

◎ 論 文

비선형 불확실성에 대한 서보계의 강인성에 관한 고찰(II) - 강인 안정성 조건

김 영 복*
(99년 3월 24일 접수)

A Study on Robustness of a Two-Degree-of-Freedom Servosystem
with Nonlinear Type Uncertainty (II)
- Robust Stability Condition

Young-Bok Kim*

Key Words : Integral Compensator(적분 보상기), Two-Degree-of-Freedom Servosystem(2 자유도 서보계), Robust Stability(강인한 안정성), Nonlinear Type Uncertainty(비선형 불확실성)

Abstract

In order to reject the steady-state tracking error, it is common to introduce integral compensators in servosystems for constant reference signals. However, if the mathematical model of the plant is exact and no disturbance input exists, the integral compensation is not necessary.

From this point of view, a two-degree-of-freedom(2DOF) servosystem has been proposed, in which the integral compensation is effective only when there is a modeling error or a disturbance input.

The present paper considers a robust stability of this 2DOF servosystem with nonlinear type uncertainty in the system, and a robust stability condition for the servosystem is introduced. This result guarantees that if the plant uncertainty is in the permissible set defined by the condition, gain tuning can be carried out to suppress the influence of the plant uncertainties and disturbance inputs.

* 정회원, (주)신창인터스트리

1. 서 론

제어계 설계에 있어서 기본적인 문제중의 하나는 제어대상의 모델링 오차나 외란의 존재할 때 제어대상의 제어출력이 목표신호에 추종하도록 하는 제어계를 설계하는 이른바 강인한 서보계 구성문제이다. 이 문제에 있어서 제어대상의 불확실성에 대처하기 위해서는 내부모델원리에 따라 제어기는 목표신호와 외란의 발생기구를 내포하지 않으면 안 된다. 이와 같은 내부모델원리에 따라 상태공간 표현 상에서의 강인한 서보계 설계에 관한 다수의 연구결과가 보고되어져 있다^{1)~3)}. 그런데 2자유도 제어계 구성에 있어서의 관점에서 본다면 목표신호에 대한 추종특성과 감도 등의 폐루프 특성은 독립적으로 설계해야만 한다. 이러한 관점에서 제어대상을 상태방정식으로 표현하고 2자유도 제어계 구성의 기본적인 취지에 부합하는 형태의 적분형 서보계의 설계법에 관한 연구가 이미 보고되어져 있다^{4)~5)}. 이러한 2자유도 적분형 서보계에 있어서 저자는 문현 6)~10)에서 제어대상의 구조적 및 비구조적인 불확실성에 대해서 제어계가 안정하기 위한 강인한 안정조건을 제시했다.

그 조건은 적분보상계인에 독립적이며 자유로운 계인조정을 가능하게 한다. 따라서 그러한 강인한 안정조건에서는 적분보상 계인을 얼마든지 크게 할 수 있으며 그럼으로써 제어출력의 정상상태로의 도달을 빠르게 할 수 있다.

이에 대해 본 논문에서는 문현 1)~9)에서 고려되지 않았던 입력과 출력간에 직달항이 존재하고 불확실성으로서 비선형적인 특성을 갖는 좀더 일반적인 경우의 제어계의 안정성과 응답특성에 대해 고찰한다. 그래서 만일 제어대상에 matching 조건을 만족하는 비선형의 모델링 오차에 대해 적분보상기를 포함하지 않는 서보계가 안정하다면 2자유도계로 제어계를 구성한 후에도 원래의 제어계의 안정성을 보장하는 적분 보상 계인이 존재함을 명확히 한다. 이러한 결과는 적분 보상 계인의 적절한 조정에 의해 제어대상의 불확실성에 적극적으로 대처할 수 있으며 과도응답 특성도 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 문제의 정식화

대상으로 하는 시스템은 다음식과 같이 직달항을 포함하고 비선형의 모델링 오차를 갖는 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + f(x(t), u(t), t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + h(x(t), u(t), t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 x 는 n 차원의 상태, u 는 m 차원의 제어 입력, y 는 m 차원의 제어출력이며 A, B, C, D 는 적당한 크기의 실수행렬이다.

