

슬라이딩 모우드를 이용한 위치서보 문전에 관한 연구

원종수 · 민준기
서울대학교 공과대학 전기공학과

A Study on Position Servo Drive with Sliding Mode Control

Jong-Soo Won · Choon-Ki Min
Dept. of Electrical Eng. Seoul National University

Abstract

In this paper the application of variable structure control with sliding modes for improving the dynamic response and eliminating chattering of DC servo motor drive is presented. Sliding mode control is an effective means to keep a system insensitive to parameter variation and disturbances. In this method the control structure is changed discontinuously to force the system dynamics to follow a predetermined trajectory. However the discontinuous change in control structure causes the controller input to chatter and gives non-zero steady state error. To overcome this problem, the discontinuous sign function is replaced by a proper continuous function, and presented through experiment.

1. 서론

많은 제어응용 분야에서 시스템의 파라미터 변화와 부하의 외란에 민감한 제어기의 설계가 요구되고 있다. 가변구조제어 시스템(VSS)라 불리는 슬라이딩 모우드 제어는 제어구조가 미리 정해진 궤도를 따라 불연속적으로 가변하게 되어 파라미터와 부하 외란의 변화에 강인한 성질을 나타내게 된다. [1][2][3] VSS를 기초로 제어되는 슬라이딩 모우드 제어는 그 응답이 미리 정해진 궤적(trajactory)을 따라 슬라이드 하므로 기본적으로는 적응제어 방법이 되고, 적응제어 속성상 구동 시스템의 응답은 파라미터 변화와 부하외란에 민감하지 않게 된다. 또한 슬라이딩 모우드 제어기법은 다른 제어이론처럼 미지의 파라미터를 추정해야 할 필요가 없을 뿐만 아니라 물리적인 실현이 간단하기 때문에 실시간제어(real-time control)에 유리한 장점을 가지고 있다.

그러나 제어구조의 불연속적인 가변으로 인해 제어기의 입력이 진동하게 되는데 이는 손실 증가의 원인이 되고 있고, 특히 원점부근의 무한진동은 정상상태 오차가 있게 된다.

따라서 본 논문에서는 진동을 작게하기 위해 불연속적인 제어기 입력을 적절한 연속함수로 정의된 개선된 슬라이딩 모우드 제어방법을 제시하고, PI제어기를 슬라이딩 제어기와 병렬로 설치하여 외란이 존재할 경우 정상상태 오차를 최소한으로 줄였다.

2. 가변구조제어 이론

2.1 가변구조시스템(VSS)의 이론

보통 제어 시스템에서는 제어구조가 고정되어 있거
되지만 가변구조시스템은 오차신호와 오차신호의

미분값에 따라 제어구조가 불연속적으로 변화하므로써 파라미터와 부하의 외란에 강인한 성질을 나타내므로써 기존 시스템과 다르게 된다. 기존 제어법과 다르게 이러한 복잡한 것을 사용하는 것은 각 구조의 유용한 성질을 조합하여 사용할 수 있기 때문이다.

또한 VSS에 기초한 슬라이딩 모우드 제어는 미리 정해진 스위칭평면에 파르도록 시스템의 구조를 불연속제어로 변화시키는데 각각의 구조가 불안정 할지라도 시스템의 평균 응답은 안정하게 된다. 기존의 VSS에서는 불연속적인 제어입력 U가 다음과 같이 주어진다.

$$U = \phi_1 X_1 + \phi_2 X_2 + K_f \text{sgn}(S) \quad (1)$$

여기서

$$\phi_1 = \begin{cases} \alpha_1 & \text{if } S X_1 > 0 \\ \beta_1 & \text{if } S X_1 < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\phi_2 = \begin{cases} \alpha_2 & \text{if } S X_2 > 0 \\ \beta_2 & \text{if } S X_2 < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{sgn}(S) = \begin{cases} +1 & \text{if } S > 0 \\ -1 & \text{if } S < 0 \end{cases}$$

X1 = 위치오차 [rad]
X2 = 위치오차의 가속도 [rad/sec]
Kf = 계인

(1)식의 1항은 비례항이고 2항은 위치오차 각속도의 궤환항이고 3항은 뒷lash(backlash)과 굴림마찰력 효과를 극복하기 위해 제어 시스템에 종종 사용하는 주파수 디더(dither) 신호와 비슷한 릴레이 type 항이 된다.

