

주파수역에서 피드백시스템의 성능향상을 위한 제어기 Auto-tuning기법 Controller Auto-tuning Scheme Improving Feedback System Performance in Frequency Domain

*정 유 철 (숭실대 대학원), 이 건 복 (숭실대 기계공학과)

*Yu Chul Jung (Soongsil Univ. Graduate), Gun Bok Lee (Soongsil Univ.)

Abstract

Controller refinement scheme to improve the performance of a conventional system automatically in frequency domain is proposed. The controller automatic tuning method features using experimental frequency responses of the conventional closed-loop system, the conventional controller, and the improved closed-loop system, instead of poorly modeled plant due to non-linearities and disturbances. The improved closed-loop system characteristics is automatically acquired by the conventional closed-loop system characteristics and the proposed performance index in system bandwidth. And the proper controller is realized by least squares approximation in frequency domain. To testify the usefulness of the approach, the path tracking control of robot arm is performed. Experimental results and analytic results are well-matched.

1. 서론

같은 모션제어시스템에서 고속·고정밀도화에 따라 보다 높은 제어성능이 요구되어지고 있다. 이러한 추세 가운데 플랜트(제어대상)를 이루는 요소들의 비선형성에 의한 효과나 모델링오차 및 외란의 작용에 대하여서도 요구하는 성능을 만족시키는 제어기의 설계 및 적합한 제어방식의 개발이 시급하다. 현장에서 많이 사용되고 있는 PID 제어기는 제어기구조로 비례·적분·미분제어기를 선정하고, 각각의 제어기 파라미터를 적절하게 튜닝하는 기법을 채택하고 있다.^[1, 2] 그러나 산업 현장에서 사용중인 PID제어방식의 제어시스템 중에서 요구되어지는 성능에 PID제어기가 잘 튜닝되어있는 것을 찾아보기 어려운 것이 현실이다.^[2] 더욱이, 제어기 튜닝의 자동화가 가능하리라 기대되었던 적응제어기법도 제어대상에 적합한 적응제어법칙을 얻기 위해서는 플랜트에 대한 더 많은 선행정보들을 필요로 한다는 점과

그만큼 제어노력이 많이 든다는 단점 때문에 자동튜닝 기법으로는 적합하지 않음을 알 수 있다.^[3] 그리고 기존의 설계기법이 플랜트모델에 기반을 두고 안정성의 견지에서 성능을 만족시키는 제어기를 설계하므로, 이때 플랜트의 모델링 오차에 대한 성능평가 및 실험해석 등의 많은 고려가 필요하게 된다. 이러한 제어시스템 설계상의 문제를 해결하기 위해서는 시스템의 안정성을 확보한 기본 제어기로부터 점차적으로 제어성능을 높일 수 있고 단순하고 안정적인 제어기자동설계기법의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 기존의 제어시스템의 제어성능을 자동으로 향상시키는 제어기 재설계기법을 2장에서 제안한다. 제안한 설계법은 비선형성이 강한 플랜트보다 안정하고 선형성에 가까우며 모델오차가 적은 페루프시스템의 전달함수를 이용한다. 즉, 기존 피드백시스템의 기준입력 대 출력의 관계와 요구하는 제어성능을 만족하는 피드백시스템의 입출력관계로부터 새로운 제어기를 설계하는 관계식을 이용한다.^[4] 그리고 기존 피드백시스템 성능보다 향상된 페루프전달함수는 시스템대역폭내에서 $(1 + 0j)$ 에 더 가깝다는 것으로부터 도출된 설계인자를 이용하여 자동설계가 가능하도록 한다. 그리고 관계식으로부터 설계된 제어기는 최소자승기법을 이용하여 주파수역에서 근사화시킨 제어기를 얻는다. 또한 제안한 제어기 자동설계기법은 로봇 머니플레이터의 궤적 제어실험을 수행하여 그 타당성을 3장에서 검토한다.

2. 제어기 Auto-tuning 기법

2.1 제어기 재설계

일반적인 제어시스템은 Fig. 1과 같이 피드백요소를 통해 페루프를 이루며, 전체적인 제어시스템이 선형시스템에 가까운 경우 그 동특성과 성능은 다음과 같이 전달함수로 나타낼 수 있다.

$$G_{cl}(\ast) = \frac{C(\ast)P(\ast)}{1 + C(\ast)P(\ast)} \quad (1)$$

여기서, \ast 연산자는 연속시간시스템에서는 미분연산자 s 를 의미하며, 이산시간시스템에서는 z^{-1} 로 구성된다.^[4] 그리고 $C(\ast)$ 는 제어기 전달함수를 나타내며, $P(\ast)$ 는 제어대상인 플랜트의 전달함수를 나타낸다.

