

제어입력 크기제한을 갖는 시스템에서 이득 스케줄 상태되먹임-외란앞먹임 제어 - 적용

강민식[#], 윤우현^{*}

Gain Scheduled State Feedback and Disturbance Feedforward Control for Systems with Bounded Control Input - Application

Min Sig Kang[#] and Woo Hyun Yoon^{*}

ABSTRACT

In this paper, the gain scheduled state feedback and disturbance feedforward control design proposed in the previous paper has been applied to a simple matching system and a turret stabilization system. In such systems, it is needed to attenuate disturbance response effectively as long as control input satisfies the given constraint on its magnitude. The scheduled control gains are derived in the framework of linear matrix inequality(LMI) optimization by means of the MatLab toolbox. Its effectiveness is verified along with the simulation results compared with the conventional optimum constant gain control and the scheduled state feedback control cases.

Key Words : Input saturation (입력포화), Disturbance feedforward (외란앞먹임), State feedback (상태되먹임), Gain scheduled control (이득 스케줄제어), Linear Matrix Inequality (LMI, 선형행렬부등식), Matching system (매칭 시스템)

기호설명

$A, B_1, B_2, C_1, D_{11}, D_{12}$ = system matrices

K_{fk} = k -th disturbance feedforward control gain

K_k = k -th state feedback control gain

Q, F_k = controller variable matrices

V_k = Lyapunov function

x, u, w = state variable, control input, and disturbance input, respectively

\bar{u} = magnitude of control input saturation.

\bar{w} = maximum Euclidian norm of w

z_∞ = control output

α, β, σ = parameters used for control design

ϵ_k = k -th ellipsoidal space

γ = L_2 -gain from w to z_∞

1. 서론

접수일: 2007년 3월 27일; 게재승인일: 2007년 10월 19일

[#] 경원대학교 기계공학과

E-mail: mskang@kyungwon.ac.kr Tel. (031) 750-5524

^{*} 경원대학교 토목공학과

최근 제어입력의 제한을 갖는 계에서 선형행렬 부등식(LMI : Linear Matrix Inequality)을 이용하여 주어진 제한조건을 만족하고 제어성능을 최적화하는 제어기가 제시되었다.^{1,2} 또한 계의 상태에 따라 제어 이득을 변화시키는, 즉 계의 상태가 원점에 가까울수록 더 큰 제어 이득을 사용함으로써 고정 이득제어에 비해 더 많은 제어입력을 사용하여 제어성능을 개선하기 위한 스케줄 제어방법이 제안되었다.^{3,7} 본 연구에서는 기존의 스케줄 제어방법을 확장하여 외란이 측정 가능한 계를 대상으로 참고 문헌⁸에서 제안된 스케줄 상태되먹임-외란앞먹임 제어 방법의 타당성과 효과를 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 스케줄 제어

다음 식으로 기술되는 선형계에서

$$\dot{x} = Ax + B_1w + B_2u \quad (1a)$$

$$z_\infty = C_1x + D_{11}w + D_{12}u \quad (1b)$$

여기서 $x \in R^n$, $w \in R^{m_w}$, $u \in R^{m_u}$, z_∞ 은 각각 계의 상태변수, 외란입력, 제어입력, 제어출력이며, A , B_1 , B_2 , C_1 , D_{11} , D_{12} 는 시스템 행렬이다. 이 계는 다음과 같은 제한이 존재한다. 단, 제어입력은 편의를 위해 단일입력으로 가정한다.

$$\|u(t)\| \leq \bar{u}, \forall t \geq 0 \quad (2a)$$

$$\|w(t)\| \leq \bar{w}, \forall t \geq 0 \quad (2b)$$

여기서 $\|*\|$ 는 $*$ 의 Euclidian 노름(norm)을 나타낸다.

상태변수의 영역을 다음과 같이 정의한다.

$$\epsilon_k = \left\{ x : x^T Q^{-1} x < \frac{\bar{w}^2}{\beta_k^2} \right\}, \beta_1 = 1 \quad (3)$$

정리 1⁴. 스케줄 상태되먹임 제어

식 (2)의 제한조건을 갖는 식 (1)의 계에서 변수 $\{\beta_m > \beta_{m-1} > \dots > \beta_2 > \beta_1 = 1\}$ 에 대해 다음의 선형행렬부등식들을 만족하며 γ_k^2 를 최소화하는 양한정(positive definite) 대칭 행렬 $Q^T = Q > 0$ 와 행렬 F_1, F_2, \dots, F_m , 그리고 양의 변수 α 가 존재하고,

