

로봇모터 제어를 위한 슬라이딩형 퍼지관측기 설계

김상훈[○], 김정현^{**}

[○](주)이노브커뮤니케이션

^{**}건국대학교 전기공학과

e-mail: conman28@hanmail.net, hynie78@konkuk.ac.kr

Design of a Sliding Type Fuzzy Observer for Robot Motor Control

Sang-Hoon Kim[○], Jung-Hyun Kim^{**}

[○]Inorve Communication Co.,Ltd

^{**}Dept. of Electrical Engineering, Kon-kuk University

● 요약 ●

로봇모터제어에 사용되는 서보전동기의 센서리스 운전에 대한 초기의 연구에서는 전동기의 전압과 전류를 측정하여 전동기 모델로부터 속도를 연산하는 방식을 취해왔으나, 근래에는 현대제어 이론 중 관측기 이론을 적용하여 속도 추정 및 센서리스 운전을 위한 다양한 연구가 시도되고 있다.

본 논문에서 설계한 슬라이딩형 퍼지 관측기의 속도추정 성능을 검증하기 위해 먼저 슬라이딩 관측기를 이용하여 전기자 전류의 도함수를 추정하고 속도관측기인 Luenberger 관측기의 이득을 퍼지 제어 기법을 이용하여 관측기 이득을 최적 값으로 선정하고 이것을 이용하여 직류 서보 전동기의 속도제어에 적용하였다.

키워드: 서보모터(servo motor), 퍼지(fuzzy), 관측기(observer), 슬라이딩(sliding)

1. 서론

로봇모터에 가장 많이 사용되는 서보전동기의 정확한 제어를 위한 센서리스 운전에 대한 초기의 연구에서는 전동기의 전압과 전류를 측정하여 전동기 모델로부터 속도를 연산하는 방식을 취해왔으나, 근래에는 현대제어 이론 중 관측기 이론을 적용하여 속도 추정 및 센서리스 운전을 위한 다양한 연구가 시도되고 있다[1][2].

센서리스 운전을 위해 센서를 대체할 관측기는 제어대상의 수학적 모델을 대상으로 하여 설계되므로 실제 제어시스템에 존재하는 다양한 비선형성과 불확실성이 고려되지 않거나 제어대상에 대한 모델링 오차가 존재할 경우에 정확하게 시스템의 상태를 추정할 수 없게 되고 본래 시스템 상태 값과의 오차가 필연적으로 발생한다[3][4].

센서리스 운전을 위한 대표적인 관측기로는 Luenberger 관측기와 슬라이딩 관측기가 있다. 첫째, Luenberger 관측기는 1964년 D.G. Luenberger에 의해 제안된 이후에 많은 연구가 진행되고 있으며 상태를 관측하기 위해 시스템의 동특성이나 내부파라미터를 알아야 한다는 문제 및 관측기 이득에 따라 시스템의 특성이 달라지는 문제점을 가지고 있다. 이러한 Luenberger 관측기의 문제점을 해결하기 위해서는 불확실한 시스템 동특성에 대해 강인한 구조를 갖는 관측기를 설계하거나, 별도의 파라미터 적응규칙이 필요하게 된다[5][6][7].

둘째, 슬라이딩 제어이론을 이용한 슬라이딩 관측기는 제어이론 특성상 시스템의 매개변수 변동 및 측정 잡음 등에 강인하고, 구현이 용이하기 때문에 쉽게 적용할 수 있는 장점을 가진다. 그러나 시스템 동특성에 대한 정보를 필요로 하는 단점이 있다.

이러한 여러 관측기들의 문제점을 극복하기 위하여 현재 지능형 제어기법이 다양하게 도입되고 있으며, 그 중 대표적인 방식이 퍼지제어 기법이다.

따라서 본 논문에서는 적응 제어 기법 중 퍼지 제어 기법을 이용하여 관측기의 이득 값을 적절히 선정하였으며, 기존의 방식에 비해 과도특성이 우수하고 구현이 용이한 퍼지 슬라이딩 관측기를 설계하였다. 또한, 본 논문에서 설계한 퍼지 슬라이딩 관측기를 이용하여 직류 서보 전동기에서 측정된 전기자 전류 값으로 전기자 전류의 도함수를 직접 추정한다. 또 이 추정 값으로 회전자속도를 추정하고 추정된 속도를 이용하여 속도제어를 수행하는 새로운 방식의 속도 센서 리스 제어 방식을 제안하였다.

