

새로운 외란관측기를 이용한 모터시스템의 강인제어

Robust Control of Motor Systems via a Novel Disturbance Observation Technique

송 성호* 김 점근**

* 한림대학교 전자공학과 (+82-361-240-1515; FAX : +82-361-56-3421; E-mail : ssh@sun.hallym.ac.kr)

** 한림대학교 전자공학과 (+82-361-240-1521; FAX : +82-361-56-3421; E-mail : jkkim@sun.hallym.ac.kr)

Abstract In this paper, a novel disturbance observer is proposed in order to regulate the disturbance in motor systems.. The proposed observer does not require the implementation of ideal derivative of the state since the inverse of the nominal model is not used in the design of the observer. The transfer gain from a disturbance to the output of the disturbance observer is one. So, there is no time-delay in the response due to the dynamics of the observer.

Keywords Motor control, disturbance observer, inverse model.

1. 서론

실제로 존재하는 모든 시스템에는 모델불확실성과 외부잡음이 존재할 수 밖에 없다. 따라서, 이러한 불확실성에 대한 제어시스템의 성능개선을 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 선형 최적제어 이론, LQR, LQG/LTR, H-Infinity 제어이론등 견실제어이론이 지난 20 여년간 제어분야에서 많은 관심을 유발하였고, 또한 많은 제어시스템에 이들 이론이 응용되어 왔다. 그러나, 이들 견실제어 이론들은 복잡한 행렬부동식을 만족하는 양한정행렬의 존재여부가 관건이며, 이를 구하는 알고리즘 또한 매우 복잡하여 실제 시스템에의 적용에는 한계가 있다. 따라서 실제 적용에 있어서는 이러한 이론에 근거한 제어기보다는 간단하면서도 외부잡음에 대한 제어성능이 우수한 외란 관측 기법을 이용하여 외란을 제어하는 것이 바람직하다.

기존의 외란 관측 기법은 제어시스템의 공칭모델(Nominal Model)의 역모델과 필터로서 형성되는 외란관측기법[1-7]과 학습이론에 근거한 외란추정기법이다[8-10]. 학습이론에 근거한 외란추정기법은 그 성능이 우수하나 제어하기 전에 미리 학습과정을 거쳐야 하는 단점이 있고 그 학습알고리즘의 수렴성등이 문제가 된다. 본 논문에서는 이러한 학습이론에 근거한 방법보다는 실시간 외란 추정 기법을 다룬다. 공칭모델과 그 역모델에 근거한 외란관측기법은 이러한 관측기법의 한 방법이다. 공칭모델과 실제 모델과의 차이가 존재하지 않으면, 완전하게 출력이 나타나는 외란의 영향을 없앨 수 있다. 그러나, 이 방법은 역모델을 이용하기 때문에 비최소위상 영점(Nonminimum Phase Zero)을 포함하거나 시스템의 분모차수가 분자보다 많은 일반적인 시스템에 적용하는 경우 많은 제약이 따른다. 즉, 역모델이 불안정 극점을 갖게되어 내부안정도(Internal Stability)를 파괴하거나 미분기를 포함하여 고주파 외란 성분을 증폭하여 제어시스템의 성능을 저하시킬 우려가 있다[3].

따라서 본 연구에서는 이러한 외란을 억제하기 위한 외란 관측기법을 제시하며, 본 논문에서 제시하는 외란관측기법은 모터와 같은 시스템의 외란관측시 역모델을 사용함으로써 발생하는 미분항을 포함하지 않으므로, 역모델에 근거한 기존 외란관측

기법의 단점을 보완한다. 또한, 그 성능을 시뮬레이션을 통하여 입증한다.