$1 \leq k \leq m$ 일 때

$$\begin{bmatrix} Y_k & * & * \\ B_1^T & -\gamma_k^2 I & * \\ C_1 Q + D_{12} F_k & D_{11} & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (4a)$$

$$\begin{bmatrix} Q & * \\ F_k^T & \beta_k^2 \frac{\bar{u}^2}{w^2} \end{bmatrix} > 0 \quad (4b)$$

$k = 1$ 일 때

$$\begin{bmatrix} Y_k + \alpha Q & * \\ B_1^T & -\alpha I \end{bmatrix} < 0, \alpha > 0 \quad (4c)$$

여기서 $Y_k = A Q + Q A^T + B_2 F_k + F_k^T B_2^T$ 이며, $*$ 는 대칭행렬 요소를 나타낸다.

제어기 $u = K_k x$ 의 이득 K_k 를 다음과 같이 선정한다면,

$$K_k = \begin{cases} F_k Q^{-1} & \text{when } \frac{\bar{w}^2}{\beta_{k+1}^2} < V(x) \leq \frac{\bar{w}^2}{\beta_k^2} \\ k = 1, 2, \dots, m-1 \\ F_m Q^{-1} & \text{when } V(x) \leq \frac{\bar{w}^2}{\beta_m^2} \end{cases} \quad (5)$$

여기서 $V(x) = x^T Q^{-1} x$

1) 폐회로는 안정하며, 외란 w 로부터 제어출력 z_∞ 까지의 L_2 -이득은 γ_1 보다 작다. 즉,

$$\int z_\infty^T z_\infty dt < \gamma_1^2 \int w^T w dt$$

2) 폐회로 상태벡터는 항상 ϵ_1 에 존재하며, 제어입력은 식 (2a)의 제한조건을 만족한다.

3) 외란 w 로부터 제어출력 z_∞ 까지의 폐회로 L_2 -이득은 $\gamma_1 \geq \gamma_2 \geq \dots \geq \gamma_m$ 의 관계를 갖는다.

정리 2⁸. 스케줄 상태되먹임-외란앞먹임 제어

식 (2)의 제한조건을 갖는 식 (1)의 계에서 변수 $\{\beta_m > \beta_{m-1} > \dots > \beta_2 > \beta_1 = 1\}$ 와 상수 σ 에 대해 다음의 선형행렬부등식들을 만족하며 γ_k^2 를 최소화하는 양한정 대칭행렬 $Q^T = Q > 0$ 와 행렬 F_1, F_2, \dots, F_m , 행렬 $K_{f1}, K_{f2}, \dots, K_{fm}$, 그리고 양의 변수 α 가 존재하고,

1 ≤ k ≤ m 일 때

$$\begin{bmatrix} Y_k & * & * \\ B_1^T + K_{fk}^T B_2^T & -\gamma_k^2 I & * \\ C_1 Q + D_{12} F_k & D_{11} + D_{12} K_{fk} & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (6a)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma Q & * & * \\ 0 & \frac{(1-\sigma)I}{\beta_k^2} & * \\ F_k & K_{fk} & \beta_k^2 \frac{u^2}{w^2} \end{bmatrix} > 0, 0 < \sigma < 1 \quad (6b)$$

k = 1 일 때

$$\begin{bmatrix} Y_k + \alpha Q & * \\ B_1^T + K_{fk}^T B_2^T - \alpha I \end{bmatrix} < 0, \alpha > 0 \quad (6c)$$

여기서 $Y_k = A Q + Q A^T + B_2 F_k + F_k^T B_2^T$

제어기를 다음과 같이 선정한다면,

$$u = \begin{cases} F_k Q^{-1} x + K_{fk} w & \text{when } \frac{\bar{w}^2}{\beta_{k+1}^2} < V(x) \leq \frac{\bar{w}^2}{\beta_k^2}, \\ F_m Q^{-1} x + K_{fm} w & \text{when } V(x) \leq \frac{\bar{w}^2}{\beta_m^2} \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, m-1 \quad (7)$$

- 1) 폐회로는 안정하며, 외란 w 로부터 제어출력 z_∞ 까지의 L_2 -이득은 γ_1 보다 작다. 즉,

$$\int z_\infty^T z_\infty dt < \gamma_1^2 \int w^T w dt$$

- 2) 폐회로 상태벡터는 항상 c_1 에 존재하며, 제어입력은 식 (2a)의 제한조건을 만족한다.
- 3) 외란 w 로부터 제어출력 z_∞ 까지의 폐회로 L_2 -이득은 $\gamma_1 \geq \gamma_2 \geq \dots \geq \gamma_m$ 의 관계를 갖는다.