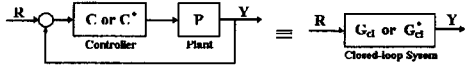


Fig. 1 Block Diagram of a Closed-loop System

기존 시스템의 성능을 향상시키기 위해 재설계되는 제어기 C^* 는 다음의 식을 만족한다.

$$C^* = \left(\frac{G_{cl}^*}{1 - G_{cl}^*} \right) \left(\frac{G_{cl}}{1 - G_{cl}} \right)^{-1} C \quad (2)$$

$$\equiv [F]^* [F]^{-1} C$$

여기서, G_{cl} , C 는 각각 기존의 제어시스템의 폐루프전달함수와 제어기의 전달함수이다. 그리고 G_{cl}^* 은 원하는 제어성능을 만족시키는 폐루프전달함수이다. 식 (2)에서 보는 바와 같이 향상된 제어기 (C^*)의 설계는 기존의 제어기 (C)와 기존 성능에 대한 폐루프시스템의 응답 (G_{cl}), 그리고 더 나은 성능을 제시하는 폐루프시스템의 응답 ($G_{cl}^* \neq 1$)으로부터 구할 수 있다. 제시한 설계기법은 각 시스템 블록에 대한 전달함수관계나 주파수 응답정보를 이용하여 구할 수 있다.

2.2 제어시스템 성능향상

향상된 제어성능을 얻기 위해 재설계에 이용되는 폐루프전달함수의 특성 G_{cl}^* 은 시스템의 주파수대역폭에서 다음의 두 조건을 만족하도록 설계한다.

조건 1 : 크기조건

$$|1 - |G_{cl}^*|| = \beta \cdot |1 - |G_{cl}|| \quad (0 < \beta \leq 1) \quad (3)$$

조건 2 : 위상조건

$$|\angle G_{cl}^*| \leq |\angle G_{cl}| \quad (4)$$

여기서, β 는 이득성능향상비를 나타낸다.

각각의 전달함수를 주파수응답에 대한 크기와 위상으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G_{cl} = M \angle \phi \quad (5)$$

$$G_{cl}^* = M^* \angle \phi^* \quad (6)$$

설계상 $\angle \phi^* \approx \angle \phi$ 로 놓으면, 향상된 시스템 성능은 공칭 주파수응답으로 다음과 같이 표현된다.

$$G_{cl}^* = [(1 - \beta) + \beta M] \angle \phi \quad (7)$$

여기서, β 는 성능향상과 관계되는 설계인자로서 주파수에 따라 다르게 정할 수 있다. 본 논문에서는 $\beta(s)$ 가 제어기 설계인자로 사용되므로, 식 (4)에서의 이득성능향상비 대신에 '이득노력함수' 혹은 '이득노력상수'라 정의한다.

2.3 제어기의 주파수역 근사화

설계된 제어기 C^* 에 대한 실현문제는 주파수역에서 최소자승기법을 이용^[5]하여 제어기 \widehat{C}^* 를 근사화함으로써 얻을 수 있다.

$$\widehat{C}^*(s) = \frac{\widehat{B}_c(s)}{\widehat{A}_c(s)} = \frac{\widehat{b}_1 s^{n-1} + \widehat{b}_2 s^{n-2} + \dots + \widehat{b}_n}{s^n + \widehat{a}_1 s^{n-1} + \widehat{a}_2 s^{n-2} + \dots + \widehat{a}_n} \quad (8)$$

근사화를 위한 파라미터 벡터 θ 는 다음과 같다.

$$\theta = (\widehat{a}_1, \widehat{a}_2, \dots, \widehat{a}_n, \widehat{b}_1, \dots, \widehat{b}_n)^T \quad (9)$$

그리고, 제어기 근사화문제는 다음의 가격함수를 최소화 하는 근사 제어기의 계수들을 구하는 문제가 된다.

$$\min J_1(\theta) = \sum_{k=1}^N \|C^*(i\omega_k) - \widehat{C}^*(i\omega_k)\|^2 \quad (10)$$

$$= \sum_{k=1}^N \left\| C^*(i\omega_k) - \frac{\widehat{B}_c(i\omega_k)}{\widehat{A}_c(i\omega_k)} \right\|^2$$

주어진 가격함수 J_1 이 오차에 대하여 비선형이므로, 적합한 가격함수로 다음과 같이 정의하였다.

