

고정 소수점 연산을 이용한 DVDR 서보의 강인 제어 알고리즘 해석

Analysis of Robust Control Algorithms for DVDR Servo using Fixed-Point Arithmetic

박창범*, 김홍록*, 서일홍*

* 한양대학교 전자공학과(Tel : +82-031-408-5802; Fax : +82-031-408-5803 ; E-mail: ihsuh@email.hanyang.ac.kr)

Abstract : In the recent, the size of hardware is smaller and the structure is simpler, without reducing the performance of the digital controller. Accordingly, the fixed-point arithmetic is very important in the digital controller. This paper presents simulation to apply the robust control algorithms to DVDR servo controller using the floating-point and fixed-point arithmetic from the matlab. Also, it analyses and compares the performance of control algorithms in the each of point calculation and presents a method for improvement of drop in the performance, quantization error and overflow/underflow from using the fixed-point arithmetic.

1. 서론

최근 정보 저장 장치 기술은 초 소형화, 기록 밀도 및 정보 전송속도의 고도화가 빠른 속도로 발전하고 있다. 이 분야는 현재 DVD, CD로 대표되는 Optical 방식과 HDD로 대표되는 자기 기억 저장기술로 양분되어 있다. 특히 정보 저장 장치의 단위 드라이브 당 저장 용량의 급격한 증가는 저장 장치의 고정밀 제어기술을 요구하게 되었고 사용 범위가 다양해짐에 따라 기인한 환경변화에서도 성능을 유지하는 강인성도 요구되어진다. 하지만 제품의 저가격과 시스템의 소형화, 단순화는 이러한 제어기술의 제한을 부여하게 되었다. 고정 소수점으로 디지털 제어를 설계함으로써 제어기의 고정밀, 강인성을 보상하기 힘들게 되었다.

본 논문에서는 Matlab을 이용하여 DVD 트랙킹 구동기에 대한 모델링을 바탕으로 설계한 디지털 광 픽업 서보 시스템에 대한 강인제어 알고리즘들을 고정 소수점으로 구현하여 각 알고리즘의 성능을 확인하고 부동 소수점으로 구현한 제어기와의 성능을 비교 분석 하였다.

2. DVD 드라이브 서보 시스템

2.1 DVD의 추종 구동기 모델링

광 픽업 서보 시스템은 포커싱 구동기에 대한 모델링을 바탕으로 포커싱 서보(focusing servo)와 트랙킹 서보(tracking servo)를 중심으로 구성되어 있는데 일반적으로 광학 디스크 드라이브의 트랙 추종 제어에서 사용하는 구동기의 형태는 축 접동 방식(Hinge Type)과 렌즈 병진 방식(Wire Type)이 있으나, 여기서는 렌즈 병진 방식의 구동기를 사용하였다[1]. 이를 스프링-질량-댐퍼 형태의 운동부와 전자계로 모델링 하여 식(1)과 같이 3차 시스템으로 나타낼 수 있으며, 매개변수는 ω_m 은 1111.12 rad/sec (176.84 Hz), ζ_m 는 0.04, $w_{R/L}$ 은 1.2 이다. 이를 보 대선도로 나타내면 그림 1의 (1)과 같다.

$$G(s) = \left(\frac{\omega_m^2}{s^2 + 2\zeta_m \omega_m s + \omega_m^2} \right) \left(\frac{\omega_{R/L}}{s + \omega_{R/L}} \right) \quad (1)$$

