

주파수역에서 시스템 감시를 이용한 제어기 Auto-tuning기법

정유철*(숭실대 대학원 기계공학과), 이건복(숭실대 기계공학과)

Controller Auto-tuning Scheme using System Monitoring in Frequency Domain

Yu Chul Jung(Graduate school, Soongsil Univ.), 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, experimental results of robot path-tracking control applied with various controllers is used, and then is analyzed with respect to a equivalent proportional controller. Experimental results and analytic results are well-matched.

Key Words : PID Controller(비례적분미분제어기), Automatic Tuning(자동튜닝), Feedback System(피드백시스템), Adaptive Control(적응제어), Frequency Response(주파수응답), Frequency Domain Approximation(주파수역 근사화), Least Square Method(최소자승법)

1. 서론

제어대상으로서 CNC 공작기계, 로봇, 반도체제조에 이용되는 와이어 본더에 이르는 모션제어시스템의 고속· 고정밀화에 따라 예전에 고려할 필요가 없었던 플랜트(제어대상)의 각 구성요소들의 비선형성에 의한 효과나 모델링오차 및 외란의 작용에 대해서도 충분히 요구하는 제어성능을 만족시키는 제어기의 설계 및 적합한 제어방식의 개발이 진행되어지고 있다. 현장에서 널리 사용되고있는 PID제어기 설계는 제어기구조로 비례적분미분제어기를 선정하고, 각각의 제어기 파라미터를 적절하게 튜닝하는 기법을 채택하고 있다.^[1, 2] 그러나 PID 제어방식을 채택하고 있는 시스템 중 대부분이 PID제어기를 플랜트에 잘 튜닝하여 사용하지 않고 있는 실정이다.^[2] 더욱이, 제어기 튜닝의 자동화가 가능하리라 기대되

었던 적응제어기법도 제어대상에 적합한 적응제어법을 얻기 위해서는 플랜트에 대한 보다 많은 선행정보들을 필요로 한다는 점과 그 만큼 제어노력이 많이 든다는 단점 때문에 순수하게 자동튜닝기법이라고 생각하기에는 적합하지 않음을 알 수 있다.^[2] 그리고 기존의 설계기법이 플랜트모델에 기반을 두고 안정성의 견지에서 성능을 만족시키는 제어기를 설계하므로, 이때 플랜트의 모델링 오차에 대한 성능평가 및 실험해석 등의 보다 많은 제어노력이 들게된다. 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 높이는 제어기 재설계기법을 제안한다. 제안한 설계법은 비선형성이 강한 플랜트보다 안정하고 선형성

에 가까우며 모델오차가 적은 페루프시스템의 전달 함수를 이용한다. 즉, 기존 피드백시스템의 기준입력 대 출력의 관계와 요구하는 제어성능을 만족하는 피드백시스템의 입력력관계로부터 새로운 제어를 설계하는 관계식을 이용한다.^[4] 그리고 기존 피드백시스템 성능보다 향상된 페루프전달함수는 시스템대역 폭내에서 $(1 + 0j)$ 에 더 가깝다는 것으로부터 도출된 설계인자를 이용하여 자동설계가 가능하도록 한다. 그리고 설계된 제어기는 최소자승기법을 이용하여 주파수역에서 근사화된 제어기를 얻는다. 또한 제한된 제어기 자동설계기법은 여러 가지 제어기에 대한 로봇 머니플레이터의 궤적제어실험을 수행하여 그 타당성을 검토한다.

2. 제어기 Auto-tuning 기법

2.1 제어기 재설계

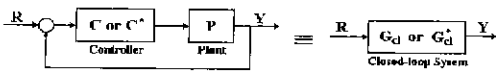


Fig. 1 Block Diagram of a Closed-loop System

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

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

여기서, * 연산자는 연속시간시스템에서는 미분 연산자 s 를 의미하며, 이산시간시스템에서는 z^{-1} 를 의미한다.^[5] 그리고 $C(*)$ 는 제어기 전달함수를 나타내며, $P(*)$ 는 제어대상인 플랜트의 전달함수를 나타낸다.

