

ϵ -조절 요소를 가진 부분 상태 궤환 제어를 이용한 자기부상 시스템의 제어

논문
60-8-18

Control of Electromagnetic Levitation System using ϵ -scaling Partial State Feedback Controller

박 규 만* · 최 호 림†
(Gyu-Man Park · Ho-Lim Choi)

Abstract - The electromagnetic levitation(EMS) system is one of the well-known nonlinear system because of its nonlinearity and several control techniques have been proposed. We propose an ϵ -scaling partial feedback controller for the ball position control of the EMS system. The key feature of our proposed controller is the use of the scaling factor ϵ which provides a function of controller gain tuning along with robustness. In this paper, we show the stability analysis of our proposed controller and the convergence analysis of the state observer in terms of ϵ -scaling factor. In addition, the experimental results show the validity of the proposed controller and improved control performance over the conventional PID controller.

Key Words : Electromagnetic levitation system, ϵ -scaling, Output feedback, Input-output linearization

1. 서 론

자기부상 시스템은 입력전압을 통해 코일에서의 전류 조절에 의해 볼의 공극을 제어하는 비선형 시스템으로서 불안정한 시스템의 안정화와 관련하여 다양한 제어기법이 사용되어 왔다 [1]-[2], [4], [9]-[11]. 슬라이딩 제어기법을 기반으로 한 상태 궤환 제어가 [1]에서 제안되었는데, 이 경우 제어입력의 채터링 문제가 보고되었으며 또한 볼의 움직임을 미분기로 근사화한 기법이 채용되었다. 고이득 제어기법을 적용한 기법을 [2]에서 2차로 표현된 시스템에 대해서 제안하였고, [9]에서는 PID 제어기법을 적용하였다. 자기부상 시스템은 비선형성이 강하여 [9]에서 제안한 PID 제어기는 오버슈터가 꾸준히 관측되어온 단점이 보고되었다.

본 논문에서 다루고자 하는 Quanser사의 자기부상 시스템은 3개의 상태로 구성되어 있는데 실제 시스템은 두 개의 센서로부터 볼의 위치와 코일의 전류만을 직접 측정하여 알 수 있다. 따라서, [1]의 미분기 근사화법과는 달리 상태 관측기를 설계하여 볼의 움직이는 속도를 관측하고자 한다. 비선형 시스템에 대한 상태 관측기의 설계와 분석에 대해서 다양한 연구가 진행되어 왔다 [3], [5], [7].

본 논문에서는 자기부상 시스템에 대해서 ϵ 이라는 조절 요소를 포함한 부분 상태 궤환 제어를 제안한다. 측정 가능한 볼의 위치와 전류는 센서의 정보를 그대로 활용하고 볼의 움직임은 ϵ -조절요소 상태 관측기를 이용하여 강인하게 관측한다. 또한 제어기의 이득에도 ϵ -조절요소를 적용하

여 전체적으로 ϵ -조절요소를 가진 부분 상태 궤환 제어를 제안하고 분석하고자 한다. ϵ 은 시스템의 수렴속도와 반응을 향상시키고 강인성을 향상시키는 효과를 가지고 있다. 기존의 결과 [4], [11]은 전체 상태의 관측을 전제로 하고 선형화된 기법을 적용하여 본 시스템에는 적용을 할 수 없다. 제안된 제어기에 대해서 ϵ 값에 따른 전체시스템의 안정성 분석 및 수렴성 분석을 하였으며 일반적으로 산업현장에서 널리 사용되는 [9]의 PID제어기와 비교하여 성능이 개선된 것을 실험을 통해 검증하였다.

2. 자기부상 시스템과 시스템의 재구성

본 논문에서 다루는 Quanser사의 자기부상 시스템은 그림 1에서 보는 것과 같으며 자기 부상 시스템을 도식적으로 나타낸 것은 그림 2와 같다. 자기부상 시스템의 모델링은 식 (1)과 같다 [12].