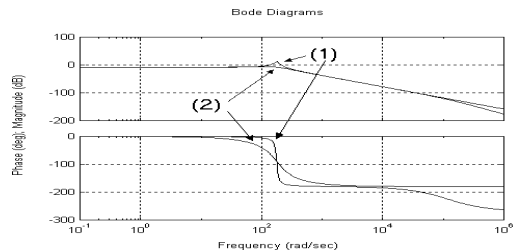


그림 1. 추종 구동기 모델의 보대 선도

2.2 서보계의 설계

레이저빔이 트랙 중심으로부터 벗어나면, 기록할 때에는 마크가 벗어나서 기록되고, 재생할 때에는 출력이 저하된다. 일반적으로 마크의 위치와 레이저빔 중심이 약 0.1 μ m 벗어나면, 재생 신호는 약 10% 떨어진다. 보통 이 벗어남을 0.10 - 0.12 μ m이내에 오도록 하고 있다. 추종 오차 검출 광학계의 오차와 추종이 불가능한 고주파 영역의 주기적 또는 비 주기적인 이탈이 있기 때문에 서보계에 허용되어지는 편차는 일반적으로 약 0.03 μ m 이하이다. 또한, 트랙킹 서보로 트랙 추종을 하지만, 픽업 구동기의 좌우 이동이 가동범위가 제한되어 있기 때문에 코어스 서보(Coarse Servo)를 이용하여 이동 범위가 큰 DC성분을 제어한다. 즉, 코어스 서보는 픽업 구동기 전체를 이동시키는 역할을 한다.

광 디스크 드라이브는 그림 2에서 보이는 바와 같이 크게 제어기와 플랜트, 그리고 외란으로 구분할 수 있다. 광 디스크 구동기의 제어기는 원하는 위치 입력에 대한 출력의 관계를 결정하며 이것을 방해하는 외란(disturbance : ω, d, n)에 대한 분석과 이들이 PES에 미치는 영향을 해석하는 것이 매우 중요하다.

그림 2에서 ω 는 토크 외란(torque disturbance)을 나타내며, 주로 외부 진동 및 충격에 기인하고, n 은 전력 증폭기 잡음, 아날로그/디지털 변환기(ADC)와 디지털/아날로그 변환기(DAC)의 제한된 해상도(resolution)에 의한 양자화 오차에 의해 나타난다. 스피들 모터와 디스크 회전 에 따른 디스크

의 움직임은 기계적 외란 d (mechanical disturbance)에 직접적인 영향을 미친다. 특히 스핀들 속도의 증가는 디스크의 진동을 더욱 증폭시키며, 안정적인 트랙 추종의 신뢰도를 낮추게 된다.

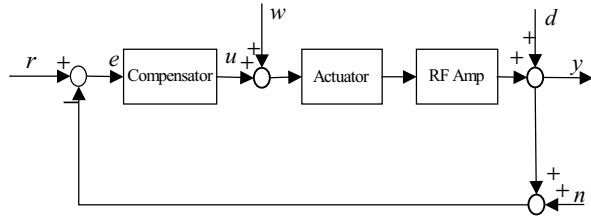


그림 2. DVD 제어 시스템의 블록도

3. 강인제어 알고리즘

강인제어기는 서보 제어기와는 별도로 플랜트 모델의 불확실성, 플랜트의 변화, 그리고 외란 등으로 인해 발생하는 플랜트 모델과의 오차를 모두 통합된 등가 외란으로 간주하여 보상하는 보상기를 갖는 제어 방식의 제어기를 말한다. 본 논문에서는 모델에 기초한 방법으로 내부 모델 제어기(Internal Model Controller, IMC)와 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB) [2], 그리고 강인 내부 보상기(Robust Internal-loop Compensator, RIC) [3] [4]를 사용하였다. 이러한 제어기들은 외란을 보상한다는 관점에서 동일한 제어 방식으로 볼 수 있으나, 구현하는 방식에는 조금씩 차이가 있다.

먼저 고정 제어기를 설계하기 위해 DVD 트랙 추종 구동기 모델에 근거한 선형 제어기는 샘플링 시간, T_s 를 $20\mu\text{sec}$ 로 하여 2.5kHz 대역폭과 40도 위상 여유를 갖도록 설계하였다. 먼저 PI 제어기를 사용하여 대역폭을 확보하도록 하였으며, 위상 앞섬 보상기를 사용하여 위상 여유를 확보하였다. 설계된 제어기는 식(2)와 같으며, 이렇게 구하여진 제어기 $C(s)$ 는 Bilinear 변환 방법을 이용하여 이산 시간 영역의 제어기로 변환하여 적용하였다[5].

$$C(s) = \left(\frac{aTs+1}{Ts+1} \right) \left(\frac{k_p s + k_i}{s} \right) \quad (2)$$