2. 새로운 외란관측기의 설계

본 논문에서 제시하는 새로운 외란관측기의 구조는 그림 2와 같다. 그림 2에서보면, 기존의 외란관측기와 마찬가지로 외란관측기를 설계하기 위하여 공칭모델 P_n 을 이용하는 것은 같으나, 기존 외란관측기에서는 공칭모델의 역모델을 이용하였으나 새로운 방법에서는 역모델을 사용하지 않는 점이 기존의 방법과 다르다. 따라서, 기존의 외란관측기에서 갖게 되는 단점들, 즉, 미분기를 필요로 하는 점과 비최소위상 영점을 갖는 시스템에 대한 설계제약들이 새로운 기법에서는 문제가 되지 않는다. 따라서 대부분의 외란관측기는 미분기를 필수적으로 포함해야 하는 단점이 있었으나, 새로운 외란관측기는 이러한 미분기를 포함하지 않으므로써 새로운 외란관측기를 이용하는 제어시스템은 보다 외란에 견실한 제어성능을 얻을 수 있다.

다음과 같은 불확실한 선형시스템을 고려하여 보자.

$$\dot{x}(t) = \{A + \Delta A(t)\}x(t) + \{B + \Delta B(t)\}(u + d) \quad (1)$$

여기서, $x \in R^n$, $u \in R^m$, $d \in R^m$ 은 각각 상태변수, 입력, 외란이며, 각각의 행렬들은 $A, \Delta A \in R^{n \times n}$, $B, \Delta B \in R^{n \times m}$ 이다. 본 논문에서는 다음과 같은 가정을 한다. 이들 가정은 일반적으로 성립하는 가정들이다.

- (가정 1) (A,B) 는 가제어(controllable)하다.
- (가정 2) 상태변수 x 는 측정가능하다.
- (가정 3) $\Delta A, \Delta B$ 는 다음과 같은 정합조건(matching condition)을 만족한다.

$$\begin{aligned}\Delta A(t) &= B \Delta \bar{A}(t) \\ \Delta B(t) &= B \Delta \bar{B}(t)\end{aligned}\quad (2)$$

여기서, $\Delta \bar{A} \in R^{m \times n}$, $\Delta \bar{B} \in R^{m \times m}$ 이다.

(가정 4) 행렬 B의 랭크는 m이다. 즉, $\rho(B) = m$ 이다. 가정 1과 가정 2로부터 다음의 제어입력 $u = Kx + v$ 에 의하여 행렬 $A+BK$ 가 안정행렬이 되는 제어이득 K가 항상 존재하며, 이 경우 식(2)는 다음식을 만족한다.

$$\dot{x} = \bar{A}x + Bv + B\{d + \Delta \bar{A}(t)x + \Delta \bar{B}(t)(Kx + v + d)\} \quad (3)$$

여기서, $\bar{A} = A+BK$ 이다. 식(4)를 다음과 같이 간단히 정의한다.

$$\dot{x}(t) = \bar{A}x(t) + Bv(t) + B\hat{d}(t) \quad (4)$$

여기서 \hat{d} 는 새로운 외란으로 인식하며, 다음을 만족한다.

$$\hat{d} = d + \Delta \bar{A}(t)x + \Delta \bar{B}(t)(Kx + v + d) \quad (5)$$

본 논문에서는 식(5)와 식(6)으로 주어지는 선형시스템의 강인 제어를 위하여 외란 \hat{d} 를 추정하는 외란관측기를 설계한다. 본 논문에서 제시하는 새로운 외란 관측기법은 그림 1에 나타내었다.

정리 1.

(가정 1)-(가정 4)가 만족되고,

$$\bar{x}(0) = x(0) \quad (6)$$

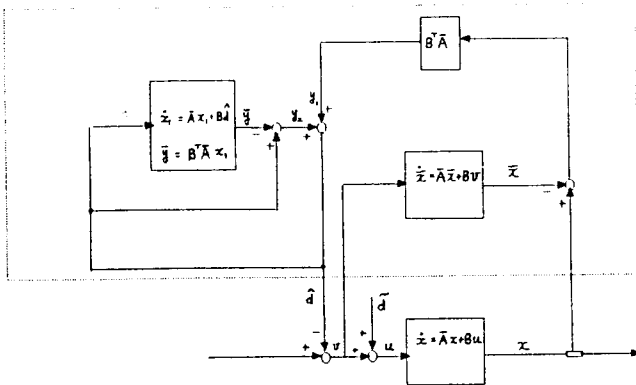


그림 1. 새로운 외란관측기의 블록도

을 만족한다고 가정하자. 그러면, 그림 2에서 제시한 외란관측기의 출력 \hat{d} 는 다음을 만족한다.

$$\hat{d}(t) = -\tilde{d}(t), \quad \forall t > 0. \quad (7)$$

정리 1의 증명을 위하여 행렬의 랭크와 관련된 다음의 보조정리 1을 제시한다.