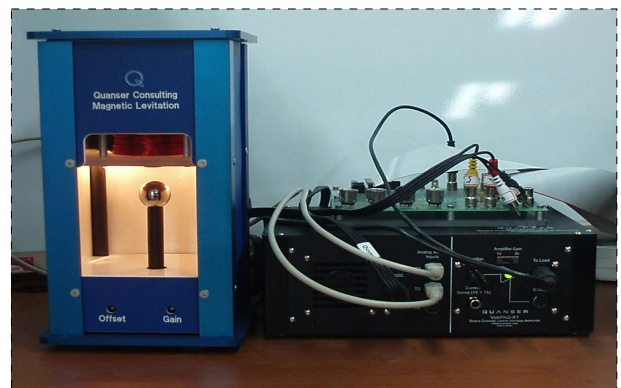


그림 1 자기부상 시스템
Fig. 1 Electromagnetic levitation system

* 준 회원 : 동아대학교 공과대학 전기공학과 석사과정

† 교신저자, 정회원 : 동아대학교 전기공학과 조교수

E-mail : hlchoi@dau.ac.kr

접수일자 : 2011년 5월 25일

최종완료 : 2011년 7월 7일

$$V = RI + L \left(\frac{d}{dt} I \right)$$

$$\ddot{x} = -\frac{1}{2} \frac{K_m I^2}{Mx^2} + g \quad (1)$$

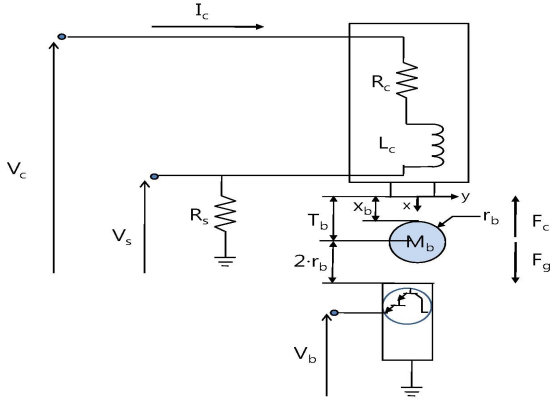


그림 2 자기부상 시스템의 개략도
Fig. 2 Schematic model of the MAGLEV plant

여기에서, x 는 볼의 위치, $R(=R_c+R_s)$ 은 코일의 저항, I 는 코일의 전류, L 은 코일의 인덕턴스, M 은 볼의 질량, g 는 중력 가속도이다.

여기서 시스템 (1)은 비선형성이 높은 시스템이므로 입-출력 궤환 선형화 기법(Input-output feedback linearization)을 적용하여 시스템을 보다 다루기 쉬운 선형 시스템으로 변환하여 표현하도록 한다. 입-출력 궤환 선형화 기법은 비선형 시스템에 상태 궤환을 가하여 결과적인 궤환 시스템이 선형의 특성을 갖도록 하는 것이다 [6]. 먼저 식 (1)을 상태 방정식 형태로 나타내기 위해 식 (2)와 같이 설정하면

$$x = x_1, \dot{x} = x_2, I = x_3, V = u \quad (2)$$

상태 방정식의 형태는 식 (3)과 같다.

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = g - \frac{1}{2} \frac{K_m x_3^2}{Mx_1^2}$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{R}{L} x_3 + \frac{1}{L} u$$

$$y = z_1 \quad (3)$$

여기서 시스템의 입력은 u 이고 시스템의 측정 가능한 출력, 즉 볼의 위치는 y 로 표시한다. $y = z_1 = x_1$ 인 입-출력 상태 궤환 선형화를 통해 다음과 같이 변환식을 설정할 수 있다.

