

유압 서보시스템을 위한 적응제어기 설계

이 상윤^a, 신 위재^b

- a.경남대학교 대학원 전자공학과 박사과정
631-701 경남 마산시 합포구 월영동 449
Tel:+82-551-49-2837 Fax:+82-551-49-2839 E-mail:dsplee@chollian.dacom.co.kr
- b.경남대학교 전자공학과 교수
631-701 경남 마산시 합포구 월영동 449
Tel:+82-551-49-2640 Fax:+82-551-49-2839 E-mail:cwee@hanma.kyungnam.ac.kr

The Design of Adaptive Controller for a Hydraulic Servo Motor

Sang Yun LEE^a, Wee Jae SHIN^b

- a. Dept. of Electronic Engineering, Kyungnam University
449 Weolyoung, Happo, Kyungnam, 631-701 Korea
Tel:+82-551-49-2837 Fax:+82-551-49-2839 E-mail:dsplee@chollian.dacom.co.kr
- b. Dept. of Electronic Engineering, Kyungnam University
449 Weolyoung, Happo, Kyungnam, 631-701 Korea
Tel:+82-551-49-2640 Fax:+82-551-49-2839 E-mail:cwee@hanma.kyungnam.ac.kr

Abstract

In this paper, we proposed a adaptive controller which need not adjustment of the scale factor.

We have verified by experimental results that applying this proposed adaptive control algorithm to a hydraulic servo system is very satisfactory.

I 서론

1958년에 Kalman에 의하여 적응제어(Adaptive)의 개념이 소개된 이후, 1960년대 상태 방정식, 안정도 이론 및 Stochastic 제어 등 현대제어 이론들이 연구되어 적응제어의 기본 이론이 마련되었으며, 미지의 시스템을 추정하기 위한 시스템 식별론(identification theory)과 매개 변수 추정론(Estimation theory) 등이 연구되었다. 1970년대에는 Landau, Narendra 등 및 Astrom 등은 현대 제어 이론을 응용하여 적응제어 시스템의 설계 기법을 발표하였다[1].

최적제어는 미분방정식인 Riccati equation의 해를 구하여야 하며, 적응제어에서 MRAC는 주어진 플랜트

에 대한 표준 모델을 정확히 구해야 하며, STC는 플랜트의 종류에 따라 전달함수(Q)를 선택하는 문제가 주어진다[1][2].

피지제어는 오차와 오차의 변화율을 피지화 시킬 때 일반적으로 플랜트에 따라 Scale Factor를 조절하여 동조시키는데 이것은 오차와 오차의 변화율을 기준 신호를 가지고 Normalization을 하면 해결 할 수 있고 추론한 결과를 비피지화 시켜서 플랜트에 인가 할 때 도 적당한 Scale factor를 곱하여서 동조를 시킨다[3]. Neural Network는 학습시 상당히 많은 매개변수를 수정해야한다[4].

이와 같이 지금까지 살펴본 제어기들은 플랜트에 적용할 때는 여러 가지 매개변수를 조절하여 동조를 시켜야하는 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 제어기 동조시 제어기의 매개변수 조절을 필요로 하지 않는 제어 알고리즘을 제안하고, 유압 서보시스템에 적용하여 성능을 확인하였다.

II. 귀환 적응제어기 설계

설계 하고자하는 제어기의 기본구조는 일반적인 폐환제어기를 기반으로 구성한다. 일반적인 귀환제어기

는 플랜트의 궤환된 출력신호와 회망하는 기준입력사이의 오차를 적당한 제어가 이득을 곱하여 플랜트의 제어 입력을 생성한다. 여기서 적당한 제어가 이득의 최적의 선택방법은 플랜트의 과거 입력과 현재 출력사이의 관계를 구하고 이 관계에서 과거의 회망하는 기준입력을 사용하여 예상되는 제어 입력을 생성한다. 이 또한 예상되는 입력과 과거의 회망하는 기준입력과 현재 플랜트의 출력사이의 오차를 이용하여 다음 단계에서 필요로 하는 적당한 제어가 이득을 생성해 낸다.