그리고 스위칭 함수는 다음과 같이 정의 된다.

$$S = c X_1 + X_2 \quad (4)$$

여기서 c는 시스템의 응답성에 따라 정해지는 슬라이딩 라인의 기울기이다. 따라서 슬라이딩 라인의 시간응답은 다음과 같이 주어진다.

$$X_1(t) = X_1(t_1) \exp(-c(t-t_1)) \quad (5)$$

여기서 t1은 동작점이 슬라이딩 라인과 만날때까지의 시간을 말하고 0-t1까지의 시간은 자유변형구간이 된다.

(5)식은 지그재그 코스를 무시하고 슬라이딩 라인을 따라 움직이는 시스템의 평균응답을 나타낸 것이다. 또한 (5)식은 시스템 파라미터의 변화에

영향을 받지 않게 된다. 시스템 응답은 슬라이딩 라인 기울기 C를 크게 하므로써 더 빨라지나 반면 t는 더 커지게 된다.
각 구조의 궤적이 반대방향으로 슬라이딩 라인을 CROSS하기 때문에 CROSS OVER CRITERIA를 정의할 필요가 있다.

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \frac{ds}{dt} < 0 \text{ ----- (6)}$$

(6)식은 슬라이딩 라인의 존재조건식으로 알려져 있는데 제어가 파라미터를 결정 하는데 도움이 된다. (6)식외 의해 (2) (3)식의 계인을 결정하게된다.

2.2 개선된 VSS의 이론

기존 VSS에서는 (1)식과 같이 제어입력이 가해졌으나 (1)식의 3항이 원점 부근에서 dominant하게 되어 스위칭평면에서 제어입력이 무한주파수로 채터링하게 되므로 이러한 문제를 극복하기 위해 불연속 함수인 (1)식의 3항을 적절한 연속함수로 변경하여 개선하였고, 또한 기존VSS에서는 외란이 있을 경우 정상상태 오차가 존재하기 때문에 비례적분제어를 슬라이딩 모드제어기와 병렬로 설치 하여 정상상태의 오차를 제거하였다.
즉 다음과 같이 제어입력을 개선하였다.

$$U = \phi_1 X_1 + \phi_2 X_2 + kf \text{ sign}(S) \text{ ---- (7)}$$

$$\phi_1 = \begin{cases} \alpha_1 & \text{if } s X_1 > 0 \\ \beta_1 & \text{if } s X_1 < 0 \end{cases}$$

$$\phi_2 = \begin{cases} \alpha_2 & \text{if } s X_2 > 0 \\ \beta_2 & \text{if } s X_2 < 0 \end{cases}$$

$$\text{sign}(S) = \frac{s}{|s| + \delta} \text{ ---- (8)}$$

δ = positiv constant

(7)식의 3항은 스위칭평면 근처에서 제어기의 입력을 제거하는 효과를 가지며 스위칭평면에서 멀리 떨어진 경우에는 sign(s) = ± 1 이 되어 제어입력을 제한하는 기능을 갖게된다.