$$\dot{z}_1 = z_2$$

$$\dot{z}_2 = z_3$$

$$\dot{z}_3 = \frac{K_m}{M} \left(\frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} + \frac{R}{L} \frac{x_3^2}{x_1^2} - \frac{1}{L} \frac{x_3^2}{x_1^2} u \right)$$

$$= \alpha(x) + \beta(x)u + \frac{K_m}{M} \frac{x_2 x_3^2}{x_1^3}$$

$$y = z_1 \quad (4)$$

여기에서 $\alpha(x)$ 와 $\beta(x)$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$\alpha(x) = \frac{K_m}{M} \frac{R x_3^2}{L x_1^2}$$

$$\beta(x) = -\frac{K_m}{LM} \frac{x_3}{x_1^2} \quad (5)$$

3. ϵ -조절 요소를 가진 부분 상태 궤환 제어기

3.1 극배치 기법에 기반한 ϵ -조절요소 제어기

식 (4)로부터 시스템의 비선형성을 소거시키는 입-출력 궤환 선형화에 기반한 outer 제어기 u 를 다음과 같이 정할 수 있다.

$$u = L \frac{x_1^2}{x_3} \left(\frac{R}{L} \frac{x_3^2}{x_1^2} - \frac{M}{K_m} v \right) \quad (6)$$

여기서 내부(inter) 제어기 v 에 ϵ -조절요소를 결합하여 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v = \frac{k_1}{\epsilon^3} z_1 + \frac{k_2}{\epsilon^2} z_2 + \frac{k_3}{\epsilon} z_3 - \frac{K_m}{M} \frac{x_2 x_3^2}{x_1^3} \quad (7)$$

여기서 $\epsilon > 0$ 이다. 식 (6)과 (7)에서 분모에 상태 x_1 과 x_3 가 있으므로 x_1 또는 x_3 가 0이 되는 점에서는 특이점(singularity)이 발생할 수가 있다. 하지만, 실제 시스템에서 물리적으로 시스템의 출력 $y = x_1$ 이 동작하는 영역은 $0.4cm \leq y \leq 1.4cm$ 이고 시스템은 전류 x_3 가 0일 때는 동작하지 않으며 전류 $x_3 > 0$ 이 되는 영역에서만 동작하므로 특이점이 발생하지 않는다.

3.2 ϵ -조절요소 상태 관측기 및 부분 상태 궤환 제어기

자기 부상 시스템은 위치(x_1)센서와 전류(x_3)센서만 가지고 있기 때문에 볼의 속도(x_2)의 상태변수를 측정할 수 없다. 볼의 속도(x_2)를 측정하기 위해서 비선형 관측기가 필요하다. 비선형 관측기는 [3]에서 제안된 방법을 기반으로 하여 다음 식과 같이 ϵ -조절요소를 갖는 관측기를 제안한다.

$$\dot{\hat{z}} = A\hat{z} + B\hat{v} - L(\epsilon)(y - C\hat{y}) + \delta(x, \hat{z}) \quad (8)$$

여기서 $\epsilon > 0$ 이다. 이제 제어기 (7) 대신에 관측된 상태 \hat{z} 를 사용한 부분 상태 궤환 제어기를 \hat{u} 로 표현한다.

$$\hat{u} = L \frac{x_1^2}{x_3} \left(\frac{R}{L} \frac{x_3^2}{x_1^2} - \frac{M}{K_m} \hat{v} \right) \quad (9)$$

이 때 \hat{v} 는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{v} = \frac{k_1}{\epsilon^3} z_1 + \frac{k_2}{\epsilon^2} z_2 + \frac{k_3}{\epsilon} z_3 - \frac{K_m}{M} \frac{z_2 z_3^2}{x_1^3} \quad (10)$$

비선형 관측기 (8)의 구체적인 형태는 다음과 같다.

$$\dot{\hat{z}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_A \hat{z} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_B \hat{v} - \begin{bmatrix} l_1 \\ \epsilon \\ l_2 \\ \epsilon \\ l_3 \\ \epsilon \end{bmatrix} (y - C\hat{y}) + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_m}{M} \frac{x_3^2}{x_1^3} z_2 \\ \frac{K_m}{M} \frac{x_3^2}{x_1^3} z_2 \end{bmatrix}}_{\delta(x, \hat{z})}$$

$$y = [1 \ 0 \ 0] \quad (11)$$

먼저 시스템의 기본적인 안정성을 위해 A_K, A_L 의 값이 Hurwitz가 되도록 k_1, k_2, k_3 와 l_1, l_2, l_3 의 값을 선택한다. 여

기서 $A_L = A + LC, A_K = A + BK$ 이다.

