

Fuzzy Slide Mode Control을 이용한 Control Actuator System

양문상* · 이영우* · 정순배**

*목원대학교 · ** (주)스마트텍

Control Actuator System used in Fuzzy Slide Mode Control

Mun-Sang Yang* · Young-Woo Lee* · Sun-Bae Jung**

*Mokwon University · **SMARTEC, Inc

E-mail : ywlee@mokwon.ac.kr

요 약

본 논문은 Fuzzy Slide Mode Control 및 BLDC모터를 이용하여 공기의 부하를 모사한 Actuator System에 관한 연구이다. 모터를 제어하기 위한 알고리즘으로 PID, PD, Fuzzy Slide Mode Control의 특징을 비교 분석하였고 외란의 영향에 강한 Fuzzy Slide Mode Control을 적용하였다. 모터의 토크를 제어하여 실제 공기 부하에 맞는 토크를 모사함으로써 최대 2.3Nm의 토크와 50Hz의 응답 특성을 얻었다.

키워드

Fuzzy Slide Mode Control, Actuator, PID, 적분형PD, Slide Line

I. 서 론

Actuator란 전기, 유압, 압축공기 등을 이용하는 구동장치의 총칭으로, 보통 유체 에너지를 이용해서 기계적인 작업을 하는 기기를 말한다. 메카트로닉스 분야에서는 어떤 종류의 제어기구를 갖고 있는 전기모터 혹은 유압이나 공기압으로 작동하는 기구를 가리킨다.

모터는 산업현장 및 로봇 등 많은 분야에서 사용된다. 이러한 모터를 정밀 제어하기 위해서는 제어기가 필요한데 P제어, PI제어, PID제어가 주로 사용된다. 본 연구에서는 모터를 제어하기 위한 여러 제어기를 비교 분석 하였으며 Fuzzy Slide Mode Control을 이용한 BLDC모터를 구동하는 시스템에 대한 실험 및 결과에 대하여 기술하였다.

II. 본 론

2.1 PID 제어

제어 변수와 기준 입력 사이의 오차에 근거하여 계통의 출력이 기준 전압을 유지하도록 하는 피드백 제어의 일종으로, 비례(Proportional) 제어와 적분(Integral) 제어, 미분(Derivative) 제어를 조합한 것이다. P 제어는 기준 신호와 현재 신호 사

이의 오차 신호에 적당한 비례 상수 이득을 곱해서 제어 신호를 만든다. I 제어는 오차 신호를 적분하여 제어 신호를 만드는 적분 제어를 비례 제어에 병렬로 연결해 사용한다. D 제어는 오차 신호를 미분하여 제어 신호를 만드는 미분 제어를 비례 제어에 병렬로 연결하여 사용한다.

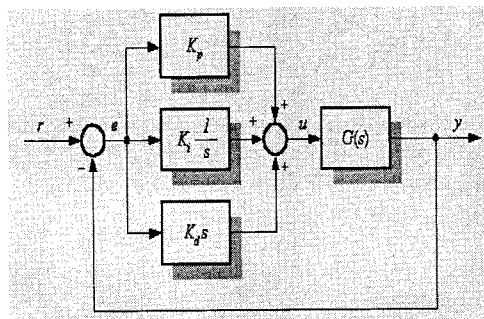


그림 1. PID 제어 블록도

그림 1과 같이 제어기로 입력되는 값(e)은 플랜트의 출력값(y)과 플랜트가 출력해야 하는 값(r)의 차인 오차신호이다. 일반적으로 대부분의 제어기는 오차신호를 피드백(Feedback) 받아서 제어기 출력신호를 출력하도록 설계되어 있다. PID 제어

기는 오차신호를 수학적으로는 식(1)과 같이 처리하여 제어신호(u)를 계산한다.

$$u_{(t)} = K_{p(t)} e_{(t)} + K_{i(t)} T_s \sum_{k=0}^t e_k + K_d \frac{e_{(t)} - e_{(t-1)}}{T_s} \quad (1)$$

위 수식에서 Kp는 오차신호에 곱해지는 비례이득이며, Ki는 오차신호를 적분한 값에 곱해지는 적분이득이며, Kd는 오차신호를 미분한 값에 곱해지는 미분이득이다. 최적의 응답특성을 위해서는 Kp, Ki, Kd의 이득값의 적절한 튜닝이 필요하다.[1]

2.2 적분형 PD제어

적분형 PD제어는 PID제어에서 적분제어를 제거하고 이전 출력값과의 누적을 통하여 출력으로 내보낸다.

$$u_{(t)} = u'_{(t)} + K_{p(t)} e_{(t)} + K_d \frac{e_{(t)} - e_{(t-1)}}{T_s} \quad (2)$$

위 수식에서 u(t)'는 이전 출력 u(t)값이다. u(t)를 적분함으로써 PID제어 보다 Reference를 더 빠르게 추종 할 수 있다.

