

자기부상식 미세구동기의 비집중 적응제어기법

Decentralized Adaptive Control Scheme for Magnetically Levitated Fine Manipulators

申 恩 珠*, 宋 泰 勝*, 柳 鑄*, 崔 起 鳳**

(Eun-Joo Shin*, Tae-Seung Song*, Joon Lyou*, and Kee-Bong Choi**)

요 약

본 논문에서는 각 운동축들(자유도 또는 부시스템)간의 상호연관성에도 불구하고 자기부상식 미세구동기가 주어진 경로를 가능한 정밀하게 추종하도록 하는 비집중 적응제어기 설계가 제시되었다. 본 제어기는 알고있는 부시스템을 기반으로 하는 모델기준제어와 국부적응제어로 구성된다. 전자는 매니퓰레이터의 운동을 안정화시켜 기준모델을 따라가도록 하고, 후자는 간섭작용을 무기력화시키는 수준만큼 국부이득을 조정하여 전체시스템의 안정을 도모하고 연관성에 의해 유발되는 추정오차를 줄여준다. 실험결과를 통하여 제시된 기법이 기존의 PID제어기에 비해 추종성능과 외란제거 능력면에서 우수함을 보였다.

Abstract

This paper presents a decentralized adaptive controller design for a Magnetically Levitated Fine Manipulator to follow the given trajectory as close as possible in spite of coupling effects between motion axes(degree of freedoms or subsystems). The present controller consists of two parts: the model reference controls based on known subsystems and the local adaptive controls. The former stabilizes the motion of the manipulator so as to follow that of the reference model. The latter reduces tracking errors due to coupling disturbances by adjusting the local gains to such levels that override interactions and assure the stability of the overall system. Through several experimental results, it has been shown that the decentralized adaptive control scheme has better tracking performances comparing to the PID controller case as well as good disturbance(coupling) rejection property.

Keywords : Fine manipulator, Coupling effects, Decentralized control, Adaptation

I. 서 론

산업의 진행방향이 생산시스템의 소형화 및 고정

밀화 되는 추세에 따라 작은 영역에서 고 분해능으로 위치를 결정할 수 있는 고정밀 미세구동기에 대한 관심이 증대되고 있다. 미세구동기의 여러 구동원중 자기력을 이용한 부상시스템은 물리적인 접촉부위가 없어 마찰에 의한 분진이 발생하지 않아 반도체 공정과 같은 청정환경용 구동기로 선호되고 있다[1]. 자기부상시스템은 마찰력을 무시할 수 있고 세밀한 힘 제어가 가능하며 미세한 위치결정기능 등의 장점을 가지

* 忠南大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics Eng., Chungnam Nat. Univ.)

** 韓國科學技術院 機械工學科

(Dept. of Mechanical Eng., KAIST)

接受日: 1999年7月13日, 修正完了日: 1999年11月18日

고 있으나, 고유적으로 불안정하고 구동부의 접촉부위가 없는 관계로 외란에 의해 매우 민감하게 반응하여 시스템이 불안정해질 가능성이 크다는 단점을 가지고 있기 때문에 이들을 안정화시키기 위한 제어를 필요로 한다. 자기부상식 미세구동기의 운동은 부상운동과 평면운동으로 구성되는데, 본 논문에서는 불안정한 평면운동에 대해 시스템의 안정도를 확보하고 외란의 영향을 제압할 수 있는 비집중 적응제어기 설계를 목표로 한다. 본 연구대상 시스템의 경우 설계 사양이 빠른 응답시간을 요하므로 계산상의 관점에서 집중 적응제어구조로의 구현이 불리하다고(부담이 된다고) 판단되어 각 축을 부시스템으로 나누어 제어하는 비집중 적응제어기의 도입을 고려하였다. 참고로 비집중 적응제어기는 다수의 단입력 단출력의 부시스템들로 구성되어 있고 상호간섭작용이 부시스템의 입력채널로 들어오거나 또는 부시스템의 출력채널로 나가는 부류의 상호연관 시스템에 대해 임의의 상호결합 강도에도 불구하고 각 부시스템의 안정도를 증가시켜 나감으로써 이들의 영향을 줄이고 전체시스템의 안정성을 도모할 수 있다[2]. 이러한 특성은 본 연구대상인 자기부상 미세구동기의 제어에 유용하게 적용 가능하므로 자기부상 미세구동기의 평면운동에 대해서 비집중 적응제어기를 설계하여 추종제어 및 외란에 대한 영향을 PID제어기와 비교 분석하였다.

