

규범모델 추종방식에 의한 회전계통의 적응속도제어에 관한 연구

하 주 식* · 송 문 현**

A Study on the Adaptive Control of the Rotational Systems
by Means of the Nominal Model Tracking Method

J. S. Ha · M. H. Song

Key words : Nominal model(규범모델), Finite time settling control(유한시간정정 제어), Fuzzy control(퍼지제어), Model reference adaptive control(모델규범형적응제어)

Abstract

Recently, in the field of industrial servo - systems, several methods have been proposed for tracking the reference input fastly and finely without overshoot. These methods, however, are established under hypothesis that structure and parameters of the plant are known accurately and they are time invariant. In practice, it is difficult to obtain the values of plant's parameters accurately and usually plants change with time and operation conditions.

In this paper a method to construct the nominal model tracking adaptive control system is proposed. The system is composed of the nominal model which produces a ideal response and the model tracking system with the fuzzy adaptive controller. If the actual plant is equal to the controlled object in the nominal model, the output of the plant is the same as that of the nominal model and the fuzzy adaptive controller becomes idle. However, when the plant changes, the fuzzy adaptive controller of the tracking system operates in order for the output of the plant to track the ideal response. Through the computer simulations under various conditions, it is confirmed that the proposed model tracking system is very effective.

1. 서 론

로봇트를 비롯하여 많은 산업분야에서는 주어진

목표치에 고속, 고정도로 추종하는 서보기구가 요구된다. 이를 실현하기 위한 한 방법으로 비선형 요소를 이용하는 방법이 제안되고 있다¹⁾. 또한 필

* 정회원, 한국해양대학교

** 정회원, 울산진문대학

자들은 LQ최적제어 이론에 의해서 설계된 선형제어기와 병렬로 보조제어기를 부가함으로써, 1차계통의 유한정정제어를 행하는 방법을 제안한 바 있다²⁾.

그러나 이러한 제어방법들은 단시간에 우수한 추종특성을 실현할 수 있으나, 제어대상의 파라미터가 변동하거나 또는 동작상태에 따라 제어대상 자체가 변화하여 순수 1차계통이 아니고 비진동성의 2차계통 또는 지연요소를 수반하는 1차계통으로 되는 경우에 대해서는 강인하지 못하고, 추종능이 열악해지는 결점을 지니고 있다. 그러나 제어대상의 파라미터값을 정확히 파악한다는 것은 현실적으로 곤란하기 때문에 실제 제어대상의 불확실성에 대한 대책이 필요하다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 퍼지제어기를 이용하여 규범모델을 추종하는 모델추종 적응제어계통을 구성하는 방안을 제안한다. 규범모델로서는 1차계를 모델로 하여, LQ제어기와 보조제어기로서 이상적인 응답을 달성하는 것으로 하고, 실제 플랜트의 출력이 규범모델의 출력에 추종하도록 한다. 만일 모델 즉, 규범모델의 제어대상과 플랜트 즉, 실제의 제어대상이 일치할 때에는, 플랜트의 출력은 규범모델의 이상적인 출력과 일치하게 되며 적응제어기 즉 퍼지제어기는 작동하지 아니하나, 플랜트가 변동하면 안정성을 유지하면서 플랜트출력이 규범모델의 출력에 추종하도록 퍼지제어기가 보상작용을 하도록 하여 적응제어를 행한다.

플랜트의 전달함수가 모델과 같이 1차계통으로 기술되거나 파라미터의 값이 다를 때, 비진동 2차계통으로 표시되는 경우에 대해서 각각 디지털 시물

레이션을 행하고 적응제어특성을 분석하므로써 본 연구에서 제안하는 방법의 유효성을 확인하고자 한다.

2. 규범모델 추종 적응제어 시스템

본 연구의 규범모델 추종제어 시스템을 Fig. 2.1과 같이 구성한다.