2.3 PID, 적분형 PD제어 문제점

PID, 적분형 PD제어는 선형 제어이므로 외란에 취약한 면을 보인다. 외란의 영향을 이겨내기 위해 이득값을 높이면 오버슈트가 발생하며 불안정 상태가 된다.

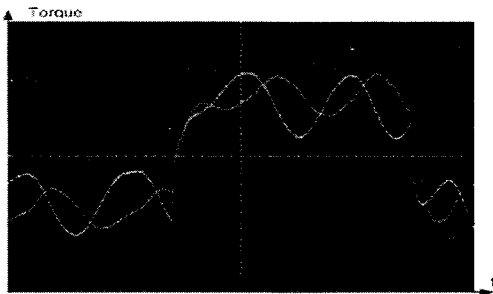


그림 2. 외란의 영향

그림 2는 구형파의 Reference(제어하고자 하는 신호)를 추종할 때 외란에 의하여 출력값이 영향을 받게 된다.

외란을 이겨 내기 위해서는 이득값을 높임으로써 응답특성을 빠르게 할 수 있다. 하지만 비례이득값이 커지면 응답은 빠르지만 오버슈트가 발생한다. 오버슈트를 줄이기 위해 미분이득값을 높이면 그림 3처럼 불안정상태가 되며 결국 발산하게 된다.

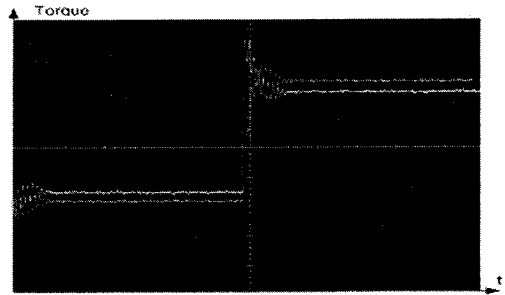


그림 3. 불안정 상태

III. Fuzzy Slide Mode Control

3.1 Fuzzy Slide Mode Control

Fuzzy Slide Mode Control은 시스템의 구조를 변경하여, 시스템의 상태를 슬라이딩 평면상에 구속시킴으로써 강인성(Robustness)을 얻을 수 있는 비선형 제어이다. 큰 의미에서는 가변구조 제어기(Variable Structure Controller)라고도 한다. 이 제어기는 모델의 불확실성(Uncertainty)과 외란(Disturbance)이 존재 할 경우에도 제어시스템의 상태를 슬라이딩 평면에 있도록 한다.[2]

슬라이딩 평면은 페루프제어 시스템의 거동을 결정지으며, 본래 시스템 동특성과 관계없이 설정이 가능하다. 또한 시스템의 상태가 슬라이딩 평면에 구속되어 있는 경우 시스템의 차수는 슬라이딩 평면의 차수만큼 낮아지며, 정합조건을 만족하는 모델 불확실성과 파라미터 변동, 외란 등에 대하여 영향을 받지 않는 불변성을 가진다.

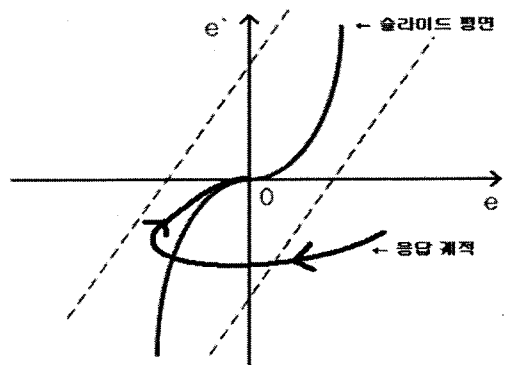


그림 4. 슬라이드 평면과 응답의 궤적

그림4에서 e는 Reference와 Feedback의 차인 오차신호이며 e'는 e의 미분값이다. 슬라이드 밖에서는 뱅뱅제어를 하여 빠르게 슬라이드 평면에 접근할 수 있게 하고 슬라이드 평면을 따라 0으로 수렴한다.