이러한 시스템에 대해서 스텝상의 m 차원 목표신호로서

$$r(t) = \begin{cases} r_+ & (t \geq 0) \\ r_- & (t < 0) \end{cases} \quad r_+, r_- \in R^m \quad (2)$$

를 생각한다. 목표치 r_+ 는 시각 $t=0$ 에서 주어진다고 한다. 그리고 목표신호 r_+ 에 제어출력이 추종하도록 하는 제어계를 구성하기 위해서 (A, B) 는 가안정, (C, A) 는 가검출 및

$$\text{rank} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = n+m \quad (3)$$

라고 한다. 또한 (1)식에서 $f(x(t), u(t), t)$, $h(x(t), u(t), t)$ 는 제어대상의 모델링 오차를 나타내는 비선형 함수이다. 본 논문에서는 비선형 함수 $f(x(t), u(t), t)$, $h(x(t), u(t), t)$ 가 matching 조건을 만족하고 상태 $x(t)$ 에만 의존하는 시불변 함수만 고려한다. 즉

$$\begin{bmatrix} f(x, u, t) \\ h(x, u, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix} g(x) \quad \forall x \in R^n, \forall u \in R^m, \forall t \in R \quad (4)$$

를 만족하는 비선형 함수 $g(x)$ 가 존재한다고 한다. 그래서 $g(x)$ 는 연속이고 그것의 x 관한 편미분은

유계, 즉

$$\left\| \frac{\partial g(x)}{\partial x} \right\|_2 \leq k \quad \forall x \in R^n, \exists k > 0 \quad (5)$$

을 만족하는 실수 k 가 존재한다고 한다.

제어대상이 선형인 경우에는 제어계가 안정이면 제어출력이 목표신호에 일치하도록 하는 평형상태 $x(\infty)$ 와 평형입력 $u(\infty)$ 가 일의적으로 존재한다. 그러나 제어대상이 비선형일 때에는 제어계의 평형상태가 일의적이지 않은 경우가 존재하며 이때에는 초기치에 의해서 정상상태가 달라지기 때문에 서보계의 구성이 불가능해진다. 그래서 우선 평형상태 $x(\infty)$ 와 평형입력 $u(\infty)$ 의 일의성에 대해서 고찰한다.

평형상태 $x(\infty)$ 와 평형입력 $u(\infty)$ 가 일의적으로 존재한다는 것은 다음식이 $[x(\infty)^T \ u(\infty)^T]^T$ 대해서 일의적으로 해를 갖는 것과 동가이다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ r_+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(\infty) \\ u(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix} g(x(\infty)) \quad (6)$$

(3)식으로부터 (6)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ r_+ \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x(\infty) \\ u(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix} g(x(\infty)) \\ &= \begin{bmatrix} x(\infty) \\ u(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} g(x(\infty)) \end{aligned} \quad (7)$$

따라서

$$\begin{aligned} x(\infty) &= [I_n \ 0] \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ r_+ \end{bmatrix} \\ u(\infty) &= [0 \ I_m] \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ r_+ \end{bmatrix} - g(x(\infty)) \end{aligned} \quad (8)$$

와 같이 구할 수 있으며 (3)식과 matching 조건이 성립하는 경우에는 언제나 일의적으로 해가 존재한다.

3. 서보계의 강인한 안정성과 적분 보상 개인

만일 제어대상에 불확실성이 존재하지 않는다면 적분보상을 행하지 않은 추종계는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A + BF_0)x(t) + B(H_0r(t) + g(x)) \\ y(t) &= (C + DF_0)x(t) + D(H_0r(t) + g(x)) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 평형상태 $x(\infty)$ 를 이용하여 상태의 편차를 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{x}(t) = x(t) - x(\infty) \quad (10)$$

따라서 편차계는

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= (A + BF_0)\tilde{x}(t) + B\tilde{g}(\tilde{x}(t), x(\infty)) \\ e(t) &= -(C + DF_0)\tilde{x}(t) - D\tilde{g}(\tilde{x}(t), x(\infty)) \end{aligned} \quad (11)$$

와 같이 구해진다. 단

$$\begin{aligned} \tilde{g}(\tilde{x}(t), x(\infty)) &= g(x(t)) - g(x(\infty)) \\ &= g(\tilde{x}(t) + x(\infty)) - g(x(\infty)) \end{aligned} \quad (12)$$

이다.