기존 시스템의 성능을 향상시키기위해 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 페루프전달함수와 제어기의 전달함수이다. 그리고 G_{cl}^* 은 원하는 제어성능을 만족시키는 페루프전달함수이다. 식 (2)에서 보는 바와 같이 향상된 제어기 (C^*)의 설계는 기존의 제어기(C)와 기존성능에 대한 페루프시스템의 응답(G_{cl}), 그리고 더 나은 성능

을 제시하는 페루프시스템의 응답($G_{cl}^* \neq 1$)으로부터 구한다. 제시한 설계기법은 각 시스템 블록에 대한 전달함수관계나 주파수응답정보를 이용하여 구할 수 있다.

2.2 제어시스템 성능향상

향상된 제어성능을 얻기위해 재설계에 이용되는 페루프전달함수의 특성 G_{cl}^* 은 시스템의 주파수대역 폭에서 다음의 두 조건을 만족한다

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. 식 (7)에서는 $\beta(s)$ 가 제어기 설계인자로 사용되므로, 식 (3)의 이득성능향상비와 대비하여 $\beta(s)$ 를 '이득노력함수' 혹은 β 단으로 '이득노력상수'라 정의한다.

2.3 제어기의 주파수역 근사화

설계된 제어기 C^* 에 대한 실현문제는 주파수역에서 최소자승기법을 이용^[6]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.

$$\begin{aligned} \min J_1(\theta) &= \sum_{k=1}^N \|C^*(i\omega_k) - \widehat{C}(i\omega_k)\|^2 \quad (10) \\ &= \sum_{k=1}^N \|C^*(i\omega_k) - \frac{\widehat{B}_c(i\omega_k)}{\widehat{A}_c(i\omega_k)}\|^2 \end{aligned}$$

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

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

여기서 가중함수 W_k 는 높은 주파수성분을 강조시키지 않거나 특정한 주파수영역을 강조하기 위해 사용되는 필터 $W(s)$ 를 의미한다. 대개의 제어시스템이 저주파역에서 에너지를 가지므로, 필터 $W(s)$ 는 시간역에서 저역통과필터와 시스템을 고려한 필터와의 대합적분을 의미한다. 식 (11)에서 주목할 점은 필터 $W(s)$ 는 주파수에 따른 크기만을 표현하는 함수도 가능하다는 것이다.

3. 실험 및 해석

3.1 로봇제어실험

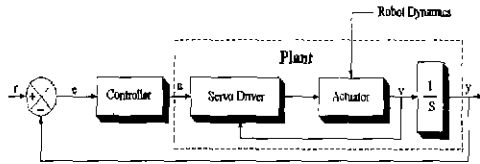


Fig. 2 Independent Joint Control of Robot Manipulator

제시한 제어기의 재설계방법에 대한 타당성을 검토하기 위해, 본 연구에서는 로봇매니퓰레이터에 대한 독립축제어를 수행하였다. 제어기의 구조로는 비례제어기와 비례적분제어기를 각각에 대해 제어실험을 수행하였으며, 각 실험에 사용된 제어기의 이득값과 해석에 필요한 표기기호를 Table. 1에 정리하였다.

Table. 1 Experimental Setup and Nomenclature

| Conventional Controller | Tracking Error | Plant | Closed-loop System | New Controller |
|----------------------------------|----------------|-------|--------------------|----------------|
| C_1 : $K_p=30$: $K_i=0$ | e_1 | P_1 | $G_{cl(1)}$ | $C_1^*(\beta)$ |
| C_2 : $K_p=50$: $K_i=0$ | e_2 | P_2 | $G_{cl(2)}$ | $C_2^*(\beta)$ |
| C_3 : $K_p=32$: $K_i=11.2$ | e_3 | P_3 | $G_{cl(3)}$ | $C_3^*(\beta)$ |
| C_4 : $K_p=29$: $K_i=302$ | e_4 | P_4 | $G_{cl(4)}$ | $C_4^*(\beta)$ |

