

외란관측기를 적용한 반복 게인 조절 알고리즘의 개발

장시영\*, 김일한\*\*, 김홍록\*, 서일홍\*

\* 한양대학교 전자전기제어계측공학과, \*\* LG산전(주)

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

Development of Iterative Gain Tuning Algorithm using Disturbance Observer

Si Young Jang\*, Il Han Kim\*\*, Hong Rok Kim\*, Il Hong Suh\*

\* School of Electrical Engineering and Computer Science, Hanyang Univ., \*\* LG Industrial Systems Co.,Ltd.

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

**Abstract** - 비선형성을 가지는 실제 플랜트의 제어기를 설계하기 위해서는 플랜트와 외부환경에 대한 충분한 정보를 필요로 한다. 그러나, 제어기 설계 시에는 실제 플랜트의 수학적 해석의 어려움, 모델링 오차와 외란 등의 원인으로 고려해야 할 복잡한 사항들이 있다. 이를 해결하기 위한 기존 연구로는 플랜트에 대한 시스템 식별과 선형화를 통하여 공칭모델을 선정하고, 이를 제어하는 Model-based 방법과 모델이 아닌 실제 플랜트의 입출력 데이터를 토대로 제어기의 게인들을 반복 조절하는 Model-free 방법 등이 있다. 본 논문에서는 Model-free 방법 중에 하나인 반복 게인 조절 알고리즘을 기반으로 이 방법의 단점인 수렴속도지연을 보상하기 위한 목적으로 Model-based 방법 중에 하나인 외란 관측기(Disturbance Observer)를 결합한 새로운 제어 알고리즘을 제안하고, ODD(Optical Disk Drive)에서 사용되는 플랜트에 적용한 모의 실험을 통하여 그 유용성을 보였다.

본 논문에서는 IFT의 수렴속도지연을 보상하기 위한 방법으로 DOB를 결합하여 적응력 있고, 강인한 최적 제어기를 설계할 수 있는 새로운 혼합형 제어 알고리즘을 제안하고, 이를 Optical Disk Drive(ODD)에서 사용되는 플랜트(Tracking actuator)에 적용한 모의 실험을 통하여 그 유용성을 보였다.

2. 본 론

2.1 IFT(Iterative Feedback Tuning)[1]

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.

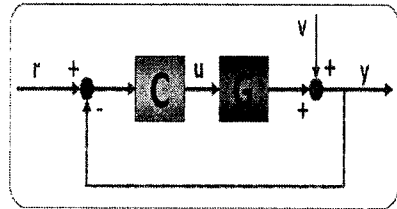


그림 2.1.1. IFT 1-DOF 제어시스템 구조

1. 서 론

강인하고 적응력있는 최적 제어기의 필요성이 증가함에 따라 이를 설계하기 위한 여러 방법들이 제안되어 왔으며 이 방법들은 Model-based 방법과 Model-free 방법으로 나누어 볼 수 있다. Model-free 방법은 제어기를 플랜트에 가해지는 입력과 그에 대해 반응하는 출력 데이터에 근거하여 설계하는 방법으로 모델 참조 적응 제어(Model Reference Adaptive Control, MRAC), PID 제어, 퍼지 로직 제어 그리고 Iterative Feedback Tuning(IFT) 방법[1] 등이 있다. Model-free 방법은 플랜트를 공칭모델에 근거하여 제어 하는 방법으로 시간 지연 제어(Time Delay Control, TDC), 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB)[2], 내부 모델 제어기(Internal Model Controller, IMC), 적응 강인 제어기(Adaptive Robust Controller, ARC) 등이 있다.

