

파라미터 추정과 슬라이딩 모드를 이용한 상태관측기 구성에 관한 연구

박 승 규, *김 태 원, 박 두 환, 안 호 균
 창원대학교 전기공학과, *창원기능대학

A study on the sliding observer with parameter estimation

Seung Kyu Park, *Tae Won Kim, Doo Hwan Park, Ho Kyun Ahn
 Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University

Abstract - In this paper, an observer with novel sliding mode is proposed. The sliding mode is designed by defining a extended state whose dynamic is determined from the output error. It has the advantage of giving the desired dynamics for the error system. To get the exact system parameter for an observer, the RLS algorithm is used.

1. 서 론

상태 관측기를 구성하는데 있어서 관측하고자 하는 시스템보다 오차시스템이 더 빠른 동특성을 가지고 있어야 한다. 오차시스템의 동특성은 상태관측기의 이득을 이용하여 결정해 줄 수 있다. 오차 방정식의 동특성은 빠를 수록 추정상태가 실제상태에 빨리 수렴하게 된다. 그러나 이 경우 상태 추정기의 이득은 커질 수 밖에 없으나 상태 추정기의 이득은 출력오차에 곱해지게 되므로 출력 오차에 노이즈가 포함되어 있는 경우는 노이즈의 영향을 크게 만드는 결과를 낳기 때문에 무한정 크게 할 수는 없다. 슬라이딩 모드를 이용한 관측기는 노이즈의 영향을 받지 않도록 하면서 오차방정식의 동특성을 빠르게 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 기존의 슬라이딩 모드 상태관측기는 초기 추정오차가 슬라이딩 평면에 도달하기까지의 출력오차의 동특성이 보장되어 있지 못하며 슬라이딩 평면에 도착해서도 오차의 동특성이 출력방정식에 의해 결정되므로 설계자의 결정사항이 아니다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 출력오차의 동특성을 부여할 수 있는 방법을 제시하였으며 실제 상태관측기를 구함에 있어서의 어려운 파라미터의 정확성을 해결하기 위하여 RLS(Recursive Least Square)를 도입하였다. 모터제동의 제어에 있어서 데이터가 제한되어 있는 상황에서 유용한 데이터를 확보하여 사용하는 예도 제시하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2.1절에서는 기존의 슬라이딩 모드 상태관측기의 개념과 제안되는 상태관측기의 핵심적인 내용에 대해서 설명하고 2.2절에서는 추정 알고리즘을 이용한 파라미터의 추정에 대해서 그리고 2.3절에서는 시뮬레이션 결과에 대해서 설명한다. 끝으로 3장에서는 본 논문의 결론에 대해 서술한다.

2. 본 론

2.1 슬라이딩 모드를 이용한 상태관측기

다음과 같은 계통을 고려하자.

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

여기서 $h(t)$ 는 파라미터 불확실성과 외란을 고려한 불확실성으로 다음 조건을 만족한다.

$$\|h(t)\| < \rho \quad (2)$$

기존의 슬라이딩 모드를 이용한 상태관측기의 형태를 살펴보면 다음과 같다.

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + K\text{sign}(e_1) \quad (3)$$

여기서 e_1 은 출력오차이다.

기존 슬라이딩모드 상태관측기의 기본개념은 sign항을 이용해서 $e_1 \dot{e}_1 < 0$ 조건을 만족하도록 함으로써 오차가 영으로 수렴하도록 하는 것이다. 이 접근방식은 외란에 대한 둔감한 특성을 가지지만 오차의 동특성이 한가지 밖에 보장받을 수 없다는 문제점이 있다. 오차가 영으로 수렴하는 것은 보장될지라도 원하는 동특성이 부여될 수 없다는 것이다.

그러므로 본 연구에서는 다음과 같은 상태관측기를 구성한다.