3.3 ϵ -조절요소 상태 관측기의 안정성 분석

상태 관측 오차를 $e = z - \hat{z}$ 라고 정의하면,
 $\dot{e} = \dot{z} - \dot{\hat{z}}$

$$= Ae + L(\epsilon)Ce + \delta(x, z) - \delta(x, \hat{z}) \\ = A_L(\epsilon)e + \delta(x, z) - \delta(x, \hat{z}) \quad (12)$$

이 때 $A_L(\epsilon) = A + L(\epsilon)C, A_L = A + LC$ ($L = [l_1, l_2, l_3]^T$) 이다. 양정치행렬(positive definite) $E(\epsilon) = \text{diag}[1, \epsilon, \epsilon^2]$ 라 정의하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다 [3].

$$\epsilon A_L(\epsilon) = E(\epsilon)^{-1} A_L E(\epsilon) \quad (13) \\ A_L = \epsilon E(\epsilon) A_L(\epsilon) E(\epsilon)^{-1} \\ A_L^T = \epsilon E(\epsilon)^{-1} A_L^T(\epsilon) E(\epsilon)$$

행렬 A_L 이 Hurwitz이므로 Lyapunov 방정식 $A_L^T P + P A_L = -I$ 를 얻고 식 (13)을 적용하면 식 (14)를 얻는다.

$$A_L^T(\epsilon) P_L(\epsilon) + P_L(\epsilon) A_L(\epsilon) = -\epsilon^{-1} E(\epsilon)^2 \\ P_L(\epsilon) = E(\epsilon) P_L E(\epsilon) \quad (14)$$

Lyapunov 함수를 다음과 같이 설정한다.

$$V_o(e) = e^T P_L(\epsilon) e \quad (15)$$

식 (14), (15)을 이용하여 $\dot{V}_o(e)$ 를 구하면

$$\dot{V}_o(e) = e^T P_L(\epsilon) \dot{e} + e^T P_L(\epsilon) \dot{e} \\ = [A_L(\epsilon)e + \delta(x, z) - \delta(x, \hat{z})]^T P_L(\epsilon) e \\ + e^T P_L(\epsilon) [A_L(\epsilon)e + \delta(x, z) - \delta(x, \hat{z})] \\ = e^T [A_L(\epsilon)^T P_L(\epsilon) + P_L(\epsilon) A_L(\epsilon)] e \\ + 2e^T P_L(\epsilon) [\delta(x, z) - \delta(x, \hat{z})] \\ \leq -\epsilon^{-1} \|E(\epsilon)e\|^2 \\ + 2\|P_L\| \|E(\epsilon)e\| \|E(\epsilon)[\delta(x, z) - \delta(x, \hat{z})]\|_1 \quad (16)$$

여기에서 $\|E(\epsilon)[\delta(x, z) - \delta(x, \hat{z})]\|_1$ 는

$$\|E(\epsilon)[\delta(x, z) - \delta(x, \hat{z})]\|_1 = \|\epsilon^2 \frac{K_m}{M} \frac{x_3^2}{x_1^3} e_2\|_1 \\ \leq \epsilon \frac{K_m}{M} \frac{x_3^2}{|x_1^3|} \|E(\epsilon)e\| \quad (17)$$

따라서 최종적으로 $\dot{V}_o(e)$ 를 정리하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\dot{V}_o(e) \leq -\epsilon^{-1} \|E(\epsilon)e\|^2 + 2\epsilon \|P_L\| \frac{K_m}{M} \frac{x_3^2}{|x_1^3|} \|E(\epsilon)e\|^2 \\ \leq -N_o \|E(\epsilon)e\|^2, N_o = \epsilon^{-1} - 2\epsilon \|P_L\| \frac{K_m}{M} \frac{x_3^2}{|x_1^3|} \quad (18)$$

식 (18)에서 자기부상 시스템의 동작영역에서 $N_o > 0$ 이 되게 하는 ϵ 이 존재함을 알 수 있다.

