

로바스트스케줄외란관측기에 기초한 사보조종체계의 설계

윤정남, 허일건

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《새 세기 산업혁명의 불길을 세차게 지펴올려 과학기술의 힘으로 경제강국건설의 전환적국면을 열어놓아야 하겠습니다.》

운동조종체계에서 필수적인것은 외부섭동과 파라미터변동에 대한 로바스트성을 개선하는것이다. 이러한 목적을 달성하기 위한 가장 통속적인 방법은 외란관측기(DOB)에 기초한 조종이다.[1] 그러나 외란관측기를 리용한 운동조종에서 고정된 Q-러파기를 리용하는 경우에 대체로 유연한 동특성응답과 높은 정확도를 동시에 실현하기 어렵다.

DOB설계에서 관건적인것은 Q-러파기라고 부르는 저역러파기의 설계이다. 이러한 러파기로서 2항러파기와 바터워스형러파기[2]들이 있는데 이것들로는 외란억제, 수감부잡음 억제, 모형변동에 대한 로바스트안정성사이의 합리적인 타협을 실현할수 없다.

이로부터 우리는 서로 다른 목적으로 설계된 Q-러파기들을 절환시키는 로바스트스케줄외란관측기를 제안한다.

1. 외란관측기의 설계

과도응답특성을 개선하고 정상과정에서의 높은 정확도를 보장하는 DOB를 설계하기 위하여 H형과 L형 감도함수가 론의되는데 상대적으로 볼 때 H형은 차단주파수에서 큰 진폭을 가지며 L형은 작은 진폭을 가진다. 그러므로 H형감도함수는 저주파외란과 고주파잡음을 억제하는데 적합하며 L형은 과도과정의 진동을 없애는데 적합하다.

스케줄DOB에서 관건적인것은 바로 이러한 감도함수조건들을 만족시키는 Q-러파기들을 설계하는것이다.

1) 로바스트안정성조건

모형불확정성이 $P(s) = P_n(I + \Delta(s))$ (P_n 은 대상의 공칭모형이며 $\Delta(s)$ 는 불확정성행렬이다.)로 표시되며 $\Delta(s)$ 는 안정이고

$$\bar{\sigma}(\Delta(j\omega) \cdot T_{DOB}(j\omega)) < 1, \quad \forall \omega \quad (1)$$

이면 외란관측기고리(내부고리)는 로바스트안정이다. 여기서 $\bar{\sigma}(\cdot)$ 는 최대특이값을 표시하며 $T_{DOB} = Q(s)$ 는 DOB고리의 상보감도함수이다.

그런데 DOB고리의 로바스트안정성조건은 전체 닫힌체계의 안정성을 반드시 담보하지는 못하지만 많은 연구자들이 로바스트안정성에 대하여 이 조건을 리용하였다.

한편 모형변동에 대하여 닫힌체계의 완전한 로바스트안정성조건은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma}(\Delta(j\omega) \cdot T(j\omega)) < 1, \quad \forall \omega \quad (2)$$

여기서

$$T(j\omega) = \frac{P_n(j\omega)C(j\omega) + Q(j\omega)}{1 + P_n(j\omega)C(j\omega)} = \frac{P_n(j\omega)C(j\omega) + T_{\text{DOB}}(j\omega)}{1 + P_n(j\omega)C(j\omega)} \quad (3)$$

는 닫힌체계의 상보감도함수이며 $P_n(j\omega)$ 와 $C(j\omega)$ 는 공칭대상과 반결합조종기이다.

이제 변동 $\Delta(j\omega)$ 의 상한함수 $W_{\text{UP}}(j\omega)$ 를

$$\bar{\sigma}(\Delta(j\omega)) \leq |W_{\text{UP}}(j\omega)|, \quad \forall \omega \quad (4)$$

로 선택하면 닫힌체계가 로바스트안정이기 위한 충분조건은

$$|T(j\omega)| < |W_{\text{UP}}^{-1}(j\omega)|, \quad \forall \omega \Leftrightarrow \|W_{\text{UP}}(s) \cdot T(s)\|_{\infty} < 1 \quad (5)$$

이다.

다른 한편 외란억제성능은 다음과 같은 닫힌체계의 감도함수에 의존한다.

$$S(s) = \frac{1 - Q(s)}{1 + P_n(s)C(s)} = \frac{S_{\text{DOB}}(s)}{1 + P_n(s)C(s)} \quad (6)$$

여기서 $S_{\text{DOB}}(s) = 1 - Q(s)$ 는 DOB내부고리의 감도함수로서 이것의 증폭도는 저주파대역에서 충분히 작아야 한다. 따라서 감도지표에 대한 평가함수를 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\min \|W_p(s) \cdot S(s)\|_{\infty} \quad (7)$$

여기서 $W_p(s)$ 는 저주파대역에서 외란의 주파수스펙트럼을 반영한 무게함수이다.