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + K\text{sign}(s) + u_e \quad (4)$$

여기서 $s = e_1 + e_3$ 여기서 e_1 은 출력오차이다. e_3 는 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{e}_3(t) = ae_1(t) \quad (5)$$

$s = 0$ 를 만족시키면 $\dot{s} = 0$ 를 만족하므로 오차의 동특성은 다음과 같이 결정된다.

$$\dot{e}_1 + \dot{e}_3 = \dot{e}_1 + ae_1 = C \dot{e}(t) + Ca e(t) = 0 \quad (6)$$

K 는 다음 조건이 만족되도록 결정된다.

$$s \dot{s} < 0 \quad (7)$$

s 의 부호에 따라서 \dot{s} 값이 영보다 크게 혹은 작게 결정되어야 하므로 다음과 같은 과정이 필요하다.

\dot{s} 를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{e}_1 + \dot{e}_3 = C \dot{e} + ae_1 \\ &= C(Ae(t) - u_n(t) - u_e(t) + h(t)) + ae_1 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $u_n(t)$ 과 $u_e(t)$ 를 다음과 결정한다.

$$u_n = K\text{sign}(s), Cu_e = ae_1(t) \quad (9)$$

이 경우 다음 식이 성립하게 된다.

$$\dot{s} = CAe(t) - CK\text{sign}(s) + h(t) \quad (10)$$

$e(t)$ 에 대한 제약조건은 다음과 같다.

$$\|CAe(t)\| < \sigma \quad (11)$$

그러므로 K 값 다음과 같이 결정하면 식(7) 조건을 만족하게 되어 $\lim_{t \rightarrow \infty} s = 0$ 가 되어 출력오차의 동특성이 식(6)를 만족하게 된다.

$$\rho + \sigma < CK \quad (12)$$

초기시간에 $s=0$ 조건을 만족하지 않는 경우에도 s 값이 결정되는 즉시 $s=0$ 조건을 만족시킬 수 있으므로 출력오차의 동특성이 거의 모든 시간에 걸쳐 슬라이딩 평면의 동특성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

2.2 파라미터 추정 알고리즘 및 제어 시뮬레이션

이 장에서는 전달함수를 추정하기 위한 기초작업과 추정 알고리즘인 RLS에 대해서 설명하고 주어진 실험데이터를 근거로 전달함수를 추정하기 위한 데이터 확보 프로그램 추정된 전달함수의 타당성을 확인하는 Matlab/Simulink 프로그램과 추정된 시스템을 이용한 전체 제어시스템 시뮬레이션에 대해서 설명한다.

2.2.1 파라미터 추정대상과 추정 알고리즘

본 논문에서 추정하고자 하는 시스템의 구성은 다음과 같다.

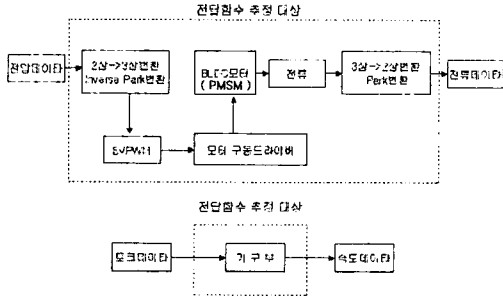


그림 1 추정 대상 시스템

위 그림에서 추정해야 할 것은 전압-전류간의 전달함수, 전류(토크)-속도간의 전달함수이다. 모터에 대한 전류와 속도에 관한 상태방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d i_a}{dt} = -\frac{R_s}{L_a} i_a - \omega i_d - \frac{K_e}{L_a} \omega + \frac{1}{L_a} V_a \quad (13)$$

$$\frac{d i_d}{dt} = \omega i_a - \frac{R_s}{L_a} i_d + \frac{1}{L_a} V_d \quad (14)$$

$$\dot{\omega}_m = \frac{K_t}{J_m} i_q - \frac{B_m}{J_m} \omega_m \quad (15)$$

여기서 ω_m 모터 속도이다. 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\omega}_m = \theta_1 i_q - \theta_2 \omega_m \quad (16)$$