3.4 전체 시스템의 안정성 분석

전체 폐루프 시스템은 다음과 같다.

$$\dot{e} = A_L(\epsilon)e + \delta(x, z) - \delta(x, \hat{z}) \quad (19)$$

$$\dot{z} = A_K(\epsilon)z + \delta(x, z) - BK(\epsilon)e \quad (20)$$

여기에서 $A_K(\epsilon) = A + BK(\epsilon)$ 이며 식 (13)의 방정식들과 비슷한 방정식을 얻을 수 있다.

$$\epsilon A_K(\epsilon) = E(\epsilon)^{-1} A_K E(\epsilon) \quad (21) \\ A_K = \epsilon E(\epsilon) A_K(\epsilon) E(\epsilon)^{-1} \\ A_K^T = \epsilon E(\epsilon)^{-1} A_K^T(\epsilon) E(\epsilon)$$

행렬 $A_K = A + BK$ 는 Hurwitz이다. 따라서 유사하게 $A_K^T P_K + P_K A_K = -I$ 를 얻으며 식 (21)을 적용하면 식 (22)를 얻는다.

$$A_K^T(\epsilon) P_K(\epsilon) + P_K(\epsilon) A_K(\epsilon) = -\epsilon^{-1} E(\epsilon)^2 \\ P_K(\epsilon) = E(\epsilon) P_K E(\epsilon) \quad (22)$$

다음과 같이 Lyapunov 함수를 설정한다.

$$V_c(z) = z^T P_K(\epsilon) z \quad (23)$$

그러면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{V}_c(z) = z^T P_K(\epsilon) \dot{z} + z^T P_K(\epsilon) \dot{z} \\ = [A_K(\epsilon)z + \delta(x, z) - BK(\epsilon)e]^T P_K(\epsilon) z \\ + z^T P_K(\epsilon) [A_K(\epsilon)z + \delta(x, z) - BK(\epsilon)e] \\ = z^T [A_K^T(\epsilon) P_K(\epsilon) + P_K(\epsilon) A_K(\epsilon)] z \\ + z^T P_K(\epsilon) [\delta(x, z) - BK(\epsilon)e] \\ \leq -\epsilon^{-1} \|E(\epsilon)z\|^2 + 2z^T P_K(\epsilon) [\delta(x, z) - BK(\epsilon)e] \\ \leq -\epsilon^{-1} \|E(\epsilon)z\|^2 + 2\|P_K\| \|E(\epsilon)z\| \|E(\epsilon)\delta(x, z)\|_1 \\ - 2z^T E(\epsilon) P_K E(\epsilon) BK(\epsilon)e \quad (24)$$

여기서 $\|E(\epsilon)\delta(x, z)\|_1$ 은

$$\|E(\epsilon)\delta(x, z)\|_1 = \|\epsilon^2 \frac{K_m}{M} \frac{x_3^2}{x_1^3} z_2\| \\ \leq \epsilon \frac{K_m}{M} \frac{x_3^2}{x_1^3} \|E(\epsilon)z\| \quad (25)$$

식 (24)에서 $E(\epsilon)BK(\epsilon)e = \epsilon^{-1}BKE(\epsilon)e$ 이고, $\dot{V}_c(z)$ 를 정리하면 식 (26)과 같다.

$$\dot{V}_c(z) \leq -N_c \|E(\epsilon)z\|^2 + 2\rho \|E(\epsilon)z\| \|E(\epsilon)e\| \quad (26)$$

이 때 $N_c = \epsilon^{-1} - \epsilon \frac{K_m}{M} \frac{x_3^2}{x_1^3} \|P_K\|, \rho = \epsilon^{-1} \|P_K\| \|K\|$ 이다. 여

