

광디스크 드라이브의 제어를 위한 에러기반 반복 피드백 게인 조절 방법에 관한 연구

서동혁*, 김홍록*, 장시영*, 서일홍*
 * 한양대학교 지능제어 및 로봇틱스 연구실

(+82-31-408-5802; FAX: 82-31-408-5803; E-mail:ihshuh@hanyang.ac.kr)

Error-Based Iterative Feedgack Tuning with Application to Optical Disk Drive

Dong Hyeok Seo**, Hong Rok Kim*, Si Young Jang*, Il Hong Suh*
 * The Graduate School of Information and Communications, Hanyang Univ.,
 (+82-31-408-5802; FAX: 82-31-408-5803; E-mail:ihshuh@hanyang.ac.kr)

Abstract - Model-free Method들 중에 반복 피드백 조절 알고리즘(Iterative Feedback Tuning, IFT)는 특정한 성능지수를 정의하고, 이를 최소화 하도록 제어기의 게인들을 조절하는 방법을 제시 하였다. PID와 같은 고전적인 제어이론에 근거한 제어기 설계 과정과는 달리, IFT 알고리즘은 반복 실험을 통해 성능지수의 Gradient를 구하여 이로부터 필터 게인들 조정하는 방법을 채택하고 있다. 수학적 증명과 실험적 실증을 통하여 IFT의 수렴성과 유용성이 보여짐 에도 불구하고, IFT 알고리즘의 한계점은 단일 성능지수의 사용이라는데 있다. 이를 개선하기 위해서는 단일 제어 목적을 위한 단일 성능지수의 사용이 아닌 복수의 제어 목적을 위한 복수의 성능지수의 사용이 필요하다.

본 논문에서는 두 개의 성능지수를 가지는 IFT를 이용해서 위상 여유가 크고, 대역폭이 넓은 제어기를 설계하기 위해서 제어기 게인을 자동 조절하는 알고리즘을 제안하고 ODD에서 사용되는 플랜트에 적용한 모의실험을 통하여 그 유용성을 보였다.

1. 서 론

현재 생산되고 있는 광 디스크 드라이브(Optical Disc Drive, ODD) 종류는 매우 다양하다. 그 중에서도 CD-ROM 드라이브, DVD-ROM 드라이브가 널리 사용되고 있다. 이들 제품에서 지원하는 매체 또한 다양해지는 추세로서 단순 재생의 CD, DVD에서 기록, 재생이 가능한 CD-R, CD-RW, DVD-R로 발전되어왔다. 따라서, 대용량 고 배속으로 데이터를 기록하고 재생하기 위해서는 헤드 위치 제어 기술이 필요하다. 대부분의 ODD 시스템에서는 헤드 위치 제어를 위해서는 고전적인 제어 이론에 기반을 둔 Lead-Lag 제어기를 사용하고 있는데, 이러한 제어기는 하드웨어로 구현된 디지털 필터 형태의 Hard-wired DSP에 구현 되어 있다. DSP 필터 게인 에 의해서만 제어기가 바뀌게 되므로 다양한 기록 매체나 재생 속도에 대응하기 위해서는 마이크로프로세서 내부에 그 파라미터들의 조합들이 미리 결정되어 저장되어 있다. 따라서, 각각의 매체나 속도에 따라 게인 들을 모두 결정해야 하는 번거로움이 있다.

본 논문에서는 IFT를 이용해서 이러한 번거로움을 해결하기 위해 ODD 필터 게인을 자동 조절하는 알고리즘을 제안하고자 한다.

최근에는 IFT와 같은 새로운 Data-Driven Model-free 제어 방식의 반복 제어기 설계 방법[2, 3]이 제시 되고 있다. 여기서 제시한 Model-free 제어 방법 중 최근에 많은 연구가 진행 되고 있는 반복적으로 제어기의 게인 조절 하는 방법으로 H.Hjalmarsson 에 의해 처음 제안된 IFT[1]는 플랜트 모델을 사용하지 않고 제어 입력, 출력 피드백 데이터와 원하는 기준 모델을 추종하여 제어기를 직접 조절하는 방법으로 플랜트가 선형 시불변 시스템이라는 제약 조건에서 시작을 하였지만 그 적용 분야를 시

변, 비선형 SISO[5, 6], 선형, 시불변 MIMO 시스템[4]으로 확장하고 있다. 이러한 IFT는 시스템 식별(System Identification)이나 선형화(Linearization)을 통해 시스템 모델을 알아야 하는 번거로움이 없다. 하지만, 수학적 증명과 실험적 실증을 통하여 IFT의 수렴성과 유용성이 보여짐 에도 불구하고, IFT 알고리즘의 한계점은 단일 성능지수의 사용이라는데 있다. 이를 개선하기 위해서는 단일 제어 목적을 위한 단일 성능지수의 사용이 아닌 복수의 제어 목적을 위한 복수의 성능지수의 사용이 필요하다.

