기에 의한 위치응답 실험

모델링 오차 및 공칭모델과 다른 비선형 성분을 외란으로 추정하여 공칭모델이 되도록 하는 외란 관측기를 적용하여 계단함수 입력에 대한 위치 응답과 오차의 실험결과가 그림 8과 같이 측정되었다. 결과적으로 외란 관측기가 외란을 제거하는 성능이 뛰어남을 검증하였다.



(a) 위치응답



(b) 위치오차

그림 8. 계단함수 입력에 대한 외란 관측기의 실험결과

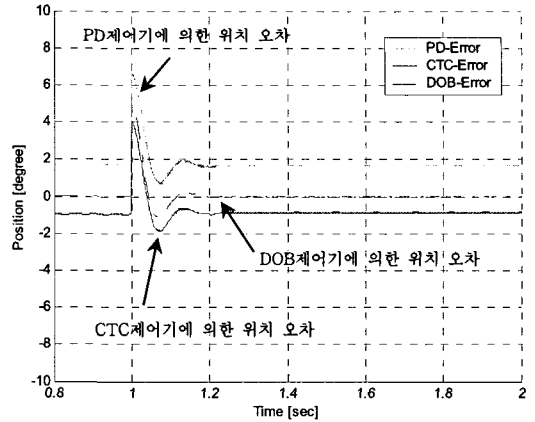


그림 9. 계단함수에 대한 제어기의 위치오차 비교

지금까지 위치명령에 대해 PD 제어기와 PD 제어기에 외란을 보상하기 위하여 궤환 선형화기와 본 논문에서 제안한 강인 제어기를 적용하여 실험을 하였다. 실험결과에 의해 각각의 제어기에 대한 위치오차는 그림 9와 같으며, 결과적으로 DOB 기반의 강인제어기가 비선형성분에 해당하는 외란을 적절히 보상했음을 확인하였다.

4. 결론

본 논문은 DSP를 이용한 외란 제거 제어기에 기초로 한 강인 제어기의 설계기법을 제안하였다. 특히, 실제 외란 관측기의 구조에서 제어입력의 포화가 발생하면 전체 시스템이 불안정해질 수 있으므로 이를 해결하기 위한 방법을 제시하였다. 그리고 제안한 제어기가 외란에 대해 성능이 뛰어남을 DSP를 기반으로 한 실험 장치를 구성하여 중력에 대해 외란을 발생시키는 1-링크 매니플레이터에 대하여 실험적으로 확인하였다. 결과적으로, 제안한 강인 제어기를 이용함으로써 외란에 대해 시스템을 안정화시킬 수 있으며, 제어 성능을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 하드웨어로의 구현이 복잡하지 않기 때문에 산업 현장에 적용이 편리함을 보였다.

참고 문헌

[1] K. Ohnishi, "A New Servo Method in Mechatronics", Trans. Japanese Society of Electrical Engineering, Vol.107-D, pp.83-86, 1987
 [2] S. Lee, "Robust Digital Tracking Controllers for

- High-Speed / High-Accuracy Positioning System", Ph.D. Dissertation, U.C Berkeley, 1994
- [3] K. Ohnishi, Masaaki Shibata, and Tosiyuki Murakami, "Motion Control for Advanced Mechatronics", IEEE/ASME Trans. On Mechatronics, Vol.1, No.1, March 1996
- [4] 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
- [5] 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
- [6] Choi, B. K., Choi, C.H., and Im, H."Model-Based Disturbance Attenuation for CNC Machining Centers in Cutting Process," IEEE/ASEM Trans. on Mechatronics, Vol. 4, No.2. 157-168, 1999
- [7] Zhu, H. A., Hong, G. S., Teo, C. L., and Poo, A. N. "Internal Model Control with Enhanced Robustness," Int. J. Systems Sci., Vol 26, No.2. 277-293, 1995
- [8] C. Bohn, and etc., "An Analysis Package Comparing PID Anti-windup Strategies", IEEE Control Systems Magazine, Vol.16, No.2, April, 1995

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