II. 자기부상 시스템의 구조 및 모델링

본 연구에 사용된 시스템은 자기력을 이용하여 6 자유도(x, y, θ , z, ψ , φ)의 운동을 할 수 있는 매니플레이터로서, 각 축이 최대 $\pm 4\text{mm}$ 의 작업영역과 μm 이하의 정밀도를 가지는 미세구동기이다. 6 자유도의 운동을 위해 16쌍의 영구자석과 솔레노이드로 구성되어 있으며, 운동을 위한 매니플레이터와 고정부로 구성되어 있다. 매니플레이터에는 영구자석을 부착하고 고정부에는 코일을 감아서 만든 솔레노이드를 부착시켜 서로의 반발력과 흡인력에 의해 매니플레이터가 구동된다. 시스템의 기구적 구조는 그림 1과 같다.

그림1의 (a)에서 A1, A1', A2 및 A2'는 x축 운동을 위한 구동기이고, (b)에서 B1, B1', B2 및 B2'는 y축

운동을 위한 구동기, (c)에서 C1, C1', C2 및 C2'는 θ 축 방향운동을 위한 구동기이다. 이들 x, y 및 θ 축 방향운동을 평면운동이라하며 각 방향의 운동을 위해서는 한쪽에서는 흡인력을 다른쪽에서는 반발력을 발생시키는 추진력(push-and-pull force)을 이용한다. (c)에서 D1, D2, D3 및 D4는 z축 방향 및 ψ , φ 축 방향의 운동을 위한 구동기이며 이 방향의 운동을 부상운동이라 한다. 부상운동은 매니플레이터를 공칭위치까지 부상시키기 위한 운동으로 솔레노이드에 공칭전류를 인가하여 영구자석에 반발력을 발생시켜, 이 반발력에 의해 매니플레이터가 공칭위치까지 부상하게 된다. 부상용 구동기에 일정한 전류를 인가하여 전류에 상당하는 위치까지 매니플레이터를 부상시킨 후 미소 양만큼 위치를 변동시키면 z, ψ 및 φ 축 운동은 원래의 위치로 복귀하는 상반구조의 특성을 갖는다. 이것은 일정한 전류가 공급될 때 공칭위치로부터 z축 방향을 따라 매니플레이터의 위치가 증가함에 따라 영구자석이 받는 힘의 크기는 감소하고, 매니플레이터의 위치가 감소함에 따라서는 영구자석이 받는 힘의 크기는 증가하여, 매니플레이터의 위치변화와 반대되는 방향으로 운동이 일어나기 때문이다. 이와같은 상반구조의 채택은 운동을 제어할 때 제어기의 이득을 크게 하지 않고서도 시스템을 안정화시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다[3].

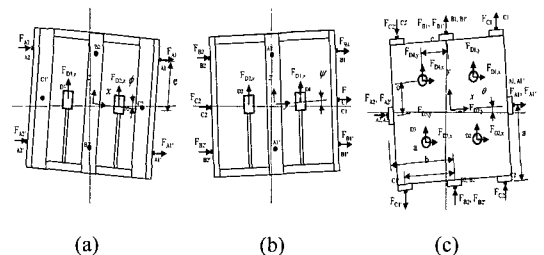


그림 1. 자기부상 미세구동기의 기구적 구조

Fig. 1. Configuration of the magnetically levitated fine manipulator.

본 연구대상의 시스템은 매니플레이터가 미소운동을 할 때 각축의 운동은 서로 비연성 되어 있으며, 매니플레이터의 동역학 차수가 2차라 가정된 후 각축

$$\begin{aligned} \dot{x}_{mi} &= A_m x_{mi} + b_{mi} r_i \\ i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 r_i 는 기준입력이고, (A_{mi}, b_{mi}) 쌍은 (4.a)의 (A_i, b_i) 와 비슷한 구조를 갖도록 한다.

$$A_{mi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix}, \quad b_{mi} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (5.a)$$

따라서 다음 관계가 성립되도록 하는 K_i 가 존재함을 쉽게 알 수 있다.

$$A_{mi} = A_i - b_i K_i \quad (6)$$

$$\text{즉 } K_i = \frac{1}{b_{0i}} \begin{bmatrix} -a_{0i} + \omega_n^2 & -a_{1i} + 2\zeta\omega_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

(5.a)에서 ω_n 과 ζ 는 설계자에 의해 임의로 선정될 수 있는 값들이다.