1). 궤환 제어기 설계

궤환 적응제어기에서 궤환 제어기의 블록 선도 구조를 그림 1에 도시하였다.

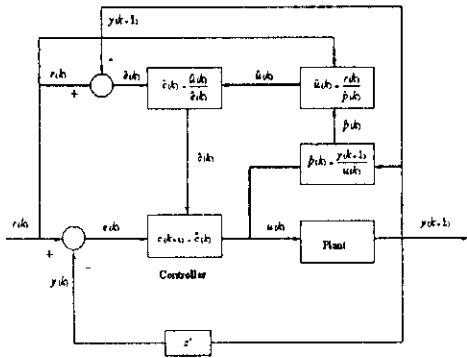


그림 1. 궤환 제어기의 블록 선도

<궤환 제어기의 추론 순서>

- ① 플랜트에 제어 입력 $u(k) = \epsilon$ 을 인가한다.
- ② 플랜트의 k 번째 제어 입력 $u(k)$ 와 출력 $y(k+1)$ 로부터 플랜트의 구조 $\hat{p}(k)$ 을 추론한다.

$$\hat{p}(k) = \frac{y(k+1)}{u(k)} \quad (1)$$

- ③ $\hat{p}(k)$ 와 k 번째 기준 입력 $r(k)$ 로부터 제어 입력을 추론한다.

$$\hat{u}(k) = \frac{r(k)}{\hat{p}(k)} \quad (2)$$

- ④ k 번째 기준 입력 $r(k)$ 와 $k+1$ 번째 $y(k+1)$ 출력으로부터 오차 $\hat{e}(k)$ 을 구한다.

$$\hat{e}(k) = r(k) - y(k+1) \quad (3)$$

- ⑤ $\hat{e}(k)$ 와 $\hat{u}(k)$ 으로부터 제어기의 이득 $\hat{c}(k)$ 을 구한다.

$$\hat{c}(k) = \frac{\hat{u}(k)}{\hat{e}(k)} \quad (4)$$

- ⑥ $\hat{c}(k+1)$ 을 $\check{c}(k)$ 로 치환한다.

$$\check{c}(k+1) = \check{c}(k) \quad (5)$$

이상 위에서 제안한 제어기 알고리즘은 플랜트의 모델을 단지 입력과 출력의 비율로서만 구하여 제어기의

이득을 결정하였기 때문에 복잡한 플랜트는 제어하기가 어렵다. 이것을 개선하기 위해 플랜트의 구조를 추정하여 이를 제어기의 이득을 구하는 궤환제어 알고리즘에 적용한다.

2). 궤환 적응제어기 설계

제안한 알고리즘의 단점을 보완하기 위해서 적응제어 방식을 도입하여 해결하려고 한다.

궤환제어기의 추론 순서 단계2에서 $\hat{p}(k)$ 을 Recursive parameter estimator에 의해서 추론한다. 그리고 이것의 블록 선도를 그림 2에 도시하였다.

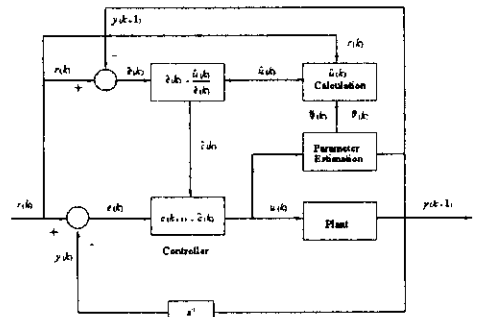


그림 2. 궤환 적응제어기의 블록 선도.

