

적용 제어의 강인성 개선에 관한 비교 연구

김 국 헌 김 영 철 장 영 수 양 홍 석

A Comparative Study on the Improvement of the Robustness
in Adaptive Control Systems

Kook-Hun Kim, Young-Chol Kim, Young-Soo Chang, Heung Suk Yang
Department of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract

In this paper, some candidates suggested for the improvement of the robustness in adaptive control systems are shortly surveyed. Using dead zone concept of error in adaptation process, gain retardation methods such as σ -modification and parameter restriction method are those considered. Feedforward compensation and normalized adaptation technique are also considered.

New modeling technique suggested by Donati et al is used for the indirect control of plants containing unmodeled dynamics. The frequency band of input signal, which is used as a test signal and control signal simultaneously, is directly related to the control of plants containing high frequency parastics. Computer simulation results of the some selected algorithms are shown.

I. 서 론

적용제어 시스템이 안정도를 유지하여 제어 목적을 달성 할 수 있는 가는 1980년을 전후하여 거의 해결을 보았다. 그러나 제어방식의 정확한 모형화가 불가능하다는 사실에 주목할때 적용 제어방식이 기존의 가정들 1)극점의 갯수와 영점의 갯수는 유한하며 알고있을것 2)지연시간을 알고 있을것 3)잡음의 특성 또는 크기에 대한 가정이 실제로는 지켜지기 어렵다. 이러한 문제에 접하여 Rohrs (1) 는 기존의 적용제어 방식이 상기가정이 지켜지지 않을때는 안정도가 보장될 수 없음을 지적하였다. 적용시스템 내에 무한대의 이득을 갖는 오퍼레이터(infinite gain operator)가 존재함을 보임으로써 안정도가 파괴되는 현상을 설명

하였는데, 적용제어계의 피이드백 부분이 비선형 특성을 갖는다는 성질을 무시하고 해석하여 많은 이론(異論)을 불러 일으켰으나, 지적인 현상만은 정확하다. 이후 적용제어의 강인성(Robustness of adaptive control)에 관한 연구가 1980년대의 중요한 연구 분야로 대두되었다. 그후 적용제어의 강인성을 개선하기위한 많은 연구 결과들이 발표되었으며, 섹터이론(sector theory)을 이용하여 안정도 문제를 해석하는 것이 바람직하나, 제어기의 설계단계에서 사용할 수 없고 해석에만 효과적으로 사용될수 있는 문제점이 있다. (2)

적용제어기의 강인성을 개선하기위한 연구로는 잡음등의 경우에는 dead-zone 을 도입하는 방법, (3) 파라미터의 최대값을 강제적으로 제한하는 방법 (4) 등이 있다. 모형화 오차(modeling error) 또는 모형화 되지 않은 운동(unmodeled dynamics)이 있는 경우에 기존의 적용 법칙을 변화킨 표준화된 적용방법 (5), 피이드백에 보상에 의해서 엄격한 정실(strictly positive real) 조건을 만족시키는 방법 (6) 등이 제안되었따. 제어기를 구현하는 과정에서 샘플링 주기를 조정할 필요성과 주파수 선택필터(일반적으로 low pass filter)를 사용해서도 강인성을 개선할 수 있다고 알려져 있다. (7)

- 특정한 형태들의 상기연구와는 별도로 강인성을 개선하기 위해서는 1) 제어대상을 목적에 맞게 좋게 모형화 하는방법 2) 강인성이 큰 추정자(robust estimator) 3) 제어가 구조의 개선등을 들을 수 있다

본 논문에서는 기 발표된 연구결과들 중 몇가지 방식에 대하여 시뮬레이션을 통한 고찰 및 상대적 특성을 비교한다. 또한 플랜트의 출력을 직접제어하는 것이 아니라 변화된 형태의 플랜트출력을 제어하는 방식을 자기동조제어기 방식에 도입하여 강인성 및 정확성이 개선될 수 있음을 보인다.