* K_p proportional controller gain

** K_i integral controller gain

사용된 로봇매니퓰레이터에 대한 제어시스템은 각각의 축이 서보모터와 서보드라이브에 의해 구동되며, 경로이동중 로봇동역학의 영향을 받는다. 따라서, 제어대상으로서 로봇관절구동부의 동특성은 경로에 따라 다르게 나타난다. 그러므로 본 연구에서는 추적오차가 크게 나타나는 경로들에 대한 실험결과를 이용하였다. 각각의 제어실험결과로 얻은 추적오차를 Fig. 3에 보였다. 실험결과, 비례제어기의 경우 비례이득이 비교적 큰 제어기를 사용하였을 때 제어성능이 더 좋으며, 비례적분제어기의 경우 적분이득이 큰 제어기에서 추적오차가 작게 나타남을 알 수 있다. 실험에 사용한 경로를 따르는 플랜트의 주파수응답을 Fig. 4에 보인 바와 같이, 비례제어기를 사용한 경우는 플랜트의 모델이 같으나 적분제어가 추가된 경우 주파수에 대한 크기 및 위상특성이 다르게 나타남을 확인할 수 있다.

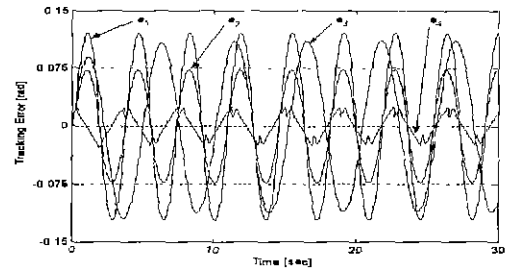


Fig. 3 Tracking Error Comparison

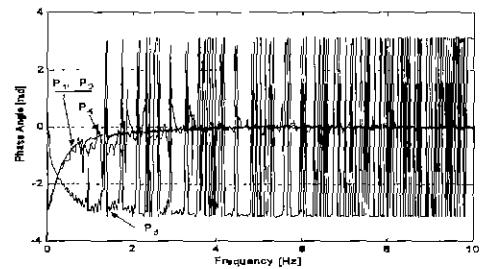
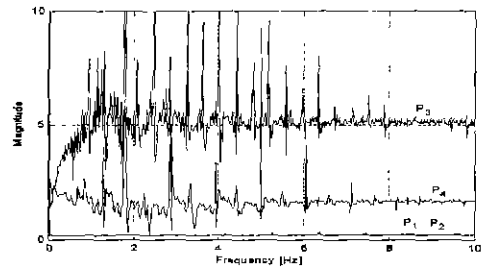


Fig. 4 Frequency Response Results of Plant
(a) Magnitude Characteristics (linear scale)
(b) Phase-angle Characteristics

3.2 결과고찰

플랜트에 대한 주파수응답특성결과가 다른 시스템(Fig. 4참조)에 대해 Table. 1에 보인 제어기들을 사용하여 얻어진 피드백시스템의 주파수응답결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 3에서 유추된 바, 추적성능이 비교적 높은 제어기 C(2)와 C(4)에 대한 피드백시스템의 주파수응답특성형상이 비슷하게 모아짐을 확인할 수 있는데, 이러한 형상의 중심곡선은 실험에 사용된 플랜트에 대해 피드백제어로서 가능한 최적성능을 나타내는 것으로 고찰된다. 그리고 이러한 중심곡선은 실험조건에 따른 바이어스를 포함한다.