이제 (4)의 x_i 가 (5)의 x_{mi} 를 가능하면 정밀하게 추종하도록 하기 위해 Lyapunov 설계법[2]에 입각한 비집중 적응제어기를 제시한다.

$$\begin{aligned} u_i &= -K_i x_i - \alpha_i(t) \overline{K}_i e_i + p_i r_i - \delta_i(t) \\ i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $e_i = x_i - x_{mi}$ 는 상태오차벡터이고, α_i 와 δ_i 는 스칼라 조정변수(적응이득)로 다음의 σ -modification 적응법칙에 의해 구해진다.

$$\dot{\alpha}_i = \gamma_{1i} e_i^T \overline{K}_i^T \overline{K}_i e_i - \sigma_{1i} \alpha_i, \quad \alpha_i(t_0) > 0 \quad (9)$$

$$\dot{\delta}_i = \gamma_{2i} e_i^T \overline{K}_i - \sigma_{2i} \delta_i, \quad \delta_i(t_0) = 0 \quad (10)$$

참고로 (9)와 (10)에 추가된 항들 $(-\sigma_{1i} \alpha_i)$ 와

$(-\sigma_{2i} \delta_i)$ 는 조정변수들 α_i 와 δ_i 가 무한히 커지지 않도록(표류가 일어나지 않도록) 보장해 주기 위해 도입되었으며, 이런 의미에서 $\sigma_{1i} > 0$ 과 $\sigma_{2i} > 0$ 는 감쇠(decaying) 상수라 불린다. 또한 γ_{1i} 과 γ_{2i} 는 양의 가중치이다. (8)에서 K_i 는 (7)에 정의되어 있는 상수행렬이고, p_i 는 u_i 와 r_i 간의 척도계수로서 아래와 같이 주어진다.

$$p_i = \frac{\omega_n^2}{b_{0i}} \quad (11)$$

\overline{K}_i 는 다음의 Lyapunov 방정식을 만족하는 H_i 로부터, 다시말하면 임의의 대칭 양한정(symmetric positive definite; spd)행렬 G_i 에 대해 A_{mi} 가 안정행렬인 경우에 다음의 관계식을 만족하는 spd 행렬 H_i 가 존재하므로,

$$A_{mi}^T H_i + H_i A_{mi} = -G_i \quad (12)$$

(12)의 H_i 를 이용하여 구해진다.

$$\overline{K}_i = b_i^T H_i \quad (13)$$

참고로 (8)의 비집중 적응 제어기에서 두 번째 항 $\{-\alpha_i(t) \overline{K}_i e_i\}$ 는 다른 축들(부시스템들)로부터 i 번째 부시스템에 들어오는 간섭작용을 무력화시키는 목적으로 도입되었고, 네 번째 항 $\delta_i(t)$ 는 각 축의 offset을 제거하기 위해 첨가되었다.

(8)의 제어입력을 (4)에 인가하고 기준모델(5)와 차로부터 얻어진 폐루프 오차시스템을 다음과 같이 유도된다.

$$\dot{e}_i = A_m e_i - b_i \alpha_i(t) \overline{K}_i e_i - b_i \delta_i(t) + b_i v_i + b_i d_i \quad (14)$$

그리고 조정변수 오차를 ϕ_{1i} 과 ϕ_{2i} 로 정의했을 때

$$\phi_{\dot{1}} = \alpha_i - \alpha_i^*, \phi_{\dot{2}} = \delta_i - d_i \quad (15)$$

적용법칙 (9)과 (10)는 다음과 같이 기술된다.

$$\dot{\phi}_{\dot{1}} = \dot{\alpha}_i = \gamma_{\dot{1}} e_i^T \overline{K_i^T} \overline{K_i} e_i - \sigma_{\dot{1}} \alpha_i \quad (16)$$

$$\dot{\phi}_{\dot{2}} = \dot{\delta}_i = \gamma_{\dot{2}} e_i^T \overline{K_i^T} - \sigma_{\dot{2}} \delta_i \quad (17)$$

(15)에서 α_i^* 와 d_i 는 모르는 상수이지만 α_i 와 δ_i 가 궁극적으로 적응해 나가야 될 참값에 해당한다. 그러면 (14), (16) 및 (17)으로 주어지는 전체 적응시스템의 안정성은 다음의 정리를 통하여 보장된다.

(정리1) 전체 적응시스템 (14), (16) 및 (17)의 신호들 $e_i(t)$, $\phi_{\dot{1}}(t)$, $\phi_{\dot{2}}(t)$, $i=1, 2, \dots, N$ 은 이들 임의의 초기치 및 모든 t 에 대해 유한하다(globally uniformly bounded).