위에서 제시한 Model-free 제어 방법 중 IFT 방법은 플랜트의 공칭모델을 사용하지 않고 제어 입력과 출력 데이터를 이용하여 제어기의 게인을 반복조절하는 방법으로 선형 시불변 시스템 뿐만 아니라 최근에는 선형 시변, 단일 입출력, 다중 입출력 시스템 등에 그 적용이 가능하도록 하는 연구가 진행되었다. 그러나, 이러한 IFT는 시스템 식별이나 선형화를 통해 시스템의 공칭모델을 알아야 할 필요가 없다는 장점이 있지만, 제어기의 차수의 증가에 따른 조절해야 할 게인들의 증가로 인한 계산 시간 증가와 수렴속도지연 등의 단점이 있다. 한편, Model-based 강인 제어 시스템은 공통적으로 내부 보상기와 외부 제어기의 두 개의 루프를 갖는 구조로 되어있으며 서로 등가 구조를 가지고 있다[3]. 이들 중 외란관측기를 이용한 방법은 모델의 불확실성, 시스템의 변화 또는 외란으로 인해 발생하는 공칭모델 오차를 보상하기 위하여 내부에 모델 보상을 설계하고, 외부에는 제어 목적을 달성하기 위하여 공칭모델에 대한 제어기 두는 방법이다.

이상적인 출력( $y^d$ )과 실제 시스템의 출력( $y$ )간의 오차( $\tilde{y}$ )는 식 2.1.1과 같고, Criterion 함수( $J(\rho)$ )는 식 2.1.2에 보였다. 최종적으로 구하고자 하는 제어기 게인들의 최적값은 식 2.1.3과 같이 Criterion 함수를 최소화하는 값이다.

$$\tilde{y}(\rho) = y(\rho) - y^d = \left[ \frac{C(\rho)G}{1 + C(\rho)G} - T_d \right] r + \frac{1}{1 + C(\rho)G} v \quad (2.1.1)$$

$$J(\rho) = \frac{1}{2N} E \left[ \sum_{i=1}^N (L_y \tilde{y}(\rho))^2 + \lambda \sum_{i=1}^N (L_u u_i(\rho))^2 \right] \quad (2.1.2)$$

$$\rho^* = \arg \min_{\rho} J(\rho) \quad (2.1.3)$$

Criterion 함수를 최소화하는 게인들의 최적값을 찾기 위하여 다음 식 2.1.4와 같이 gradient를 취하였으며 이때 1,2는 식 2.1.5와 같이 실험적으로 추정하여 구한다. 이렇게 구한 값들은 식 2.1.6에서와 같이 게인값들의 갱신에 이용된다.

$$\frac{\partial J}{\partial \rho}(\rho) = \frac{1}{N} E \left[ \sum_{i=1}^N \mathcal{F}(\rho) \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \rho}(\rho) + \sum_{i=1}^N u_i(\rho) \frac{\partial u_i}{\partial \rho}(\rho) \right] \quad (2.1.4)$$

$$\begin{aligned} \text{est} \left[ \frac{\partial y}{\partial \rho}(\rho_i) \right] &= \frac{\partial y}{\partial \rho}(\rho_i) + \frac{1}{C(\rho_i)} \frac{\partial C}{\partial \rho}(\rho_i) S_o(\rho_i) v_i^2 \\ \text{est} \left[ \frac{\partial u}{\partial \rho}(\rho_i) \right] &= \frac{\partial u}{\partial \rho}(\rho_i) - \frac{\partial C}{\partial \rho}(\rho_i) S_o(\rho_i) v_i^2 \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\rho_{i+1} = \rho_i - \gamma_i R_i^{-1} \frac{\partial J}{\partial \rho}(\rho_i) \quad (2.16)$$

## 2.2 외란 관측기(Disturbance Observer: DOB)

Ohnishi[2]에 의해 처음 제안된 외란관측기 방법은 외란 관측기를 이용하여 실제 플랜트를 공칭모델처럼 동작하게 하는 방법으로 최근 강인 제어 및 외란 제거 제어의 분야에 널리 사용되고 있다. 이 방법은 모델링 오차와 매개변수의 변화, 그리고, 외란 등을 외란으로 간주하고 이를 관측하여 제거함으로써 실제 플랜트를 공칭모델처럼 동작하게 하는 방법이다. 외란 관측기를 이용한 제어시스템 구조를 그림 2.2.1에서 보였다.

