

퍼지 가변구조제어를 가지는 자기부상시스템 제어

이 훈 이대식

대구대학교 정보통신공학부
경북 경산시 진량면 내리리 15

A Study on the Magnetic Levitation System Controller with Fuzzy Sliding Mode

Hun Lee Dae-Sik Lee

Taegu University, School of Computer and Communication
Kyungpook Kyongsan Jinryang Naeriri 15

Abstract - 일반적으로 슬라이딩모드 제어는 강인한 특성을 가지나, 시스템 제어의 설계자는 외란이나 변수 변화에 대한 최대 값을 알아야 한다. 그러나, 이와 같은 최대 값은 종종 쉽게 구할 수가 없다. 이에 반해 퍼지 제어는 불확실한 외란이나 변수변화를 가지는 시스템의 제어를 설계하는 효과적인 방법을 제시하고 있다. 본 논문에서는 이 두 가지 제어이론의 장점을 결합하여 자기부상시스템에 적용할 고성능의 제어를 설계하고자 한다.

경우에 PID 제어기로는 적절한 이득을 결정하는 것이 어렵고 신경회로망에서도 제어규칙의 생성이나 훈련과정이 매우 시간 소모적이며 과도한 계산량으로 인해 실제 적용이 어려운 문제점을 안고 있다[5-6].

이러한 문제점을 해결할 수 있는 제어방식중의 하나가 외란에 강인한 특성을 나타내는 가변구조제어(variable structure control : VSC)방식이다[7]. 가변구조제어는 시스템의 궤적이 스위칭 면에 도달하도록 시스템 구조를 변화시킴으로서 나타나는 불연속적 제어에 의해 특성화되는 비선형 시스템의 특수한 한 부류이다. 가변구조 시스템의 주된 장점은 파라메타 변화와 외란에 둔감하다는 것이다. 그러나 슬라이딩 면의 대부분이 상태 공간에 고정되고 주어진 초기상태에 독립인 선형 혹은 비선형으로 설계된다. 그러므로 슬라이딩 면으로부터 먼 초기조건에 대해 리칭 페이스(reaching phase) 문제가 존재한다. 또한, 가변구조제어는 원하는 과도상태 응답을 얻을 수 있지만 불연속적인 제어입력에 의해 채터링(chattering)이 발생하는 단점이 있다. 이와 같은 채터링 입력은 실제 시스템에 새로운 동특성을 유발하며 이는 원하지 않는 응답을 발생시킨다.

1. 서 론

자기부상(magnetic levitation)이란 자기력을 이용하여 물체를 공중에 띄우는 것을 말하는 것으로, 중력과 이에 반대방향으로 작용하는 전자기력 사이의 힘의 균형을 조절함으로써 가능하다. 자기부상 시스템의 구동부는 접촉이 없으므로 기계적인 마찰이 존재하는 부분에 적용하면 마찰로 인하여 발생하는 여러 가지 문제점들을 해결할 수가 있다. 자기부상 열차나 자기 베어링, 자기디스크 드라이브나 우주 탐사선 발사대 등은 현재 실용화되었거나 많은 연구가 진행중인 자기부상 원리의 응용분야이다. 그러나 자기부상의 원리는 기계적인 마찰을 획기적으로 줄일 수 있는 장점이 있는데 반해 제어기 설계에 있어서 많은 어려움이 따른다. 이는 대상 물체와 코일간의 거리에 따른 특성이 연속적으로 급격하게 변화하는 강한 비선형성을 가지고 있기 때문이다. 일반적으로 특정 동작점에서 선형 근사화 된 시스템을 이용한 PID 제어기가 많이 사용되었는데 동작점 부근의 일부 제어구간을 제외하고는 전체적으로 시스템의 좋은 성능을 보장하기가 어렵다. 또한 비접촉식 구동이므로 외부 외란에 매우 민감하게 반응하여 불안정하게 될 수도 있다[1].