보조정리 1 [11, p.31] : Sylvester 부등식

다음의 두 행렬 $U \in R^{m \times n}$, $V \in R^{n \times q}$ 에 대하여 다음과 같은 부등식이 성립한다.

$$\rho(U) + \rho(V) - n \leq \rho(UV) \leq \min(\rho(U), \rho(V))$$

이제, 정리 1을 증명한다.

정리 1의 증명

그림 1에서 보면, 외란관측기의 출력 \hat{d} 는 다음을 만족한다.

$$\hat{d}(t) = y_1(t) + y_2(t) \quad (8)$$

여기서,

$$\begin{aligned}y_1(t) &= B^T \bar{A} (x(t) - \bar{x}(t)) \\ y_2(t) &= B^T \bar{A} x_1(t) + \hat{d}(t)\end{aligned}\quad (9)$$

이며, \bar{x} , x_1 은 다음의 미분방정식을 만족한다.

$$\begin{aligned}\dot{\bar{x}} &= \bar{A} \bar{x} + Bv \\ \dot{x}_1 &= \bar{A} x_1 + B\hat{d}, \quad x_1(0) = 0.\end{aligned}\quad (10)$$

식(9)와 식(10)로부터 $y_1(t)$, $y_2(t)$ 의 라플라스 변환은

$$\begin{aligned}Y_1(s) &= B^T \bar{A} (sI_n - \bar{A})^{-1} B d(s) \\ Y_2(s) &= \{I_m + B^T \bar{A} (sI_n - \bar{A})^{-1} B\} \hat{d}(s).\end{aligned}\quad (11)$$

이고, 식(8)와 식(11)으로부터 다음식이 만족된다.

$$B^T \bar{A} (sI_n - \bar{A})^{-1} B \hat{d}(s) = -B^T \bar{A} (sI_n - \bar{A})^{-1} B d(s) \quad (12)$$

이 성립한다. 그런데, 가정 4와 행렬 \bar{A} 의 안정성으로부터

$$\rho(B) = m, \quad \rho(\bar{A}) = n, \quad \rho(sI - \bar{A}) = n$$

이 성립하고, 보조정리 1로부터

표 1. 브러쉬없는 직류모터의 매개변수

매개 변수	값
토크상수	0.26 Nm/A
관성질량	0.45 kgm ²
감쇄계수	0.07 N sec

임을 알 수 있다. 따라서, $B^T \overline{A} (sI_n - \overline{A})^{-1} B \in R^{m \times m}$ 이므로 행렬 $B^T \overline{A} (sI_n - \overline{A})^{-1} B$ 은 비특이(nonsingular) 행렬이 된다. 그러므로, 식(12)로부터 식(7)이 성립한다. ■

참조 1 : 그림 1 에서 제시한 새로운 외란관측기는 상태변수의 미분을 포함하지 않으면서도, 정확하게 외란을 추정한다. 즉, 식(7)에서 보면 알 수 있듯이 외란에서 외란관측기의 출력까지의 전달함수가 -1 이 되어 정확하게 외란을 없앨 수 있다. ■

3. 모터시스템에의 적용

본 논문에서 모의실험을 위해 다음과 같은 브러쉬없는 직류모터의 동역학 모델을 고려한다.

$$J(\dot{\theta}) = -B(\dot{\theta}) + K(\theta)(T + T_L) \quad (13)$$

여기서 $\theta \in R$ 은 시스템의 회전각, J, B, K 는 각각 기계시스템의 관성질량, 감쇄계수, 토크상수이고, T, T_L 은 모터 시스템에 작용하는 입력 토크와 부하토크이다. 일반적으로 관성질량은 부하토크에 따라 변화할 수 있으며, 감쇄계수는 마찰저항에 따라서 변화할 수 있다.