3.2 Fuzzy Slide Mode Control 설계

$$\dot{z}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ a_1 & a_2 & a_3 & \dots & a_n \end{bmatrix} z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot (u(t) + v(t, x, u)) \quad (3)$$

$$s(x) = z_n + \sum_{i=1}^{n-1} c_i z_i = 0 \quad (4)$$

최적제어 입력에 의해서 canonical form 식(3)이 슬라이딩 평면(s=0)에 유한 시간 내에 도달할 수 있다고 가정하고 슬라이딩 평면을 식(4)와 같이 설계하였다.

식(3)과 같은 시스템은 최적제어 입력에 의해서 슬라이딩 평면에 도달하면 다음과 같이 변환된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \vdots \\ \dot{z}_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_{n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} z_n \quad (5)$$

$$\dot{z}(t) = A z(t) + B z_n(t)$$

$$z = [z_1 z_2 z_3 \dots z_{n-1}]^T$$

$$z_n = -c_1 z_1 - c_2 z_2 \dots - c_{n-1} z_{n-1}$$

Performance measure를 설정하고 상태를 가장 빨리 수렴하도록 만드는 Zn을 구하면 식(6)과 같이 된다.

$$J = \int_{t_0}^{\infty} \frac{1}{2} (z^T Q z + z_n^T R z_n) dt \quad (6)$$

Hamilton-Jacobi-Bellman의 방정식으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} z_n &= -R^{-1} B^T K z \\ &= -c_1 z_1 - c_2 z_2 \dots - c_{n-1} z_{n-1} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 K는 다음과 같은 Ricatti 방정식의 해가 된다.[3][4]

$$\begin{aligned} 0 &= \dot{K}(t) + Q - K(t) B R^{-1} B^T K(t) \\ &+ K(t) A + A^T K(t) \end{aligned} \quad (8)$$

3.2 Fuzzy Slide Mode Control 문제점

슬라이딩 모드 제어기의 큰 단점으로 채터링(Chattering)이 있다.

시스템의 상태가 슬라이딩 평면을 가로지를 때 발생하는 제어 입력의 급격한 스위칭(불연속적인

부호함수를 포함하는 제어입력)으로 인하여, 시스템의 모델링 과정 중에 생략된 시스템의 고주파 동역학이 여기되어 무한진동을 발생시키는데 이것이 슬라이딩 모드 제어기가 가지는 치명적인 결점인 채터링이며, Actuator에 악영향을 끼친다.

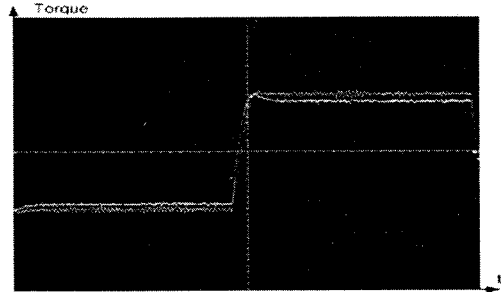


그림 5. 채터링

IV. 프로토타입 제작 및 실험 결과

4.1 부하 시험 장치 구성

본 연구에서는 Fuzzy Slide Mode Control을 적용한 제어기와 BLDC모터를 이용하여 공기의 부하를 모사한 Actuator System을 제작 하였다. 그림 6은 모터의 토크를 이용하여 미사일의 방향 제어 날개에 가해지는 실제 공기의 부하와 같은 힘을 모사해주는 시스템이다. 엔코더 끝에 미사일의 날개를 결합함으로써 모터의 구동으로 날개에 부하를 가해준다.

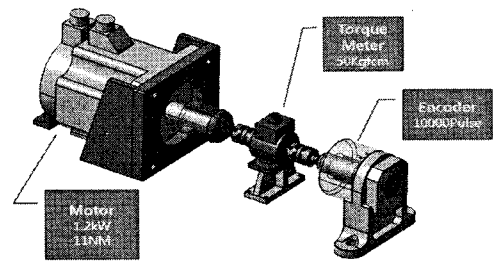


그림 6. 부하 시험 장치

구동을 위한 모터와 모터의 토크를 측정하여 Feedback 제어를 위한 토크미터, 모터의 위치를 측정하는는 엔코더, 각 장비들을 연결 해주는 커플링으로 구성되어있다. 모터는 1.2KW, 11Nm의 성능을 가지고 있으며 토크미터는 50kgfcm까지 측정이 가능하다. 엔코더는 10000펄스의 정밀도를 가지고 있다.