고성능의 제어를 위하여 자기부상 시스템은 주로 PID 제어기에 퍼지이론이나 신경 회로망 이론의 장점을 접목한 제어기가 많이 이용되어 왔다[2-4]. 그 이유는 PID 제어기는 단순한 구조로 인하여 구현이 간편하며, 퍼지이론이나 신경회로망 이론은 그 특성상 보다 좋은 견실성을 보장할 수가 있으므로 비선형 성분과 외란에 대한 보상을 해주기 때문이다. 자기부상 시스템은 고유적인 불안정 시스템이며 비선형성이 강한 시스템으로써, 전류를 정밀하게 제어하여 코일의 실제 전류가 전류 명령을 얼마나 잘 추종하는가의 여부가 속도나 위치의 정밀 제어 성능을 좌우하게 된다. 따라서 초기 동조 후에도 시스템의 비선형성, 시변특성이 나타나는 자기부상 시스템의

퍼지이론은 Zadeh에 의해 1965년 논문이 소개되고 난 이후로 지금까지 많이 발전되어 왔다[8]. 일반적으로 시스템이 잘못 정의되었거나 복잡한 수학적 모델에 대하여 퍼지제어가 효과적인 방법을 제공한다. 퍼지 제어에 기초를 둔 제어기는 자동제어 방법에서 언어적인 제어방법으로 변환한다. 퍼지제어의 설계는 수학적 모델의 종합이나 해석에 의존하지 않는다. 모든 제어 규칙은 전문 지식이나 전문가의 경험에 의해 구성된다.

이와 같은 슬라이딩모드 제어와 퍼지제어의 장점들을 적절히 결합하는 연구는 제어이론에 있어서 매우 중요하며 많은 연구가 진행되고 있다[9-13].

본 논문의 목적은 자기부상 시스템의 고정밀 위치 제어가 설계이며 외란에 강인한 특성을 가지는 가변구조제어를 적용하고 가변구조 제어기가 가지는 단점으로 지적되는 채터링 문제의 완화를 위해서 퍼지이론을 접목하여 퍼지 가변구조 제어기를 도입하였다.

2. 본 론

2.1 자기부상 시스템

2.1.1 시스템의 구조

자기부상 시스템은 구조적으로 전자석의 원리와 같다. 코일에 흐르는 전류를 조절함으로써 자기장의 세기를 바꿔줄 수 있다는 이점과 영구자석으로는 얻기 힘든 강력한 자기장을 얻을 수 있다. 일반적으로 전압과 전류 관계식을 이용하여 전압의 세기를 조절함으로써 자기장의 세기를 조절한다. 자기부상 시스템의 구조는 그림1과 같다.

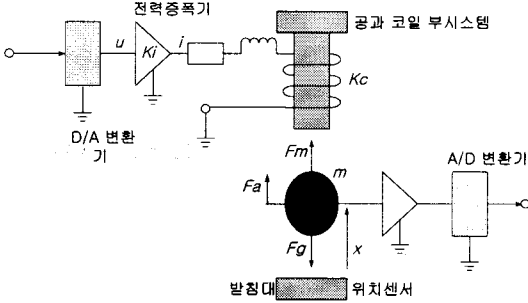


그림 1. 자기부상 시스템의 구조

그림1에서 F_a 는 공의 가속력이고 F_m 은 전자석에 의한 전자기력이며 F_g 는 중력가속도이다. u 는 제어 입력 전압을 나타내며 k_i , k_c , k_x 는 각각 코일의 증폭 이득, 코일 상수, 위치센서 이득이며 m 은 공의 무게, y 는 위치센서의 출력 전압, i 는 코일에 흐르는 전류, x 는 공의 위치이다.

2.1.2 시스템 모델링

그림1에서 보는바와 같이 자기부상 시스템은 다음과 같이 5개의 블록으로 나뉘볼 수 있다.