Recursive parameter estimator는 제안한 제어기에 있어서 중요한 부분이다[5][6]. Parameter estimation를 위해 사용되는 방법으로는 많은 것들이 있다. 예를 들면 Stochastic approximation, least squares, Extended least squares, Generalized least squares, Multistage least squares, Instrumental variables, 그리고 Maximum likelihood 방법들이 있으나 Recursive parameter estimator을 위해 사용할 수 있는 최고의 선택방법은 없다. 즉 결론은 매우 많은 다른 가능성을 가지고 있다. 간단히 처리하기 위하여 Recursive parameter estimation을 본 연구에서 도입하였다.

플랜트가 다음의 수식에 의해 특성화된다고 가정하자.

$$Ay(k) = Bu(k) \quad (6)$$

여기서 A와 B는 Forward shift operator을 가지는 다항식이다. 그리고 A와 B는 Coprime이고 다음의 조건을 만족한다고 가정한다.

$$\deg B < \deg A \quad (7)$$

여기서 $n = \deg A$ 는 다항식 A의 차수이고, $m = \deg B$ 는 다항식 B의 차수이다.

Least squares estimation에서 Criterion은 다음의 수식을 최소화하는 것이다.

$$V = \sum_{k=1}^n \lambda^{k-1} \epsilon^2(k) \quad (8)$$

여기서 $\epsilon(k + \text{deg } A) = Ay(k) - Bu(k)$ 이다.

Parameter λ 는 Old measurements로의 Weight를 낮추도록 주어지는 Weight factor이다.

알고리즘을 표현하기 위해 식(9)을 다음과 같이 표현한다.

$$y(k+1) + a_1y(k) + a_2y(k-1) + \dots + a_ny(k-n) = b_0u(k) + b_1u(k-1) + \dots + b_mu(k-m) \quad (9)$$

Parameter estimates의 Vector θ 와 Regressors vector $\phi(k)$ 을 다음과 같이 표현한다.

$$\theta = [\hat{a}_1 \hat{a}_2 \dots \hat{a}_n \hat{b}_0 \hat{b}_1 \dots \hat{b}_m] \quad (10)$$

$$\phi(k) = [-y(k) \ -y(k-1) \ \dots \ -y(k-n) \ u(k) \ u(k-1) \ \dots \ u(k-m)]^T \quad (11)$$

그리고 Recursive least squares estimate는 다음과 같이 주어진다.

$$\theta(k+1) = \theta(k) + P(k+1)\phi(k+1)\epsilon(k+1) \quad (12)$$

여기서 $\epsilon(k+1) = y(k+1) - \theta^T(k)\phi(k+1)$ 이다.

그리고

$$P(k+1) = [P(k) - P(k)\phi(k)R(k)\phi^T(k)P(k)]/\lambda \quad (13)$$

여기서 $R(k) = [\lambda + \phi^T(k)P(k)\phi(k)]^{-1}$ 이다.

$\hat{u}(k)$ 를 구하기 위해 Recursive least squares estimate에 의해 추론된 Parameter estimate vector θ 와 Regressors vector $\phi(k)$ 을 다음과 같이 수정한다.

$$\hat{\theta} = [\hat{a}_1 \hat{a}_2 \dots \hat{a}_n \hat{b}_1 \hat{b}_2 \dots \hat{b}_m] \quad (14)$$

$$\hat{\phi}(k+1) = [-y(k+1) \ -y(k) \ -y(k-1) \ \dots \ -y(k-n) \ u(k-1) \ \dots \ u(k-m)]^T \quad (15)$$

위의 두 벡터로부터 제어기의 이득을 구하는데 사용하는 $\hat{u}(k)$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{u}(k) = \frac{r(k) - \hat{\theta}^T(k)\hat{\phi}(k+1)}{b_0} \quad (16)$$

사용한 Parameter estimation 방법은 지수함수 망각 계수를 가지는 순환 최소 자승(Recursive least squares with exponential forgetting) 방식이다[5][6].