3. 시뮬레이션

앞에서 소개된 정리의 타당성과 효과를 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

3.1 매칭(Matching) 시스템

다음의 간단한 질량-댐퍼-스프링으로 이루어진 계를 고려하자.

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = w + u \quad (8)$$

여기서 m, c, k 는 각각 질량, 댐핑계수, 스프링 상수이며, y, w, u 는 각각 질량의 변위, 외란입력, 제어입력을 나타낸다. 외란입력은 측정 가능한 것으로 가정한다. 시뮬레이션에서 사용된 계수는 각각 $m = 1 \text{ Kg}, c = 1.01 \text{ Ns/m}, k = 631.7 \text{ N/m}$ 로 고유진동수 $\omega_n = 4 \text{ Hz}$, 감쇠비 $\zeta = 0.02$ 를 갖는 진동계로 가정한다.

식 (8)을 상태공간방정식으로 나타내면

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (9)$$

$$z_\infty = [1 \ 0] x$$

여기서 상태변수는 $x = [y \ \dot{y}]^T$ 이며, z_∞ 는 제어출력이다.

또한 외란과 제어입력은 식 (2)의 제한을 갖으며, $\bar{u} = 0.8, \bar{w} = 1.0$ 으로 가정한다. 즉, 외란의 크기가 제어입력의 크기에 비해 큰 경우를 가정한다.

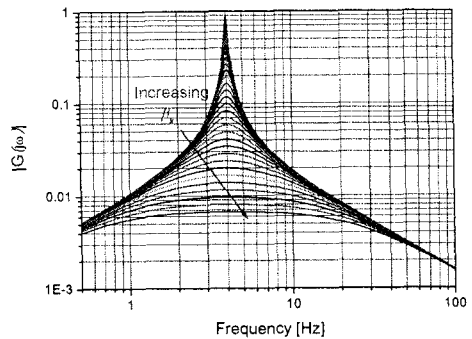


Fig. 1 Frequency response of scheduled control system

Fig. 1은 정리 1의 스케줄 상태피드백 제어(스케줄 FB-제어)를 적용한 경우 각 제어이득을 적용한 폐회로의 외란 w 와 제어출력 z_∞ 간의 주파수 응답 함수이다. 여기서 $\beta_k = 1.2^{(k-1)}, k = 1, 2, \dots, 25$ 로 정하였다. β_k 가 커질수록, 즉 계의 상태가 원점에 더 가까운 타원체에 속할수록 폐회로 주파수 응답함수가 감소함을 알 수 있다. Fig. 2는 β_k 에 따른 외란 w 와 폐회로 제어출력 z_∞ 간의 L_2 -이득 γ_k 을 보인다. 정

리 1에서와 같이 β_k 가 클수록 계의 상태가 존재하는 타원체 ϵ_k 가 작아져 고이득의 제어가 적용되므로 γ_k 는 β_k 의 증가에 따라 단순 감소함을 알 수 있다. 이 결과는 정리 1의 3)을 만족한다.

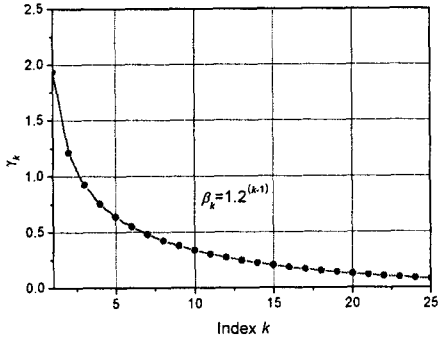


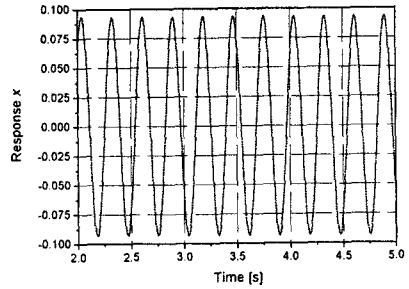
Fig. 2 L_2 -gain v.s. β_k - scheduled state FB-control

k 의 최대값을 증가시킬수록 L_2 -이득은 더 감소하나 외란이 조화함수 형태로 작용할 경우에 대한 Fig 3의 시뮬레이션 결과를 보면 정상상태에서 선정되는 제어기 번호가 $k=14$ 와 15 이므로, k 의 최대값을 이들보다 충분히 큰 25로 정하였다.