식(13)에서 J, B, K 의 정상상태 값인 J_n, B_n, K_n 은 표 1 과 같다. 따라서 식(13)은 이 값에 의하여 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} J_n \dot{\theta} &= -B_n \dot{\theta} + K_n(T + \tilde{T}_L) \\ \tilde{T}_L &= \frac{1}{K_n} \{T_L - \Delta J \dot{\theta} \\ &\quad - \Delta B \dot{\theta} + \Delta K(T + T_L)\} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서

$$\Delta J = J - J_n, \Delta B = B - B_n, \Delta K = K - K_n$$

이다. 따라서, \tilde{T}_L 은 새로운 외부잡음으로 인식된다. 따라서, 식(14)은 다음의 행렬식을 이용하면, 식(4)로 변환된다.

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, d = \tilde{T}_L \\ u &= T = Kx = -k_1 \theta - k_2 \dot{\theta} + v \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B_n}{J_n} \end{bmatrix}, \\ \overline{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_1 & -k_2 - \frac{B_n}{J_n} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_n}{J_n} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

본 시뮬레이션에서는 $k_1 = 1000000, k_2 = 2000$ 으로 하였고, $T_L = 0.2 \sin(1000t) + 0.11 \sin(2500t)$ 로 하였다. 또한, 모델 매개변수의 불확실성은 표 1 에 주어진 정상상태 값에 대하여 10 % 오차가 존재한다고 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다.

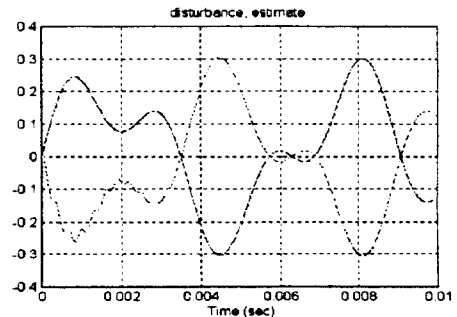
시뮬레이션 결과는 부록에 그림 2-그림 4 에 나타내었다. 그림 2 은 외란과 본 논문에서 제시한 외란관측기에 의한 외란 추정값을 나타내고, 그림 3 는 외란이 존재하지 않을 경우의 모터 시스템의 위치응답을 나타내고 있으며, 그림 3 와 그림 4 는 외란이 존재하는 경우 모터시스템의 위치와 속도응답을 나타낸다. 그림 2 에서 보면 알 수 있듯이 외란관측기의 전달함수 이득이 -1 로서 전혀 시간 지연이 없이 외란을 추정함을 알 수 있고, 그림 4 의 (a) 의 외란관측기를 사용하여 제어한 경우의 응답특성이 그림 3 의 외란이 존재하지 않는 경우의 응답과 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 반면, 그림 3 의 (b) 경우에는 외란에 의한 영향을 보정하지 않은 경우로서 그 응답이 시간이 흐름에 따라 발산하여 외란이 시스템을 불안정하게 함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서 브러쉬없는 직류모터의 속도제어를 위하여 제시한 외란관측기는 기존의 외란관측기법에서 요구하는 속도미분항을 포함하지 않으므로, 실제 구현에 있어서 많은 장점을 갖는다. 즉, 이상적인 미분기의 구현을 요구하지 않으며, 속도 센서에 내재한 센서잡음을 미분함으로 생기는 고주파 증폭 문제도 발생하지 않는다. 특히, 작은 외란이 존재하는 경우의 저속 제어시에는 외란의 영향을 무시할 수 없으며 그 성능이 크게 저하되는데, 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 외란관측기를 사용한 경우에는 그 성능이 우수함을 알 수 있다.

본 논문에서 제시한 외란 관측기는 단순히 일차 필터 형태의 전달함수와 덧셈기등으로 구현할 수 있으며, 외란에서부터 외란관측기 출력까지의 전달함수 이득이 -1 이 되어 외란관측기 동역학에 의한 시간지연이 없이 정확한 외란 추정이 가능하다.