여기서 제안된 IFT는 두 개의 다른 성능지수를 사용하는데, 고주파 대역을 담당하는 제어기에는 Integral of the time-weighted squared error(ITSE) 성능 지수를 사용하고, 저주파 대역을 담당하는 제어기에는 Integral of the squared error(ISE) 성능지수를 사용해서 성능지수에 의해 나타나는 성능지표를 위상여유와, 대역폭을 선택하여 제어기의 보다 높은 성능을 보장하는 게인을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 이를 ODD에서 사용되는 트랙킹 역추에이터에 적용한 모의실험을 통하여 그 유용성을 보였다.

2. 본 론

2.1 반복 피드백 조절 알고리즘

IFT는 H. Hjalmarsson에 의해 제안된 반복 게인 조절 방법으로서 그림 2.1.1은 본 논문에서 이용할 Unity Feedback일 경우의 1-DOF 시스템에 대한 제어시스템 구조를 나타내었다.

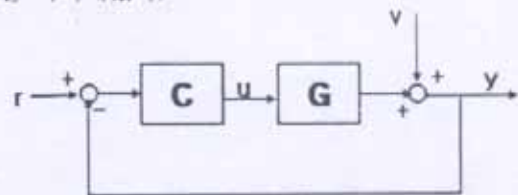


그림 2.1.1. IFT 1-DOF 제어시스템 구조

1-DOF 는 그림 2.1.1과 같은 구조를 가지고 있으며, 제어기 구조가 $C_r=C, \Delta C$ 과 같이 되어 제어 입력은 식(2.1.1)과 같다.

$$v = \alpha(\rho)(r - y) \tag{2.1.1}$$

이상적인 출력(y^d)과 실제 시스템의 출력(y)간의 오차(\tilde{y})는 식(2.1.2)과 같고, Criterion 함수($J(\rho)$)는 식(2.1.3)에 보였다. 최종적으로 구하고자 하는 제어기 게인 들의 최적값은 식(2.1.4)과 같이 Criterion 함수를 최소화하는 값이다.

$$\bar{y}(\rho) = y(\rho) - y^d$$

$$= \left[\frac{C(\rho)G}{1 + C(\rho)G} - T_d \right] r + \frac{1}{1 + C(\rho)G} v \quad (2.1.2)$$

$$J(\rho) = \frac{1}{2N} E \left[\sum_{i=1}^N (L_v \bar{y}(\rho))^2 + \lambda \sum_{i=1}^N (L_u u_i(\rho))^2 \right] \quad (2.1.3)$$

$$\rho^* = \arg \min_{\rho} J(\rho) \quad (2.1.4)$$

Criterion 함수를 최소화하는 계인들의 최적값을 찾기 위하여 식(2.1.5)와 같이 Gradient를 취하였으며 식(2.1.6)와 같이 실험적으로 추정하여 구한다. 이렇게 구한 값들은 식(2.1.7)에서와 같이 계인 값들의 업데이트에 이용된다.

$$\frac{\partial J}{\partial \rho}(\rho) = \frac{1}{N} E \left[\sum_{i=1}^N \bar{y}_i(\rho) \frac{\partial \bar{y}_i}{\partial \rho}(\rho) + \sum_{i=1}^N u_i(\rho) \frac{\partial u_i}{\partial \rho}(\rho) \right] \quad (2.1.5)$$

$$\text{est} \left[\frac{\partial y}{\partial \rho}(\rho_i) \right] = \frac{\partial y}{\partial \rho}(\rho_i) + \frac{1}{C(\rho_i)} \frac{\partial C}{\partial \rho}(\rho_i) S_e(\rho_i) v_i^2$$

$$\text{est} \left[\frac{\partial u}{\partial \rho}(\rho_i) \right] = \frac{\partial u}{\partial \rho}(\rho_i) - \frac{\partial C}{\partial \rho}(\rho_i) S_e(\rho_i) v_i^2 \quad (2.1.6)$$

$$\rho_{i+1} = \rho_i - \gamma R_i^{-1} \frac{\partial J}{\partial \rho}(\rho_i) \quad (2.1.7)$$

2.2 오차 기반 IFT (Error-based IFT)

본 논문에서 사용하는 ODD 서보 제어기의 DSP 필터 계인들을 실험적으로 결정할 수 있는 알고리즘으로서 IFT를 제안하고, 이를 이용하여 Lead-Lag 보상기로 사용되는 몇 개의 DSP 필터 계인들을 설계하고자 한다. 이를 위해 기존의 IFT 알고리즘을 ODD 시스템에 맞도록 수정하여 사용하여야 하는데, ODD 시스템에서는 실제로 출력신호와 기준 신호를 측정할 수 없기 때문이다. 따라서, 측정 가능한 오차 신호와 제어 입력에 기준하여 IFT 알고리즘을 적용하여야 한다.