[증명] 부록참조.

IV. 경로추종 실험결과 및 고찰

위에서 제시한 비집중 적응제어기의 성능을 평가하기 위해 경로추종실험을 수행하여 PID제어기와 비교하였다. 경로추종실험은 자기부상 매니플레이터가 여러 각속도에 대하여 x-y평면상에서 x축, y축 각각에 정현파를 인가하여 그린 반경 0.3mm의 원을 추종하는 실험이다. 자기부상시스템과 측정장치까지 부착된 전체 시스템의 모습은 그림 3과 같다.

먼저 PID 제어기의 구현은 자기부상 미세구동기의 평면운동이 불안정하므로 안정화를 위해 비례·미분(PD)제어를 먼저 실행하고, 정상상태 오차를 줄이기 위해 적분(I)작용을 포함시키는 PD-PI형태로 변형하였다. PID제어기의 블록도는 그림 4와 같다.

여기서 각각의 이득을 선정하는데는 극점 배치 개념을 이용하였다. 초기의 PD제어용 이득 K_{P1} , K_D 를

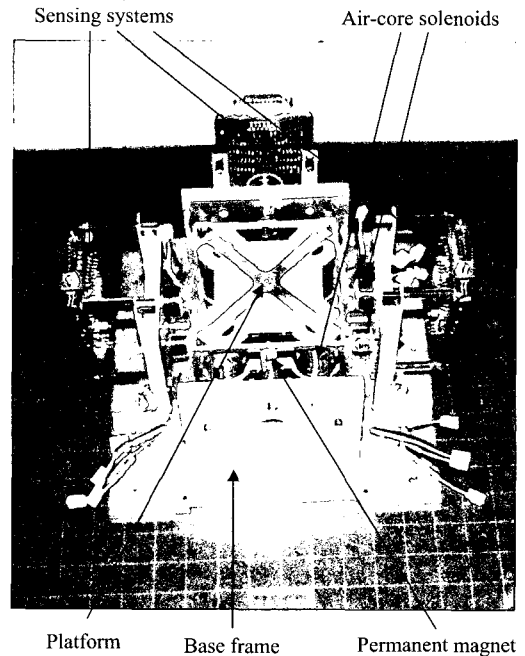


그림 3. 자기부상식 미세구동기
Fig. 3. Magnetically levitated fine manipulator.

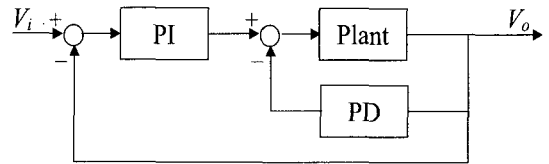


그림 4. 변형된 PID제어기의 블록도
Fig. 4. Block diagram of modified PID controller.

구하기 위해 ζ 와 ω_n 을 원하는 과도응답의 특성에 따라 임의의 원하는 위치 $\zeta=0.7$, $\omega_n=90$ 에 놓고 이득을 구하였다. $\omega_n=90$ 으로 선정할 이유는 빠른 응답특성을 요하기 때문이며, 전체 시스템의 표본(sampling)시간은 0.25ms 이다. 외부루프 PI의 이득 K_{P2} , K_I 를 구하기 위해서는 하나의 극점을 적절한 위치에 놓고 이때의 시스템의 응답특성을 고려하여 선정하였다. 원하는 위치에 극점을 놓게 하는 이득들 K_{P1} , K_D , K_{P2} , K_I 의 값은 표 1과 같다.

표 1. 각축의 PD-PI의 이득값

Table 1. PID controller gains of each axis.

Axis	K_{P1}	K_I	K_{P2}	K_D
x	1.38	173.2	3.92	0.060
y	1.44	181.5	4.11	0.062
θ	2.38	299.5	6.65	0.102

비집중 적응제어기의 구현을 위해 필요한 각 상수들과 적응이득들은 Matlab을 이용하여 시뮬레이션 상에서 찾은 값들을 기초로 실험에서 적용하였다[4]. 또한 초기에 비집중 적응제어기의 기준모델 선정시 PID제어기의 극점과 같은 위치에 지정하므로써 비교대상인 PID 제어기와 정량적으로 비슷한 상황에서 비교하도록 하였다. 실제 실험에서 사용된 비집중 적응제어기의 설계변수값은 표 2와 같다.