부 록



— : 외란
- - - : 외란관측기 출력

그림 3. 외란과 외란관측기 출력

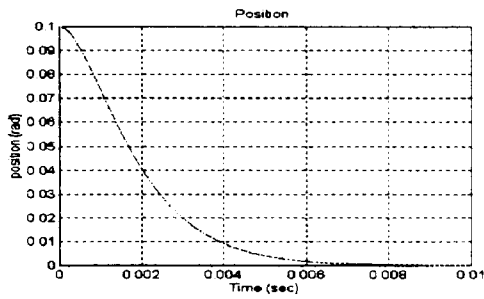
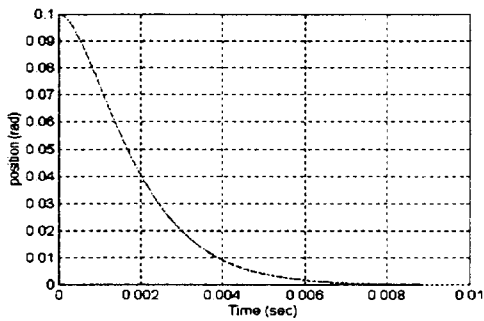
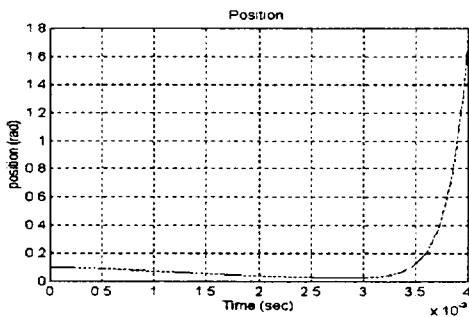


그림 4. 위치응답특성 (외란이 존재하지않는 경우)



(a) 외란이 존재하는 경우
(외란관측기를 이용한 경우)



(b) 외란이 존재하는 경우
(외란관측기에 의한 보정이 없는 경우)

그림 5. 위치 응답 특성

참고 문헌

[1] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics," *Transactions on Japanese Society of Electrical Engineers*, Vol.107-D, pp.83-86, 1987.
 [2] T. Umeno, T. Kaneko, and Y. Hori, "Robust servo system design with two-degrees of freedom and its application to novel motion control of robot manipulators," *IEEE Transactions on Industrial*

Electronics, Vol.40, No.5, pp.473-485, Oct. 1993.
 [3] Y. J. Choi, W. K. Chung, and Y. Youm, "Disturbance observer in H_∞ frameworks," *IEEE IECON*, pp.1394-1400, 1996.
 [4] A. Alexander, *Uncertain models and robust control*, Springer-Verlag, New York, 1991.
 [5] K. Ohnishi and K. Miyachi, "Adaptive DC servo drive control taking force disturbance suppression into account," *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol.24 No.1, 1988.
 [6] S. Hara, Y. Yamamoto, T. Omata, and M. Nagano, "Repetitive control systems : a new type servo system for periodic exogenous systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.33, pp.659-668, 1988.
 [7] C. H. Yim, J. H. Kang, S. H. Song, and D. I. Kim, "New feedforward control of brushless DC motors using a novel disturbance suppressor," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp.1910-1916, Oct. 1995.
 [8] S. Arimoto, S. Kawamura, F. Miyazaki, and S. Tamaki, "Learning control theory for dynamical systems," *Proceedings of IEEE 24th CDC*, Vol.3, pp.1375-1380, 1985.
 [9] S. Kawamura, F. Miyazaki, and S. Arimoto, "Realization of robot motion based on a learning control," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.18, pp.126-134, 1988.
 [10] W. Messner, R. Horowitz, W. W. Kao, and M. Boals, "A new adaptive learning rule," *IEEE Automatic Control*, Vol.36, pp.188-197, 1991.
 [11] C. T. Chen, *Linear system theory and design*, Holt, Rinehart & Winston, 1984.