이 시스템은 규범모델과 추종시스템의 두 부분으로 구성되어 있으며, 규범모델은 1차계통의 제어대상에 대하여 이상적인 응답특성을 갖도록 설계하고, 추종시스템은 실제 제어대상인 플랜트의 응답이 규범모델의 출력에 잘 추종하도록 설계한다.

2.1 규범모델의 설계

디젤기관, 전동기등 원동기의 속도제어계통과 각종 열교환기의 온도 제어계통에 있어서 제어대상은 일반적으로 순수1차계통, 지연요소를 수반하는 1차계통 또는 비진동성의 2차계통등으로 표시된다. 이러한 계통은 정위성계통으로 피드백제어를 행하는 경우, 제어기에 적분기를 사용하지 않으면 옴세트가 발생한다.

따라서, 이러한 계통에는 일반적으로 PI 또는 PID제어기가 사용되고 있다. 제어기에 적분기가 포함되면 제어계통은 2차계통 또는 고차계통이 되어서, 속응성을 좋게 하기 위해 제어계통의 이득을 증가시키면 오버슈트가 발생하고 제어에 소요되는 에너지가 증가된다.

반면, 제어계통의 이득을 너무 감소시키면 비진동계가 되어 오버슈트가 없어지고 제어에 소요되

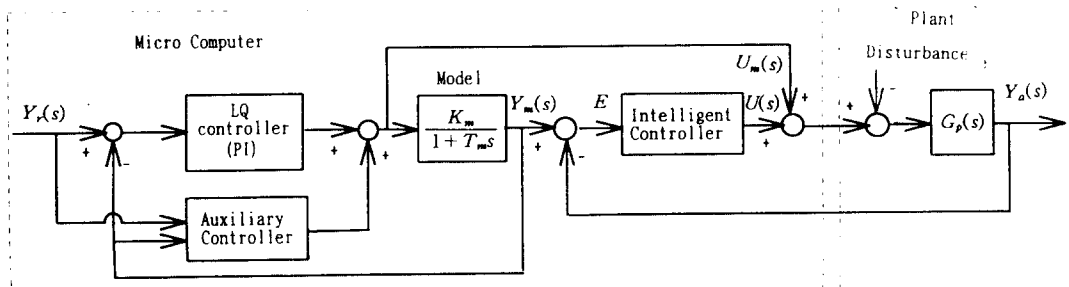


Fig.2.1 Model reference adaptive control system

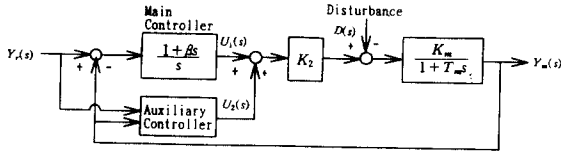


Fig.2.2 FTS Control for the first order system

는 에너지는 감소되나 속응성이 나빠진다. 교류발전기의 원동기로 사용되는 디젤기관이나 로봇 등 각종 산업용 서어보 기구에 있어서는 목표치 변동이나 외란에 대하여 옵셋과 오버슈트가 없이 빠른 응답으로 목표치에 추종하는 제어특성이 강력히 요구된다. 그러나 PI 또는 PID제어기만으로는 이러한 제어특성을 달성할 수 없다.

본 연구에서는 옵셋가 전혀 허용되지 않는 경우를 고려하여 규범모델을 다음과 같이 설계한다. 우선 적분제어기를 직렬로 부가한 1차계통의 제어 대상에 대하여 2차형식의 평가함수를 최소로 하는 LQ제어이론에 의한 최적제어기를 설계한다. 이 LQ최적제어계통은 제어오차의 2승면적과 제어에 소요되는 에너지에 대한 하중계수의 값에 따라 제어 성능이 달라지게 되며, 속응성을 좋게하려면 오버슈트가 발생한다.