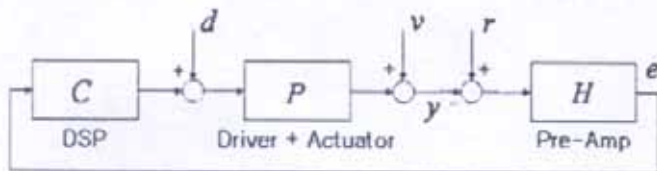


그림 2.1 오차 신호에 기준한 ODD 시스템

IFT 알고리즘은 Gradient에 기초하여 최소화 하는 과정을 반복하여 제어 성능을 최적화하도록 구성되어 있다. 그리고, ODD 시스템의 이상적인 환경에서 오차신호는 다음과 같다.

$$e = H(r - y) = -Hy \quad (2.2.1)$$

주어진 제어기 구조에서 파라미터를 구하기 위해서는 다음과 같이 LQ(Linear Quadratic) 형태의 Criterion을 이용한다.

$$J(\rho) = \frac{1}{2N} E \left[\sum_{i=1}^N (e_i^2(\rho) + u_i^2(\rho)) \right] \quad (2.2.2)$$

Criterion을 최소화하는 최적 파라미터를 구하기 위해서는 Gradient Method를 사용하여 반복계산을 수행한다.

$$\rho_{i+1} = \rho_i - \gamma R_i^{-1} \frac{\partial J}{\partial \rho}(\rho_i)$$

$$\text{where } \frac{\partial J}{\partial \rho}(\rho) = \frac{1}{N} E \left[\sum_{i=1}^N e_i(\rho) \frac{\partial e_i}{\partial \rho}(\rho) + \sum_{i=1}^N u_i(\rho) \frac{\partial u_i}{\partial \rho}(\rho) \right] \quad (2.2.3)$$

그런데, 여기에서 $\partial J / \partial \rho$ 는 e , $\partial e / \partial \rho$ 와 u , $\partial u / \partial \rho$ 로부터 계산되는데, 이들은 식(2.2.4)와 식(2.2.5) 같이 계산할 수 있다.

$$e = -Hy = -\frac{H}{1 + HPC} v - \frac{HP}{1 + HPC} d$$

$$\frac{\partial e}{\partial \rho} = \frac{\partial C}{\partial \rho} \left(\frac{H \cdot HP}{(1 + HPC)^2} v + \frac{HP \cdot HP}{(1 + HPC)^2} d \right) = \frac{\partial C}{\partial \rho} \left(-\frac{HP}{1 + HPC} e \right) \quad (2.2.4)$$

$$u = Ce + d = -\frac{HC}{1 + HPC} v + \frac{1}{1 + HPC} d$$

$$\frac{\partial u}{\partial \rho} = \frac{\partial C}{\partial \rho} \left(-\frac{H}{(1 + HPC)^2} v - \frac{HP}{(1 + HPC)^2} d \right) = -\frac{\partial C}{\partial \rho} \left(-\frac{1}{1 + HPC} e \right) \quad (2.2.5)$$

하지만, 여기에서 IFT 알고리즘의 핵심은 $\partial e / \partial \rho$ 와 $\partial u / \partial \rho$ 를 실험적으로 구하는 데 있다. 즉, $\partial e / \partial \rho$ 를 얻기 위해서는 $HPe / (1 + HPC)$ 가 필요한데, 첫 번째 실험에서 얻어진 오차신호 e_1 를 외란신호 d 로 다시 인가할 경우 두 번째 오차신호 e_2 에서는 $HPe_1 / (1 + HPC)$ 을 포함한 신호가 생성된다.

$$e_1(\rho_i) = -\frac{H}{1 + HPC} v_i - \frac{HP}{1 + HPC} d_i$$

$$d_2 = e_1, \quad e_2(\rho_i) = -\frac{H}{1 + HPC} v_i - \frac{HP}{1 + HPC} e_1 \quad (2.2.6)$$

이 신호에는 출력 외란 또한 포함되어 있지만, 이를 근사화하여 $\text{est}(\partial e / \partial \rho)$ 는 식(2.2.7)과 같이 표현된다.

