

분산 제어 시스템에서의 시간 지연 보상을 위한 2-자유도 μ 제어기 연구에 관한 연구

최병목, 임동진
한양대학교 제어계측공학

A study on the 2 D.O.F. ramp tracking controller for the Distributed Control Systems with Network induced Time-Delays by μ control

Byung-Muk Choi, Dong-Jin Lim
Dep. of Control & Instrumentation Eng., Hanyang University

Abstract - In the distributed control systems where the control components, controllers and sensors are distributed on a communications network, there exist network time delays on communication lines between the system components. This paper deals with the 2 D.O.F. ramp tracking controller design issue for such system. Time delay terms are converted into rational terms using Pade approximation method and the system is augmented with two integrators for ramp tracking. For this system, μ -controller design method, which enables to meet not only performance requirements but robust stabilities simultaneously, is employed.

$g(s)$: nominal plant
 $g_p(s)$: the set of delay uncertain plant
 Δ : complex perturbation
 $l(w)$: multiplicative uncertainty
 여기서 $l(w)$ 의 bound는 Owens과 Raya에 의해 다음과 같이 정의되어진다.

$$l(w) = \frac{|e^{-j\tau\omega} - 1|}{2}, \quad \forall \omega < \pi/\tau$$

$$\frac{|e^{-j\tau\omega} - 1|}{2}, \quad \forall \omega \geq \pi/\tau$$

이 bound는 무리수이므로 해석상은 가능하나 합성 (synthesis)에는 부적절하다. 따라서 파데 근사화 (Pade approximation) 방법으로 근사화 시킨다.

$$e^{-\tau s} = 1 - \frac{\tau s}{1 + \frac{\tau}{s} s} \Delta = 1 + w(s)\Delta, \quad |\Delta| \leq 1$$

τ : 시간 지연(time delay)
 Δ : complex perturbation

여기서 $w(s)$ 는 $l(w)$ 보다 어떤 주파수 범위에서 작은 가중치를 가지므로 Wang에 의해 제시된 w_h 를 사용한다.

$$w_h(s) = \frac{\tau s}{1 + \frac{\tau s}{3.465}}$$

1. 서 론

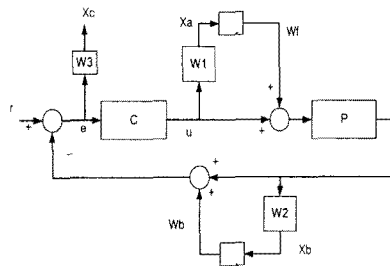
일반적으로 분산 제어 시스템에서 센서 모듈과 제어기가 분리되어 근거리 통신망을 통하여 센서로부터 데이터를 전송하게 된다. 분산 제어 시스템에서 사용되는 통신망은 실시간의 기능을 가진 통신망이 사용되지만, 네트워크 상의 오버헤드로 인한 데이터 전송 시 발생하는 시간 지연이 나타나며 이로 인한 시스템의 성능저하와 안정성에 문제가 된다. 본 논문에서는 이러한 시간 지연요소를 지닌 환경에서 램프 기준입력을 추종할 수 있는 제어기의 설계방법을 제시한다. 이를 위하여 시간 지연요소를 파데 근사법을 이용하여 근사화 시킨 후 시간 지연 요소를 구조화된 불확실 요소로 전환하고 램프 추종을 위한 오차 적분기를 도입하고, μ 제어를 도입한 제어기 설계 과정을 제시한다. 이렇게 설계되어진 제어기는 과도응답 특성이 나빠지므로 실제 시스템에 적용하기에는 부적절하다. 따라서 Chida가 제안한 2-자유도 구조로 재구성하여 과도응답 특성을 개선한다.

2. 본 론

2.1 시스템 모델

통신상에서 나타나는 시간 지연 요소가 포함된 피드백 제어 시스템에 대한 모델을 일반적으로 그림 2-1과 같이 나타낸다. 제어기와 플랜트 사이에 시간 지연(forward network delays)과 플랜트에서 제어기로 피드백(feedback)시 나타나는 시간 지연(backward network delays)요소를 고려하였다. 본 논문에서는 불확실한 시간 지연 요소를 변형된 파데 근사법(a modified Pade approximation method)을 이용하여 근사화한다.

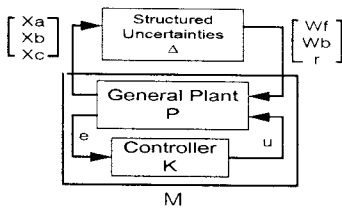
$$g_p(s) = g(s)(1 + l(w)\Delta(s)), \quad |\Delta| \leq 1$$



<그림 2-1> 시간 지연이 있는 제어 시스템

2.2 오차 적분기 설계

램프 입력을 오차 없이 추종하기 위해 오차 적분기로 시스템을 확장한다. 따라서 시스템은 Type II가 된다.



〈그림 2-5〉

이러한 제어 기법에 의해 그림 2-2의 시스템을 그림 2-5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서

$$M = P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21}$$

$$P_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ W_2PK_2 & 0 & 0 \\ -W_3PK_2 & -W_3 & W_3 \end{bmatrix},$$

$$P_{12} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2PK_2 \\ -W_3PK_2 \end{bmatrix},$$

$$P_{21} = [-PK_2 \quad -1 \quad -1], \quad P_{22} = -PK_2$$

$\Delta = \text{diag}[\Delta_f, \Delta_b, \Delta_{\text{플}}]$ 모델 불확실성 블록이며, Δ_p 는 가상적인 불확실성 블록을 나타낸다.