최량DOB를 설계하기 위해서는 식 (5)를 만족시키면서 식 (7)을 최소화하여야 하는데 여기서 중요한 문제는 H형과 L형의 감도함수에 관한 상세한 설계지표를 이 문제에 직접 반영할 수 없다는것이다.

2) 표준 H_{∞} DOB설계문제에로의 변환

로바스트DOB설계문제를 풀기 위하여 식 (5)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$|L(j\omega) + Q(j\omega)| < |W_{\text{UP}}^{-1}(1 + L(j\omega))|, \quad \forall \omega \quad (8)$$

여기서 $L(j\omega) = P_n(j\omega)C(j\omega)$ 는 공칭대상에 대한 닫힌체계의 열린고리전달함수로서 이것은 복소수의 절대값의 성질로부터

$$|L(j\omega) + Q(j\omega)| < |L(j\omega)| + |Q(j\omega)|, \quad \forall \omega \quad (9)$$

이다. 그러므로 $Q(j\omega)$ 가

$$|Q(j\omega)| < |W_{\text{UP}}^{-1}(1 + L(j\omega))| - |L(j\omega)| = E(\omega), \quad \forall \omega \quad (10)$$

를 만족시키면 식 (8)은 항상 성립한다.

정리 DOB내부고리가 없는 상보감도함수 $T_0(s) = L(s)/(1 + L(s))$ 가 공칭안정성과 일반적인 로바스트안정성조건

$$T_0(s) \in RH_{\infty}, \quad \|W_{\text{UP}}(s)T_0(s)\|_{\infty} < 1 \quad (11)$$

을 만족시키면 주파수함수 $E(\omega)$ 는 모든 ω 에 대하여 $E(\omega) > 0$ 을 만족시킨다.

식 (11)에서 다음의 조건

$$|W_Q^{-1}(j\omega)| < E(\omega), \quad \forall \omega \quad (12)$$

을 만족시키는 $W_Q(s)$ 를 선택하자. 이때 식 (10)과 (12)로부터

$$\|W_Q T_{\text{DOB}}(s)\|_{\infty} = \|W_Q Q(s)\|_{\infty} < 1 \quad (13)$$

이면 닫힌계는 로바스트안정으로 된다. 로바스트안정성조건 (13)의 보수성은 식 (9)의 량변의 차이 즉 매 주파수에서 $Q(s)$ 와 $L(s)$ 의 차이에 의존한다. 그러나 실천적인 경우에 대체로 주파수가 증가하는데 따라 두 함수의 위상이 같이 감소하여 위상차가 크지 않기때문에 보수성이 작아지게 된다.

한편 안정인 무게함수 $W_C(s)$ 를

$$|W_P(j\omega)(1+L(j\omega))^{-1}| \leq |W_C(j\omega)|, \quad \forall \omega \quad (14)$$

로 되게 선택하면 최량화문제를 다음과 같이 설정할수 있다.

$$\begin{aligned} \min_{Q(s)} & \|W_C(s) \cdot T_{\text{DOB}}(s)\|_{\infty} \\ \text{s.t.} & \|W_Q(s) T_{\text{DOB}}(s)\|_{\infty} < 1 \end{aligned}$$

우의 최량화문제를 등가표현하면 다음과 같다.

$$\max \gamma, \min_{Q(s)} \left\| \begin{bmatrix} \gamma W_C(s) \cdot S_{\text{DOB}}(s) \\ W_Q(s) \cdot T_{\text{DOB}}(s) \end{bmatrix} \right\|_{\infty} < 1 \quad (15)$$

여기서

$$Q(s) \in \Omega_{n, k, q} = \{R(s) | R(s) = M(s)/N(s),$$

$$N(s) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot s^i, \quad M(s) = \sum_{j=0}^m b_j \cdot s^j, \quad n-m=k, \quad a_l = b_l (l=0, \dots, q)\} \quad (16)$$

는 닫힌계체가 안정으로 되게 선택하는데 $n, k(\leq n), q(\leq m)$ 은 설계과정에 얻어지는 $Q(s)$ 의 전체차수, 상대차수, 내부모형차수이다.

식 (16)에 관해서 식 (15)를 최량화하는 문제는 표준 H_{∞} DOB설계문제로서 가상고리함수법을 리용하여 풀수 있다.

2. 스케줄DOB에 기초한 사보체계설계

제안된 스케줄DOB에 기초한 조종체계는 그림 1과 같다.