기서도 $N_c > 0$ 을 만족하는 ϵ 을 시스템의 동작영역에서 구할 수 있다. 전체 시스템의 Lyapunov 함수를 $V(e, z) = V_o(e) + dV_c(z), d > 0$ 으로 설정한다. 그러면 다음의 부등식을 얻을 수 있다.

$$\dot{V}(e, z) \leq -N_o \|E(\epsilon)e\|^2 - dN_c \|E(\epsilon)z\|^2 \\ + 2d\rho \|E(\epsilon)z\| \|E(\epsilon)e\| \quad (27)$$

식 (27)을 $\dot{V}(e, z) \leq -\Sigma^T M \Sigma$ 로 정리하면

$$\Sigma = - \begin{bmatrix} \|E(\epsilon)e\| \\ \|E(\epsilon)z\| \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} N_o - d\rho \\ -d\rho \quad dN_c \end{bmatrix} \quad (28)$$

$d < \frac{N_o N_c}{\rho^2}$ 인 조건에서, $\dot{V}(e, z) < 0$ 되고 $e \rightarrow 0, z \rightarrow 0$ 이 되어 전체 시스템은 안정하게 된다.

3.5 ϵ -조절요소 상태 관측기의 수렴 속도 분석

여기서는 ϵ -조절요소를 이용하여 관측기의 수렴 속도를 강인하게 조절할 수 있음을 정리한다. 식 (15)에서 다음과

같은 식을 구할 수 있다.

$$\lambda_{\min}(P_L)\|E(\epsilon)e\|^2 \leq V_o(e) \leq \lambda_{\max}(P_L)\|E(\epsilon)e\|^2 \quad (29)$$

식 (18), (29)로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$V_o(e) \leq V_o(0)e^{-\frac{\epsilon^{-1}}{\lambda_{\max}(P_L)}t} \quad (30)$$

이를 정리하여 나타내면

$$\|E(\epsilon)e\|^2 \leq \frac{\lambda_{\max}(P_L)}{\lambda_{\min}(P_L)}\|E(\epsilon)e(0)\|^2 e^{-\frac{\epsilon^{-1}}{\lambda_{\max}(P_L)}t} \quad (31)$$

최종적으로 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\|E(\epsilon)e\| \leq \sqrt{\frac{\lambda_{\max}(P_L)}{\lambda_{\min}(P_L)}}\|E(\epsilon)e(0)\| e^{-\frac{1}{2\epsilon\lambda_{\max}(P_L)}t} \quad (32)$$

즉, 조절요소 ϵ 을 이용하여 관측기의 수렴속도를 조절 할 수 있다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 ϵ 이 작을수록 더 빠른 수렴이 보장되며 이는 제어기의 성능을 강인하게 향상 시킬 수 있다.

4. 실험 결과

표 1은 Quanser사의 자기부상 시스템의 사양을 나타낸 것이다. 전원공급 장치 또한 Quanser사의 $\pm 24V, 5A$ 인 VoltPAQ-X1을 사용하였다.

표 1 자기부상 시스템의 사양

Table 1 Electromagnetic levitation system specifications

Parameter	Description	Value
L	Coil Inductance	412.5 mH
R	Resistance	11 Ω
K_m	Electromagnetic Force Constant	$6.5308 \times 10^{-5} N \cdot m^2/A^2$
M	Mass of Ball	0.064 kg
g	Gravitational Constant	9.81 m/s^2
T_b	Air gap	0.02 m

제안된 제어기의 기본 설계를 위해 A_K 의 극점을 -25, -26, -50으로 정하였고, A_L 의 극점을 -850, -850, -850으로 정하였다. 그 다음 ϵ -조절요소의 값에 따른 제어 결과를 정리하여 ϵ 에 따른 제어 성능의 비교를 통해 이론적인 분석과 일치함을 보이고자 하였다.