2장에서 기발표된 결과들의 간단한 요약을 하고, 3장에서는 제어대상과 모형을 적절히 변화시킬때의 특성을 간접제어의 관점에서 고찰하고 4장에서 시뮬레이션 결과와 검토를 5장에서 결론을 싣는다.

II. 기존의 강인성 개선 방식

1. Dead-zone의 사용

제어에서의 오차가 어느 한계 이내이면 적응을 하지 않고 고정된 피드백 이득 값을 사용하는 방식이다. 이 방식에서는 Dead-zone 의 크기 또는 지속성 여부 등에 관한 사전 지식이 필요하고, 알고리즘은 다음과 같다.

(기본적인 적응 알고리즘은 생략)

$$k(t) = \begin{cases} f(e, u, y) & |e(t)| \geq \Delta \\ 0 & |e(t)| < \Delta \end{cases}$$

여기서 $k(t)$ 는 적응이득 (adaptive gain)

e 는 출력오차

u, y 는 입력 및 출력

이 경우 외부잡음의 크기가 변화한다면 deadzone 의 크기를 변화시킴으로써 정상상태오차를 줄일 수 있다.

2. 적응 파라미터의 크기제한 방식

제어대상 및 적응제어계의 파라미터의 상한을 알수 있으면 잡음등에 의해서 파라미터가 커지는것을 강제로 막아주는 형식이다. 알고리즘은 다음과 같다.

$$\dot{\theta}(t) = g(e, u, y) - \theta \cdot f(\theta)$$

$$f(\theta) = \begin{cases} (1 - \|\theta\| / \|\theta^*\|_{\max})^2 & \text{if } \|\theta\| \geq \|\theta^*\|_{\max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

g 는 일반적인 적응법칙이라 할때 $\theta(t)$ 의 변화율을 $\|\theta(t)\|$ 가 사전에 결정된 값보다 커지면 적응속도를 낮추는 형태가 된다.

이와는 다른 관점에서 연구 되었으나 비슷한 형태로 σ -modification (8) 방법이 있다. 잡음등에 의해 적응시스템의 안정도가 파괴되는 것을 막는것으로 적응속도를 낮추준다는 관점에서 유사한 방법이다 할 수 있다. 상기 1과 2의 접합에 의한 좋은 결과로 보고되고 있다.

3. 피이드-워드 보상방법

Riedle 등이 제안한 방법으로 unmodeled parasticspole 이 불안정 영역의 zero 로 근사화된다는 것을 보이고 이에 의해서 안정도 유지에 충분조건인 엄격한 정상조건이 지켜 지지 않으므로 이를보상하기 위한 피이드-워드 항을 포함시킨다. 여기서 피이드-워드 보상값이 크면 클수록 안정도가 보장되는parastics 의 허용한계가 커지지만 정상상태에서의 오차가 커지는 것은 어쩔수 없는 trade off 이다,

4. 표준화된 적응방법 (normalized adaptation)

파라미터 적응 과정에서 쓰이는 입력력 데이터 즉 regressor 와 오차를 특정한 factor로 나누어 표준화(normalize) 함으로써 그 신호들이 모형과 오차나 잡음이 존재해도 L_2 혹은 L_∞ 의 안정도가 보장될 수 있는 조건을 섹터의 형태로 구하였다.

5. 샘플링 주기 및 주파수 선택필터

샘플링 주기를 크게 잡으면 고주파 잡음 및 모형화 오차의 효과를 감소 시킬 수 있다고 알려져 있으나 정량적인 해석은 되어 있지 않다.