본 논문에서 설계한 퍼지 슬라이딩 관측기의 속도추정 성능을 검증하기 위해 먼저 슬라이딩 관측기를 이용하여 전기자 전류의 도함수를 추정하고 속도관측기인 Luenberger 관측기의 이득을 퍼지 제어 기법을 이용하여 관측기 이득을 최적 값으로 선정하고 이것을 이용하여 직류 서보 전동기의 속도제어에 적용하였다. 또한, 설계한 퍼지 슬라이딩 관측기를 200[W] 직류서보전동기에 적용하여 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 Luenberger 관측기

를 이용한 경우 및 퍼지 슬라이딩 관측기를 이용하여 속도를 추정
한 경우를 부하가 없는 경우와 부하가 있는 경우로 나누어서 비교
실험하여 본 논문에서 설계한 퍼지-슬라이딩 관측기의 타당성을
입증하였다.

II. 관측기 설계

1. 슬라이딩 모드 관측기

제어 대상이 다입력 다출력 선형 제어 시스템이고 행렬 (A,C)
가 가관측성을 갖는 상태 방정식은 식 (2.1),(2.2)과 같이 표현될
수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + \Delta f \quad (2.1)$$

$$y = Cx \quad (2.2)$$

Δf 는 제어대상의 매개변수 변동분이나 외란을 표시한다.

이러한 시스템에서 슬라이딩 평면을 $s = \hat{y} - y = 0$ 으로 하
는 슬라이딩 모드 관측기를 구성하면 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K \cdot \text{sgn}(\hat{y} - y) \quad (2.3)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (2.4)$$

$\text{sgn}(\)$ 함수는 슬라이딩 영역에서 무한 이득을 갖는
OP-amp로 생각할 수 있다. 좀 더 구체적으로 표현하면 다음과 같
은 입출력 관계를 갖는 시스템으로 표현할 수 있다.

$$y = \text{sgn}(x) \quad (2.5)$$

$$S_g(x_j) = \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 0, & x = 0 \\ +1, & x \leq 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

여기서, $\text{sgn}(\)$ 의 이득, G 를 고려해 보면 다음과 같다.

$$G = \frac{\text{sgn}(x)}{x} = \frac{1}{|x|} \quad (2.7)$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} G = \infty \quad (2.8)$$

따라서 시스템이 슬라이딩 모드 영역에 존재한다면 이 시스템
은 매개변수의 변동이나 외란에 강하다는 것을 알 수 있다.

한편, 다른 시각에서는 이러한 $\text{sgn}(\)$ 를 뱅뱅(bang-gang)함
수라고도 하며 뱅뱅 제어기는 시스템에 최대의 입력을 가하면서
최소의 시간에 목표점에 도달하는 제어기로 알려져 있다.

식 (2.1),(2.2)는 가관측 시스템이므로 다음과 같이 표현 가능한
것으로 가정한다.

$$\dot{x}_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + B_1u + \Delta f_1 \quad (2.9)$$

$$\dot{x}_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + B_2u + \Delta f_2 \quad (2.10)$$

$$y = Cx = [1 \quad 0]x = x_1 \quad (2.11)$$

이 때 앞에서 서술했던 슬라이딩 모드 관측기는 다음과 같이
표현된다.