- a) D/A 변환기 (D/A converter)
- b) 전력 증폭기 (Power amplifier)
- c) 공과 코일 부시스템 (ball & coil subsystem)
- d) 위치 센서 (position sensor)
- e) A/D 변환기 (A/D converter)

전력 증폭기의 전압과 전류 관계식은 다음과 같다.

$$u = k_i \cdot i \quad (2.1)$$

여기서 k_i 는 코일의 증폭이득이며 양의 상수이다. 공과 코일 부시스템의 관계식은 다음과 같다.

$$F_a = F_m - F_g \quad (2.2)$$

여기서

$$F_a = m \ddot{x}, F_g = mg, F_m = k_c \frac{i^2}{x^2} \quad (2.3)$$

이다. m 은 공의 무게이며 x 는 공의 중심과 전자석의 끝 부분 사이의 거리이다. g 는 중력가속도이며 k_c 는 코일 상수로 양의 값이고 i 는 코일에 흐르는 전류이다.

식(2.3)을 식(2.2)에 대입하면

$$m \ddot{x} = k_c \frac{i^2}{x^2} - mg \quad (2.4)$$

이다. 식(2.1)을 식(2.4)에 대입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\ddot{x} = -g + k \frac{u^2}{x^2} \quad (2.5)$$

여기서 $k = \frac{k_c k_i^2}{m}$ 이며 양의 상수이다. 식(2.5)는 시스템에 인가하는 입력 전압을 조절함으로써 코일에 흐르는 전류를 제어할 수 있는 형태의 식으로 나타나며 상당한 비선형성을 가지는 시스템임을 알 수 있다.

2.2 자기부상 시스템의 위치제어

2.2.1 가변구조 제어기 설계

가변구조제어 이론의 가장 중요한 특성은 스위칭 평면 상에서 슬라이딩 모드를 형성하는데 있다. 시스템의 상태 변수들이 슬라이딩 모드에 있는 동안에는 시스템의 변수 변화나 외란에 둔감한 특성을 얻을 수 있게 된다. 이러한 가변구조제어의 장점은 대상 시스템의 정확한 모델링 없이 단지 변수 값의 변화 범위만을 알고도 정밀한 제어가 가능하다는 것이다.

일반적으로, 가변구조제어기는 스위칭 면상에서 제어구조를 바꾸는 불연속적인 제어 입력으로 특징 지워진다. 제어 입력은 아래와 같은 형태로 주어진다.

$$u = \begin{cases} U^+(x, t) & \text{만약 } s(x) > 0 \\ U^-(x, t) & \text{만약 } s(x) < 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

여기서 $s(x)$ 는 다음의 식을 만족하는 스위칭 면이다.

$$s(x) = C^T x = \sum_{i=1}^n c_i x_i, \quad c_i = \text{상수}, \quad c_n = 1 \quad (2.7)$$

이론적으로 스위칭 면상에서 무한대 스위칭이 발생하면, 상태 변수의 궤적은 스위칭 면상($s(x)=0$)에 머물면서 미끄러져 내려가게 된다. 이 상태를 슬라이딩 모드라 하며 슬라이딩 모드는 그림2에서 보는 바와 같이 스위칭 면 위를 시스템 상태 변수의 궤적이 움직일 때 스위칭 면($s(x)=0$) 위에서 발생된다.

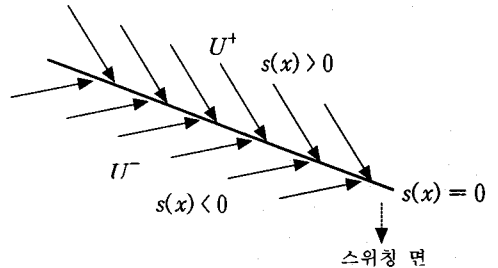


그림 2. 슬라이딩 모드

스위칭 면 위에서 슬라이딩 모드가 형성될 조건은 다음과 같다[7].

$$s \dot{s} < 0 \quad (2.8)$$

이것을 슬라이딩 모드 존재 조건이라 한다. 시스템의 상태 궤적의 움직임이 스위칭면 상에서 슬라이딩 모드를 형성하게 되면 시스템은 다음 식을 만족하게 된다.