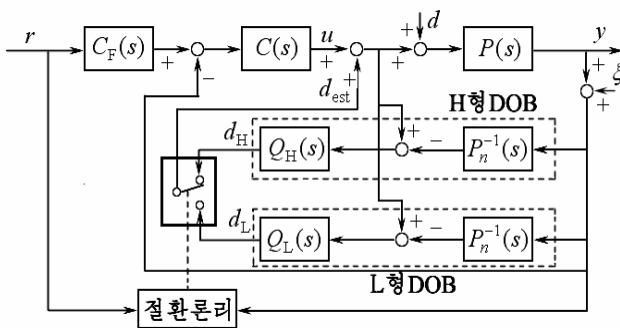


그림 1. 스케줄DOB에 기초한 조종체계의 블록구성도

그림 1에서 DOB내부고리는 2개의 DOB가 절환되는 형식의 구조를 가지고있다. 그리고 $C(s)$ 는 로바스트성과 외란억제성능이 DOB에 의하여 달성된다고 보고 목표량추종성능에 관하여 설계된 반결합조종기이고 $C_F(s)$ 는 목표량러파기이다. 한편 Q -러파기 $Q_H(s)$ 와 $Q_L(s)$ 는 앞에서 언급한 방법에 따라 설계하며 외란추정값 d_{est} 는 절환논리장치에 의하여 H형 Q -러파기의 추정값 d_H 와 L형 Q -러파기의 추정값 d_L

중 어느 한 값으로 선택된다.

이러한 절환론리장치는 목표입력의 급작스러운 변화나 외란에 의하여 발생하는 체계의 과도상태를 검출하는데 1개 조종주기에서의 절환론리흐름도를 그림 2에 보여주었다.

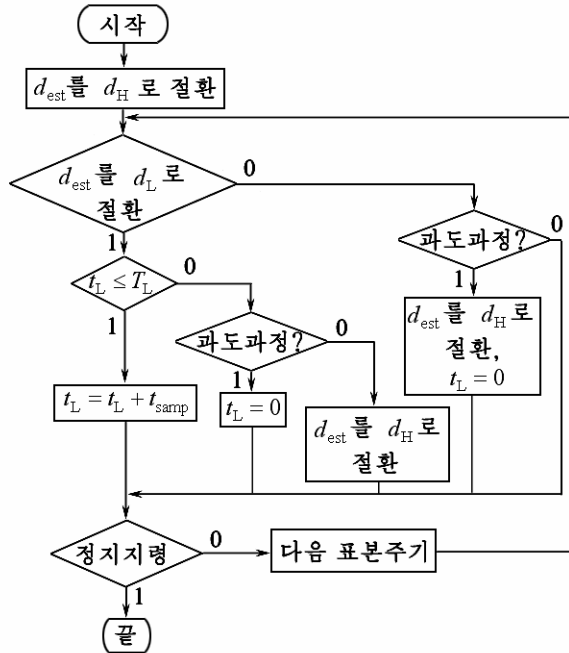


그림 2. 절환론리흐름도

그림 2에서 t_{samp} 는 표본화주기이고 T_L 은 체계가 L형Q-러파기로 절환되는데 걸리는 시간이다.

만일 과도상태가 검출되면 외란추정기가 L형DOB으로 절환되며 따라서 $Q_L(s)$ 에 의하여 과도과정이 진동없이 진행되게 된다. 이때의 과도시간이 T_L 이며 $Q_L(s)$ 에 의한 체계운전시간이 T_L 이 되면 다시 $Q_H(s)$ 으로 절환된다.

그리고 현재의 과도과정이 끝나기 전에 새로운 목표량변동이 생겨 과도시간이 T_L 을 초과하여도 체계가 과도상태에 있게 되면 T_L 을 0으로 초기화하고 $Q_L(s)$ 를 리용하여 체계를 계속 운전한다. 과도과정을 제외하고는 항상 $Q_H(s)$ 를 리용함으로써 체계가 외란을 억제하도록 한다.

3. 모의실험결과 및 분석

제안한 로바스트스케줄DOB를 리용하여 2토막기계손에 대한 모의실험을 진행하였다. 모의에서 리용한 대상의 동력학적모형[3]의 파라미터와 반결합조종기로 리용한 PD조종기의 파라미터값들을 아래의 표에 보여주었다.

두 토막에 대하여 H형Q-러파기와 L형Q-러파기설계를 위한 무게함수들을 각각 다음과 같이 선택하였다.