III. 간접제어방식과 모형의 선정

3. 1. 시스템식별 과 제어

제어대상의 전달함수를 P 이의 형식적 (nominal) 표현을 M 로 놓으면 $P = M(I + \Delta)$ 로 (1) 표시할 수 있고, Δ 는 모형화 오차를 나타낸다. 제어대상을 시험입력에 의한 식별을 할때는 근사화된 모형이 실시간 추정되지만 제어목적으로 인가되는 입력은 기준입력의 크기, unmodeled dynamics, 잡음등과 관련하여 근사한 모델의 식별이 보장되지 않는다. 그러므로 시험입력에 의한 시스템 식별과 간접 방식 적응제어에서의 식별과정은 다르게 취급 되어야 한다.

3. 2. 제어 목적과 모형화

Donati (9) 등이 제안한 새로운 모형의 방식이 그림 1이다

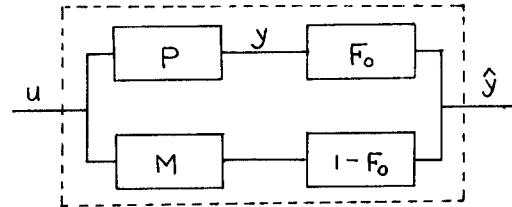


그림 1

를 식(1)과 같이 모형화 하면 ΔP 의 모형화 오차가 존재하지만 그림1과 같은 형태에서

$$P^* : u \rightarrow \hat{y} \text{ 를 고려하면}$$

$$P^* = P F_0 + M(1 - F_0)$$

$$= M(1 + \Delta F_0) \dots \dots \dots (2)$$

식(2)와 같아진다.

P 를 P^* 로 모형화하면 모형화 오차는 ΔF_0 가 되고, F_0 를 조절함에 따라 원하는 주파수의 제어대역에서의 모형화 오차를 줄일 수 있다.

자기동조 제어기의 한 방식에 섹터이론을 적용해본 결과(10)는 모형화 오차가 안정도를 유지하는 충분조건에 매우 중요한 역할을 한다.

예 : $P = B/A \cdot (1 + \Delta)$ 의 형태를 고려하면 $\|A(z^*)\Delta(z^*)/(1 + \Delta z^*)\|$ 가 안정도를 보장하는 충분조건에 직접 관계되며, Δ 에 따라, 상관관계가 있고, W 의 함수이다.

$\|\hat{y} - y\|$ 가 제한 됨은 참고문헌 (9)에 밝혀져 있다..

3. 새로운 모형을 이용한 간접적응제어

3.2와 같은 모형에 의해서 모형화 오차의 영향을 줄일 수 있고, 이에 의해서 기준 입력 및 잡음의 주파수에 관한문제에도 여유가 많아진다. 이 방식에서의 제어대상 식별은 필터의 설정에 따라 제어입력에 따른 오식별의 가능성을 작게한다. 즉 제어입력의 주파수 특성과 unmodeled dynamics 의 자극에 의한 안정도 파괴의 요인을 감소시켜 적응제어기의 강인성을 개선 할수 있다.

IV. 시뮬레이션 및 검토

4.1. 시뮬레이션

Fig. 1은 $\frac{1}{(s+1)(0.1s+1)}$ 의 System 를 $\frac{1}{s+1}$ 을

model reference 로 하여 reference input 2, adaptive gain parameter 24 의 방법으로 white noise 아래서 일반적인 방법으로 control 한 것이다. Adaptation gain $K(t)$ 가 약 40% 의 maximum overshoot 를 가진다.

Fig. 2 는 같은 system 을 feed foward compensation 을 이용하여 (feed foward parameter 0.1) control 해 본것이다, overshoot 는 줄어들었지만 steady state error 가 생기게 되는 결점이 있다.

Fig. 3 은 역시 같은 system 을 SPR compensation, 즉 $F_o = \frac{2}{s+2}$ 를 이용해서 새로운 모델로 모형화하여 control 한 경우이며 이때는 maximum overshoot 도 줄어들면서 steady state error 는 발생하지 않는 좋은 결과를 보여준다.