외란 관측기의 설계를 위한 공칭 모델은 식(3)과 같은 모델로 하였으며 ω_n 는 1105.84 rad/sec (176 Hz), ζ_n 는 0.5로 하여 1차 공진이 없는 모델을 선택하였다. 이는 그림 1의 (2)와 같다. Q 필터는 식(4)과 같은 3차 필터로 구성하였으며, 이때 τ 는 0.0001로 약 1.6kHz에서 절점 주파수를 가지도록 설계하였다.

$$G_n(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

$$Q(s) = \frac{3\tau s + 1}{(\tau s)^3 + 3(\tau s)^2 + 3\tau s + 1} \quad (4)$$

4. 강인제어 알고리즘의 모의 실험

디지털 제어기를 설계하는 방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 설계 기법이 잘 개발된 연속 시간 영역에서 설계하여 이산 시간 영역으로 변환하는 것이고, 다른 하나는 직접 이산 시간 영역에서 설계하는 것이다. 본 논문에서는 전자의 제어기 설계방법을 사용하였다. 이 방법은 연속 시간 영역에서의 제어기 설계가 쉽고 샘플링 주기는 충분히 작게 하면 이산 영역으로의 근사화가 적절한 수준으로 정확하게 될

수 있다. 또한, 강인 내부 보상기를 갖는 제어기를 설계하고, 여기에 일반적인 선형 제어기 및 강인제어 DOB, RIC를 적용하여 성능을 비교하였다.

모의 실험은 matlab에서 제어기를 설계하여, matlab의 simulink와 simulink에서 지원하는 fixed-point tool box란 추가 기능을 이용하여 구성하고, 수행하였다.

이때 식(4)와 같은 연속적인 토크 외란을, 식(5)와 같은 연속적인 출력 외란을 인가하였다. 여기서 토크 외란은 전기적 장치에 의한 것으로 볼 수 있고, 연속적인 출력 외란은 디스크의 편심 진동등에 의한 것으로 볼 수 있다. 그리고 식(6)과 같이 드라이브의 충격을 불연속적인 출력 외란으로 보고 연속적인 출력 외란과 함께 인가하였다.

$$\rho(t) = 63\mu \cdot 9.8 + 0.5m \cdot \sin(300\text{Hz}) + 0.3m \cdot \sin(100\text{Hz}) \quad (4)$$

$$d(t) = 30\mu \cdot \sin(200\text{Hz}) + 20\mu \cdot \sin(85\text{Hz}) \quad (5)$$

$$s = \frac{100}{s+100} \{ \text{step}(0.05) - \text{step}(0.06) \} \quad (6)$$

4.1 고정 소수점 블록셋을 이용한 모의 실험

우리가 흔히 제어 알고리즘을 시뮬레이션을 수행하기 위해 matlab이란 프로그램을 사용한다. 이러한 프로그램은 다양한 툴들을 지원하고 있는데 그 중에 앞에서 제안된 제어 알고리즘들을 시뮬레이션 하기 위해 고정 소수점이란 블록셋을 사용하였다. 고정 소수점 블록셋은 다이나믹 시스템의 디자인과 이것의 고정 소수점 디지털 하드웨어 상에서의 수행간의 차이를 연결해준다.

고정 소수점 블록셋의 특징들을 살펴 보면 다음과 같다. 첫째, 고정 소수점 시뮬링크 모델을 개발하고 고정 소수점 연산을 사용한다. 둘째, 시뮬레이션 하는 동안 고정소수점 데이터 형태, 스케일링, 라운딩, 오버플로우 등을 처리할 수 있고, 셋째, 부동 소수점과 고정 소수점 연산의 효과를 시뮬레이션 할 수 있다. 특히 고정 소수점 연산에서 스케일링을 적용 시켜야 되는데, 그렇지 않으면 오버플로우가 쉽게 발생하여 정확한 결과 값을 얻을 수가 없다. 이러한 스케일링을 적용하기 위해서 고정 소수점 블록셋에서는 GUI라는 기능을 지원하게 되는데 부동 소수점상에서 시뮬레이션 한 각 블록은 파라미터 값들을 저장하고 있어 이것을 이용하여 고정 소수점에서 적용할 스케일링을 결정할 수가 있다[6].