표. 모의에서 리용한 파라메터들의 값

파라메터 값		의미
토막 1	토막 2	
$l_1 = 1$	$l_2 = 1$	토막의 길이/m
$l_{C1} = 0.5$	$l_{C2} = 0.5$	질량중심으로부터 관절축까지의 거리/m
$m_1 = 50$	$m_2 = 50$	토막의 질량/kg
$I_{C1} = 10$	$I_{C2} = 10$	질량중심에 관한 관성모멘트/(kg·m ²)
$m_{m1} = 5$	$m_{m2} = 5$	전동기의 회전자질량/kg
$I_{m1} = 0.02$	$I_{m2} = 0.02$	회전축에 관한 관성모멘트/(kg·m ²)
$k_1 = 100$	$k_2 = 100$	전동기의 감속비
$g = 9.8$	$g = 9.8$	중력가속도/(m·s ⁻²)
$K_{P1} = 1\ 200$	$K_{P2} = 1\ 800$	PD조종기의 비례증폭도
$K_{D1} = 1\ 000$	$K_{D2} = 900$	PD조종기의 미분증폭도

$$W_{HQ1}(s) = \frac{1}{8.2}(s+2), W_{LQ1}(s) = \frac{1}{8.4}(s+8),$$

$$W_{HQ2}(s) = \frac{1}{6.2}(s+1.8), W_{LQ2}(s) = \frac{1}{6.0}(s+5.6)$$

여기서 첨수 1, 2는 토막 1과 2를 의미한다.

설계된 러파기들은 각각 다음과 같다.

$$Q_{H1}(s) = \frac{7.692s^2 + 29.34s + 52.75}{s^3 + 7.692s^2 + 29.34s + 52.75}, Q_{L1}(s) = \frac{7.692s^2 + 0.177\ 5s + 0.001\ 213}{s^3 + 7.692s^2 + 0.177\ 5s + 0.001\ 213}$$

$$Q_{H2}(s) = \frac{5.556s^2 + 15.31s + 19.87}{s^3 + 5.556s^2 + 15.31s + 19.87}, Q_{L2}(s) = \frac{5.556s^2 + 0.092\ 59s + 0.000\ 457\ 1}{s^3 + 5.556s^2 + 0.092\ 59s + 0.000\ 457\ 1}$$

그림 3에 계단형외란과 시누스외란이 작용했을 때의 오차응답곡선을 보여주었다.

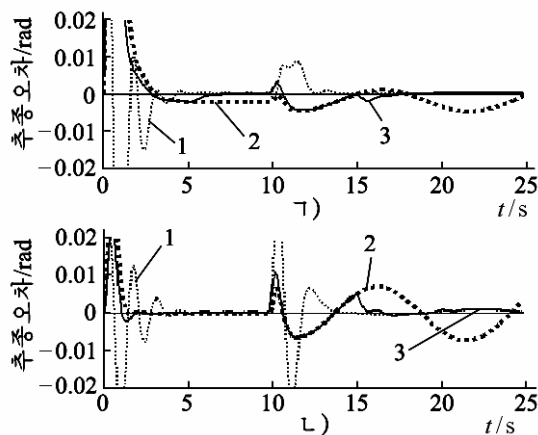


그림 3. 계단형외란과 시누스외란에 대한 오차응답곡선

ㄱ) 토막 1의 응답곡선, ㄴ) 토막 2의 응답곡선;

1-H형, 2-L형, 3-스케줄러파기

그림 3에서 보는바와 같이 10s 되는 시각에 계단형외란이나 시누스외란이 작용하였을 때 제안된 스케줄외란관측기에 기초한 조종체계의 외란억제특성이 대단히 강하다는것을 알수 있다.

맺 는 말

체계의 성능에 따라 Q-러파기가 절환되는 스케줄DOB에 기초한 사보조종체계의 설계방법을 제안하였다. 제안된 방법은 로봇의 유연팔, 유연관절과 같은 목표량이 자주 변하는 유연성을 가진 대상들의 조종에서 효과적이다. 2토막유연팔에 대한 모의실험을 통하여 제안된 방법의 효과성을 보여주었다.

참 고 문 헌

- [1] S. Sadhu et al.; IEEE Trans. Control Systems Technology, 19, 2, 449, 2011.
- [2] Z. N. Yun et al.; Acta Automatica Sinica, 37, 3, 331, 2011.
- [3] Van Den Bosch et al.; International Journal of Control, 58, 3, 537, 1993.

주체105(2016)년 4월 5일 원고접수

A Design of Servo Control System based on Robust Scheduled Disturbance Observer

Yun Jong Nam, Ho Il Gon

A design method of servo control system based on scheduled DOB that is switched over different Q-filters according to performance state is proposed. The proposed method is reasonable to control of plant with elasticity such as flexible arm, elastic joint of robot, etc., with set point frequently changed. The effectiveness of proposed method is illustrated by simulation for control of a two-link manipulator.

Key words: Robust motion control, disturbance observer, H_{∞} standard control problem, low pass filter