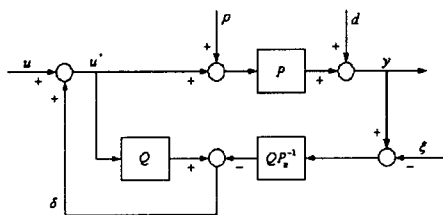


그림 2.2.1. 외란관측기를 이용한 제어시스템 구조

여기서  $\rho$ ,  $d$ ,  $\zeta$ 는 각각 입력 외란, 출력 외란, 측정 잡음이고,  $\delta$ 는 관측된 외란이다. 그리고,  $P$ 는 실제 플랜트이며,  $P_n$ 은 공칭모델이다.  $Q$ 는  $P_n^{-1}$ 이 구현 불가능한 것을 해결하기 위한 저주파수 영역 통과 필터( $Q$ 필터)이다. 그림 2.2.1의 입출력 전달함수는 식 2.2.1과 같다.

$$\begin{aligned} y &= G_w \cdot u + G_p \cdot \rho + G_d \cdot d + G_\zeta \cdot \zeta \\ \text{where, } G_w &= \frac{PP_n}{P_n + [P - P_n]Q}, \quad G_p = \frac{PP_n[1-Q]}{P_n + [P - P_n]Q} \\ G_d &= \frac{P_n[1-Q]}{P_n + [P - P_n]Q}, \quad \text{and, } G_\zeta = \frac{PQ}{P_n + [P - P_n]Q} \end{aligned} \quad (2.2.1)$$

### 2.2.1 저역 통과 필터( $Q$ 필터)의 설계

외란 관측기는  $Q$ 필터에 의해 좌우된다. 실제  $Q$ 필터의 적용 시  $Q$ 의 상태 차수는 공칭모델의 차수보다 크거나 같도록 정해야 하며 이 조건을 만족하는 플랜트의 역 모델이 구현가능함은 알려져 있다[5].  $Q$ 필터의 설계에 대한 연구는 Ohnishi, Umeno와 Hori, 그리고, H. S. Lee 등의 방법들이 있다. 이 중 H. S. Lee가 제안한  $Q$ 필터는 binomial 필터의 형태를 갖는 식 2.2.2와 같다.

$$\begin{aligned} Q_{NM}(s) &= \frac{\sum_{k=0}^M a_{nk} (\tau s)^k}{(\tau s + 1)^N} \quad (M = 0, 1, \dots, N - 1) \\ \text{where, } a_{nk} &= \frac{N!}{(N - k)!} \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

여기서  $\tau$ 는 필터 시정수,  $m$ ,  $n$ 은 필터의 분모 차수와 분자 차수를 나타낸다.

## 2.3 제안하는 혼합형 제어 알고리즘

제안하는 IFT 방법과 외란관측기 방법을 혼합 형태의 제어 시스템 구성도는 그림 2.3.1과 같다. 내부 루프에는

외란 관측기를 사용하여 외란으로 인하여 생기는 공칭모델 오차, 센서 노이즈, 시스템 불확실성 등에 강인하게 되고, 외부 루프에는 IFT로 입출력 데이터를 사용하여 원하는 기준모델을 추종하도록 하는 제어기의 파라미터 계산을 조절한다.

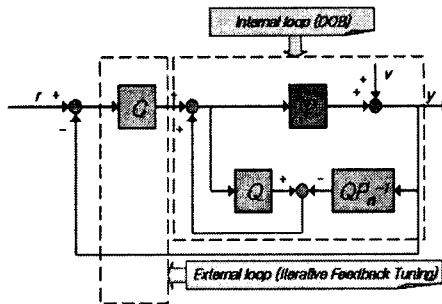


그림 2.3.1. 혼합형 제어시스템의 구성도

## 2.4 모의 실험

IFT를 이용한 제어기와 제안한 혼합형 제어기의 성능을 비교하기 위한 모의 실험을 그림 2.4.1과 같은 Matlab의 Simulink를 이용하여 수행하였다.