그림 3, 4는 ϵ 값에 따라 성능이 변함을 보인 실험 결과이다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 $\epsilon=1$ 인 경우 4초 부근에서 수렴을 하고 채터링이 있는 것을 확인할 수 있고 $\epsilon=0.8$ 인 경우는 2초 부근에서 수렴을 하고 채터링이 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 ϵ 이 작을수록 더 빠른 수렴속도와 더 정밀한 위치 제어가 가능함을 확인할 수 있다. 하지만, ϵ 값을 계속 줄일수록 제어기의 분모값이 작아져서 입력의 포화 또는 피킹(peaking) 현상이 발생 할 수 있으므로 실제적으로 줄일 수 있는 값에는 한계가 있다. 따라서 볼의 수렴속도와 코일의 전류를 잘 고려해서 ϵ 값을 설정해야 한다.

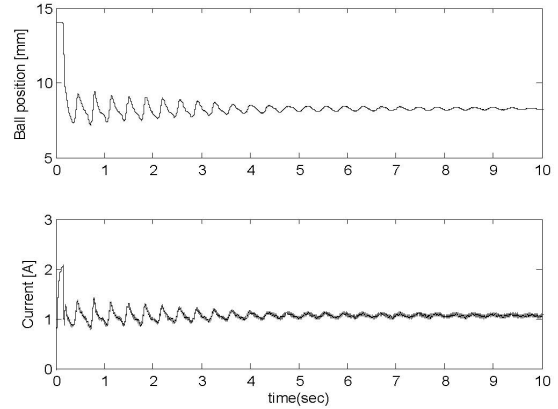


그림 3 실험 결과 : $\epsilon = 1$

Fig. 3 Experimental result : $\epsilon = 1$

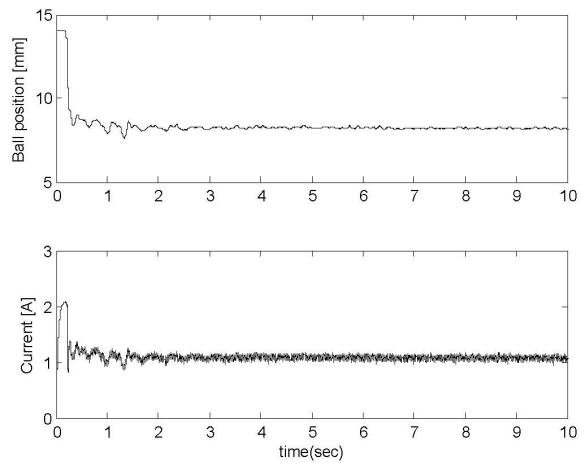


그림 4 실험 결과 : $\epsilon = 0.8$

Fig. 4 Experimental result : $\epsilon = 0.8$

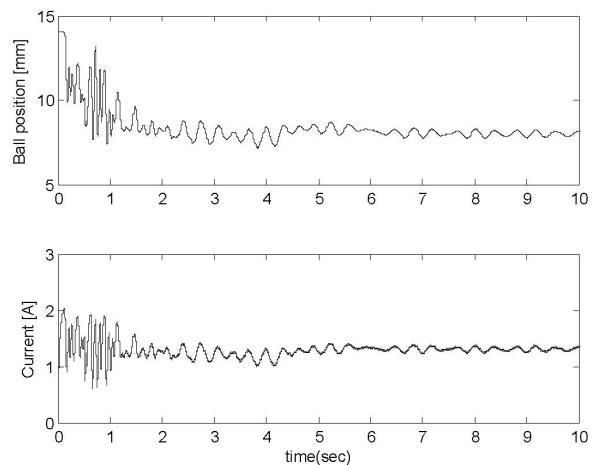


그림 5 실험 결과 : 일반적인 PID 제어기 [9]

Fig. 5 Experimental result : conventional PIDcontroller [9]