$$s(x) = 0 \\ \dot{s}(x) = C^T \dot{x} = 0 \quad (3.9)$$

식(2.5)를 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2.10) \\ \dot{x}_2 = -g + k \frac{u^2}{x_1^2}$$

여기서 \dot{x}_1 과 x_1 과 x_2 는 공의 위치와 속도이고 k 는 양의 상수이다. 공의 위치와 속도에 대한 오차를 각각 다

음과 같이 정의하자.

$$e_1 = x_1 - x_{d1} \quad (2.11)$$

$$e_2 = x_2 - \dot{x}_{d1}$$

여기서, x_{d1} 은 요구되는 위치이다. 식(2.7)의 스위칭 면은 다음과 같이 두자.

$$s = \dot{e}_1 + ce_1 \quad (2.12)$$

여기서 C는 양의 상수이다. 식(2.8) 슬라이딩모드 존재조건을 판별하기 위하여, 식(2.12)을 시간에 대하여 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{s} = -g + k \frac{u^2}{x_1^2} + cx_2 \quad (2.13)$$

첫 번째로 $s > 0$ 인 경우는 식(2.13)가 영보다 작아야 한다. 즉,

$$\dot{s} = -g + k \frac{u^2}{x_1^2} + cx_2 < 0 \quad (2.14)$$

이며, 식(2.14)로부터 제어입력 u 는 다음과 같다.

$$-\frac{1}{\sqrt{k}} |x_1| \sqrt{g - cx_2} < u < \frac{1}{\sqrt{k}} |x_1| \sqrt{g - cx_2} \quad (2.15)$$

자기부상 시스템의 제어입력은 식(2.5)로부터 양의 값을 가지므로 식(2.15)은 다음과 같은 조건식을 가지게 된다.

$$0 \leq u < \frac{1}{\sqrt{k}} |x_1| \sqrt{g - cx_2} \quad (2.16)$$

\sqrt{k} 와 $|x_1|$ 은 양의 값을 가지므로 $g - cx_2 > 0$ 일 때 식(2.14)는 제어입력 $u = 0$ 에 대해 만족하며 안정하다.

두 번째로 $s < 0$ 인 경우는

$$\dot{s} = -g + cx_2 + k \frac{u^2}{x_1^2} + cx_2 > 0 \quad (2.17)$$

이며 제어입력 u 는 다음과 같다.

$$u > \frac{1}{\sqrt{k}} |x_1| \sqrt{g - cx_2} \quad (2.18)$$

본 논문에서는 다음과 같이 최대 제어 입력을 가지도록 설계한다[14].

$$U = U_{\max} > \left(\frac{1}{\sqrt{k}} |x_1| \sqrt{g - cx_2} \right)_{\max} \quad (2.19)$$

식 (2.8)의 슬라이딩 모드 존재조건을 만족하기 위해서는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$g - cx_2 > 0 \quad (2.20)$$

2.2.2 퍼지 가변구조 제어기 설계

퍼지제어기의 구조는 그림3과 같이 입력 데이터를 적절한 언어적인 값으로 변환시키는 퍼지화 과정과 퍼지논리 제어에서의 퍼지 데이터를 조작하고 언어적 제어규칙을 정의하는데 필요한 사항들을 정의한 지식 베이스부, 이에 의거한 추론의 형식으로 복수의 퍼지 제어규칙 집합과 퍼지 추론부, 출력 퍼지값을 실제 제어 입력으로 변환시키는 비퍼지화부로 구성되어 있다.

퍼지 가변구조제어기에서는 가변구조제어에서 사용하는 최대입력에 의한 채터링 문제를 완화하기 위하여 식(2.19)을 다음과 같이 변형한다.

$$U = \gamma \cdot U_{\max} \quad (2.21)$$

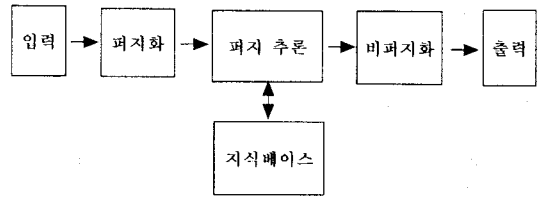


그림 3. 퍼지 시스템의 기본 구조

제어입력에서 적절한 $0 \leq \gamma \leq 1$ 값을 퍼지추론을 이용하여 추정하기 위하여 슬라이딩 면과 슬라이딩 면의 변화율을 입력 변수로 사용한다. s , \dot{s} 과 γ 의 소속 함수는 그림4와 같고, 소속 함수는 아래와 같은 언어 변수를 사용한다.