III. 실험 및 결과 고찰

그림 3은 전체 실험 장치의 블록 다이어그램이다. 제한한 제어 알고리즘을 수행하는 부분은 ADSP-21020 EZ-LAB™ DSP 보드에서 하고 이 보드의 제어는 RS-232 통신 방식을 사용하여 PC1에서 이루어진다[25]. PC1은 ADSP-21020 Family Development Software를 사용하여 C 언어로 작성된 제한한 알고리즘을 DSP 어셈블리 언어로 번역하고, 실행 파일을 생성하여 ADSP-21020 EZ-LAB™ DSP 보드로 Down loading 하여 알고리즘을 수행한다[7].

유압 서보 시스템은 유압 모터와 Direct Drive Valve 그리고 관성부하로 이루어진다[8].

유압 서보 시스템에서 제어기의 제어 입력 신호를 D/A 변환기를 사용하여 아날로그 전압으로 바꾼다음 Direct Drive Valve에 인가한다. Direct Drive Valve는 Valve 내부에 서보 증폭기를 내장하고 있는 일체형이다.

Direct Drive Valve의 구동 신호(제어 입력)는 ±10V로 ADSP-21020 EZ-LAB™ DSP 보드에 D/A 변환기(AD669 :16bit)를 연결하여 생성한다. 그리고 Direct Drive Valve의 A, B Port는 유압 모터의 포트에 연결되고, 유압 모터의 축은 커플링을 통하여 관성부하를 연결하는 축에 결합된다. Valve에 의해 제어된 유량은 유압 모터로 공급되고, 공급된 유량에 비례해서 회전력을 발생시킨다.

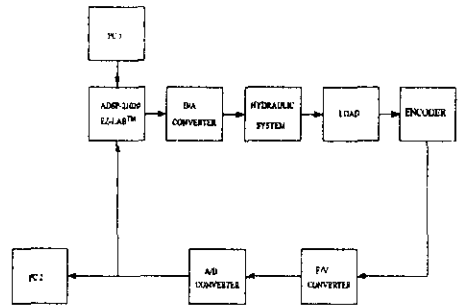


그림 3 전체 실험 장치의 구성

또한 관성부하를 고정하는 축은 다시 커플링을 통하여 엔코더에 연결된다. 엔코더는 유압 모터의 회전수를 감지하는 부분으로 F/V 변환기를 사용하여 유압 모터의 회전수를 전압 신호로 변환하고, 변환된 전압 신호는 A/D 변환기를 통과하여 ADSP-21020 EZ-LAB™ DSP 보드로 연결된다. 그리고 PC2의 AD 변환 카드(Lab-PC-1200/AI)로 전달되고, 실험 결과를 기록하는 역할을 담당한다.

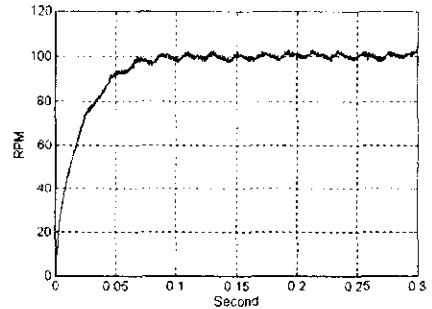


그림 4 무부하시 레환 적응제어기 응답 (설정치 : 100 RPM, 압력 : 40kg/cm²)

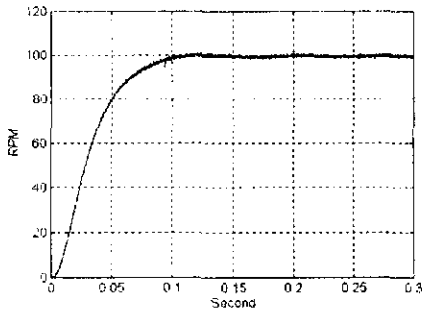


그림 5 부하시 케환 적응제어기 응답
(설정치 : 100 RPM, 압력 : 40kg/cm²,
79.882kg/cm²의 관성부하)