본 연구에서는 이 LQ최적제어이론에 의해서 설계된 제어기를 주제어기로 하고 이와 병렬로 보조 제어기를 부가함으로써 1차계통에 있어서 목표치 변동에 대해 오버슈트가 없는 유한시간 정정제어(Finite Time Settling Control : 이하 FTS Control이라 함)를 행하도록 설계한다(Fig. 2.2참조).

1차계통의 유한시간 정정제어에 관한 상세한 것에 대해서는 이미 필자들이 발표한 연구(2)을 참조하기 바라고 그 결과만을 적으면 다음과 같다.

주제어기 :

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{K_1}{K_2} \\ K_1 &= \frac{1}{K_m} (\sqrt{1+m T_m \omega} - 1) \\ K_2 &= \sqrt{\omega} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

단, ω 는 LQ제어의 평가함수에 있어서 상대오차에 대한 하중계수

보조 제어기 : $U_2(t)$ (보조제어기의 출력)

$$= \begin{cases} m_2 A : 0 < t < t_s \\ m_1 A : t_s < t \end{cases} \quad (2.2)$$

여기서, $m_2 = pm_1 (p \leq 1)$, A 는 목표치의 계단상 변화의 크기이며 m_1 은 다음 2차방정식의 근이다.

$$c_0 m_1^2 + c_1 m_1 + c_2 = 0 \quad (2.3)$$

$$\text{단, } c_0 = (1 + \gamma_o^2) \omega_o^2 (p^2 - e^{\gamma_o(1-p)})$$

$$c_1 = 2p\alpha(1 + \gamma_o^2)\omega_o$$

$$c_2 = 1 + \alpha^2$$

$$\alpha = \beta(1 + \gamma_o^2)\omega_o - \gamma_o$$

$$\alpha_o = \zeta \omega_n$$

$$\omega_o = \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n$$

$$\zeta = \frac{1 + K_m K_2 \beta}{2\sqrt{T_m K_m K_2}}, (0 < \zeta < 1)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_m K_2}{T_m}}$$

$$\gamma_o = \frac{\alpha_o}{\omega_o} = \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}$$

식 (2.1)~(2.3)에 의해서 Fig. 2.2의 주제어기와 보조제어기를 설계하면 규범모델의 출력 $Y_m(t)$ 는 다음과 같이 된다.

$$Y_m(t) = \begin{cases} A - A[\sqrt{1 + \alpha^2} - m_1(1 + \gamma_o^2)\omega_o]e^{-\alpha_o t} \\ \cos(\omega_o t + \tan^{-1}\alpha) : 0 < t < t_s \\ A : t_s < t \end{cases} \quad (2.4)$$

따라서 $Y_m(t)$ 는 t 가 식 (2.5)와 같이 되는 유한정정시간 t_s 보다 작을 때는 단조 증가하고 $t > t_s$ 일 때는 일정치 A 가 되어 유한시간 정정제어가 되며 ω_o 및 p 의 값을 조정함으로써 오버슈트가 없고 속응성이 높은 유한시간 정정제어가 가능하다.

$$t_s = \frac{1}{\omega_o} \left(\frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\alpha \right) \quad (2.5)$$

2.2 적응제어기의 설계

적응제어에 있어서 가장 대표적인 것은 모델규범형 적응제어 시스템이다³⁾. Fig.2.1의 규범모델 추종제어 시스템에서 추종시스템만을 블럭선도로

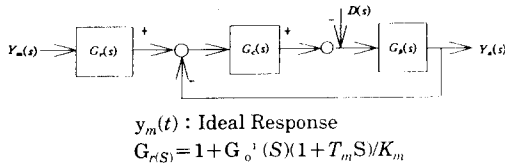


Fig.2.3 The model following system

나타내면 Fig.2.3과 같이 된다.