3. 실험장치의 구성

그림1에 본 연구에 사용되는 시스템의 하드웨어가 나타나 있다.
120V 1KW DC 서보전동기가 PWM POWER 트랜지스터 4상한 효파모 구동되고 있고, 샤프트 인코더가 위치를 감지하기 위해 설치되었다.
DC 타코제너레이터가 서보전동기와 직결되어 출력속도에 비례하는 아날로그 신호를 발생하고 이 신호를 8-BIT A/D 컨버터를 사용해서 디지털신호로 변환시켜 주고 있다. 본 시스템에 사용된 마이크로 컴퓨터는 기준 클럭이 8 MHz인 8088 CPU를 사용하고 있고 연산속도 향상을 위해 수치연산 프로세서인 8087을 사용하고 있다.
또한 외란 발생을 위해 그림2와 같은 구조의 외란발생장치를 전동기 축에 직결하였다.
외란 발생장치는 출력위치의 사인함수이고 따라서 시스템의 상태변수의 하나가 되지만 이러한 것을 고려하게 되면 시스템 해석이 복잡해 지므로 간단함으로 일정한다고 보고 모든실험이 행해졌다.

4. 시스템 모델링

DC 서보전동기의 모델은 그림3와 같은 블록 다이어그램으로 나타낼 수 있다. 제어입력은 최대위치오차와 전류제한에 의해 제한된다. 상태변수를 위치오차 X1 과 위치오차의 각속도 X2 로 선택하면 본 시스템의 상태방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -A1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ A2 \phi \end{bmatrix} U + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f \text{ --- (9)}$$

여기서 X1 = 위치오차
X2 = 위치오차의 각속도
A1 = Kθ K_e / J R_a
A2 = (Kt K_e + B R_a) / J R_a
f = F / J (-1 < f < 1)

(6)식외 의해 제어부프 계인을 구하면 다음과 같다.

$$ds/dt = c dx1/dt + dx2/dt = c X_2 - A1 X_2 + A2 \phi U + f$$

$$s ds/dt = -A2 \phi s X_1 + (c - A1 - A2 \phi) s X_2 - A2 \phi Kf s \text{ sign}(S) + f s \text{ --- (10)}$$

(10)식의 계인 상수에 대한 조건은 다음과 같다.

$$\alpha_1 > 0$$

$$\beta_1 < 0$$

$$\alpha_2 > (c - A1) / (A2 \phi) \text{ ---- (11)}$$

$$\beta_2 < (c - A1) / (A2 \phi)$$

$$Kf > \frac{f}{A2 \phi} \text{ sign}(S)$$

이러한 조건의 계인값이 표1에 나타나 있고 실험결과 본 논문 계인값이 표2에 나타나 있다. 슬라이딩 모드 제어의 장점중의 하나인 것이 바로 표2와 같은 시스템계수를 다른 PI제어기처럼 정략한 값을 알아야만 하는 것이 아니기 때문에 그 장점이 있다.

표 1 계인값의 조건

α1	> 0
β1	< 0
α2	> -1.6526
β2	< -1.6526
Kf	> 0.00063

표 2 실험에 의한 계인값

α1	8
β1	-0.1
α2	0
β2	-8
Kf	0.2

5. 시뮬레이션

개선된 VSS의 실행순서는 첫째로 (4)식외 의해 요구되는 슬라이딩 라인의 파라미터 C를 구하는데 시스템의 응답성에 따라 결정하게 된다(C=4). 두번째로 슬라이딩 라인의 존재조건으로 부터 불연속적인 제어를 결정하는데 이때 사인함수인 sign(C_e)는 (8)식과 같은 적절한 연속함수로 대체해서 구한다. (δ=0.2)
세번째로 원점근처의 진동현상을 제거하기 위해 원점근처의 선형 제어를 결정하는데 적절한 오차영역을 두고 슬라이딩 모드 제어에서 PI제어 모드로 전환한다. 이때 오차영역은 위치오차 초기치의 2 %로 하였고 순한 이산형 PI 알고리즘은 다음과 같은 관계로 얻었다.

$$U(k) = U(k-1) + q_0 X_1(k) + q_1 X_1(k-1)$$

$$q_0 = k_p, q_1 = -k_p (1-t_0/t_i)$$

여기서 t_i : 적분시간, t_0 : 샘플링 시간

q_0 와 q_1 은 Ziegler-Nichols tuning rule로 구했다. ($q_0=15.22, q_1=14.78$) 본 실험에 사용된 프로그램의 순서도가 그림4에 나타났다. DC서보전동기 구동시스템의 파라미터는 표3에 나타나 있다.