Fig. 4 는 $\frac{1+0.12q^{-1}}{1-0.88q^{-1}} (1 + \frac{rq^{-1}}{1+rq^{-1}})$ (여기서 $r=0.05$)

의 system 을 $F_o = \frac{1+q^{-1}}{2}$

를 이용하여 새로운 모델로 만들어 reference input 5 의 경우를 해보았다.

4.2. 검토 의견

새로운 모형을 이용한 간접 적응제어 방식이 피이드.뒤 어드 보상 방식보다 양호한 특성을 보이며, 사구간을 도입 하거나 적응 파라미터의 크기를 제한하는 거의 강제적인 방식도 어느정도 효과가 있으나 플랜트에 대한 사전지식이 충분해야 한다는 단점이 있다.

V. 결론

기존의 강인성 개선을 위한 방법들이 대부분의 경우 주 파수 또는 모형화 오차에 대하여 강인성이 개선 되는가가 충분히 검토 될 수 없는 단점이 있다. Donati 의 새로운 모형은 특정한 형태의 강인성 개선방식이 아니라 모형화 방법자체를 새롭게 한 것으로 간접적응제어 뿐 아니라 모든 제어 방식과 연결되어 효과적으로 사용될 수 있고, 기존의 강인성 개선 방식과 함께 병행 사용될 수 있는 장점이 있다.

앞으로의 연구과제로 적응제어의 강인성에 대한 정량적 평가와 이를 제어기 설계과정에서 직접이용할 수 있는 필요 및 충분조건에 관한 연구가 필요하다.

VI. 참고 문헌

1. C. Rohrs, "Adaptive control in the presense of unmodeled dynamics," Ph. D Thesis, MIT, Nov. 1982.
2. P.V. Kokotović, "Round table discussion on adaptive signal processing," Proc. of IFAC workshop, San Fransisco, USA, Jun. 1983.
3. B.B. Peterson and K.S. Narendra, "Bounded error adaptive control, IEE Trans. AC-27. PP. 1161 -1168, Dec. 1982.
4. G. Kreisselmeier and K.S. Narendra, "Stable model reference adaptive control in the presense of bounded disturbances, "IEEE trans. AC-27, pp. 1169-1175, Dec. 1982.
5. Ortegar, et al, "Robustness of discrete time direct adaptive controller," IEEE, AC-30. No. 12 pp 1179-1187. 1985.
6. B.D. Riedle, "Stability analysis of an adaptive system with unmodeled dynamics," INT. J. CONTROL, Vol. 41. No. 2, 1985.
7. C. Rohrs, "A Frequency selective adaptive controller, IEEE. AC, 1983.
8. P. Ioannou, "Instability Analysis and Improvement of Robustness of Adaptive control," IEEE. AC-20, 1984.
9. Donati et al, "Guaranted control of Almost Linear plants, "IEEE. AC-29, 1984.
10. 강국연, 김재민, 양흥석, "강인성 해석에 관한 연구," 대한전기학회지 권 35, 9호, 1986.

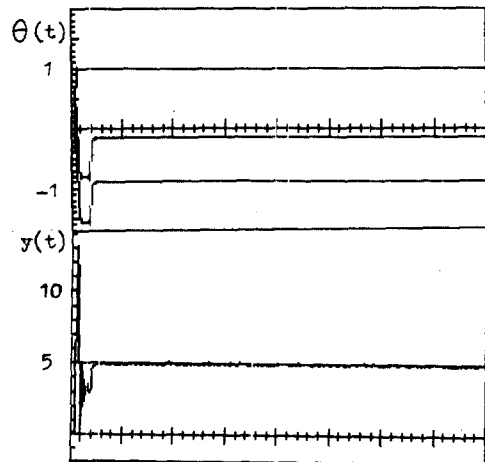


Fig.4 Adaptive control with new modeling (discrete case)

