

외란관측기를 리용한 유연관절을 가지는 2토막기계팔의 로바스트비간섭화조종

윤정남, 리유정

로봇기계팔의 간섭모형을 분해하고 비선형성을 보상하며 조종의 속도와 정밀도를 높이는 데서 외란관측기(disturbance observer-DOB)가 널리 리용되고 있다.[1-3] 그러나 2항모형과 바타워스모형과 같은 전통적인 러파기모형에 의하여 설계되는 DOB의 Q-러파기는 차단주파수의 한계로 하여 로바스트성을 높이는 데서 제한을 받는다.

론문에서는 유연관절을 가지는 2토막기계팔의 분해조종에 개선된 로바스트성을 가지는 DOB를 적용하여 조종성능을 높이는 한가지 방법을 제기한다.

1. DOB에 기초한 2토막기계팔의 간섭분해조종체계

2토막기계팔형태는 수직형과 수평형이 있는데 우리는 수직형에 대해서 논의한다.

수직2토막기계팔의 동력학모형은 다음과 같다.

$$J(q)\ddot{q} + B\dot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (1)$$

여기서 $J(q)$, B , $C(q)$, $G(q)$ 는 각각 해당하는 차수의 관성행렬, 대각인 점성마찰결수행렬, 원심력 및 코리올리힘벡토르, 중력힘벡토르이다. 그리고 q 와 τ 는 관절각과 구동모멘트벡토르이다.

한편 DOB는 그림 1에서 보여준바와 같이 식 (1)의 MIMO(다입력다출력)동력학을 개별적인 분해된 SISO(1입력1출력)사보체계로 분해할 수 있다. 즉

$$J_n\ddot{q} + B_n\dot{q} = \tau - \tau_d = \tau^{\text{지령}} + \hat{\tau}_d - \tau_d. \quad (2)$$

여기서 J_n 과 B_n 은 대각인 공칭관성행렬과 대각인 공칭점성마찰결수행렬이다.

식 (2)로부터 만일 구동모멘트 τ 가 지령모멘트 $\tau^{\text{지령}}$ 과 추정외란 $\hat{\tau}_d$ 로 구성되었다면 MIMO체계 (1)은 비간섭화된 SISO체계들로 변환된다는 것을 알 수 있다.

한편 식 (2)에서 추정외란 $\hat{\tau}_d$ 는 DOB에서 추정된다.

관절축의 탄성을 고려하면 식 (1)의 동특성을 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$\begin{cases} J_M\ddot{q}_M + B_M\dot{q}_M = \tau_M - K_f(q_M - q) \\ J(q)\ddot{q} + B\dot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau = K_f(q_M - q) \end{cases} \quad (3)$$

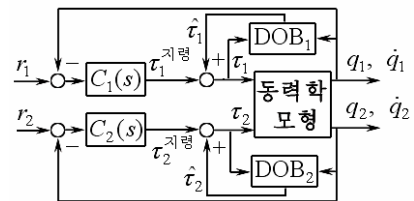


그림 1. DOB에 의한 2토막기계팔의 MIMO동력학분해

여기서 J_M , B_M , K_f 는 각각 전동기관성모멘트, 점성마찰계수, 축의 탄성계수의 대각행렬이며 q_M 와 τ_M 는 각각 전동기축의 회전각과 전동기의 구동모멘트이다.

식 (3)으로부터 만일 팔동력학의 변화속도가 고려되지 않는다면 τ_M 으로부터 q 까지의 전달함수 $G_{q\tau_M}(s)$ 는 다음과 같은 선형모형으로 표현할수 있다.

$$G_{q\tau_M}(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{b_{G0}}{a_{G3}s^3 + a_{G2}s^2 + a_{G1}s + a_{G0}} \quad (4)$$

여기서

$$a_{G3} = J_M J, \quad a_{G2} = J_M B_n + J_M, \quad a_{G1} = K_f(J_M + J) + B_M B, \quad a_{G0} = b_{G0} = K_f(B_M + B)$$

이다.