제어기의 재설계에 이용한 제어기 구조는 비례제어기를 사용하여 비례제어만으로 가능한 피드백시스템의 성능을 유추할 수 있도록 등가 비례제어기를 재설계하였다. 실험을 통해 얻은 피드백시스템의 주파수 응답결과(Fig. 5)를 2장에서 다른 제어기의 재설계에 대입하여 제어기의 재설계 결과를 Fig. 6에 보였다. Fig. 6은 이득노력상수 β 를 변수로 하여 등가비례이득을 구한 결과이다. 해석결과, 제어기 C(2)나 C(4)에 비해 제어성능이 좋지 않은 제어기 C(1)과 C(3)은 곡선이 가파르지 않음을 볼 수 있다. 이는 제어기 C(1)과 C(3)은 상대적으로 제어성능을 더 높이기 위한 재설계가 유연함을 보여주고 있다. 그리고 이들 선들의 방향 또한 어느 정도 제어이득을 높임으로서 제어기 C(2)와 C(4)의 제어성능까지 얻을 수 있음을 보여주고 있다. 이는 비례제어만으로 구성된 제어기 C(1)과 C(2)의 실험예로부터 어느 정도 유추되었던 것이다. 흥미로운 점은 이득노력상수 β 가 1인 경우에 대해 제어기 C(4)의 등가비례제어이득이 80정도라는 점이다. 이는 비례이득이 80정도인 비례제어기만으로 제어기 C(4)의 성능정도를 얻을 수 있음을 보여준다. 곡선들의 추이를 통해 알 수 있는 바는 성능을 매우 높이하고자 하는 경우($\beta < 0.1$) n등가 비례제어이득이 매우 크게 나타남을 볼 수 있다. 이는 자동튜닝시 이득노력상수 β 의 값을 너무 작게 잡지 않고 적절하게($0.25 < \beta < 0.8$) 설정해주어야 함을 보여주고 있다.

4. 결론

본 논문에서 기존 제어시스템의 성능을 향상시키기 위한 제어기 설계기법을 제시하였으며, 실험 및 해석을 통해 그 타당성을 보였다. 제어시스템의 성능향상을 주파수영역에서 검토하여 성능향상인자들도 출하였으며, 이를 이용하여 제어기를 주파수영역에서 재설계하였다. 그리고 재설계된 제어기의 실현을 위해 주파수영역에서 최소사승기법을 이용하여 제어기를 근사화하는 방법을 이용하였다. 또한, 로봇매니플레

이터에 대한 실험 및 해석을 통해 본 논문에서 제안한 제어기 설계기법의 유용성을 등가제어기설계관점에서 보였다.

앞으로의 연구는 더 나은 제어성능을 반영하는 페루프시스템의 특성을 자동으로 설계하는 체계적인 방법과 일반적인 플랜트에 존재하는 입력의 포화를 고려한 안정화 제어기설계기법에 대한 지속적인 연구가 필요하다고 본다.

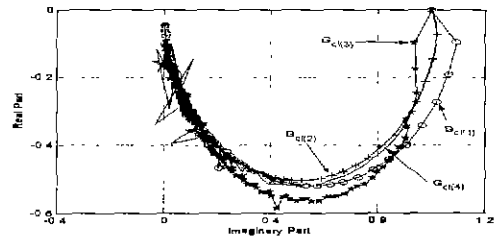


Fig. 5 Frequency Response Result of Closed-loop Characteristics

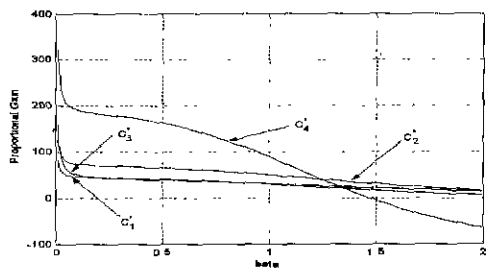


Fig. 6 Design of Equivalent Proportional Controller

참고문헌

- Ogata, K., *Modern Control Engineering*, 2nd Ed., Prentice Hall, 1990.
- Aström, K., and Häggglund, T., *Automatic Tuning of PID Controllers*, Instrument Society of America, 1988.
- 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.
- 정유철, 이진복, "페루프시스템 인식을 이용한 제어기 설계기법," 한국정밀공학회 '99년도 춘계학술대회논문집, pp. 314-217, 1999.
- Landau, I., *System Identification and Control Design*, Prentice Hall, 1990.
- 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.