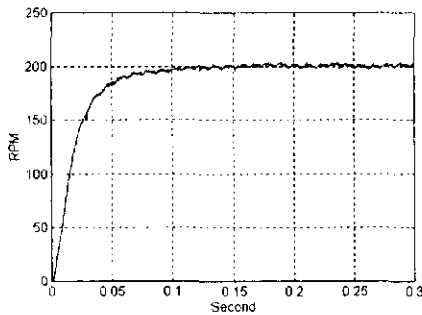


그림 6 무부하시 케환 적응제어기 응답
(설정치 : 200 RPM, 압력 : 80kg/cm²)

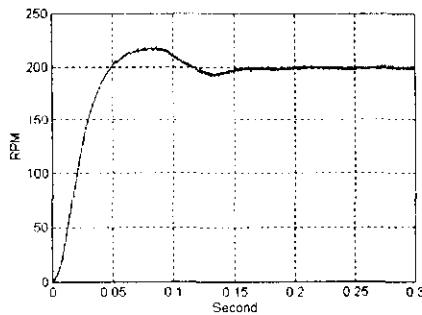


그림 7 부하시 케환 적응제어기 응답
(설정치 : 200 RPM, 압력 : 80kg/cm²,
79.882kg/cm²의 관성부하)

실험장치의 조건으로부터 서보 밸브를 100% 열고, 유압 펌프의 압력을 최대로 하면, 약 250RPM으로 유압 모터가 회전한다. 그래서 실험은 설정치가 100RPM 일 때 공급 유압 40kg/cm²으로 하고, 설정치가 200RPM일 때 80kg/cm²의 유압을 유지하여 실험을

수행하였다. 부하시 부하는 79.882kg/cm²의 관성부하를 사용하였다. 그리고 실험 결과를 표1에 나타내었다.

표 1 부하시와 무 부하시의 실험결과 비교

설정치		무부하시	부하시
100RPM	상승시간	50.4ms	55ms
	정정시간	62.2ms	82.8ms
	오버슈트	없음	없음
정상상태오차		5.832%	3.271%
200RPM	상승시간	40.6ms	31ms
	정정시간	57.6ms	101ms
	오버슈트	없음	9.43%(18.8)
정상상태오차		4.245%	2.829%

IV. 결론

실험결과로 부터 기준 설정치에 잘 추종함을 볼 수 있다. 그러나 설정치 200RPM 부하시에는 오버슈트가 생긴다. 본 논문에서 제안한 케환 적응제어기는 제어기를 설계할 때 문제시되는 Scale factor의 조절을 필요로 하지 않는다. 그러나 플랜트의 차수를 알아야 한다는 단점을 가지고 있다.

이러한 단점을 보완 하기 위해 앞으로의 연구 방향은 퍼지와 신경망 이론을 도입하여 플랜트의 구조를 모르는 경우 또는 비선형 플랜트의 경우에도 잘 동작하는 제어기로 확장해야 할 것으로 사료된다.

IV. 참고문헌

- [1]. Karl Johan Astrom, Bjorn Wittenmark, "Adaptive Control" Second Edition, Addison Wesley, 1989.
- [2]. 이상윤, "DSP 소자를 이용한 자기 동조 제어기의 설계 및 구현", 석사학위논문, 1990
- [3]. Spyros Tzafestas, Nikolaos P. Papanikolopoulos, "Incremental Fuzzy Expert PID Control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 37, No. 5, October 1990.
- [4]. Chin-Teng Lin, C. S. George Lee, "Neural Fuzzy Systems", Prentice Hall, 1996.
- [5]. V. V. Chalam, "Adaptive Control Systems Techniques and Application", Marcel Dekker, inc., 1987.
- [6]. Edited by Kumpari S. Narendra, Richard V. Monopoli, "Applications of Adaptive Control", pp15~19, Academic Press, 1980.
- [7]. Analog Devices, "ADSP-21020 EZ-LABTM Evaluation Board Manual", Analog Devices, Inc., March, (1995)
- [8]. MOOG, "Servo and Proportional Systems Catalog", (1997)