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N W_k \|B(i\omega_k) - \widehat{A}(i\omega_k)G(i\omega_k)\|^2 \quad (11)$$

$$= \sum_{k=1}^N \|W(i\omega_k)\|^2 \cdot \|B(i\omega_k) - \widehat{A}(i\omega_k)G(i\omega_k)\|^2$$

여기서 가중함수 W_k 는 높은 주파수성분을 강조시키지 않거나 특정한 주파수영역을 강조하기 위해 사용되는 필터 $W(s)$ 를 의미한다. 대개의 제어시스템이 저주파역에서 에너지를 가지고 있으므로 필

터 $W(s)$ 는 시간역에서 저역통과필터와 시스템을 고려한 필터의 대합적분으로 간주할 수 있다.

3. 실험 및 결과고찰

3.1 로봇제어실험

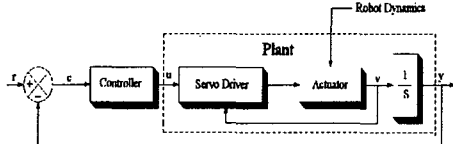


Fig. 2 Independent Joint Control of Robot Manipulator

제안한 제어기의 재설계기법의 타당성을 검토하기 위해, 본 연구에서는 로봇매니퓰레이터에 대한 독립축제어를 수행하였다. 제어기의 구조는 비례제어기를 이용하였으며, 비례이득 K 가 각각 $K=30$ 인 경우와 $K=50$ 인 경우에 대해 제시한 제어기 재설계기법의 타당성을 확인한다.

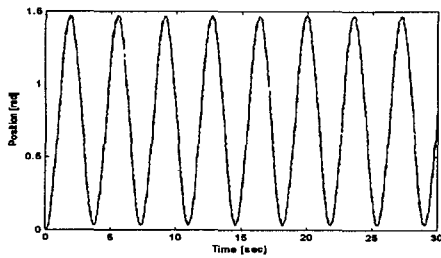


Fig. 3 Reference Path Input and Actual Output in the case of ($K = 30$ and $K = 50$)

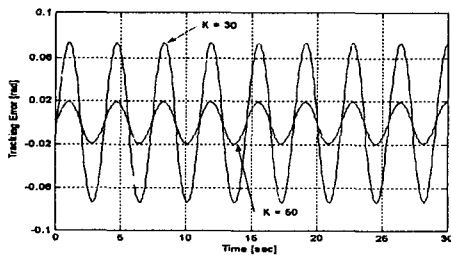


Fig. 4 Tracking Error Comparison between ($K=30$) and ($K=50$)

사용된 로봇매니퓰레이터에 대한 제어시스템은 각각의 축이 서보모터와 서보드라이브에 의해 구동되며, 경로이동중 로봇동역학의 영향을 받는

다. 따라서, 로봇팔의 플랜트부의 동특성은 경로에 따라 다르게 나타난다. 본 논문에서는 추적오차가 크게 나타나는 경로를 사용한다. 기준입력으로 사용한 경로를 Fig. 3에 보였으며, 각각의 제어게인에 대한 오차는 Fig. 4에 보였다. 실험결과, 비례이득이 비교적 큰 $K=50$ 인 경우가 $K=30$ 인 제어기보다 제어성능이 더 좋음을 알 수 있다.

3.2 해석 및 결과고찰

각각의 제어기를 비교한 실험을 통해 구한 폐루프시스템의 입출력관계를 주파수분석하여 주파수응답을 구한 결과를 크기와 위상그래프를 비교하여 Fig. 5에 나타내었다.

실험해석결과, 폐루프시스템의 위상특성에서 비례이득 $K=30$ 인 경우와 $K=50$ 인 경우가 거의 비슷함을 알 수 있다. 그리고 크기특성에서 이득성능 향상비 β 가 거의 0.3 정도임을 알 수 있다.

제어기 근사화시 사용되는 필터 $W(s)$ 는 입력의 주파수역 스펙트럼해석결과(Fig. 6 참조)를 통해 요구되어지는 필터특성을 알 수 있다. 입력의 주파수역 스펙트럼해석결과를 보인 Fig. 6로부터 $W(s)$ 의 필터특성은 1.8Hz 근처에 1차 차단주파수 특성을 갖음을 알 수 있다.