Fig.2.3의 시스템에서 플랜트의 출력 $y_a(t)$ 가 규범모델의 이상적인 응답 $y_m(t)$ 에 정상편차없이 추종하기 위한 조건은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} G_p(0) &= K_m \text{ 또는,} \\ G_c(0) &= \infty \end{aligned} \quad (2.6)$$

$G_p(0)$ 즉, 플랜트의 정상이득이 모델의 정상이득과 항상 같다고 기대하기는 실질적으로 어려운 일이며 또한 적응제어기의 이득을 무한대로 할 수는 없다. 따라서, 이 추종시스템에 있어서 정상편차(오프셋)를 없애려면 적응제어기는 적분기를 포함하고 있어야 한다.

B. Gong등은 H_∞ 제어이론을 이용하여 적응제어기 $G_c(s)$ 를 설계하는 방법을 제안하고 있다¹⁴. 이 방법은 추종시스템이 안전하고 강인하다는 장점은 있으나, H_∞ 제어의 특성상 반드시 최적의 추종 성능을 갖는다는 보장이 없어 본 연구에서는 플랜트에 대한 사전정보 없이 가장 간단한 알고리즘으로 실현할 수 있는 적응제어기로서 Fig. 2.4의 블럭선도로 표시되는 속도형 퍼지제어기를 이용하는 방법을 제안한다.

입력변수 E_i 와 ΔE_i 는 다음과 같이 계산된다.

$$\left. \begin{aligned} E_i &= \frac{e_i}{e_{\max}} \\ \Delta E_i &= \frac{\Delta e_i}{\Delta e_{\max}} \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

$e(t) = y_m(t) - y_a(t)$: 이상적인 응답과 실제 플랜트출력과의 오차

$$\Delta e_i = e_i - e_{i-1}$$

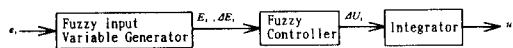


Fig.2.4 The block diagram of the adaptive controller

또한, 퍼지제어기의 출력 즉, 플랜트에의 조작입력은 식(2.8)과 같이 계산된다.

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_i &= \frac{\Delta U_i}{\Delta U_{\max}} \\ U_i &= U_{i-1} + \Delta U_i \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

식(2.7), (2.8)에서 e_{\max} , Δe_{\max} 및 ΔU_{\max} 는 각각 e_i , Δe_i 및 ΔU_i 의 예상되는 최대치를 취하며 E_i , ΔE_i 및 ΔU_i 는 각각 절대치가 1 이하의 값으로 기준화 된다. 다음에 퍼지제어기에 있어서 제어규칙은 식(2.9), (2.10)과 같이 극히 단순한 것을 사용하기로 한다.

$$\begin{aligned} \text{제어규칙 } 1 R^1; & \text{ if } E_i \text{ is } P \text{ and } \Delta E_i \text{ is } P \\ & \text{then } \Delta U_i \text{ is } P' \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \text{제어규칙 } 2 R^2; & \text{ if } E_i \text{ is } N \text{ and } \Delta E_i \text{ is } N \\ & \text{then } \Delta U_i \text{ is } N' \end{aligned} \quad (2.10)$$

여기서, P, P' 와 N, N' 는 각각 Positive와 Negative를 나타내는 퍼지변수이며 제어규칙 R^1 과 R^2 는 각각 Fig. 2.5의 영역(4)와 영역(2)에 있어서 제어기가 행하여야 할 동작을 if-then 형식으로 표시한 것으로 지극히 자연스러운 지령동작이다. 기타의 영역에서는 제어규칙 R^1 과 R^2 의 양쪽이 보편적으로 동작하여 적절한 지령이 된다.

또한 전건부 P, N , 후건부 P', N' 의 소속함수는 식(2.11) 및 (2.12)와 같이 표시되는 지극히 간단한 것을 이용하기로 하며, 이를 도시하면 Fig.