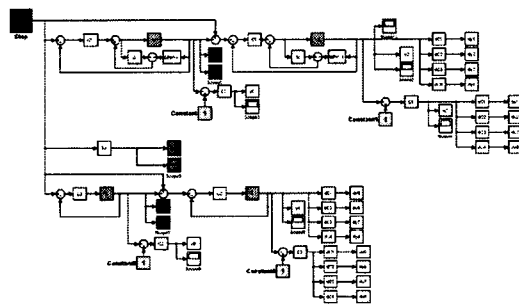


그림 2.4.1. Matlab Simulink를 이용한 모의 실험 구성도

모의 실험에서 샘플링 시간은 1ms로 설정하였고, 출력 외란을 크기가 0.1인 50Hz Sine파와 크기가 0.05인 200Hz Sine파를 혼합하여 생성하였다. IFT의 외부 제어기는 식 2.4.1과 같이 정하였고, 이상적인 모델은 식 2.4.2와 같이 settling time이 0.029s이고, rise time이 0.0536s인 2차 시스템으로 설계하였다. 그리고, 혼합형 제어기의  $Q$ -필터의 절점 주파수는 1kHz로 정하였다.

$$C(s) = \frac{\rho_1 + \rho_2 q^{-1} + \rho_3 q^{-2} + \rho_4 q^{-3}}{1 - q^{-1}} \quad (2.4.1)$$

$$T_d(s) = \frac{3948}{s^2 + 125.7s + 3948} \quad (2.4.2)$$

### 2.4.1 플랜트와 공칭모델 선정

모의 실험에서 선정한 플랜트는 그림 2.4.2에서 ODD 시스템의 Fine Motion을 담당하는 Tracking Actuator (Voice Coil Motor)이다. 각 모델의 성능을 가지고 구한 플랜트 전달함수를 표 2.4.1과 같은 Tracking Actuator 사양에 맞추어 근사화한 모델을 식 2.4.3에서와 같이 공칭모델로 하였다.

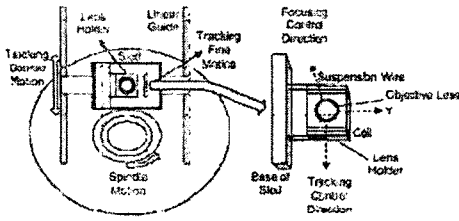


그림 2.4.2. ODD 시스템

표 2.4.1 Tracking Acuator 사양

	값
DC gain(k)	0.9 mm/V
공진 주파수( $\omega_n$ )	314.15 rad/s
공진 최대값( $M_p$ )	10 mm/V

$$P_{nTracking}(s) = \frac{2.221 \times 10^5}{s^2 + 942.5s + 39482.221 \times 10^5} \quad (2.4.3)$$

### 2.4.2 모의 실험 결과

Magnus Akerbald가 제안한 수렴성 관찰에 관한 게인 조절 시도 회수의 선정 방법[4]에 근거하여 10번의 반복을 통해 IFT와 혼합형 제어기의 성능을 그림 2.4.3과 그림 2.4.4에서 비교하였다. 이 때 초기 파라미터 게인은  $\rho = (\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4) = (5, -5, 0, 0, 1, 0, 0, 1)$ 로 정하였다.