지금까지의 내용을 기본으로 하여 이제부터는 제어계의 강인한 안정성에 대하여 고찰한다. 우선 (9)식의 시스템을 Fig. 1과 같이 선형부 L 과 비선형부 NL 로 분리해서 나타낸다.

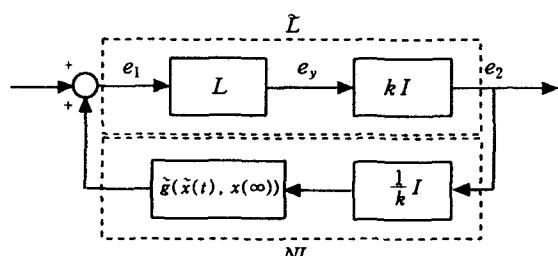


Fig. 1 System representation with linear and nonlinear Part

정리 1 (5)식에 대해서

$$0 \leq \| \tilde{g}(\tilde{x}(t), x(\infty)) \|_2 \leq k \quad \forall \tilde{x}(t), \forall x(\infty) \in R^m, \exists k > 0 \quad (13)$$

가 성립한다. 따라서 small gain 정리에 의해 선형부가 내부안정하고 다음의 조건이 성립하면 추종계는 장인 안정하다.

$$\| k(sI - A - BF_0)^{-1}B \|_\infty < 1 \quad (14)$$

(2)식의 제어대상에 비선형의 모델링 오차 $g(x)$ 가 존재한다고 하면 2자유도 적분형 서보계는 다음식으로 표현된다¹¹⁾.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ w(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + B(F_0 + GF_1) & BG \\ -C - D(F_0 + GF_1) & -DG \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} BH_0 \\ I - DH_0 \end{bmatrix} r(t) + \begin{bmatrix} B \\ -D \end{bmatrix} g(x) \quad (15)$$

여기서

$$\begin{aligned} \tilde{w}(t) &= w(t) - w(\infty) \\ &= w(t) + F_1 x(\infty) - F_1 x(0) - w(0) \end{aligned} \quad (16)$$

라 두면 편차 시스템은

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}(t) \\ \dot{\tilde{w}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + B(F_0 + GF_1) & BG \\ -C - D(F_0 + GF_1) & -DG \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}(t) \\ \tilde{w}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ -D \end{bmatrix} \tilde{g}(\tilde{x}(t), x(\infty)) \quad (17)$$

로 나타난다. 이 편차 시스템에 대해

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ F_1 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}(t) \\ \tilde{w}(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

의 좌표변환을 행하면 (17)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + BF_0 & BG \\ 0 & (F_1 B - D) G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}(t) \\ z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ F_1 B - D \end{bmatrix} \tilde{g}(\tilde{x}(t), x(\infty)) \quad (19)$$

이렇게 표현된 시스템을 선형부분과 비선형부분으로 분리해서 나타낸다. 우선 선형부분은

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + BF_0 & BG \\ 0 & (F_1 B - D) G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}(t) \\ z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ F_1 B - D \end{bmatrix} e_1(t) \quad (20)$$

$$e_1(t) = k[I \ 0] \begin{bmatrix} \tilde{x}(t) \\ z(t) \end{bmatrix}$$

와 같이 나타낼 수 있으며 이것의 전달함수를 $\hat{H}(s)$ 라 하면 그것은

$$\begin{aligned} \hat{H}(s) &= k[I \ 0] \begin{bmatrix} sI - A - BF_0 & -BG \\ 0 & sI - F_1 BG - DG \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} B \\ F_1 B - D \end{bmatrix} \\ &= k(sI - A - BF_0)^{-1} B \{ I + G(sI - (F_1 B - D)G)^{-1} (F_1 B - D) \} \\ &= k(sI - A - BF_0)^{-1} B \times \hat{H}_1(s) \end{aligned} \quad (21)$$

와 같이 표현된다. 단,

$$\hat{H}_1(s) = I + G(sI - F_1 BG + DG)^{-1} (F_1 B - D) \quad (22)$$

이다. 여기서

$$\| \hat{H}(s) \|_\infty \leq \| k(sI - A - BF_0)^{-1} B \|_\infty \cdot \| \hat{H}_1(s) \|_\infty \quad (23)$$

이다.