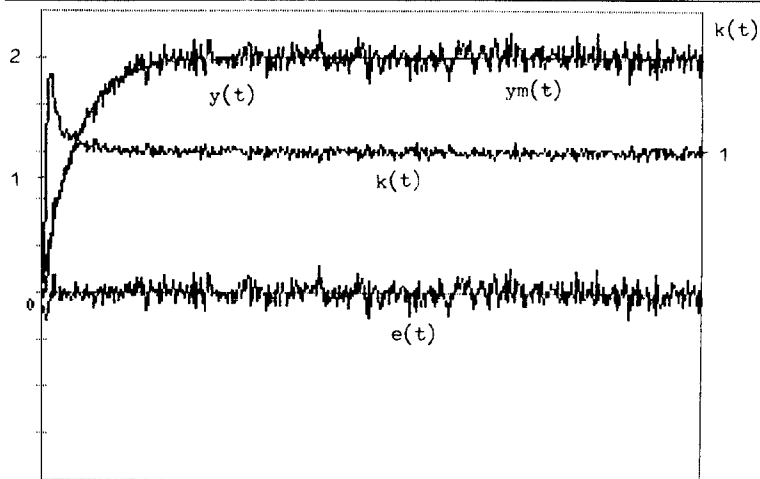


Fig.1 Adaptive control with general method

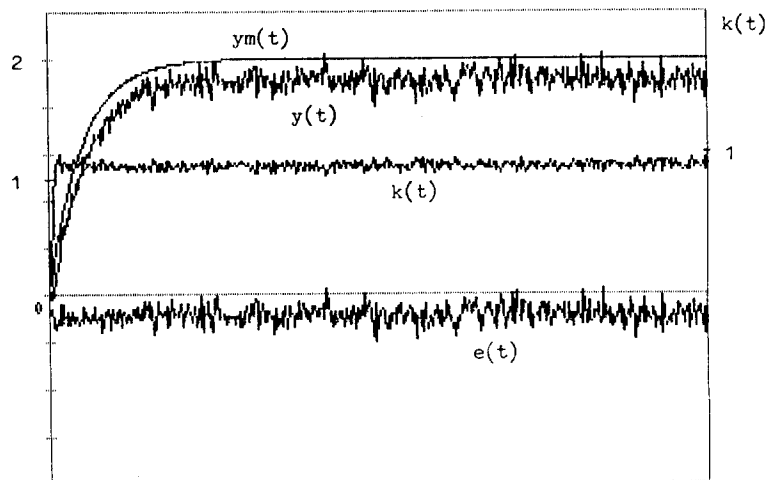


Fig.2 Adaptive control with feedforward compensation

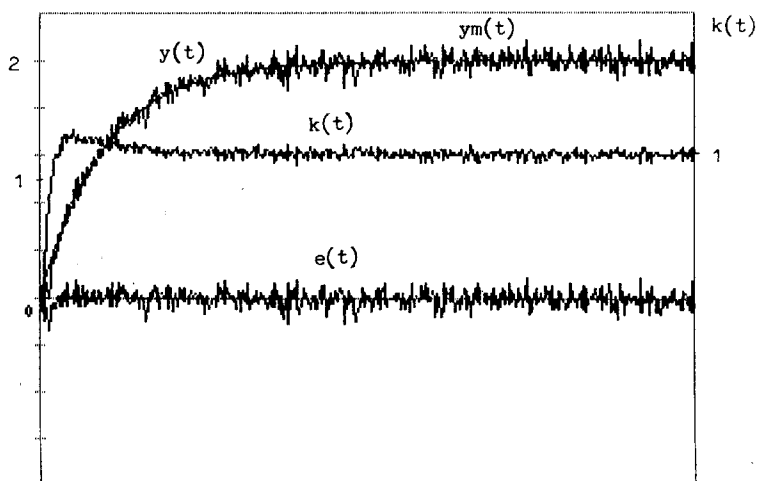


Fig.3 Adaptive control with new modeling
(continuous case)