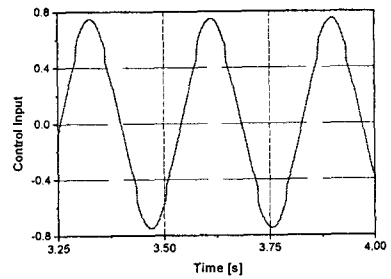
Fig. 1과 2의 결과로부터 스케줄 제어는 고정 제어이득을 사용하는 경우에 비해 외란응답 감소에 더 나은 성능을 보일 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 3은 외란이 $w(t) = \bar{w} \sin(7\pi t)$ 이고 초기 조건이 모두 영인 경우 (a)응답, (b)제어입력, (c)적용된 제어이득 번호를 보인다. Fig. 3(c)에서 초기상태가 원점에 있으므로 가장 큰 제어이득인 K_{25} 가 선정되었으며, 외란이 가해지면서 계의 상태 x 가 점차 큰 타원체로 이동하고 결과적으로 작은 제어이득이 적용되며, 약 1초 이후 x 는 14번째 와 15번째 타원체를 넘나드는 응답을 보인다. Fig. 3(a)에서 정상상태에 도달 된 후 응답의 크기는 피크-피크값이 0.198로 나타났다. 제어하는 동안 제어입력은 항상 주어진 조건을 만족하였다. Fig. 3(b)는 정상상태 도달 후 제어입력으로 이득 변화에 따른 제어입력의 변화를 볼 수 있다.

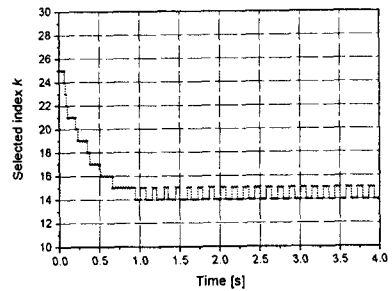
Fig. 4는 정리 2의 스케줄 상태피드백제어+외란 앞먹임제어 (스케줄 FB+FF-제어)를 적용한 경우 β_k 와 L_2 -이득의 관계로 β_k 의 증가에 따라 L_2 -이득은 단순 감소함을 알 수 있다. 이 때 $\sigma=0.1$, $\beta_k = 1.2^{(k-1)}$, $k=1, 2, \dots, 25$ 로 정하였다.



(a) response



(b) control input



(c) index k of selected control gain

Fig. 3 Scheduled state FB-control

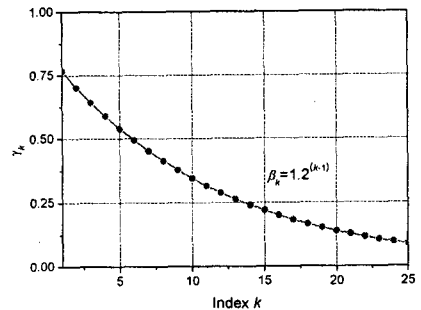
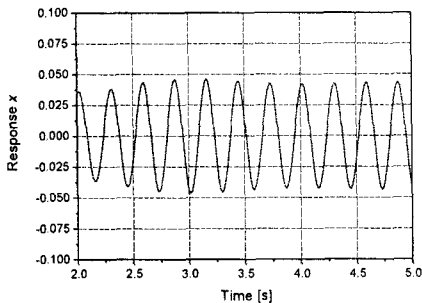
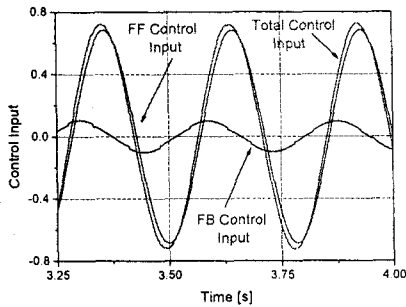