$$\text{여기서 } \theta_1 = \frac{K_t}{J_m}, \theta_2 = \frac{B_m}{J_m}$$

위 식에서 전압-전류간의 전달함수는 d축 전류가 0으로

제어가 된다는 가정하에서 직류모터 모델과 같은 형태의 2차 전달함수로 추정되며 전류-속도간 전달함수는 1차 전달함수로 추정이 된다. 모터-기구부가 연결된 형태의 속도방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\omega} = \frac{K_t}{(J_m + J_{me})} i_a - \frac{(B_m + B_{me})}{(J_m + J_{me})} \omega - \frac{1}{J_{me}} T_L \quad (17)$$

위 식 (17)에서 $\frac{K_t}{(J_m + J_{me})} = \theta_a, \frac{(B_m + B_{me})}{(J_m + J_{me})} = \theta_b, \frac{1}{J_{me}} = \theta_c$ 로 하면 식 (18)과 같다.

$$\dot{\omega} = \theta_a i_q + \theta_b \omega + \theta_c T_L \quad (18)$$

모터자체만의 전압-전류 전달함수와 전류-속도 전달함수를 추정함으로써 모터의 파라미터를 구할 수 있으며 모터-기구부의 전류-속도 전달함수를 추정함으로써 다음과 같은 관계식에 의해 기구부의 파라미터를 구할 수 있다.

$$J_{me} = \frac{(\theta_a - \theta_1)}{K_t}, B_{me} = \theta_b (J_m + J_{me}) - \theta_2 J_m$$

실제시스템의 제어에 있어서 디지털제어를 실행하고 있으며 실험 데이터가 이산치 데이터이기 때문에 이산치 전달함수를 구해야하므로 위의 연속치 계통을 다음과 같이 이산치 형태로 표현해야만 한다.

$$\omega_m(k+1) = \theta_{a1} i_q(k) - \theta_{a2} \omega_m(k) \quad (19)$$

$$\omega(k+1) = \theta_{da} i_q(k) - \theta_{db} \omega(k) + \theta_{dc} T_L \quad (20)$$

위의 전달함수 표현에서 실제 계통과 같은 입력을 인가했을 때 동일한 출력을 얻을 수 있도록 파라미터를 결정해 주어야 하며 본 논문에서의 파라미터 추정은 RLS 알고리즘을 사용한다. 위의 식들을 RLS알고리즘을 사용할 수 있도록 다음과 같이 표현한다.

$$\omega(k+1) = \theta_{da} i_q(k) - \theta_{db} \omega(k) + \theta_{dc} T_L = \theta \varphi \quad (21)$$

위에서 파라미터 벡터 θ 는 미지의 값이고 회귀벡터 φ 는 실험계통으로부터 확보할 수 있는 데이터이다. 본 연구에서는 파라미터를 추정하는데 있어서 가장 일반적으로 사용되는 알고리즘인 RLS 알고리즘을 사용한다.

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t)(y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)) \quad (22)$$

$$K(t) = P(t)\varphi(t) = P(t-1)\varphi(t)(I + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t))^{-1} \quad (23)$$

$$P(t) = P(t-1) - P(t-1)\varphi(t)(I + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t))^{-1}\varphi^T(t)P(t-1) = (I - K(t)\varphi^T(t))P(t-1) \quad (24)$$

여기서, $K(t) = P(t)\varphi(t), \varepsilon(t) = y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)$

2.2.2 모터의 입출력 데이터 확보

2.2절에서 설명된 RLS를 이용하여 모터-기구부의 전달함수 파라미터를 추정하기 위해서는 입출력 데이터의 확보가 필요하다. 즉 전압데이터와 전류 및 속도데이터가 필요하다. 실험과정에서 확보된 데이터는 전류와 속도데이터이고 실제 실험에서 전압데이터는 제어기에 의해서 계산되어진 값이기 때문에 다음과 같은 프로그램에 의해서 전압데이터를 계산하였다.