표 2. 비집중 적응제어기의 설계변수

Table 2. Design parameters of decentralized adaptive controller.

A_m	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -8100 & -126 \end{bmatrix}$	G	$\begin{bmatrix} 600 & 0 \\ 0 & 0.00001 \end{bmatrix}$	γ_2	9.0
B_m	$\begin{bmatrix} 0 \\ 8100 \end{bmatrix}$	H	$\begin{bmatrix} 7.05 & 0.037 \\ 0.037 & 0.0003 \end{bmatrix}$	σ_{a1}	1.0
K	$\begin{bmatrix} 3.92 & 0.06 \end{bmatrix}$	\bar{K}	$\begin{bmatrix} 30 & 0.23 \end{bmatrix}$	σ_{a2}	0.0
p	3.7	γ_{a1}	32.0	$\alpha_i(0)$	0.1

매니플레이터의 무게중심이 흔들릴 경우에 대해 φ 방향으로 크기가 0.1인 정현파 운동의 외란이 가해지는 상황에서 각속도 $\pi/4, \pi/2, \pi, 2\pi$ rad/s인 경우에 대하여 PID 제어와 비집중 적응제어를 수행했을 때의 경로에 대한 추종오차를 그림 5, 그림 6에 도시하였다. 여기서 e_x, e_y 는 각각 x 및 y방향의 추종오차를 의미한다. 또한 그림 7은 위의 두가지 제어기에서 발생된 오차의 rms(root mean square)값을 도시한 것이다. 그림에서 각속도가 증가함에 따라 rms의 오차도 함께 증가하며, 각속도의 증가에 따라 비집중 적응제어기로부터 발생된 rms 오차는 PID 제어시스템으로부터 발생된 rms 오차보다 더 적은 크기로 변하고

있음을 알 수 있다.

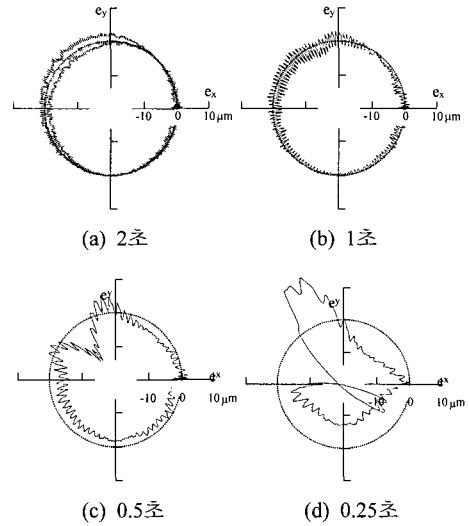


그림 5. PID 제어기의 추종오차

Fig. 5. Experimental results of tracking control using conventional PID controller.

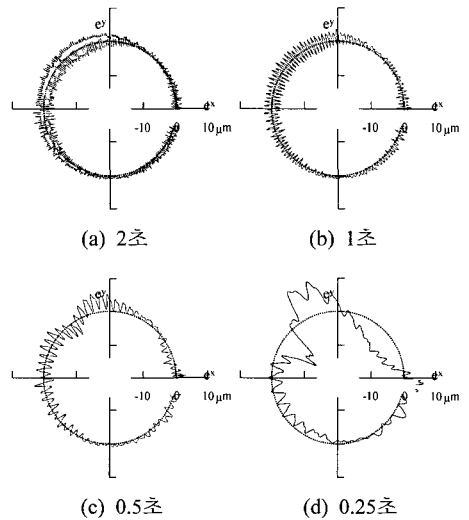


그림 6. 비집중 적응제어기의 추종오차

Fig. 6. Experimental results of tracking control using decentralized adaptive controller.

또한 각 제어기의 제어입력의 형태 및 외란의 영향에 의한 제어입력 및 비집중 적응제어기의 적응이득의 변화를 각속도 2초인 경우에 대해 그림 8, 그림 9에 보이고 있다.