$$\dot{\hat{x}}_1 = A_{11}\hat{x}_1 + A_{12}\hat{x}_2 + B_1u + K_1 \cdot \text{sgn}(\hat{y} - y)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = A_{21}\hat{x}_1 + A_{22}\hat{x}_2 + B_2u + K_2 \cdot \text{sgn}(\hat{y} - y)$$

$$\hat{y} = \hat{x}_1 \quad (2.12)$$

식 (2.9) ~ 식 (2.12)로 부터 오차 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{e}_1 = A_{11}e_1 + A_{12}e_2 - \Delta f_1 + K_1 \cdot \text{sgn}(\hat{y} - y)$$

$$\dot{e}_2 = A_{21}e_1 + A_{22}e_2 - \Delta f_2 + K_2 \cdot \text{sgn}(\hat{y} - y) \quad (2.13)$$

$$\text{단, } e_1 = \hat{x}_1 - x_1, \quad e_2 = \hat{x}_2 - x_2$$

슬라이딩 모드를 발생시키기 위한 조건은 $s\dot{s} < 0$ 이지만, 이것
은 $\text{sgn}(\)$ 함수의 이득인 K 를 충분히 크게 함으로써 만족되
어지므로 이상적이 슬라이딩 모드 제어에서 이득 K 는 무한대 값
을 갖는다.

슬라이딩 모드 제어에서의 상태궤적은 시스템의 해의 궤적을
나타내고 슬라이딩 모드 관측기의 궤적은 추정오차 해의 궤적을
나타내며 슬라이딩 관측기의 구조는 그림 2.1과 같다.

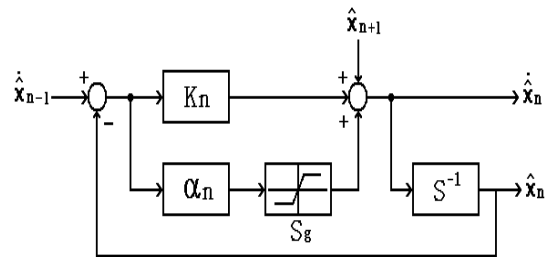


그림 2.1 슬라이딩 관측기 구조

Fig 2.1 Structure of sliding observer

슬라이딩 모드 관측기의 추정오차는 슬라이딩 면에 도달하기
전까지 동일차원 관측기의 해의 궤적을 만족하고 슬라이딩 면에
도달하면 최소차원 관측기의 특성을 갖고 슬라이딩 면에 구속된
다. 이상적인 슬라이딩 모드 관측기는 동일차원 관측기와 최소차
원 관측기의 특성을 동시에 갖고 있으므로 슬라이딩 모드 관측기
의 추정오차 궤적은 매개변수 변동이 슬라이딩 면 밖의 영역에서

발생하더라도 슬라이딩 면으로 구속되도록 한다.

2. 슬라이딩형 퍼지 관측기

본 논문에서는 Luenberger 관측기의 문제점인 관측기 이득 값을 적절히 선정하기 위하여 관측기 이득을 적절히 조절할 수 있는 슬라이딩형 퍼지 관측기를 설계하고 이것을 직류 서보 전동기의 속도 센서리스 제어에 적용하려 한다.

따라서, 슬라이딩형 퍼지 관측기의 기본 구조는 직류 서보 전동기의 속도 센서리스제어에 적용하기 위하여 전기자 전류의 도함수를 추정하는 슬라이딩 관측기 부분과 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 이용하여 Luenberger 관측기의 관측기 이득 L을 설정하는 퍼지 제어 부분과 전동기 속도 추정을 위한 Luenberger 관측기의 세 가지 부분으로 구성된다.

본 논문에서는 직류 서보 전동기의 속도 센서리스 제어를 수행하기 위해서 직류 서보 전동기의 전기적 동특성을 이용하여 속도를 관측하며 그림 2.4와 같다.

그러나, 직류 서보 전동기의 전기적 동특성만으로 속도를 관측한다는 것은 문제점이 있기 때문에 직접 속도를 추정하는 것은 어렵게 된다.