Fig. 4 L_2 -gain v.s. β_k - scheduled state FB+disturbance FF-control

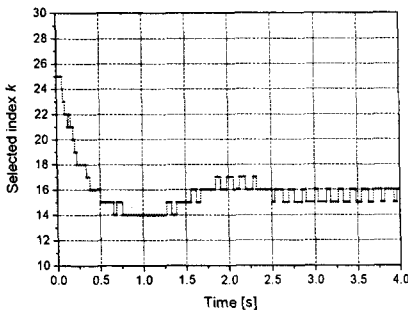
Fig. 5는 Fig. 3에서와 동일한 외란과 초기조건에서 스케줄 FB+FF-제어 결과로 (a)응답, (b)제어입력, (c)적용된 제어이득 변화를 보인다. Fig. 5(c)에서 제어이득은 Fig. 3(c)에서와 같이 초기 K_{25} 가 선정되었으며, 외란이 가해지면서 점차 작은 제어이득이 적용되며, 약 2.5초 이후 x 는 15번째와 16번째 타원체를 넘나드는 응답을 보인다. Fig. 5(a)에서 정상상태에 도달된 후 응답의 크기는 피크-피크값이 0.0923으로 Fig. 3(a)의 스케줄 FB-제어 응답의 46.6% 수준에 해당된다. Fig. 5(b)는 정상상태 도



(a) response



(b) control input



(c) index k of selected control gain

Fig. 5 Scheduled state FB+ disturbance FF control case

달 후 상태되먹임 제어입력, 외란앞먹임 제어입력, 전체 제어입력을 보인다. 전체 제어입력은 항상 주어진 제한조건을 만족하였으며, Fig. 5(b)에서와 같이 전체 제어입력 중 상태되먹임 제어입력에 비해 외란 앞먹임제어입력의 크기가 더 큰데, 이는 참고 문헌⁸에서의 논의와 같이 제어기 설계에 사용된 $\sigma=0.1$ 은 상대적으로 상태되먹임제어에 비해 외란 앞먹임 제어에 대한 가중이 크기 때문이다.

추가적인 시뮬레이션 결과 σ 가 커질수록 외란 앞먹임제어입력은 줄고 상대적으로 상태 되먹임제어입력은 증가하였으며, 응답은 점차 증가였고, σ 가 1에 근접할 경우 Fig. 3(a)의 상태되먹임 응답과 거의 같아짐을 확인하였다.

다양한 주파수 특성을 갖는 외란에 대한 제어성능 비교를 위해 10초 동안 3Hz에서 6Hz까지 선형적으로 변화하는 chirp 신호를 외란으로 가했을 때 고정이득제어를 한 경우와 스케줄 제어를 적용한 경우를 시뮬레이션하였다.

시뮬레이션은

- 1) 고정이득을 적용한 경우 FB-제어와 FB+FF-제어에 대해 수행했으며, 여기서 사용한 제어이득은 고정이득 FB-제어의 경우 정리 1에서 $u = K_1x$, 고정이득 FB+FF-제어의 경우 정리 2에서 $u = K_1x + K_{F1}w$ 를 적용하였다.
- 2) 스케줄제어에서는 FB-제어의 경우 정리 1, FB+FF-제어의 경우 정리 2를 적용하였다. 이때 앞에서와 같이 $\beta_k = 1.2^{(k-1)}$, $k = 1, 2, \dots, 25$, $\sigma = 0.1$ 을 적용하였다.

고정이득제어 시뮬레이션 결과는 Fig. 6과 Fig. 7과 같으며, 스케줄제어 시뮬레이션 결과는 Fig. 8, 9, 10과 같다.

Fig. 6에서 가는 선은 고정 FB-제어, 굵은 선은 고정 FB+FF-제어 응답이다. 대상 주파수 전 범위에서 고정 FB+FF-제어응답이 작으며, 특히 고유 진동수 부근의 4.3Hz 외란에 대한 응답 성능 차이가 많이 나타났다. FB-제어와 FB+FF-제어의 최대 피크-피크값은 각각 1.174, 0.439로 나타났다. 이 때 사용된 제어입력은 Fig. 7에서와 같이 굵은 선으로 나타낸 고정 FB-제어의 경우 4.3Hz 부근에서 최대 -0.37 ~ 0.37 범위의 값을 갖는데 반해, 가는 선으로 나타낸 고정 FB+FF-제어에서는 외란 주파수의 변화에 비교적 무관하게 허용된 제어입력을 많이 사용하

며, 사용된 최대 제어입력 범위는 $-0.73 \sim 0.73$ 이었다. 따라서 외란 앞먹임 제어를 추가함으로써 주어진 제어입력을 효과적으로 이용하여 제어성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