Matlab에서의 고정 소수점 블록셋은 고정 소수점 제어기를 구현할 수는 있지만 그 제어기의 성능을 최적화 시키는 워드 길이는 사용자가 시뮬레이션을 통해 찾아 내야 한다[7]. 물론 여기서 사용되는 워드 길이는 절대적인 것이 아니다. 고정 소수점인 하드웨어에서도 소프트웨어적으로 부동 소수점을 구현할 수 있다. 하지만 프로그램의 수가 늘어나 연산에서의 속도를 떨어뜨린다[8]. 결국 시스템의 성능을 저하시키는 결과를 낳게 된다. 그러므로 시뮬레이션을 통해 최적의 워드 길이를 결정하는 것은 고정 소수점으로 구성된 하드웨어나 이러한 하드웨어상에서 소프트웨어를 이용하여 제어기를 구현했을 때 제어 알고리즘의 성능을 유지하면서 수행시간이나 비용 등을 줄일 수 있다.

4.2 부동 소수점에서의 강인제어 알고리즘 구현

강인제어 알고리즘의 성능을 비교하기 위해 먼저 matlab의 simulink에서 지원하는 고정 소수점 블록셋을 이용하여 부동 소수점 시뮬레이션을 구현하였다. 먼저 주파수 도메인 상에서 설계한 제어기를 충분한 샘플링 주기를 적용하고 bilinear 변환하여 디지털 제어기로 구현한다. 디지털 제어기는 일반적으로 디지털 필터의 형태로 나타나게 되는데 디지털 필터는 여러 가지 구조의 형태로 나타나게 된다[9]. 여기서는 양자화 에러라든지 오버플로우의

영향을 줄이기 위해서 병렬 구조를 사용하였다.

먼저 강인 내부 보상을 기초한 선형 제어를 구현하여 보았고 거기에 DOB, RIC를 적용하였다. 그림 3, 4, 5는 시간에 대한 위치 응답 특성을 보여주며 X축은 시간(sec)이고 Y축은 위치 응답(μm)을 의미하며 각 알고리즘에 대한 시뮬레이션한 결과를 나타냈다. 이러한 결과로부터 강인 제어를 기존의 선형 제어에 추가적으로 적용한 경우가 선형제어기만을 사용한 경우보다 10배 이상의 성능이 개선됨을 확인할 수 있다. 이것은 부동 소수점을 사용하였기 때문에 강인 제어의 성능이 보장 된다면 예측할 수 있는 결과가 된다.

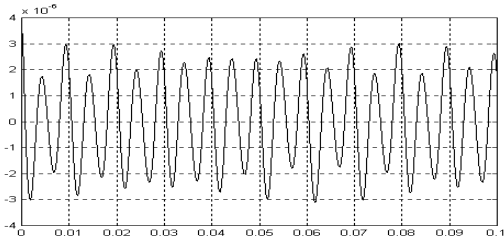


그림 3. 선형 제어기에 대한 위치 응답 특성

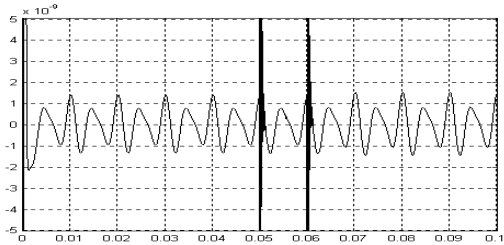


그림 4. DOB를 적용한 제어기에 대한 위치 응답 특성

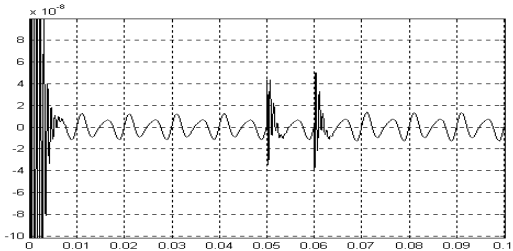


그림 5. RIC를 적용한 제어기에 대한 위치 응답 특성

4.3 고정 소수점에서의 강인제어 알고리즘 구현

부동 소수점에서 시뮬레이션을 통해 각 블록셋에서의 데이터의 값들을 알 수가 있다. 여기서는 고정 소수점이란 제한이 있기 때문에 이러한 데이터의 값들을 가지고 고정 소수점에서 적용한 스케일링 값을 결정하게 된다. 이것은 각 블록에서의 데이터 값들 중에 최소, 최대값을 가지고 여유 값을 적용하여 스케일링을 하게 된다.