직류 서보 전동기의 전기적 동특성은 식(2.14)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + k_b \omega \quad (2.14)$$

속도를 추정하기 위해서 식(2.14)을 식(2.15)로 나타낼 수 있다.

$$\hat{\omega} = \frac{1}{k_b} [e_a(t) - R_a i_a(t) - L_a \frac{di_a(t)}{dt}] \quad (2.15)$$

그러나, 식(2.15)에서 전류 도함수($\frac{di_a(t)}{dt}$)을 알 수 없기 때문에 속도를 직접 추정하는 것은 어려우며, 속도를 추정하기 위해 전류 도함수를 추정해야 한다. 전류 도함수 추정 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\hat{i}_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} [e_a(t) - R_a i_a(t) - k_b \omega] + L (i_a - \hat{i}_a) \quad (2.16)$$

여기서, L은 Luenberger 관측기 이득상수

본 논문에서 제안한 직류 서보 전동기의 전류와 전류 도함수를 추정하기 위한 슬라이딩 관측기 설계 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{\hat{i}}_1 = \hat{i}_2 + k_1(i - \hat{i}_1) + \alpha_1 S_g(i - \hat{i}_1) \\ \dot{\hat{i}}_2 = \hat{i}_3 + k_2(\dot{\hat{i}}_1 - \hat{i}_2) + \alpha_2 S_g(\dot{\hat{i}}_1 - \hat{i}_2) \end{cases} \quad (2.17)$$

여기서, \hat{i}_1 는 전기자전류, \hat{i}_1 는 전기자전류 추정값 K_i, a_i : 슬라이딩 관측기 이득 상수

슬라이딩 관측기를 이용하여 직류 서보 전동기의 전기자 전류의 도함수를 추정하는 것은 가능하지만 속도 관측기인 Luenberger 관측기의 관측기 이득 L을 최적 값으로 선정하지 않으면 관측기의 성능 저하로 인해 정확한 속도 추정이 어렵게 된다.

따라서 본 논문에서는 퍼지 제어기법을 통하여 직류 서보전동기의 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 사용하여 Luenberger 관측기 이득 L을 선정하였으며 퍼지-슬라이딩 관측기의 구조는 그림 2.2와 같다.

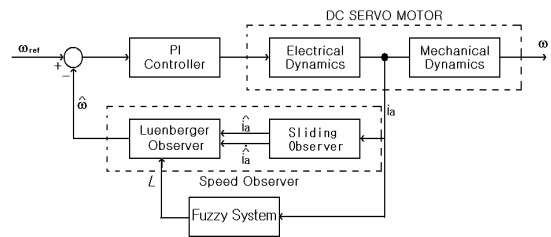


그림 2.2 퍼지 슬라이딩 관측기 구조
Fig. 2.2 Structure of Fuzzy Sliding Observer

III. 실험 및 결과

본 논문에서는 직류 서보 전동기의 속도센서리스 속도제어를 하기 위하여 슬라이딩형 퍼지 관측기를 적용하였다. 이를 위하여 제작된 디지털 서보 시스템을 이용하여 속도센서를 장착한 경우와 속도센서 없이 퍼지-슬라이딩 관측기를 적용하여 속도를 추정한 경우를 동일한 조건으로 비교실험을 하였으며 속도제어기로는 PI제어기를 사용하였다. 그림 3.1은 실험장치 구성도를 나타낸 것이다.

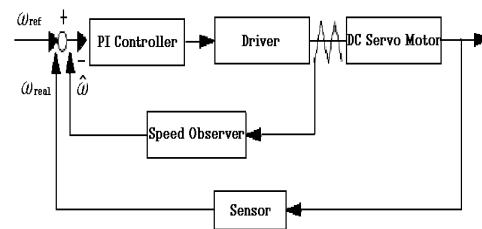


그림 3.1 실험장치
Fig. 3.1 Experimental system

본 실험에서 사용한 서보 전동기는 최대출력200W (LG기전, FMD-E205A)이며 속도추정을 위한 센서로 1000[펄스/회]의 분해능을 갖는 엔코더를 사용하였다.

목표 값이 2,000[rpm]일 때, 각각 센서를 이용한 경우와 Luenberger관측기와 슬라이딩형 퍼지 관측기를 적용한 경우의 시

스텝 응답을 비교하여 그림 3.2에 나타내었으며 결과를 표 2에 정리하였다.