이때 식 (3)의 기타 비선형항은 DOB에 의하여 보상되어야 할 외란으로 보았다. 한편 식 (3)에서 실제부하관성 J 는 그것의 공칭값 J_n 주위에서 변한다.

만일 식 (2)의 $\tau^{\text{지령}}$ 으로부터 q 까지의 전달함수모형 $G_n(s)$ 를 DOB의 공칭모형으로 리용한다면 로바스트안정성을 위하여 상대모형섭동 $\Delta(s) = (G_{q\tau_M}(s) - G_n(s)) / G_n(s)$ 가 고려되어야 한다. 따라서 기계팔의 운동범위내에서 부하관성 J 의 각이한 값들에 대한 $\Delta(s)$ 의 주파수응답으로부터 그 상한함수로서 다음의 식들을 리용한다.

$$\begin{cases} W_{U1}(s) = \frac{3.5s(s^2 + 50s + 600)}{(s + 0.4)(s^2 + 50s + 6000)} \\ W_{U2}(s) = \frac{2s(s^2 + 60s + 600)}{(s + 0.4)(s^2 + 30s + 6000)} \end{cases} \quad (5)$$

한편 그림 1의 반결합조종기 $C_1(s)$, $C_2(s)$ 는 PD보상기들로 선택하였다.

2. 파라미터변동에 대한 로바스트안정성을 보증하는 외란관측기의 설계

파라미터변동으로 인한 모형섭동에 대한 로바스트안정성은 다음과 같이 표시된다.

$$\|\Delta(s)T(s)\|_{\infty} < 1, \quad T(s) = \frac{L(s) + Q(s)}{1 + L(s)} \quad (6)$$

여기서 $T(s)$ 는 닫힌체계의 상보감도함수이고 $L(s) = P_n(s)C(s)$ 이다.

만일 $|\Delta(j\omega)| < |W_U(j\omega)|$, $\forall \omega$ 라면 ($W_U(s)$ 는 (5)와 같은 상한함수) 로바스트안정성판정에 옷식대신 다음식을 리용할수 있다.

$$|L(j\omega) + Q(j\omega)| < |W_U^{-1}(1 + L(j\omega))|, \quad \forall \omega \quad (7)$$

복소수의 절대값의 성질에 의하여 식 (7)은 다음과 같이 된다.

$$|L(j\omega) + Q(j\omega)| < |L(j\omega)| + |Q(j\omega)|, \quad \forall \omega \quad (8)$$

그러므로 식 (7)은 $Q(s)$ 가 다음의 조건을 만족시키기만 하면 언제나 성립한다.

$$|Q(j\omega)| < |W_U^{-1}(j\omega)(1 + L(j\omega))| - |L(j\omega)| = E(\omega), \quad \forall \omega \quad (9)$$

이제 안정한 무계함수 $W_Q(s)$ 를 $|W_Q^{-1}(j\omega)| < E(\omega)$, $\forall \omega$ 이 만족되도록 선정하자.

이때 다음의 조건이 만족되면 닫긴고리체제는 로바스트안정으로 된다.

$$\|W_Q(s) \cdot T_{DOB}(s)\|_\infty = \|W_Q(s) \cdot Q(s)\|_\infty < 1 \quad (10)$$

한편 안정한 무계함수 $W_C(s)$ 를 다음의 조건이 만족되도록 선택한다.

$$|W_P(j\omega)(1+L(j\omega))^{-1}| \leq |W_C(j\omega)|, \quad \forall \omega \quad (11)$$

결과적으로 DOB의 Q-려과기를 설계하기 위한 평가함수는 다음과 같이 된다.

$$\max_{\gamma, \min_{Q(s)}} \left\| \begin{bmatrix} \gamma W_C(s) \cdot S_{DOB}(s) \\ W_Q(s) \cdot T_{DOB}(s) \end{bmatrix} \right\|_\infty < 1 \quad (12)$$

이 설계문제는 선행연구[4]에서 제기한 방법으로 풀수 있다.

이 경우 DOB를 가지지 않는 닫긴체제는 일반로바스트안정성조건을 만족한다.