정리 2 제어대상에 비선형의 모델링 오차를 포함하는 2자유도 적분형 서보계가 장인 안정하기 위해서는 (14)식과 small gain 정리에 따라 다음의 조건이 성립해야 한다.

$$\| \hat{H}_1(s) \|_\infty \leq 1 \quad (24)$$

보조정리 1 행렬 A 가 안정한 행렬이라고 한다. 이 때 전달함수 $H(s)$ 가

$$H(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (25)$$

와 같이 주어진다면

$$\| H_1(s) \|_{\infty} \leq 1 \quad (26)$$

를 만족하는 필요충분 조건은

$$PA + A^T P = -C^T C - E^T E \quad (27)$$

$$B^T P + W^T E = -D^T C \quad (28)$$

$$I - D^T D = W^T W \quad (29)$$

를 만족하는 $P(\geq 0)$ 와 적당한 행렬 E, W 가 존재하는 것이다.

따라서 정리 2의 조건 $\| \widehat{H}_1(s) \|_{\infty} \leq 1$ 가 성립하기 위한 필요충분 조건은 보조정리 1로부터

$$P(F_1 BG - DG) + (F_1 BG - DG)^T P = -G^T G - E^T E \quad (30)$$

$$(B^T F_1^T - D^T) P = -G \quad (31)$$

를 만족하는 $P(\geq 0)$ 와 E 가 존재하는 것이다.
(31)식으로부터

$$G = -(F_1 B - D)^T P \quad (32)$$

이고 이것을 (30)식에 대입하면 다음식이 얻어진다.

$$P(F_1 B - D)(F_1 B - D)^T P = E^T E \quad (33)$$

이것으로부터 임의의 $P(\geq 0)$ 에 대해서 (33)식을

만족하는 E 가 항상 존재함을 알 수 있다.

또한 제어대상이 안정하기 위해서는 행렬 $(F_1 B - D)G$ 가 안정하지 않으면 안 된다. 그러므로 $(F_1 B - D)G$ 가 안정하기 위한 필요충분조건은 (32)식의 계인 G 가 참고문헌 11)에서 구한 계인 G 와 같은 형태로 주어져 있기 때문에 (37)식을 만족하는 P 로서 임의의 정정행렬을 선택하면 된다. 따라서

$$G = -(F_1 B - D)^T P \quad (P > 0) \quad (34)$$

라 두면 보조정리 1로부터

$$\| \widehat{H}_1(s) \|_{\infty} \leq 1 \quad (35)$$

가 성립하고 결론적으로 비선형 불확실성을 포함하는 2자유도 적분형 서보계는 강인 안정함을 알 수 있다. 또한 참고문헌 11)에서는 2자유도 적분형 서보계가 최적 서보계가 되도록 하는 적분 보상 계인 G 로서 다음과 같은 형태의 것을 이용하였다.

$$G = -(F_1 B - D)^T W \quad (W > 0) \quad (36)$$

이것으로부터 최적 서보계가 되도록 하는 적분 보상 계인 G 는 서보계가 불확실성에 대해 강인 안정하기 위한 적분 보상 계인 중의 하나임을 알 수 있다.

4. 시뮬레이션

이하에서는 지금까지의 결과를 기초로 하여 적분 보상 계인을 구하고 제어대상에 비선형의 모델링 오차가 존재할 경우에도 제어계의 강인한 안정성은 보장되며 그러한 적분 보상 계인의 조절에 의해 불확실성의 영향을 억제시킬 수 있음을 확인한다.