그림 5는 PID제어기를 이용하여 자기부상 시스템의 볼의 위치와 코일의 전류를 나타낸 그림이다. 이득값에 따라서

오버슈트와 수렴속도에 영향을 미치기 때문에 최적화된 이득값을 정해야된다. 여기서 PID제어기의 최적화된 이득값을 $K_p = -4500$, $K_I = -80000$, $K_D = -600$ 으로 정하였다. 그림 3-5에서 알 수 있듯이 제안된 제어기가 PID제어기 보다 오버슈트와 수렴속도가 개선된 것을 확인 할 수 있다. PID제어기의 경우는 자기부상 시스템의 높은 비선형성으로 인해 오버슈트가 자주 발생하는 것으로, [2], [9]의 결과에서도 공통적으로 보고되고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 자기부상 시스템의 동역학 방정식으로부터 입-출력 궤환 선형화 기법을 기반으로 ϵ -조절 요소를 가진 부분 상태 궤환 제어기를 제안하였다. 제어기의 강인성과 수렴속도를 ϵ 을 적용함으로써 ϵ 값에 따른 전체시스템의 안정성 분석 및 수렴성 분석을 하였으며 실제 실험을 통해 ϵ 값에 따라 수렴속도와 제어 성능의 향상을 입증하였고, 또한 PID 제어기와 비교하여 성능이 더 개선된 것을 검증해 보았다. 뿐만 아니라, 한 개의 통일된 파라미터 ϵ 만을 이용하여 제어 이득의 분석적인 튜닝이 가능하므로 AD-Hoc 방식의 3개의 이득을 조절하는 PID 제어기보다 더 분석적이고 간편함을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] N. F. Al-muthairi and M. Zribi, "Sliding mode control of a magnetic levitation system," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. Issue 2, pp. 93-107, 2004.

[2] H.-L. Choi, H.-S. Shin, M.-S. Koo, J.-T. Lim, and Y.-M. Kim, "Nonlinear control of an electromagnetic levitation system using high-gain observers for magnetic bearing wheels," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 15, no. 6, pp. 573-580, 2009.

[3] H.-L. Choi and J.-T. Lim, "Output feedback stabilization for a class of Lipschitz nonlinear systems," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E88-A, no. 2, pp. 602-605, 2005.

[4] A.E. Hajjaji and M. Ouladsine, "Modeling and nonlinear control of magnetic levitation systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 4, pp. 831-838, 2001.

[5] N. H. Jo and J. H. Seo, "Input output linearization approach to state observer design for nonlinear system," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 45, no. 12, pp. 2388-2393, 2000.

[6] H.K.Khalil, *Nonlinear systems*, 3rd, Prentice Hall Inc., 2002.

[7] J.-S. Kim, G.-M. Park, and H.-L. Choi, "Sliding mode control design under partial state feedback for ball and beam systems," *International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 1293-1296, 2010.

[8] S.-H. Lee, H.-K. Sung, J.-T. Lim, and Z. Bien, "Self-tuning control of electromagnetic levitation systems," *Contr. Engr. Practice*, vol. 8, pp. 749-756, 2000.

[9] Y. Park, M.-R. Nam, I.-H. Seo, S.-H. Lee, J.-T. Lim, and M.-J. Tahk, "Least squares based PID control of an electromagnetic suspension system," *KSAS Int. Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 69-78, 2003.

[10] P.K. Sinha, *Electromagnetic Suspension: Dynamics and Control*, Peter Peregrinus Ltd., London, 1987.

[11] D.L. Trumper, S.M. Olson, and P.K. Subrahmanyam, "Linearizing control of magnetic suspension systems," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 5, no. 4, pp. 427-438, 1997.

[12] Quanser, *Maglev user manuals*, 2008.

저 자 소 개



박 규 만 (朴 珪 萬)

2010년 동아대학교 전기공학과 졸업
2010년 ~ 현재 동 대학원 석사과정 재학
중 관심분야는 입-출력 궤환 선형화 및 적응 제어기 설계, 관측기 설계 기법 등



최 호 림 (崔 虎 林)

1996년, Univ. of Iowa, USA(학사). 1999년, 2004년 KAIST(석·박사). KAIST 정보전자연구소 연구교수, KIST 인지로봇연구단 선임연구원, 2007년~현재 동아대학교 전기공학과 조교수, 관심분야는 비선형 시스템의 궤환선형화 기법, 시지연 시스템, DEDS등.