그림 6, 7, 8은 고정 소수점에서 각 알고리즘들을 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. 이것을 위의 부동 소수점에서 구현한 알고리즘들의 성능은 유지하면서 최소로 필요로 하는 워드 길이에서 나온 결과를 나타낸 것이다.

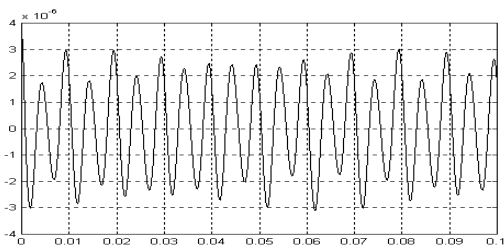


그림 6. 선형 제어기에 대한 위치 응답 (9bit)

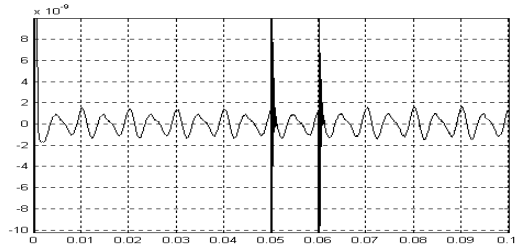


그림 7. DOB를 적용한 제어기에 대한 위치 응답 (21bit)

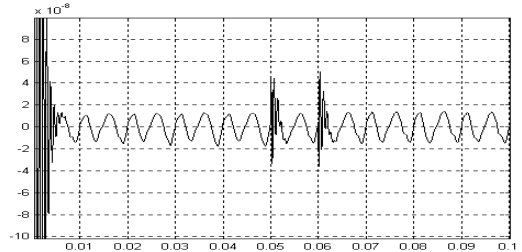


그림 8. RIC를 적용한 제어기에 대한 위치 응답 (21bit)

4.4 각 시뮬레이션에 대한 결과

아래의 표들은 워드의 길이에 따른 디지털 제어기의 성능을 시뮬레이션하고 이 제어기의 성능을 유지할 수 있는 워드의 길이를 나타낸 것이다. 이것은 제어기의 구조를 블록으로 구분하여 시뮬레이션한 후 각 블록의 최적 워드 길이를 얻어서 전체 제어기에 대한 최적 워드 길이를 구하는 방법을 사용하였다. 선형 제어기의 경우에는 워드의 길이가 짧지만 강인 제어기의 경우에는 선형 제어기의 경우보다 많은 워드의 길이가 필요하게 된다. 그러므로 고정 소수점으로 구성된 하드웨어에 이러한 강인제어 알고리즘들을 구현하기 위해서는 많은 워드 길이를 필요로 하게 된다. 하지만 고정 소수점 하드웨어에서는 워드 길이가 고정적이기 때문에 하드웨어의 선택이나 프로그램 작업에 많은 제약이 따르게 된다. 고정 소수점을 가진 하드웨어에서 강인 제어기들을 구현하고자 할 때 이러한 시뮬레이션의 결과를 토대로 워드 길이를 결정한다면 프로그램 수행 시간이나 메모리의 양 등을 줄일 수 있을 것이다.