$$\text{est} \left[\frac{\partial e}{\partial \rho}(\rho_i) \right] = \frac{\partial C}{\partial \rho}(\rho_i) e_1(\rho_i) \quad (2.2.7)$$

비슷한 방법으로 $\partial u / \partial \rho$ 또한 $e / (1 + HPC)$ 을 이용하여 식(2.2.8)을 구할 수 있다.

$$e_1(\rho_i) = -\frac{H}{1 + HPC} v_i - \frac{HP}{1 + HPC} d_i$$

$$d_2 = e_1, \quad u_2(\rho_i) = -\frac{HC}{1 + HPC} v_i - \frac{1}{1 + HPC} e_1 \quad (2.2.8)$$

$$\text{est} \left[\frac{\partial u}{\partial \rho}(\rho_i) \right] = -\frac{\partial C}{\partial \rho}(\rho_i) u_2(\rho_i) \quad (2.2.9)$$

이렇게 구한 $\partial e / \partial \rho$ 와 $\partial u / \partial \rho$ 를 이용하여 $\partial J / \partial \rho$ 를 계산하고 이로부터 제어기의 계인들을 업데이트함으로써 제어기 계인 ρ 를 수렴시킬 수 있다.

2.3 변경된 성능 지수를 고려한 IFT

본 논문에서 적용할 ODD 시스템에서의 제안된 제어기는 그림 2.3.1 과 같은 병렬형 구조를 가지고 있다.

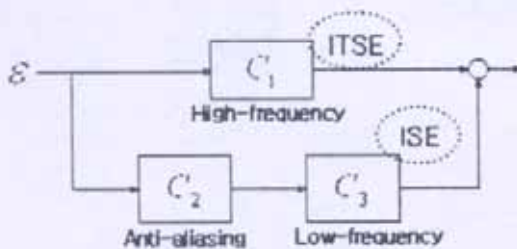


그림 2.3.1 변경된 성능지수를 고려한 제어기 구조
 여기서는 고주파수 대역과 저주파수 대역을 나누어 제어기에 필요한 대역폭과 위상여유를 향상시키기 위해 각기 다른 성능 지수를 사용하는 IFT를 제안하였다. 따라서, 고주파 대역을 담당하는 C1 제어기에는 ITSE(Integral of the time-weighted squared error) 성능 지수를 가지고 위상 여유를 성능을 나타내는 지표로 삼아 필터 계인들을 조절하고, 저주파 대역 제어기인 C3에서는 ISE(Integral of the squared error) 성능 지수를 적용하여 보다 큰 대역폭을 얻기 위해 계인 조절을 하도록 설계하였다.

본 논문에서는 제안한 두 가지 성능 지수, ISE 성능 지수와 ITSE 성능 지수에 의해 성능을 나타내는 지표로 대역폭과 위상여유를 성능 지표로 택했고, 이때 사용되는 ITSE 성능 지수 J_1 과 ISE 성능 지수 J_2 는 식(2.3.1)과 같다.

$$J_1 = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (T_i e_i^2(\rho))$$

$$J_2 = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (e_i^2(\rho)) \quad (2.3.1)$$

*where T_i :sampling interval

2.4 모의 실험

MATLAB을 이용하여 새로운 성능 지표를 적용하여 계인 조절 알고리즘을 검증하였다. 0.5초 동안 4900개의 오차 신호와 제어 입력을 측정 한 후 J_1 과 J_2 를 계산하였다. 이렇게 계산된 파라미터에 대한 성능 지수의 변화에 따라 새로운 계인들을 업데이트한 후 주어진 전달함수들로부터 대역폭과 위상여유를 계산하였다. 그림 2.4.1은 노이즈가 없다고 가정하고 구성된 시뮬레이션 환경이다.