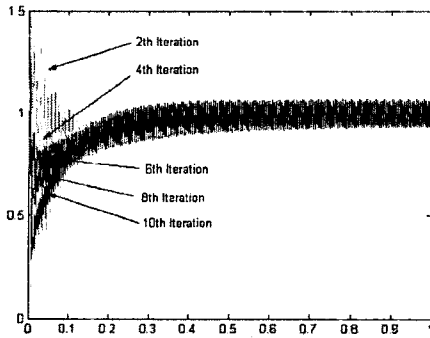


그림 2.4.3. IFT를 사용한 출력

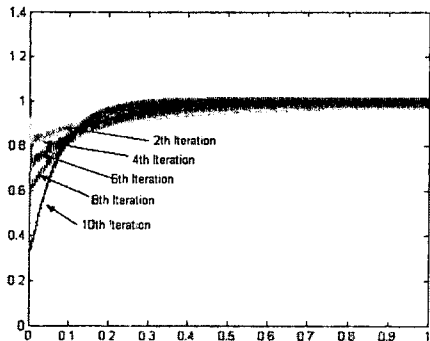


그림 2.4.4. 제안한 혼합형 제어기를 사용한 출력

IFT의 출력은 출력 외란에 민감하여 반복횟수가 증가

에 따라 외란 성분이 점점 증가함을 알 수 있고, 반면에 제안한 제어기에 의한 출력은 외란에 강인하면서 IFT방법에 의한 제어기의 출력보다 원하는 기준 모델에 더 가깝게 접근하였다. 반복회수의 증가에 따라 IFT와 제안한 제어기의 출력이 얼마나 기준 모델에 접근하는지 Criterion  $J(\rho)$ 와 기준 모델에 대한 실제 출력의 오차의 크기는 그림 2.4.5와 같다.

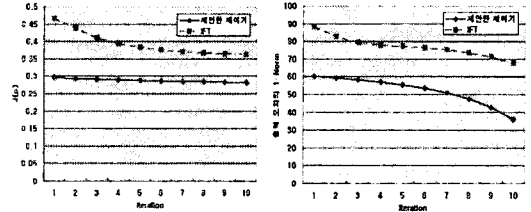


그림 2.4.5. 반복횟수에 따른  $J(\rho)$ 와  $\|e\|_2$ 의 변화

그림 2.4.5에서 제안한 제어기가 IFT만을 사용한 제어기에 비하여 Criterion 함수  $J(\rho)$  값이나 나 출력오차의 값이 낮음을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 Model-free 방법 중에 하나인 IFT 알고리즘에 Model-based 방법 중에 하나인 외란관측기 방법을 결합하여 입출력 외란이나 모델링 오차에 강한 성능을 가지며, 원하는 제어 목적을 달성하기 위한 제어기 게인들의 최적 값을 찾는 혼합형 제어기를 제안하였다. IFT를 이용한 제어기와 제안한 혼합형 제어기의 성능을 모의 실험을 통하여 비교하였으며, 제안한 제어기의 유용성을 보였다.

앞으로는 시스템의 안정성을 보장하는 파라미터 값의 범위를 계산할 수 있는 방법과 이에 근거한 제어기의 초기 파라미터의 자동적인 선정 방법에 대한 연구가 진행되어야 하겠고, 실제 실험을 통한 검증이 진행되어야 하겠다.

### [참 고 문 헌]

- [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] K. Ohnishi, "A New Servo Method in Mechatronics," Transactions Japanese Society of Electrical Engineering, Vol. 107 D, pp. 33-86, 1987.
- [3] H. T. Choi, B. K. Kim, I. H. Suh and W. K. Chung, "Design of Robust High Speed Motion Controller for Plant with Actuator Saturation," ASME Journal of Dynamic, System, Measurement, and Control, Vol. 122, pp. 535-541, 2000.
- [4] M. Akerbald, A. Hansson and B. Wahlberg, "Automatic Tuning for Classical Step Response Specification using Iterative Feedback Tuning," Proc. IEEE, Conference on Decision and Control, 2000.
- [5] H. S. Lee, "Robust Digital Tracking Controllers for High Speed/High Accuracy Positioning Systems," Ph.D. Dissertation, U.C Berkeley, 1994.