그러므로 조종대상의 상대차수 $k=1$, Q-려과기의 내부모형차수 $q=2$, 전체 차수 $n=3$ 을 고려하면 식 (10)을 만족시키는 무계함수는 다음과 같이 선택할수 있다.

$$\begin{cases} W_{Q1}(s) = \frac{1}{8.2}(s+3.0) \\ W_{Q2}(s) = \frac{1}{6.2}(s+2.2) \end{cases} \quad (13)$$

이 두 상한함수는 부등식조건 식 (10)을 만족시킨다는것을 쉽게 확인할수 있으며 따라서 식 (13)은 로바스트안정성을 위한 무계함수로 리용할수 있다.

내부모형차수의 최대값 $q=2$ 를 고려하면 저감도화무계함수는 다음과 같이 간단히 얻어진다.

$$W_{C1}(s) = W_{C2}(s) = \frac{1}{(s+\lambda)^3} \quad (14)$$

여기서 $\lambda > 0$ 은 내부모형차수지표를 만족시키는 충분히 작은 수이다.

이 무계함수들에 대하여 두 관절들에 대한 Q-려과기의 설계문제 (12)는 H_∞ DOB설계방법에 따라서 체계적으로 풀릴수 있다. 그 결과 얻어진 최량로바스트외란관측기는 다음과 같다.

$$\begin{cases} Q_{opt1}(s) = \frac{8.2s^2 + 28.847 \ 6s + 48.273 \ 4}{s^3 + 8.2s^2 + 28.847 \ 6s + 48.273 \ 4} \\ Q_{opt2}(s) = \frac{6.2s^2 + 16.640 \ 8s + 21.241 \ 2}{s^3 + 6.2s^2 + 16.640 \ 8s + 21.241 \ 2} \end{cases} \quad (15)$$

3. 모의실험 및 결과분석

길이가 각각 1m이고 질량중심이 매 토막의 중심에 놓이는 2토막기계팔에 대하여 조종체계를 구성하고 모의실험을 진행하였다.

그림 2에 각각 매 관절에 대하여 시누스외란이 작용하는 경우의 오차응답을 보여주었다.

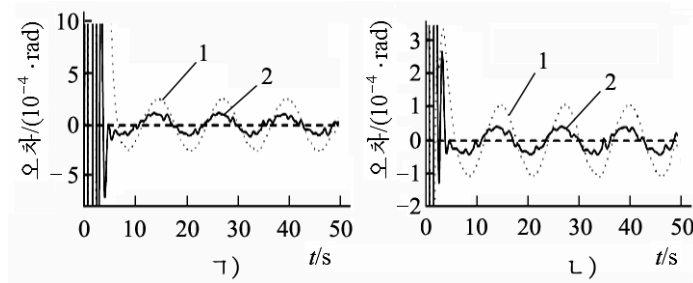


그림 2. 조화외란에 대한 오차응답

ㄱ) 관절 1, ㄴ) 관절 2; 1-선행한 방법, 2-제안한 방법

그림 2로부터 제안된 외란관측기를 리용한 경우의 응답이 2.5배 더 정확하다는것을 알수 있다.

맺 는 말

관절탄성과 같은 모형섭동에 대한 로바스트안정성을 만족시키는 최량외란관측기의 한가지 설계방법을 제기하고 그것을 유연관절을 가지는 2토막기계팔의 조종에 응용하였으며 모의결과를 통하여 설계방법의 효과성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Journal of **Kim Il Sung** University(Natural Science), **3**, 1, 15, Juche103(2014).
- [2] K. Ohnishi, et al.; In Proc. 15th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., **2**, 356, 1989.
- [3] H. X. Li et al.; International Journal of Control, **58**, 3, 537, 1993.
- [4] J. B. Su et al.; Acta Automatica Sinica, **37**, 3, 331, 2011.

주체105(2016)년 6월 5일 원고접수

Robust Decoupling Control of Two Links Manipulator with Flexible Joints using Disturbance Observer

Yun Jong Nam, Ri Yu Jong

We presented a design method of optimal DOB satisfying robust stability against model perturbation such as elasticity of joint shaft and applied it on the control of two links manipulator with flexible joints.

Key words: two links manipulator, disturbance observer, decoupling control