상위 제어기로서 Fuzzy Slide Mode Control의 연산을 위한 TI에서 나온 TMS320F2812를 사용하였으며, 모터 드라이브에 토크 명령을 주기 위한

D/A변환기, 토크의 Feedback값을 측정하기 위한 A/D변환기로 구성 되어있다. 모터 드라이브의 고주파 스위칭 노이즈를 제거 하기 위해 A/D변환기 앞에 Sallen-key 필터를 설계 하였다. Low Pass Filter로 차단 주파수는 2kHz로 설계 하였다.

4.2 실험 결과

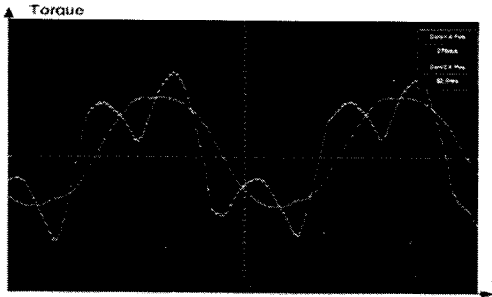


그림 7. 정현파 추종 실험

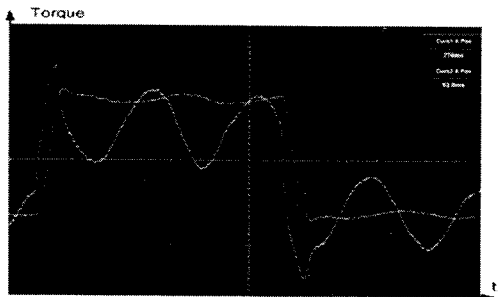


그림 8. 구형파 추종 실험

그림 7은 정현파, 그림 8은 구형파의 추종 실험이다. 외란의 영향에 Reference를 빠르게 추종하여 Reference 신호를 유지함을 볼 수 있다. 이처럼 시스템의 상태를 슬라이딩 평면상에 구속시킴으로써 강인성을 얻을 수 있어 외란이 존재 할 경우에도 제어 시스템의 상태를 슬라이딩 평면에 있도록 한다.

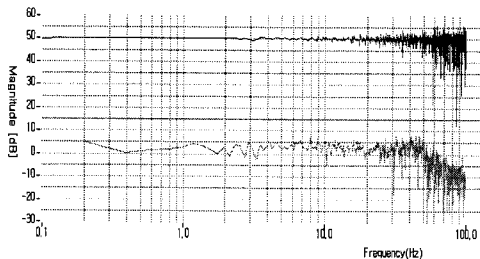


그림 9. 화이트 노이즈 추종 실험

비선형 제어를 실험하기 위해 화이트노이즈를 추종 하도록 실험 하였으며 그 결과 그림 9와 같이 최대 2.3Nm의 토크와 50Hz의 응답 특성을 얻었다.[5]

V. 결 론

자동 제어 시스템과 공기의 부하를 모사해주는 Actuator System의 제작과 실험 결과를 기술 하였다. 외란에 강한 Fuzzy Silde Mode Control을 적용하여 상위 제어를 구성 하였으며 응답쾌적이 슬라이딩 평면에 도달한 후부터 가장 빠른 수렴시간을 갖도록 하는 최적의 슬라이딩 평면을 Ricatti 방정식과 Hamilton-Jacobi-Bellman 방정식을 이용하여 설계했다. 실험 결과 최대 2.3Nm의 토크와 50Hz의 Bandwidth를 얻었다.

모터의 큰 이너서와 Actuator System 측의 불일치 등으로 Phase Lag이 커져서 성능이 많이 떨어졌다. 향후 시스템 설계 시 축을 정밀하게 맞추고 Phase를 Lead할 수 있는 Feedforward 제어를 적용함으로써 성능이 개선될 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] J.H. Kim and S.J. Oh, "A fuzzy PID controller for nonlinear and uncertain system", in *Soft Computing*, 4, Springer Verlag, pp. 123-129, 2000.
- [2] F. Barrero, A. Gonzalez, A. Torralba, E. Galvan and L. G.Franquelo, "Speed control of Induction Motors using a novel Fuzzy Sliding Mode structure," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, Vol.10, No.3, June 2002, pp. 375-383.
- [3] 민경원 외, "개선된 슬라이딩 모드 제어의 강인성", 대한건축학회, 19권 3호(통권173호), 2003. 3
- [4] J. Lo and Y. Kuo, "Decoupled Fuzzy Sliding Mode Control," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, Vol.6, No. 3, Aug. 1998, pp. 426-435.
- [5] Y. Lai and J. Lin, "New hybrid Fuzzy controller for Direct Torque Control Induction Motor drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 18, No. 5, Sept. 2003, pp. 1211-1219