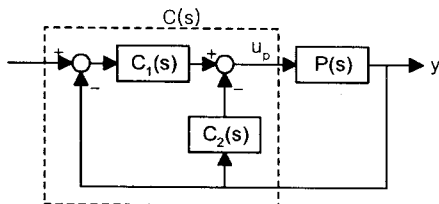
2.4 2자유도 구조로의 변환

본 논문에서 제시하는 μ -제어기법은 앞에서 설명하였듯이 부분적으로 H_∞ 제어기법을 사용하고 있다. 그러나 일반적으로 적분형 서보 시스템에서 H_∞ 제어기법을 사용하면 과도응답 특성이 나빠지게 된다. 이러한 현상 때문에 설계된 제어기를 바로 실제 시스템에 적용하기에는 부적절하므로 Chida가 제안한 2-자유도 구조(2-degree of freedom structure)로 재구성하여 과도응답 특성을 개선한다.

2-자유도 구조로 재구성하기 위하여, 먼저 설계된 제어기 $C(s)$ 를 다음 식(6)과 같이 두 개의 항으로 분리한다.

$$C(s) = C_1(s) + C_2(s), \quad C_1(s) = \frac{K}{s} \quad (6)$$

여기서, $C_1(s)$ 은 시스템의 DC 게인 K 와 적분기로 구성되며 $C_2(s)$ 는 $C(s)$ 에서 $C_1(s)$ 를 제외한 나머지 항으로 구성된다. 이렇게 구성된 $C_1(s)$ 와 $C_2(s)$ 를 사용하여 그림 2-6과 같은 2-자유도 구조의 제어기를 구성한다.



〈그림 2-6〉 재구성된 2자유도 구조의 제어기

재구성을 통하여 전체 시스템의 폴들의 위치는 변화시키지 않으나 제로(zero)들의 위치만이 변하므로, 재구성하기 전의 제어기의 성능 강인성 및 안정도 강인성 등의 특성을 유지하면서도 과도응답 특성을 개선하게 된다. 또한 제어 입력의 크기도 재구성되기 전의 제어기보다 작아진다.

2.5 시뮬레이션 결과

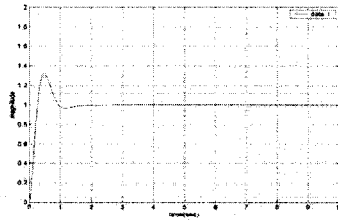
플랜트 모델과 시간 지연 요소를 근사화한 모델에 대한 가중치와 오차 적분기의 gain은 아래와 같이 설정한다.

$$W_1(s) = \frac{T_f s}{1 + T_f s / 3.465}, \quad W_2(s) = \frac{T_b s}{1 + T_b s / 3.465},$$

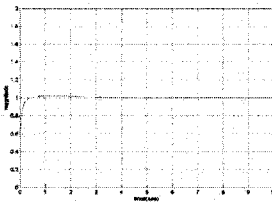
$$W_3(s) = \frac{0.9}{s^2 + s + 0.9}, \quad \text{Plant} = \frac{10}{s + 1},$$

$$k_1 = k_2 = k_3 = 1$$

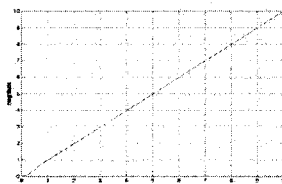
용여기서 T_f 는 forward network delay, T_b 는 backward network delay를 나타낸다. 최대 시간 지연은 각각 10ms를 설정하였다.



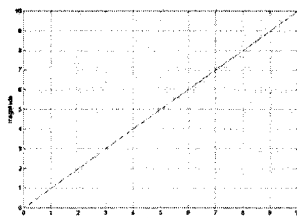
〈그림 2-7〉 계단입력에 대한 시스템의 출력



〈그림 2-8〉 2-자유도 구조로 변환한 후의 계단입력에 대한 응답



〈그림 2-9〉 램프입력에 대한 시스템의 출력



〈그림 2-10〉 2-자유도 구조로 변환한 후의 램프입력에 대한 응답

3. 결 론

본 논문에서는 네트워크에서 나타나는 시간 지연에 따른 시스템의 안정성과 성능저하를 보상하기 위하여 μ 제어 기법을 이용하여 램프 추종 제어기를 설계하였다.

시간 지연 요소를 파데 근사법을 이용하여 근사화시킨 후 구조화된 불확실 요소로 모델링하고, 오차 적분기로 확장된 시스템을 μ 제어 기법을 이용하여 제어기를 설계하였다. 이렇게 설계되어진 제어기는 과도응답 특성이 나빠지므로 이를 개선하기 위하여 Chida가 제안한 2-자유도 구조로 재구성하여 과도응답 특성을 개선하였다. 마지막으로 시뮬레이션을 통하여 이렇게 설계되어진 제어기가 램프입력을 추종하는 것을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Z.Wang, P.Lundstrom, and S.Skogestad. "Representation of uncertain time delays in the H_{∞} framework." International Journal of Control, 59(3), 1994
- [2] Gary J.balas, John C. Doyle, Keith Glover, Andy Packard, Roy Smith, " μ -Analysis and Synthesis Toolbox", MUSYN Inc. and The MathWorks, Inc. 1991
- [3] R.Lane Dailey, "Lecture Notes for the Workshop on H_{∞} and μ -Method for Robust Control, 1991 IEEE Conference on Decision and Control, 1991
- [4] J.M.Maciejowski, "Multivariable Feedback Design", Addison-Wesley, 1989
- [5] Faik Goktas, Jonathan M. Smith, Ruzena Bajcsy. " μ -Synthesis For Distributed Control Systems with Network-Induced Delays", 1996 IEEE Conference on Decision and Control, 1996
- [6] Y.Chida, "An H_{∞} Controller Design Method of Integral-Type Servo Systems and Its Application to a Flexible Structure System", Second IEEE Conference on Cont. Appl., vol 3, pp. 847-852, 1993