우선 제어대상으로서 다음식과 같이 표현되는 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 3 & 1 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} g(x) \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} g(x)$$

최적 제어레이터 이론에 따라 상태 피드백 계인 F_0 는 다음과 같이 결정하였다.

$$F_0 = - \begin{bmatrix} 2.201 & 2.700 & 0.730 \\ 0.730 & 1.328 & 0.482 \end{bmatrix} \quad (38)$$

이것으로부터 각 계인값은 다음과 같이 얻어진다.

$$H_0 = \begin{bmatrix} -1.700 & -1.300 \\ -0.328 & 0.048 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} 1.424 & 3.274 & 0.852 \\ 0.215 & -0.720 & -0.113 \end{bmatrix}$$

그리고 제어대상에 불확실성으로서 다음과 같이 표현되는 비선형의 모델링 오차가 존재한다고 가정한다.

$$g(x) = \begin{bmatrix} -\alpha \tan(x_1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

여기서 파라미터 $\alpha = 0.5$ 로 하였다.

이것으로부터 시뮬레이션을 행한 결과를 Fig. 3~Fig. 5에 나타낸다. 여기서 적분보상 계인의 효과를 확인하기 위하여 적분보상 계인의 파라미터 W 를 $W = \alpha I (\alpha > 0)$ 로 두고 $\alpha = 0.1, 5, 10$ 과 같이 증가시켰을 때의 응답특성을 관찰하였다. 시뮬레이션 결과로부터 알 수 있듯이 적분보상 계인을 증가시킴에 따라 응답특성이 개선됨을 알 수 있다.

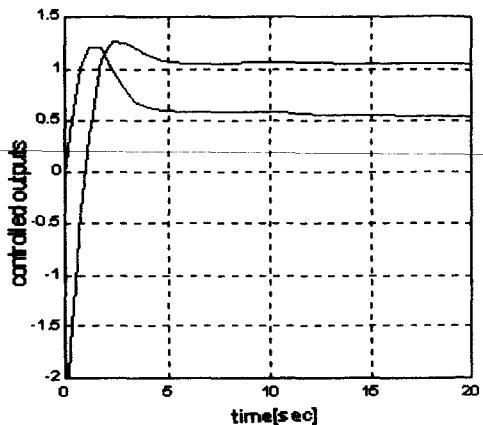


Fig. 3 Step Responses, $\alpha = 0.1$ ($W = \alpha I$)

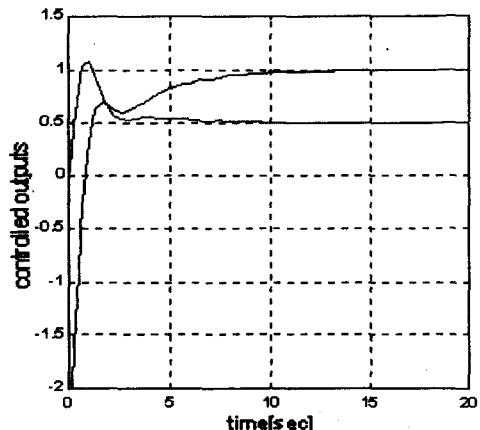


Fig. 4 Step Responses, $\alpha = 5.0$ ($W = \alpha I$)

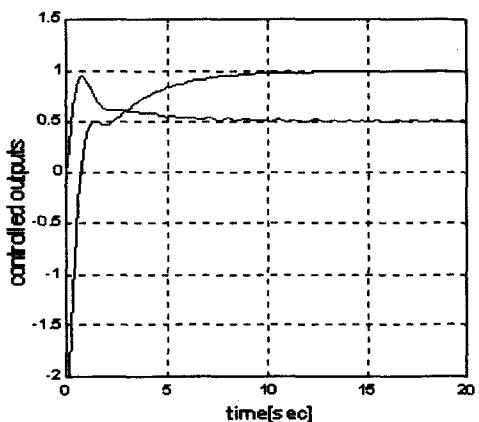


Fig. 5 Step Responses, $\alpha = 10$ ($W = \alpha I$)