- ZE : Zero
- PH : Positive Huge NH : Negative Huge
- PB : Positive Big NB : Negative Big
- PM : Positive Medium N : Negative Medium
- PS : Positive Small NS : Negative Small

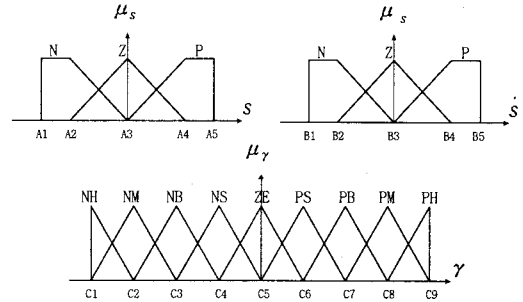


그림 4. 퍼지 집합의 소속함수

슬라이딩 모드 존재 조건을 만족하는 γ 값의 추정을 위해 표1과 같은 퍼지 추론규칙을 설정한다.

퍼지제어기에서 퍼지 추론 결과는 비퍼지화를 거치는데 이는 제어 출력의 가능성 분포를 표시하는 퍼지집합으로부터 가장 효과적인 제어기 출력 값을 정하는 것으로 본 논문에서는 퍼지 출력 γ 는 아래와 같은 무게중심법을 사용한다.

표 1 퍼지 규칙 테이블

	s	P	Z	N
\dot{s}				
P		NM	PS	PH
Z		NB	ZE	PB
N		NH	NS	PM

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i c_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} = \frac{[c_1 \dots c_n] \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_n \end{bmatrix}}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (2.22)$$

2.3 시뮬레이션

본 논문에서 사용하는 자기 부상 시스템의 사양은 $6.35 \leq x_1 \leq 12.65 \times 10^{-3} [m]$, $-0.25 \leq x_2 \leq 0.25 [m/sec]$, $0 \leq u \leq 5 [v]$ 이다.

식(2.8)의 슬라이딩 모드를 만족하는 제어입력 식(2.16)과 식(2.19)은 다음과 같다.

$$u = \begin{cases} 0 & \text{for } s > 0 \\ 5 & \text{for } s < 0 \end{cases}$$

식(2.20)로부터 가변구조제어의 c 값은 다음의 범위를 만족해야 한다.

$$0 < c \leq 39.2$$

시뮬레이션에서의 초기상태는 $x_1 = 12.65 \times 10^{-3}$,

$x_2 = 0$ 이고 $c = 30$, $x_d = 8 \times 10^{-3}$ 이다.

그림5와 6은 최대입력을 가지는 가변구조 제어기를 가지는 자기부상시스템의 응답이다. 그림 6에서 보듯이 심한 채터링 현상이 발생하며 이는 시스템의 2차 공진 주파수를 가지게 하므로 시스템에 악영향을 미친다.

그림 7과 8은 퍼지 가변구조제어기를 가지는 자기부상시스템의 응답특성이다. 가변구조제어기에 비하여 채터링이 현저히 감소하였음을 볼 수 있고, 응답의 특성도 개선되었음을 볼 수 있었다.