표 3 시스템 파라미터

K_e	1.05 V/rad	K_t	1.05 Nm/A
R_a	0.92 ohm	J	0.0225 Kg.m
B	1.2 Nme/rad	ϕ	60
L	0.035 m	M_g	0.0122 Kg
F	L Mg	KG	1/50
f	F / J		

여기서는 기존방법의 VSS와 개선된 VSS를 비교해서 시뮬레이션 결과를 나타냈는데 그림5는 외란이 있을 경우 기존 VSS에 대한 슬라이딩 모드 제어를 했을 경우이고, 그림6은 외란이 있을 경우 새로운 VSS에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림(5)-(6)에서 보는 바와 같이 응답시간은 기존 VSS나 개선된 VSS나 큰 차이가 나타나지 않지만 슬라이딩 라인 선상의 채터링이 개선된 VSS로 했을 경우 더 라이엇고 특히 원점 부근의 채터링은 기존 VSS에서는 나타나나 개선된 VSS에서는 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 제어입력을 보면 기존의 VSS에서는 (+), (-) 진동이 심하나 개선된 VSS에서는 진동이 심하지 않게 된다. 이상과 같은 것들을 정량적인 성능 비교를 위해 다음과 같은 평가지표를 사용한다. [4]

하중질대면적적분 : $ITAE = \frac{1}{X_0} \int t |X_1| dt$

자속입력적분 : $ISU = \int U^2 dt$

절대입력적분 : $IAU = \int |U| dt$

여기서 X_1 =위치오차, $X_0=X_1$ 의 초기치, U =제어입력

ITAE는 견고성을 평가하는 Index로서 사용되는데 표4에 시험1(외란이 없을 경우) 과 시험2(외란이 있을 경우)에 대해 기존 VSS 와 개선된 VSS 에 대해 나타나 있다. 표4에서 보면 견고성은 기존 VSS나 새로운 VSS나 비슷하게 나타나므로 새로운 VSS도 견고성을 충분히 갖는다는 것을 알 수 있다.

표 4 견고성

시험 NO	기존 VSS ITAE	새로운 VSS ITAE
1	0.03339	0.03082
2	0.02829	0.02563

또한 제어기의 성능은 ISU 와 IAU로 평가되는데 표5에 시뮬레이션 결과가 나타나 있다. 표5에서 보는바와 같이 기존 VSS 보다 새로운 VSS가 스위칭을 상당히 적게 하고 있기 때문에 제어입력의 채터링이 적다는 것을 정량적으로 알 수 있다.

표 5 제어기의 성능

시험 NO	기존 VSS		새로운 VSS	
	ISU	IAU	ISU	IAU
1	2.7763	13.959	0.0395	1.4389
2	2.4753	12.083	0.0711	1.4432

6. 결론

기존 슬라이딩 모드 제어에서는 제어입력의 비선형 요소를 포함하고 있기 때문에 스위칭 평면상에서의 과도한 제어입력 스위칭이 있었으나 제어입력의 비선형 요소를 적절한 선형요소로 바꾸어 스위칭 평면상에서의 과도한 스위칭을 제한하여 스위칭에 의한 손실을 줄였다. 그리고 외란이 존재할 경우 기존의 슬라이딩 모드 제어에서는 정상상태의 오차가 있었으나 슬라이딩 모드 제어기와 병렬로 비례적분 제어기를 설치하여 정상상태 오차를 최소화 할 수 있었다. 본 논문에서 제시한 제어입력을 사용할 경우 견고성은 기존 VSS와 개선된 VSS 가 비슷하나 제어입력의 과도한 스위칭은 상당히 줄었음을 알 수 있다.