5. 결 론

제어계 설계에 있어서 기본적인 문제중의 하나는 제어대상의 모델링 오차나 외란이 존재할 때 제어 대상의 제어출력이 목표신호에 추종하도록 하는 제어계를 설계하는 이른바 강인한 서보계 구성문 제이다. 이 문제에 있어서 제어대상의 불확실성에 대처하기 위해서는 내부모델원리에 따라 제어기는 목표신호와 외란의 발생기구를 내포하지 않으면 안된다. 이와 같은 내부모델원리에 따라 상태공간 표현상에서의 강인한 서보계 설계에 관한 다수의 연구결과가 보고되어져 있다. 그런데 2자유도 제어계 구성에 있어서의 관점에서 본다면 목표신호에 대한 추종특성과 감도 등의 폐루프 특성은 독립적으로 설계해야만 한다.

본 논문에서는 입력과 출력간에 직달항이 존재하고 불확실성으로서 비선형적인 특성을 갖는 좀 더 일반적인 경우의 제어계의 안정성과 응답특성에 대해 고찰하였다. 그래서 만일 제어대상에 matching 조건을 만족하는 비선형의 모델링 오차에 대해 적분 보상기를 포함하지 않는 서보계가 안정하다면 2자유도계로 제어계를 구성한 후에도 원래의 제어계의 안정성을 보장하는 강인 안정 조건을 제시하였다. 이것은 적분보상개인에 독립적이며 자유로운 개인조정을 가능하게 한다. 따라서 그러한 강인한 안정조건하에서는 적절한 적분 보상 개인의 조절에 의해 제어대상의 불확실성에 적극적으로 대처할 수 있고 과도응답 특성도 개선할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

참고문헌

- 1) Davison, E. J., "The Robust Control of a Servomechanism Problem for Linear Time Invariant Multivariable Systems", IEE Trans. AC-21-1, Vol. 25, No. 34, 1976
- 2) Sebakhy, O. A., and W. M. Wonham, "A Design Procedure for Multivariable Regulators", Automatica, Vol. 12, pp.467-478, 1976
- 3) 古田, 原, "サーボ技術と現代制御論", 計測と制御, Vol. 19, No. 10, pp.953~961, 1980
- 4) Fujisaki, Y., and M. Ikeda, "A Two-Degree-of-Freedom Design Optimal Servosystem", Proc. of 31st IEEE CDC, pp.3588-3589, 1992
- 5) Fujisaki, Y., and M. Ikeda, "Synthesis of Two-Degree-of-Freedom Servosystems", Trans. SICE, Vol 27, No. 8, pp.907-914, 1991
- 6) Kim, Y., Y. Fujisaki, M. Ikeda, "Robust Stability and High-gain Compensation of a Two-Degree-of-Freedom Servosystem", The 17th SICE Symposium on Dynamical System Theory, pp.325-330, 1994
- 7) Kobayashi, M., Y. B. Kim, M. Ikeda, Y. Fujisaki, "On Robust Stability of Two-Degree-of-Freedom Servosystem Incorporating an Observer", The 39th Annual Conference of iSCIE, pp.263-264, 1995
- 8) Kim, Y. B., M. Ikeda, M. Kobayashi, Y. Fujisaki, "High-Gain Compensation of a Two-Degree-of-Freedom Servosystem Incorporating an Observer", The 24th SICE Symposium on Control Theory, pp.107-110, 1995.
- 9) Kim, Y. B., Y. Fujisaki and M. Ikeda, "Robust Stability of Two-Degree-of-Freedom Servosystem with a Tuning Gain", Trans. SICE, Vol. 34, No. 10, pp.1411-1418, 1998.
- 10) Kim, Y. B., M. Ikeda, Y. Fujisaki, "Robust Stability of a Two-Degree-of-Freedom Servosystem with Unstructured Uncertainty", Memoirs of The Graduate School of Science & Technology, KOBE Univ., 14-B, pp.73-80, 1996
- 11) 김영복, "비선형 불확실성을 갖는 서보계의 강인성에 관한 고찰(I)-직달항을 고려한 2자유도 서보계의 구성", 한국해양공학회지, Vol. 13, No. 3, pp.91~98, 1999. 8