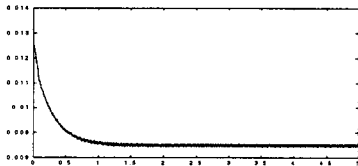


그림 5. 위치응답(가변구조 제어기)

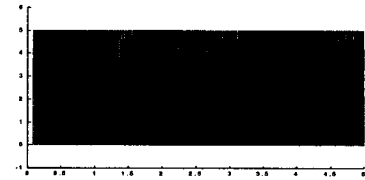


그림 6. 제어 입력(가변구조 제어기)

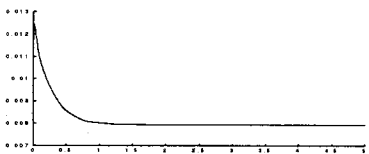


그림 7. 위치응답(퍼지가변구조 제어기)

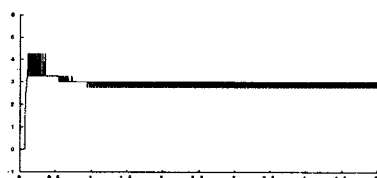


그림 8. 제어 입력(퍼지가변구조 제어기)

3. 결 론

일반적으로 슬라이딩모드 제어는 강인한 특성을 가지나, 시스템 제어의 설계자는 외란이나 변수변화에 대한 최대 값을 알아야 한다. 그러나, 이와 같은 최대 값은 종종 쉽게 구할 수가 없다. 이에 반해 퍼지 제어는 불확실한 외란이나 변수변화를 가지는 시스템의 제어를 설계하는 효과적인 방법을 제시하고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 장점을 가지는 두 제어이론을 결합한 퍼지 가변구조제어기를 사용하여 자기부상시스템 제어기 설계를 하였다. 일반적으로 소속함수의 변수 값들을 시행착오를 거쳐 결정해야 하나, 적용기법을 이용하면 해결할 수 있다. 앞으로 이 문제에 대하여 더욱 연구해 나가고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1]최기봉 외3명, "A Study on Path Control of Fine Manipulator Based on Magnetic Levitation," KACC Proc. Oct. 1997
- [2]장태정, 이재환, "Control of an Experimental Magnetic Levitation System Using Feedforward Neural Network Controller," KACC Proc. Oct. 1997.
- [3]Chang-goo Lee, Jeong-heun Im, "Design of Neural Network Based Self-Tuning Fuzzy PID Controller," KIEE Trans. Vol. 50D, No.1, pp22-30, Jan. 2001
- [4]박영웅 외2명, "An Application of Levitation Systems into a 3-axis Attitude Detector," KACC Proc. October 1998
- [5]Li CS, Priemer R, "Self-learning-general purpose PID controlier," Journal of the Franklin Ins. Vol. 334B, No.2, 1997.
- [6]Marian B, Gorzalczary, "On some Idea of a Neuro-Fuzzy Controller," Information Science, Vol. 120, No.1-4, 1999
- [7]Alan S.I. Zinober, "Variable Structure and Lyapunov Control," Printed in Great Britain, 1994.
- [8]Zadeh, L.A, "Fuzzy Set," Information control, IE-40, pp23-36, 1965.
- [9]J.C.Wu and T.S.Liu, "A Sliding-mode Approach to Fuzzy Control Design," IEEE Trans. Vol.4, No.2, pp141-151, March. 1996.
- [10]Chaio-shiung Chen and Wen-liang Chen, "Robust Adaptive Sliding Mode Control using Fuzzy Modeling for an Inverted Pendulum System," IEEE Tran. Vol. 45, No.2, pp297-306, April. 1998.
- [11]HeeJin Lee, Euntai Kim, HyungJin Kang, Mignon Park, "Design of a Sliding mode Controller with Fuzzy Sliding Surfaces," IEE Proc. Vol. 145, No.5, pp411-418, Sep. 1998.
- [12]Rainer, Palm, "Robust Control by Fuzzy Sliding Mode," Automatica, Vol.30, No.9, pp1249-1437, 1994.
- [13]Vadim I, Utkin, "Sliding Mode Control of Pendulum System," MOVIC '98, pp787-792, Aug. 1998.
- [14]S.R.Habibi and R.J. Richards, "Sliding Mode Control of an Electrically Powered Industrial Robot," IEE Proc. D, Vol.139, No.2, pp207-225, Mar. 1992.