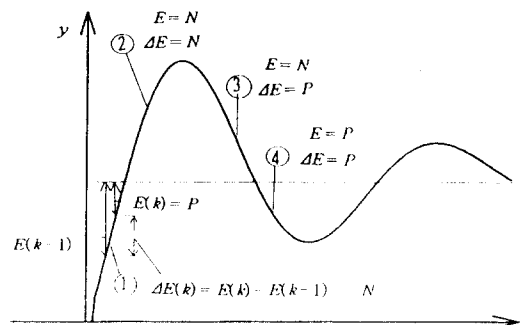


Fig.2.5 Characterization of indicial response

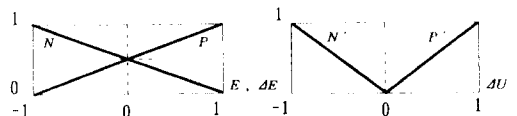


Fig.2.6 Membership functions used in the study

2.6과 같이 된다.

$$P(x) = \frac{1}{2}(1+x), N(x) = P(-x) \quad (2.11)$$

$$P'(x) = b(x-1)+1, N'(x) = P'(-x) \quad (2.12)$$

제어규칙 R^1 과 R^2 에 대한 퍼지추론은 Tsukamoto가 제안한 방법을 간략화하여 이용하기로 한다⁵. 즉, 플랜트로부터의 정보 E_i 및 ΔE_i 로부터 퍼지제어기의 출력을 다음과 같이 계산한다.

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= P(E_i) \wedge P(\Delta E_i) \\ \omega_2 &= N(E_i) \wedge N(\Delta E_i) \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

단, ω_1, ω_2 는 각각 R^1 과 R^2 에 대한 적합도임

$$\Delta U_i = \frac{\omega_1 P'^{-1}(\omega_1) + \omega_2 N'^{-1}(\omega_2)}{\omega_1 + \omega_2} \quad (2.14)$$

3. 수치계산 및 시뮬레이션

3.1 퍼지제어기의 입출력 관계

퍼지제어기의 입력 E_i 와 ΔE_i 와 출력 ΔU_i 와의 관계를 식(2.11)~(2.14)를 이용하여 전 입력공간에 대해서 수치계산하여 도시하면 Fig. 2.7과 같이 된다.

3.2 응답 시뮬레이션

규범모델에 있어서 제어대상의 시정수 $T_m=1$,

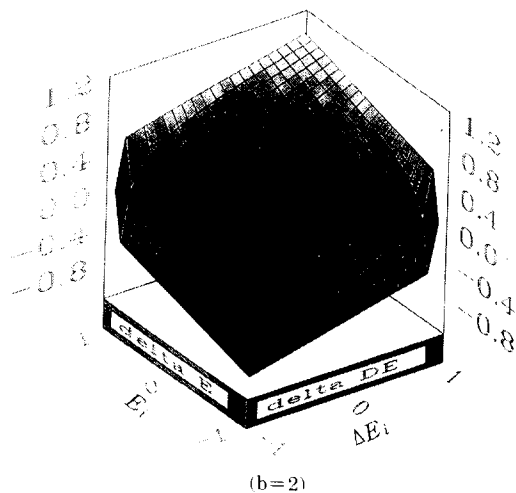
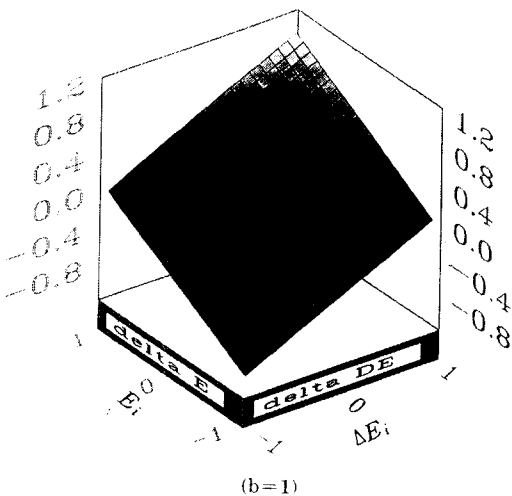