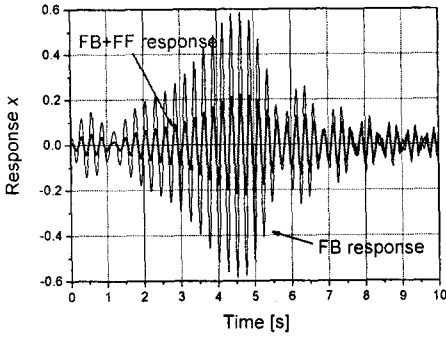


Fig. 6 Responses of fixed gain control

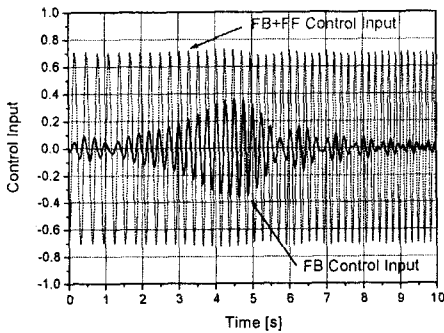


Fig. 7 Control input of fixed gain control

다음으로 동일한 chirp 신호 외란이 작용할 때 스케줄 제어를 시뮬레이션하였다. Fig. 8에서 가는 선은 스케줄 FB-제어, 굵은 선은 스케줄 FB+FF-제어의 응답이다. 모든 주파수 범위에서 스케줄 FB+FF-제어가 스케줄 FB-제어에 비해 우수한 제어 성능을 나타내었다. 두 경우 모두 Fig. 6에서와 같이 4.3Hz에서 응답이 가장 크게 나타났다. 스케줄 FB-제어의 경우 응답의 피크-피크값이 0.51로 Fig. 6의 고정이득 제어 응답의 43% 수준으로 고정 FB-제어에 비해 스케줄 FB-제어가 외란응답 감소에 효과적임을 확인할 수 있다. 스케줄 FB+FF-제어의 경우 응답의 피크-피크값은 0.36으로 Fig. 6의 고정 FB+FF-제어 응답의 82% 수준으로 감소하여 고정 FB+FF-제어에 비해 스케줄 FB+FF-제어가 외란응답 감소에 효과적임을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 스케줄 FB-제어에서 사용된 제어이득

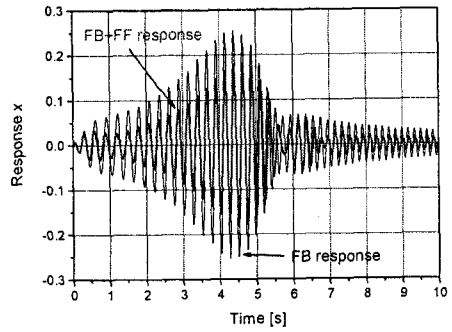


Fig. 8 Responses of scheduled gain control

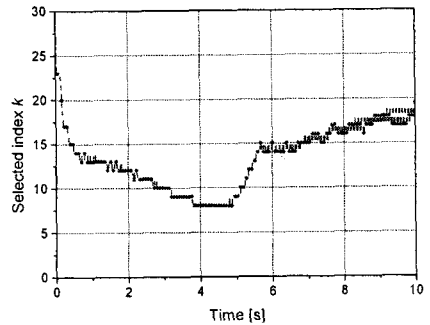


Fig. 9 Selected index of scheduled gain - FB case

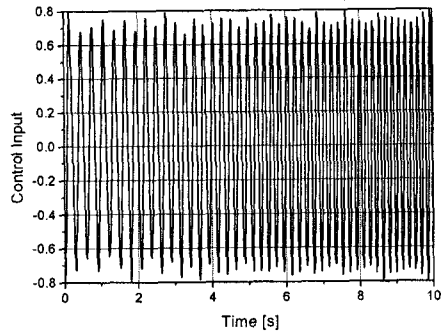


Fig. 10 Control input of scheduled control - FB case

번호를 보인다. 제어 초기 계의 상태가 모두 원점에 있으므로 가장 큰 제어이득 K_{25} 가 선정되었다. 외란이 가해지면서 계의 상태가 원점으로부터 점차 멀어짐에 따라 작은 제어이득이 선정되었다. 외란의 주파수가 증가함에 따라 5초 부근에서 응답이 감소하고 따라서 점차 큰 제어입력이 선정됨을 알 수 있다. Fig. 10은 이 때 사용된 제어입력으로 주어진 제한 조건을 만족하며, Fig. 7의 고정이득 제

어에 비해 주어진 제어입력을 보다 많이 사용하고 있음을 알 수 있다.

스케줄 FB+FF-제어의 경우도 Fig. 9와 유사하게 계의 상태가 포함되는 타원체에 따라 제어이득이 선정되며, 이 때 사용된 제어이득은 Fig. 10과 같이 제한 조건을 만족할 뿐 아니라 주어진 제어입력을 충분히 사용하였다.