7. 참고문헌

1. V.I.UTKIN, "VARIABLE STRUCTURE SYSTEMS WITH SLIDING MODES," IEEE Trans.Auto.Con.,vol.AC -23,no.6,pp1079-1085,1978
2. F.HARASHIMA et al, "MOSFET CONVERTER-FED POSITION SERVO SYSTEM WITH SLIDING MODE CONTROL," IEEE - IE-32.NO.3,1985
3. B.K.BOSE, "SLIDING MODE CONTROL OF INDUCTION MOTOR," IEEE - IAS Conf.Rec.,pp479 -486,1985
4. L.B.Wee et al, "A VARIABLE STRUCTURE STRATEGY FOR MOTION CONTROL," IEEE-IECON, pp167 -174,1987
5. Stephen Gardner, "OPTIMISATION OF ROBOT POSITION CONTROL USING VARIABLE STRUCTURE CONTROLLERS AND ADAPTIVE SWITCHING LINES," IEEE-IAS, pp426-437,1987
6. Hideki Hashimoto et al, "A MICROPROCESSOR-BASED ROBOT MANIPULATOR CONTROL WITH SLIDING MODE," IEEE-TIE.vol.IE-34,NO.1,pp11 -18,1987

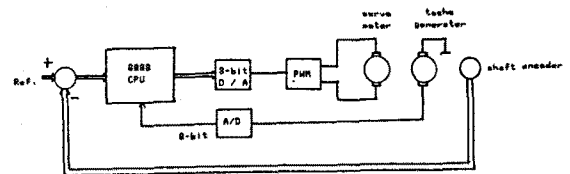


그림 1. 시스템의 블록도

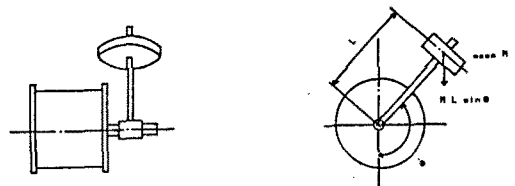


그림 2. 외란 발생장치

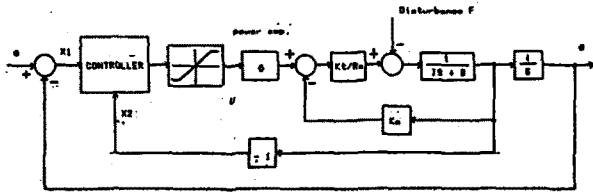


그림 4. 시스템 블록 다이어그램

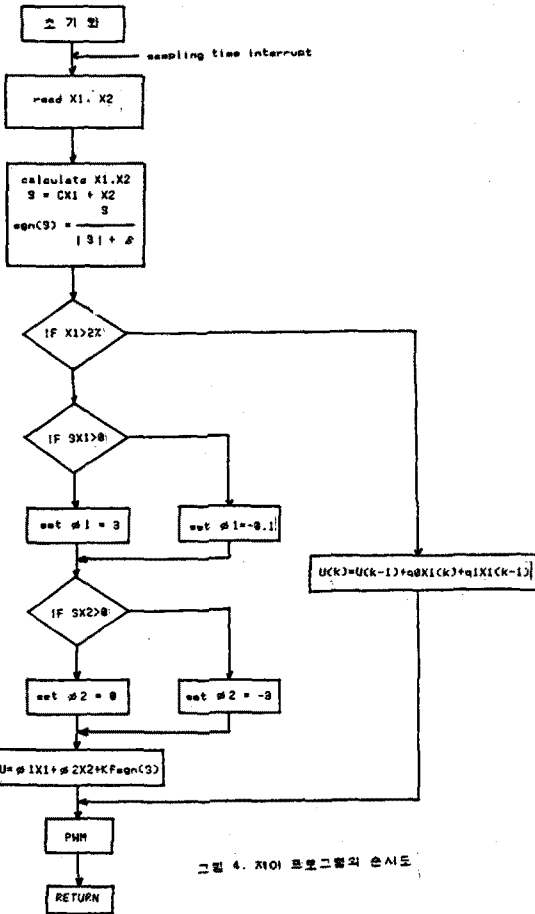


그림 4. 제어 프로그램의 순서도

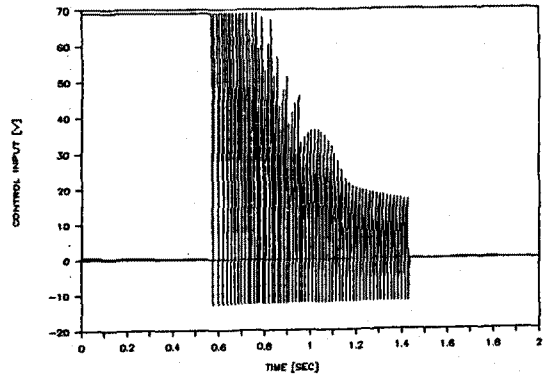


그림 5. 기존 가변구조제어 시스템 (with disturbance)

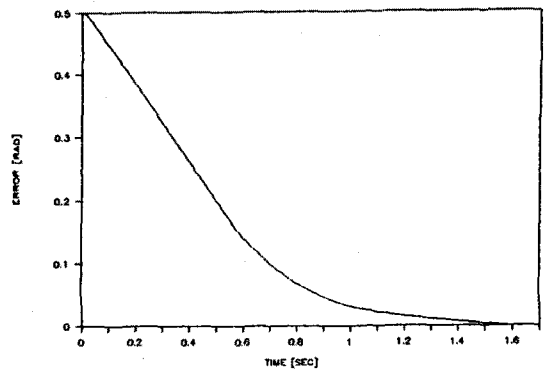
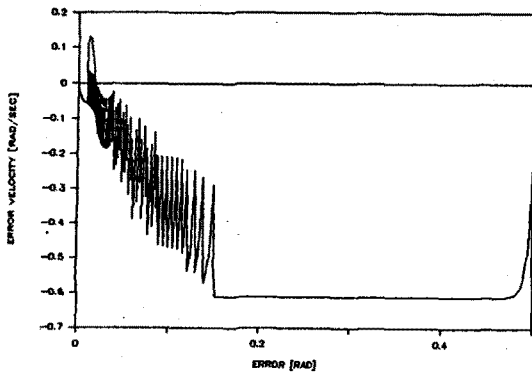
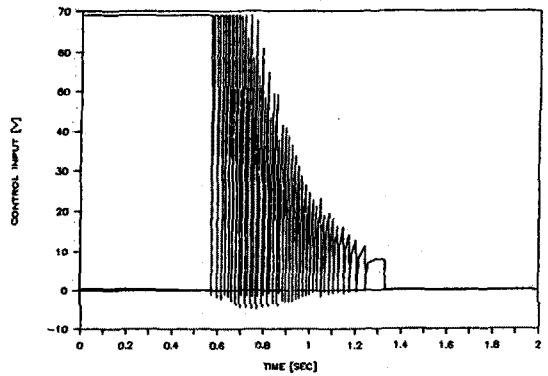
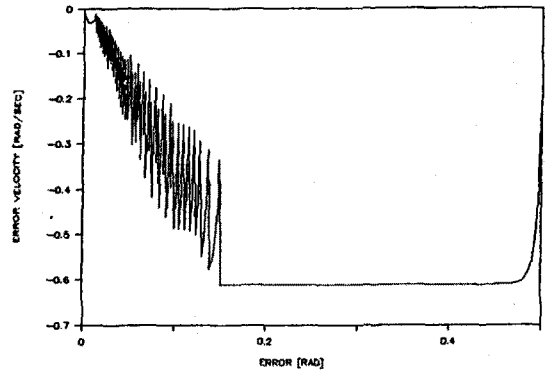


그림 6. 새로운 가변구조제어 시스템 (with disturbance)