Fig. 2.7 Input output relationships

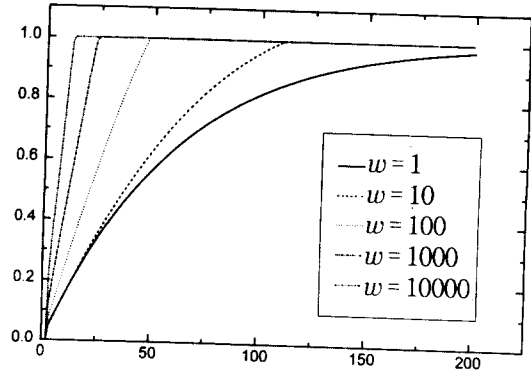


Fig.2.8 Ideal response of the nominal model ($K_m=1, T_m=1$)

정상이득 $K_m=1$ 로 하였을 때 유한시간 정정제어에 의한 규범모델의 출력 즉, 이상적인 응답을 계산하여 도시하면 Fig. 2.8과 같이 된다.

다음에 실제 플랜트가 순수 1차계통일 때 및 비진동 2차계통일 때, 각각 적응제어계통을 구성하여 응답 시뮬레이션을 행한 결과를 도시하면 Fig. 2.9~Fig. 2.10과 같이 된다.

4. 고 찰

4.1 퍼지제어기의 파라미터 결정

본 연구에서 이용된 퍼지제어기는 네개의 파라미터를 가지고 있다. 즉, 그 하나는 식(2.11)로 표현되는 퍼지제어규칙 후건부의 소속함수에 있어

서의 파라미터 b 이며 나머지 셋은 식(2.6), (2.7)의 e_{max} , Δe_{max} 및 Δu_{max} 이다. 여기서 b 의 값은 1~2로 취할 수 있으나, 일반적으로 1을 많이 취하며 본 연구에서도 1로 하였다. 실제의 시뮬레이션의 결과에서도 $b=1$ 과 2인 경우에 대한 큰차이를 찾아 볼 수 없었다(Fig. 2.7참조). 다음에 e_{max} , Δe_{max} , Δu_{max} 는 각각 오차,오차의 변화율, 조작량의 변화율에 대한 예상되는 최대치를 나타낸다. 이는 시뮬레이션 결과등을 참작하여 경험적으로 결정할 수 밖에 없으며 현재로서는 과학적인 결정방법이 아직 개발되지 않고 있다.

4.2 응답 시뮬레이션에 대한 고찰

Fig. 2.9과 Fig. 2.10의 인디셜 응답에 대한 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 실제의 플랜트가 1

차계통일 경우에도 그 파라미터의 값이 가정한 규범모델의 제어 대상의 그것과 상당한 차이가 있을 경우, 혹은 1차계가 아니고 비진동성의 2차계인 경우, 단순한 유한시간 정정제어만으로는 이상적인 응답보다는 상당히 열악한 응답을 나타냈으나 적응제어를 행한 결과는 오버슈트가 없이 거의 정확하게 이상응답을 잘 추종하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

이상과 같이 본연구에서는 유한시간 정정제어 기법을 이용하여 규범모델의 이상적인 응답을 얻은 다음, 퍼지제어기를 이용한 적응제어계통을 구성함으로써 회전계통등 정위성계통에 있어서 그 응답이 오버슈트가 없이 이상적인 응답을 잘 추종