표 2 무부하 정속운전 실험결과표
Table 2 The results table

응답특성	Sensor	Luenberger	Sliding Type Fuzzy
최대초과량 [rpm]	2049	2257	2202
최대백분율초과량 [%]	2,45	12,85	10,1
상승시간 [sec]	0,0198	0,0286	0,0259
정착시간 [sec]	1,1268	2,17	1,35

표 2의 결과와 같이 스텝입력 실험에서의 출력응답은 최대초과량 백분율에서 속도센서 없이 슬라이딩형 퍼지 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비하여 약 7.7[%]정도 증가했으며, 정착시간에 있어서도 속도센서 없이 슬라이딩형 퍼지 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비해 약 6.1[msec] 정도 느리게 나타났다. 따라서, 슬라이딩형 퍼지 관측기가 과도상태와 정상상태에서 추정성능이 우수하며, 속도센서 없이 슬라이딩형 퍼지 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우의 응답 특성에 근접하다는 것을 입증하였다.

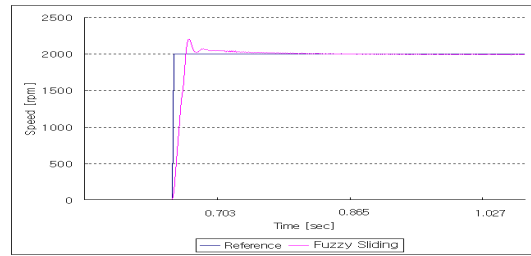
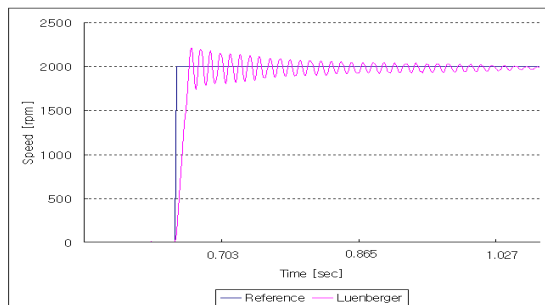


그림 3.2 실험결과
Fig. 3.2 Experiment of Results

VI. 결론

본 논문은 로봇모터에 가장 많이 사용되는 직류 서보 전동기의 속도센서리스 속도제어를 수행하기 위하여 설계한 관측기에 대한 연구로서 전동기의 동특성 및 내부파라미터에 대한 정보를 필요하지 않는 강인한 특성을 갖는 슬라이딩형 퍼지 관측기를 제안했다. 또한 과도상태에서의 응답특성 개선과 저속에서의 운전 특성 향상을 입증하기 위하여 직류 서보 전동기의 정속실험을 통하여 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 슬라이딩형 퍼지 관측기를 이용한 경우를 비교 실험한 결과 본 논문에서 제안한 퍼지슬라이딩 관측기를 직류 서보 전동기에 적용하여 정속 운전 시 과도상태와 정상상태에서 안정성 및 추정성능이 우수하다는 것을 입증하였다.



참고문헌

- [1] Masahiro Takigawa, et. al. "A Wide Speed Control System for Brushless DC Motor Regarding to the Transient Response Characteristics," T. IEEE Japan, vol.113-D, No.2 pp.151-158, 1993
- [2] K, Nandam. Pradeep, "Analog and Digital Speed Control of DC Drives Using Proportional-Integral and Integral-Proportional control techniques", IEEE Trans. Ind. Elect., Vol. IE-34, No.2, pp. 227-233, 1987
- [3] T. Furuhashi, S. Sangwanish, S. Okuma, "A Position and Velocity Sensorless Control of Brushless DC Motors Using an Adaptive Sliding Observer" T. IEEE Japan, pp.1188-1192, 1990
- [4] Z. Iwai, A. Inoue, and S. Kswaji, "Observer", Corona Pub., 1994 (in Japanese)
- [5] H. Nakano and I. Takahashi, "Speed Sensorless Field-Oriented Control of the Induction Motor Using an Instantaneous slip Frequency Estimation Method", IEEE PESC., pp. 847-854, 1988
- [6] Joachim Holtz, "Speed Estimation and Sensorless Control of AC Drives", IEEE IECON, pp.649-654, 1993
- [7] Kubota, "DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor", IEEE Trans, Ind. Appl., Vol.29, No.2, Mar., pp344-348, 1993