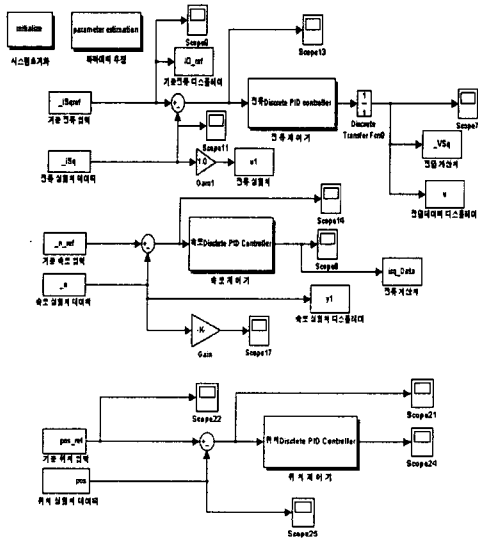


그림2 모터 및 기구부 입출력데이터 확보
Simulink프로그램

위의 프로그램에서 세 개의 입력 블록은 다음의 m-파일에 저장된 실험데이터를 불러올 수 있도록 한 것이고 한 개는 파라미터 추정 확인프로그램을 불러오기 위한 것이다.

2.3 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 출력에 포함되어 있는 노이즈의 영향 때문에 상태추정기 이득을 오차방정식의 고유치가 -2와 -1에 있도록 결정할 수 밖에 없는 상황에서 기존의 상태관측기와 본 연구에서 제안한 상태관측기에 대해서 시뮬레이션을 실행하였다.

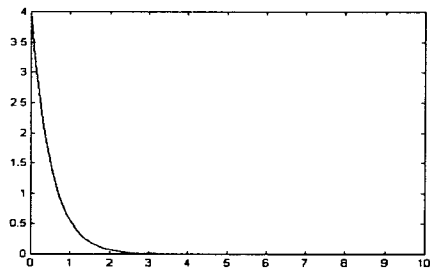


그림 3. 기존의 상태 추정기의 추정오차

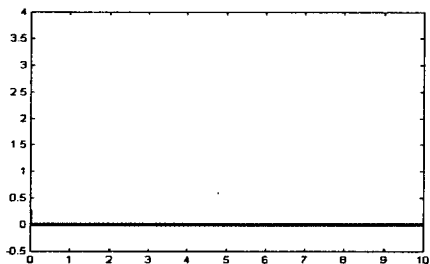


그림 4. 제안된 상태추정기의 추정오차

위의 그림들에서 기존의 상태추정기의 출력오차의 동특성을 설계자가 임의로 정해줄 수 없으므로 인하여 영

로의 수렴성이 좋지 않음을 보여주고 있고 제안된 상태 추정기는 출력오차의 동특성을 설계자가 결정해 줄 수 있음으로 인해 수렴성이 상당히 개선될 수 있음을 보여 주고 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 슬라이딩 모드를 이용한 상태관측기의 구성에 있어서 출력오차의 동특성을 설계자가 결정해 줄 수 있는 방안을 제안하였다. 실제 모터계통에 있어서 실험적으로 얻을 수 있는 데이터가 한정되어 있는 경우에 데이터 확보를 통해 RLS 알고리즘을 이용한 유용성을 높이는 동시에 상태관측기의 구성의 용이성도 높이는 결과를 얻었다.

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작 기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

(참 고 문 헌)

- [1].HUNG, J.Y., GAO, W., HUNG, J.C. : 'Variable structure control : A survey', IEEE Trans, on Industrial Electronics, Vol. 40, No.1 1993, pp.2-22
- [2].UTKIN, V.I. : 'Sliding modes and their application in variable structure systems' (Moscow, Mir Publishers, (1978)
- [3].ITKIS,U. : 'Control systems of variable structure' (JOHNWILLY & SONS, New York,1976)
- [4].S.Sangwongwanich, S. Doki, T.Yonemoto, S. OKuma : 'Adaptive Sliding Observers for Direct Field-Oriented Control of Induction Motor'(IEEE,1990)