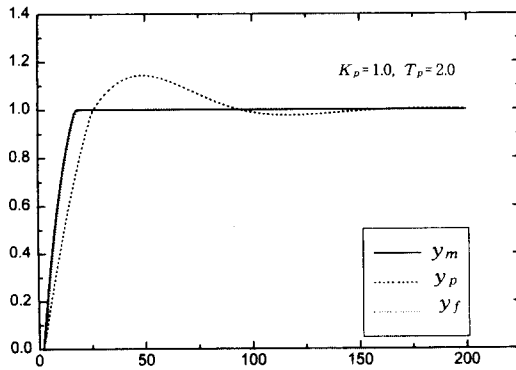


Fig. 2.9 Indicial response of the adaptive control system(I)

$$\text{(When, } G_p(S) = \frac{K_p}{1+T_p S} \text{)}$$

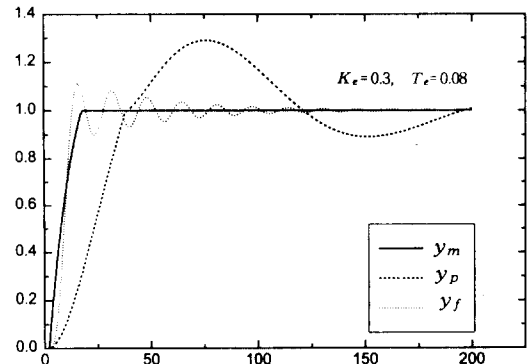
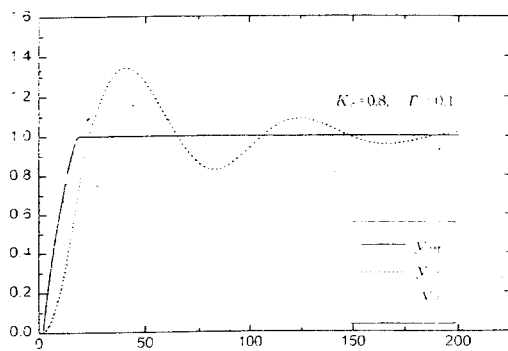
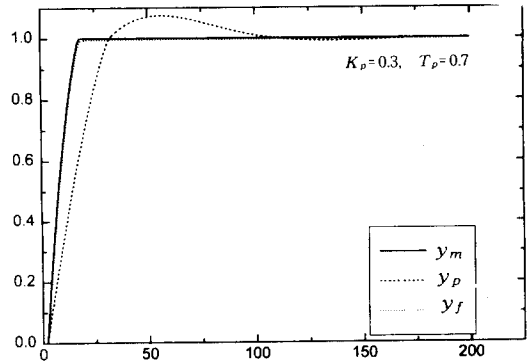


Fig. 2.10 Indicial response of the adaptive control system(II)

$$\text{(When, } G_p(S) = \frac{K_m}{1+T_m S} \cdot \frac{K_c}{1+T_c S} \text{)}$$

하도록 하는 방법에 대해서 이론적으로 고찰하고, 여러가지 경우에 대한 시뮬레이션을 행하였으며 그 결과 다음 사항을 확인할 수 있었다.

1) 본 연구에서 제안하는 방법이 속도형서보등 회전계통의 고속정밀제어에 매우 효과적이다.

2) LQ제어의 상대하중계수 w 의 값을 조정함으로써, 요구되는 임의의 작은 정정시간을 얻을 수 있다.

3) 퍼지제어기를 이용하는 경우 단순한 제어규칙, 간단한 추론법만으로도 매우 효과적인 제어성능을 얻을 수 있다

그러나 퍼지제어기의 파라미터값을 효과적으로 결정하는 문제, 실제의 플랜트에 순수지연요소가 수반되는 경우의 문제등에 대해서는 앞으로 더욱 연구되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1) 中野道雄外3人, "非線形要素を用いた制御系の有限時間整定補償", 電氣學會論文誌D, Vol. 114 - D, No. 2(1994)
- 2) 송문현, 하주식, "일차계통의 최적제어에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제18권제4호(1994)
- 3) 金井喜美雄, "ロボаст適應制御入門", P. 15, オーム社
- 4) B. Gong, et al, "Nominal Model Tracking System Using Nonlinear Model, T.IEE Japan, 114 - D, No. 10(1994)
- 5) 菅野道夫, "フアジイ制御" P. 84, 日刊工業新聞社(1988)