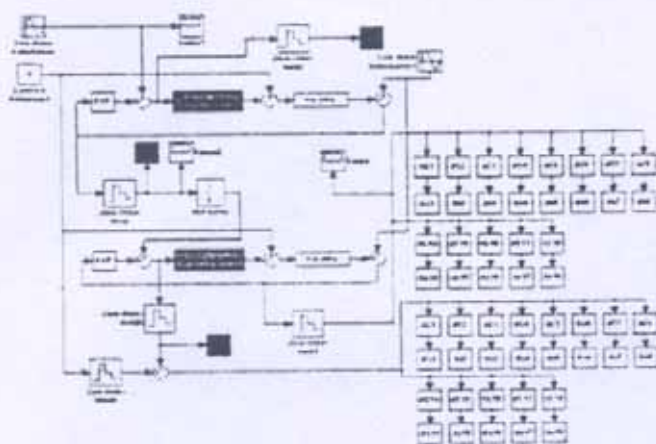


그림 2.4.1 Matlab을 이용한 모의실험 구성도
 MATLAB에서는 측정 노이즈 없는 이상적인 환경에서 ODD 모델을 대상으로 3번의 반복 실험을 수행하여, 18개의 필터 계인에 대한 성능지수 변화율을 계산하고 이로부터 새로운 파라미터 값을 업데이트 하도록 하고 있다. 여기에서 성능지수를 계산할 때 사용되는 업데이트 비율을 0.4로 설정 하였을 때 여러 기판 IFT 알고리즘에 따라 반복실험을 수행하였다.

2.5 모의 실험 결과

두 가지의 성능 지수를 고려하여 IFT를 수행하기 위해 먼저, 고주파수 대역의 ITSE 성능 지수로서 계인 조절을 수행하였다. 이때, 고주파 대역을 담당하는 계인들에 대해 ITSE 성능 지수 J_1 이 일정한 범위 이하로 떨어질 때까지 계인 조절을 반복한다. 그리고, J_1 이 어느 바운드 이하로 들어온 후 저주파 대역을 담당하는 계인들에 대해서도 ISE성능지수 J_2 가 어느 바운드 이하로 떨어지면 J_2 의 튜닝을 종료하고서 기존의 J_1 이 바운드를 유지하고 있는지를 확인한다. J_1 이 바운드를 벗어났다면 다시 J_1 을 반복 튜닝 하는 방식으로 J_1 과 J_2 가 모두 바운드 내에 머물러 있는 지를 확인하여 계인 튜닝을 종료한다.

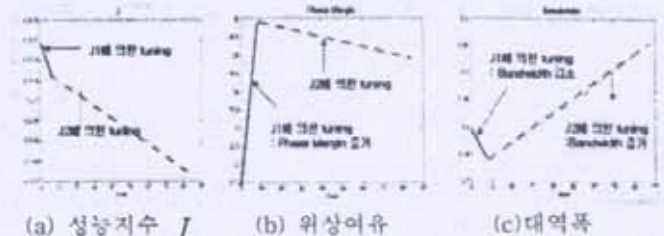


그림 2.4.2 모의실험 결과
 그림 2.4.2에서와 같이 모의실험 결과에서 직접적인 제어 성능을 나타내는 대역폭, 위상여유를 살펴보면 (a)에서 초기에 J_1 에 의한 계인 조절 과정에서 (b)에서의 위상여유는 증가하지만 (c)에서의 대역폭이 감소하는 것을 확인할 수 있었고, 다시 J_2 에 의한 계인 조절 과정에서는 (b)에서의 위상여유는 감소하지만 (c)에서의 대역폭은 증가하는 것을 보였다.

3. 결 론

Model-free Method들 중에 IFT는 임의의 성능지수를 정의하고, 제어기의 계인들을 조절하는 방법으로 단일 목적을 가지는 단일 성능지수가 아닌 복수의 제어 목적을 가지는 복수의 성능지수를 제안하고 제어기 성능을 ODD 플랜트에 적용한 모의 실험을 통하여 그 유용성을 보였다.

앞으로는 제어기의 적용범위와 갱신비율을 실험에 의한 경험으로 구하지만 이들 적용범위와 갱신 비율을 찾는 방법에 관한 연구와 실험을 통한 검증이 진행 되어야 하겠다.

[참고 문헌]

- [1] M. Hjalmarsson, M. Gevers, S. Gunnarsson and O. Lequin, "Iterative Feedback Tuning: theory and application," IEEE control Systems Magazine, pp. 18:26-41, 1998
- [2] H. Hjalmarsson, "Iterative Feedback Tuning-An overview," International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, pp. 16:373-395, 2002
- [3] H. Hjalmarsson and T. Birkeland, "Iterative Feedback Tuning of Linear Time-Invariant MIMO Systems," Proc. IEEE Conference on Decision and Control, 1998 (San Diego, USA).
- [4] H. Hjalmarsson, "Model-free Tuning of controllers: Experience with time-varying linear systems," Proc. 3rd European Control Conference, 2869-2874, 1995
- [5] F. Bruyne, B. Anderson, M. Gevers and N. Linard, "Iterative Controller Optimization for Nonlinear Systems," Proc. IEEE Conference on Decision and Control, 1997(San Diego, USA).
- [6] H. Hjalmarsson, "Control of nonlinear systems using iterative feedback tuning," Proc. American Control Conf., 1998