표 1. 선형 제어기의 각 그룹별 워드 길이(단위 bit)

Compensator	Simulation Result
10	Pass
9	Pass
8	Fail
7	Fail

표 2. DOB의 각 그룹별 워드 길이(단위 bit)

Compensator	DOB	IMC	Result
10	Double	Double	Pass
9	Double	Double	Fail
Double	21	Double	Pass
Double	20	Double	Fail
Double	Double	10	Pass
Double	Double	9	Fail
21	21	21	Pass
20	20	20	Fail
17	21	17	Pass
17	21	16	Fail
15	21	17	Pass
14	21	17	Fail

표 3. RIC의 각 그룹별 워드 길이(단위 bit)

Compensator	RIC	IMC	Result
12	Double	Double	Pass
11	Double	Double	Fail
Double	21	Double	Pass
Double	20	Double	Fail
Double	Double	16	Pass
Double	Double	15	Fail
21	21	21	Pass
20	20	20	Fail
17	21	18	Pass
17	21	17	Fail
15	21	18	Pass
14	21	18	Fail

5. 결론

본 논문에서는 강인제어 알고리즘들을 matlab을 이용하여 고정 소수점이라는 하드웨어 구조적 한계 하에서 구현하였고 기 연구 결과와 같은 성능을 얻기 위한 최적의 워드 길이는 21 bit 이상이어야 한다는 결과를 얻었다. 이와 같은 워드 길이가 주어지지만 강인제어기의 성능이 보장될 수가 있었다. 여기에서는 디지털 제어기의 구조적 변경을 하지 않았고 또한 Q-filter의 차수의 변화도 주지 않았다. 디지털 제어기의 구조를 제어하고자 하는 하드웨어의 구조에 잘 맞도록 설계하고 Q-filter의 차수를 작게 하여도 그 성능을 보장할 수 있다면 최적 워드 길이를 줄일 수 있을 것이다.

DVD 서보 제어기와 같이 높은 주파수를 가진 제어기를 고정 소수점 하드웨어에 적용하는 것은 쉽지가 않다. 오버플로우나 양자화 에러 등으로 인해 강인 제어기의 성능이 저하되기 때문이다. 소프트웨어를 통해 부동 소수점을 구현할 수는 있지만 여기에는 많은 제약이 따른다. 그러므로 고정 소수점으로 높은 차수의 제어기를 구현하기 위한 다양한 연구가 진행되어야 한다고 본다.

추후 실제 고정 소수점 하드웨어에서 여기서 제안된 워드 길이를 가지고 강인제어 알고리즘들을 적용하고 그 하드웨어 구조에 가장 잘 맞는 디지털 제어기를 설계함으로써 시스템의 성능을 보장할 수 있는 강인 제어기를 구현하고자 한다.

참고문헌

- [1] 최현택, 서일홍, "외란 관측기에 기초한 내부 모델 제어기 설계 : 광학 디스크 드라이브의 추종 제어에의 적용," *대한전기학회논문지*, Vol.48A, No.2, pp.159-167, 1999.
- [2] T. Murakami, K. Ohnishi, "Advanced motion control in mechatronics - A tutorial," *IEEE Int. Workshop Intelligent Control*, vol. 1, pp. SL9-SL17, Istanbul, Turkey, Aug. 1990.
- [3] 최현택, 서일홍, 김봉근, 정완균, 배홍문, 정홍상, "강인 내부 보상기의 설계와 해석," *대한전기학회 하계학술대회 논문집*, 1999.
- [4] B. K. Kim, H. T. Choi, W. K. Chung, I. H. Suh, H. S. Lee, and Y. H. Chang, "Robust Time Optimal Controller Design for Hard Disk Drives," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.35, No.5, pp.3598 - 3600, 1999.
- [5] Ogata, K (1994), "Discrete-time Control Systems," Second Edition, Prentice Hall, 1995.

- [6] *Fixed-Point Blockset User's Guide*, MATH WORKS
- [7] W. Y. Sung, K. I. Kum, "Simulation-Based Word-Length Optimization Method for Fixed-Point Digital Signal Processing Systems," *IEEE Tans. On Signal Processing*, Vol. 43, No. 12, Dec. 1995.
- [8] S. H. Kim, K. I. Kum, W. Y. Sung, "Fixed-Point Optimization Utility for C and C++ Based Digital Signal Processing Programs," *IEEE Trans. On Circuits and Systems*, VOL. 45, No. 11, Nov. 1998.
- [9] F. Franklin, J. D. Powell and M. L. Workman (1990), "Digital Control of Dynamic Systems," Third Edition, Addison Wesley, 1998.