3.2 포탑 안정화 시스템

참고문헌⁷의 포탑안정화 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 계의 상태공간방정식은

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_u u + B_w w \\ z_\infty &= C_1 x + D_{11} u \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $x = [\theta, \dot{\theta}, \theta_m, \dot{\theta}_m]$ 이며, θ_m 과 $\dot{\theta}_m$ 는 각각 모터와 포탑의 절대적인 회전각을 나타낸다. w 는 포탑에 가해지는 외란 토크로 포탑의 질량불균형과 직선가속도의 곱에 해당한다. 제어입력의 크기 제한은 $\bar{u} = 30 Nm$ 이다.

Fig. 11은 고정 이득 제어시 FB-제어와 FB+FF-제어 응답을 보인다. 고정이득은 앞의 매칭시스템에서와 같이 FB-제어의 경우 정리 1에서 $u = K_1 x$, FB+FF-제어의 경우 정리 2에서 $u = K_1 x + K_{f1} w$ 를 적용하였다. 이 때 외란은 20초 동안 1Hz에서 0.1Hz로 직선적으로 감소하는 chirp 신호를 선정하였다. 포탑안정화 시스템에서 외란은 1Hz 미만의 대역폭을 갖는 잡음으로 가정할 수 있다.

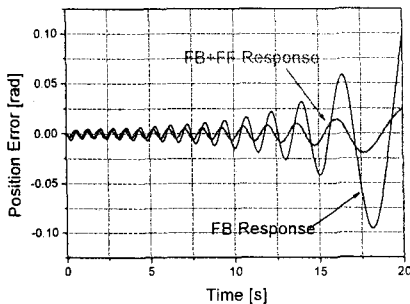


Fig. 11 Response of fixed gain controls

상태피드백 제어와 외란안정제어의 상대적 가중치에 해당하는 σ 는 0.1로 하였다. Fig. 11에서 1Hz 부근의 외란의 경우 두 제어의 성능은 유사하

지만, 외란 주파수가 낮아져 0.1Hz에 가까울수록 FB+FF제어 성능이 우수함을 알 수 있다. Fig. 12는 이 때의 제어입력으로 FB-제어의 경우 고주파에서는 저주파로 갈수록 커지지만, FB+FF-제어의 경우 주파수에 관계없이 주어진 제한 내에서 큰 입력이 사용되었다. 이 결과로부터 포탑 안정화계에서 외란안정제어의 효과를 확인할 수 있다. FB-제어에서 외란의 주파수가 더 작아질 경우 제어입력은 커지지만, 주어진 제어입력 제한을 초과하지 않고 $\bar{u} = 30 Nm$ 에서 포화됨을 확인하였다.

Fig. 13은 동일한 외란에서 스케줄제어 응답을 보인다. 이 때 $\beta_k = 1.1^{(k-1)}$, $k = 1, 2, \dots, 40$ 으로 하였다. Fig. 11의 응답과 비교 스케줄제어의 효과를 확인할 수 있으며, 또한 FB-제어보다 FB+FF-제어가 더 나은 성능을 보임을 알 수 있다.

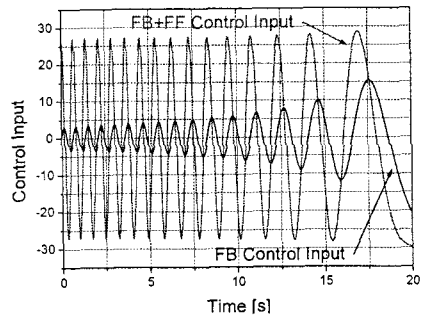


Fig. 12 Control input of fixed gain controls

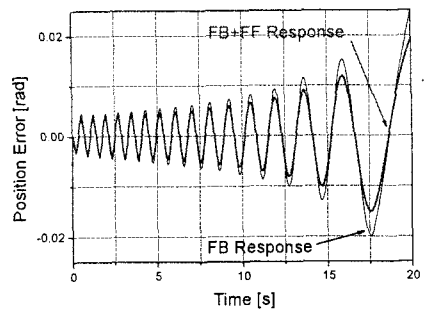


Fig. 13 Response of scheduled gain controls

Fig. 14과 Fig. 15는 스케줄 FB-제어시 선정된 이득의 변화와 제어입력으로, 계의 상태 x 의 변화에 따른 제어기 변화를 볼 수 있으며, 결과적으로 제어입력은 제한조건을 만족하며, 충분히 큰 제어입력이 적용되었음을 확인할 수 있다.