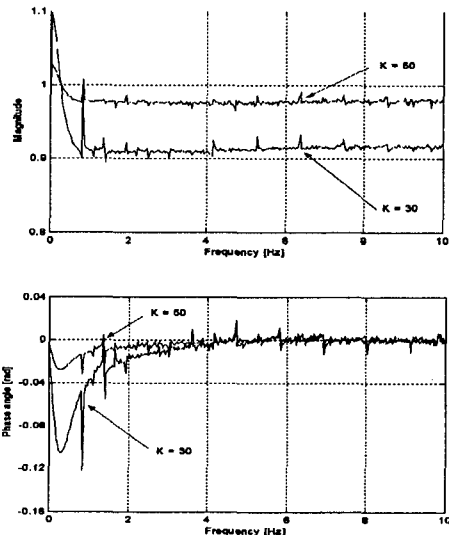


Fig. 5 Frequency Response Results of Closed-loop System ($K=30$ vs $K=50$)

(a) Magnitude Characteristics (linear scale)

(b) Phase-angle Characteristics

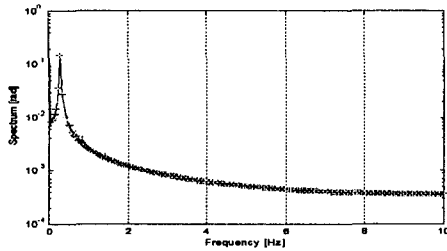


Fig. 6 Spectrum Results of Reference Path Input

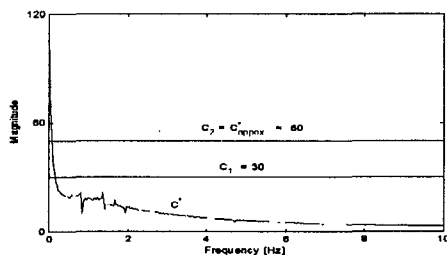


Fig. 7 Comparison between Controller Refinement (C^*) and Controller Approximation ($\hat{C} = \hat{K}$)

해석결과로부터 비례제어의 이득이 $K=30$ 인 경우의 페루프시스템의 동특성보다 더 나은 제어 성능을 얻기 위해, 이득노력상수 β 를 0.3으로 하고, 필터 $W(s)$ 를 차단주파수가 1.8Hz인 1차 저역통과 필터특성으로 설계하여 새로운 제어기 C^* 를 구하고, 식 (11)을 이용하여 비례제어기로 근사화하였다. Fig. 7은 주파수역상에서 재설계된 제어기 C^* 와 비례제어기($\hat{C} = \hat{K}$)로 근사화시킨 결과를 보인 것이다. 비례제어기로 근사화한 결과, 비례이득 \hat{K} 가 50.038로 이득성능향상비 β 를 만족시키는 비례이득($K=50$)과 거의 같음을 알 수 있다. 이러한 해석결과로부터 본 논문에서 제안한 제어기의 재설계방법이 타당함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서 기존 제어시스템의 성능을 향상시키기 위한 제어기 설계방법을 제시하였으며, 실험 및 해석을 통해 그 타당성을 보였다. 제어시스템의 성능향상을 주파수역에서 검토하여 성능향상 인자를 도출하였으며, 이를 이용하여 제어기를 주파수역에서 재설계하였다. 그리고 재설계된 제어

기의 실현을 위해 주파수역에서 최소자승기법을 이용하여 제어기를 근사화하는 방법을 이용하였다. 또한, 로봇매니퓰레이터에 대한 실험 및 해석을 통해 본 논문에서 제안한 제어기 설계기법의 유용성을 보였다.

향후 연구로서, 제어기 근사화할 때 사용된 가중함수에 대한 필터특성을 적절하게 설계하는 방법과 일반적인 플랜트에 존재하는 입력의 포화를 고려한 안정화 제어기설계기법에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Ogata, K., *Modern Control Engineering*, 2nd Ed., Prentice Hall, 1990.
2. Aström, K., and Hägglund, T., *Automatic Tuning of PID Controllers*, Instrument Society of America, 1988.
3. Dep. of Automatic Control in Lund Institute of Technology, *Activity Report 1995-1996*, Dep. of Automatic Control in Lund Institute of Technology, Lund Univ., Sweden, 1996.
4. 정유철, 이진복, "페루프시스템 인식을 이용한 제어기 설계기법," 한국정밀공학회 '99년도 춘계학술대회논문집, pp. 314-217, 1999.
5. Landau, I., *System Identification and Control Design*, Prentice Hall, 1990.
6. Lilja, M., "Controller Design by Frequency Domain Approximation," Report CODEN:LUTFD2 / (TFRT - 1031)/ 1-107 / (1989) (Ph. D. Thesis), Department of Automatic Control, Lund, Sweden, 1989.