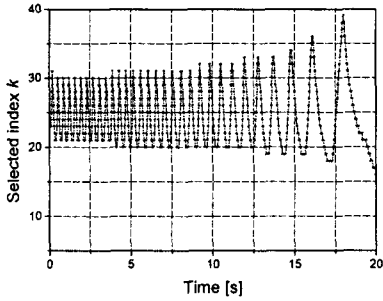


Fig. 14 Index of selected gain - scheduled FB-control

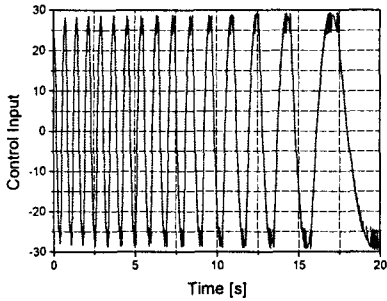


Fig. 15 Control input of scheduled scheduled FB-control

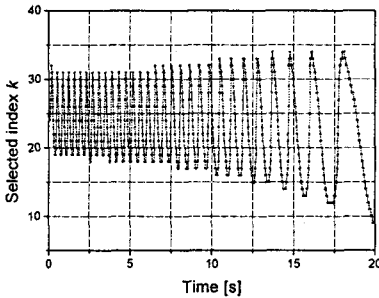


Fig. 16 Index of selected gain - scheduled FB+FF-control

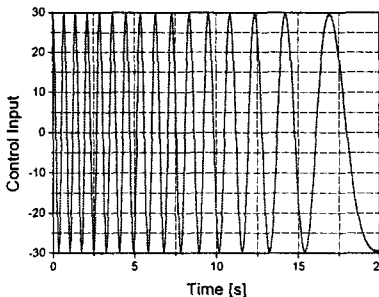


Fig. 17 Control input of scheduled FB+FF -control

Fig. 16과 Fig. 17은 스케줄 FB+FF-제어시 선정된 이득의 변화와 제어입력으로, 이 경우도 외란에 따른 제어 이득의 변화를 확인 할 수 있으며, 특히 제어입력은 주어진 조건을 만족할 뿐 아니라 최대의 범위를 사용함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 시스템에 가해지는 외란의 최대 크기를 알고 있고 측정가능하며, 제어입력의 크기 제한을 갖는 계를 대상으로 참고문헌⁸에서 제안된 스케줄 상태되먹임+외란앞먹임제어기 설계방법의 타당성과 제어성능을 간단한 매칭시스템과 포탑안정화 시스템에 적용하여 전산 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

시뮬레이션 결과 고정 상태되먹임제어에 비해 고정 상태되먹임제어+외란앞먹임제어가 외란응답 감소에 효과적이었다. 또한 고정 이득제어에 비해 스케줄 이득제어가, 그리고 스케줄 상태되먹임제어에 비해 스케줄 상태되먹임+외란앞먹임 제어가 제어입력을 더 많이 효과적으로 사용함으로써 외란응답 감소에 우수함을 밝혔다.

참고문헌

1. Nguyen, T. and Jabbari, F., "Disturbance Attenuation for LPV Systems with Bounded Inputs," Proc. of the American Control Conference, pp. 1543-1547, 1998.
2. Nguyen, T. and Jabbari, F., "Disturbance Attenuation for Systems with Input Saturation: An LMI Approach," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 44, No. 4, pp. 852-857, 1999.
3. Srivastava, S. and Jabbari, F., "Scheduled Controllers for Disturbance Attenuation of Systems with Bounded Inputs," Proc. of the American Control Conference, pp. 735-739, 2000.
4. Kose, I. E. and Jabbari, F., "Scheduled Controllers for Linear Systems with Bounded Actuators," Automatica, Vol. 39, No. 8, pp. 1377-1387, 2003.
5. Kang, M. S., "Gain Scheduled Control for Disturbance Attenuation of Systems with Bounded Control Input - Theory," J. of KSPE, Vol. 23, No. 6, pp. 81-87, 2006.

6. Kang, M. S., "Gain Scheduled Control for Disturbance Attenuation of Systems with Bounded Control Input - Application to Stabilization Control," J. of KSPE, Vol. 23, No. 6, pp. 88-95, 2006.
7. Kang, M. S., "Gain Scheduled State Feedback and Disturbance Feedforward Control for Systems with Bounded Control Input - Theory," J. of KSPE, Vol. 24, No. 11, pp. 59-65, 2007.