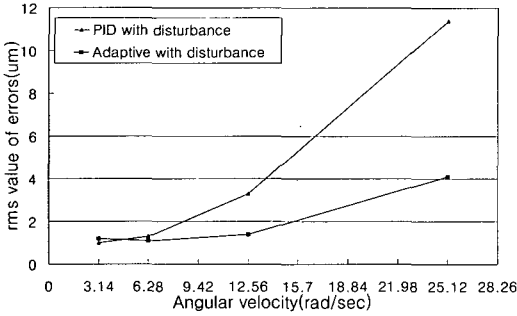
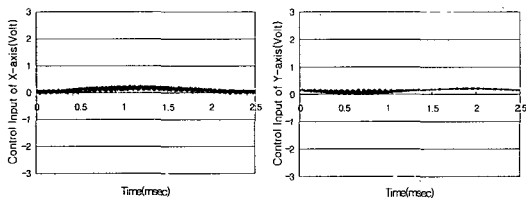


그림 7. PID 제어기와 비집중 적응제어기의 추종오차 비교

Fig. 7. Comparison of rms values of errors between PID and adaptive controller.

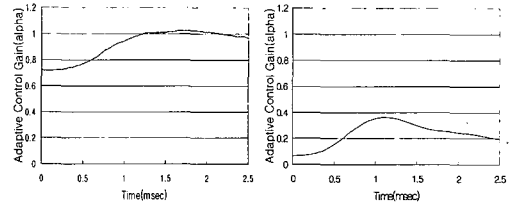
그림 8에서 제어입력은 각 축의 정현파 모양을 따라가고 있는 것을 볼 수 있다. 그림 9는 비집중 적응제어기의 적응이득 및 제어입력을 보여 주고 있다. (a)에서 x축의 적응이득 α 가 초기에 큰 값을 보이고 있는데 이는 x축의 초기값이 1에서 시작하기 때문에 그 값까지 따라가도록 α 값이 수렴해 왔기 때문이다. (b)에서 y축의 α 는 \cos 파와 비슷한 형상을 하는데 이는 y축의 기준값이 \cos 파이며, 이 값을 따라 α 값이 변화하다 최종 수렴해 가는 것을 볼 수 있다. (c), (d)에서 x축 및 y축의 δ 은 음의 값을 가지고 있는데



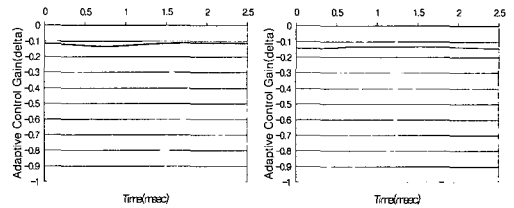
(a) x축 (b) y축

그림 8. PID 제어기의 제어입력
Fig. 8. Control inputs of PID controller.

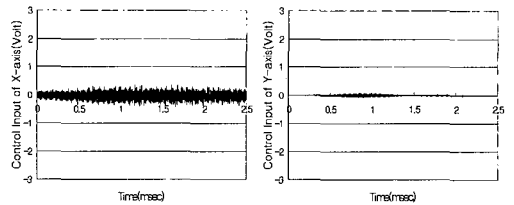
이는 음의 방향으로 시스템 오프셋이 존재하고 있기 때문이다. (e), (f)에서 제어입력은 PID에서의 제어입력과는 상당히 다른 모습을 보인다.



적응이득(α); (a) x축 (b) y축



적응이득(δ); (c) x축 (d) y축



제어입력; (c) x축 (f) y축

그림 9. 비집중 적응제어기의 적응이득 및 제어입력
Fig. 9. Adaptive gains and control inputs of decentralized adaptive controller.

V. 결 론

본 연구에서는 불안정하고 외란에 민감한 영향을 받는 자기부상식 미세구동기의 평면운동에 대해 안정화를 시키며 외란에 대한 영향을 제압하기 위해 비집중 적응제어기를 제시하였다. 제안된 비집중 적응제어기는 먼저 시스템의 모델을 찾아 known 시스템으로 만들어 적용하므로 설계시 필요한 값들은 상수의 값으로 결정되고 단지 적응이득 값만을 매번 계산하는

작업을 한다. 이러한 단순한 구조 때문에 표본 시간 0.25ms에서 제어가 수행 가능하다.

외란이 존재하는 상황에서 각속도를 변경하며 추종제어를 실행하였다. 실험결과는 속도가 증가할수록 PID제어기에 비해 비집중 적응제어기가 더 좋은 추종 성능을 보였다. 따라서 본 연구에서 제시한 비집중 적응제어기를 사용한다면 불안정하며, 외란의 영향으로 정밀위치제어에 영향을 많이 받던 자기부상식 미세구동기를 더 빠른 작업환경에서, 어느정도 외란이 존재하는 현장에서도 효율적으로 사용 가능하리라 사료된다. 관련 추후과제로는 집중 구조제어기와의 성능비교, 표본시간이 긴 경우도 수용이 가능하도록 이산시간 비집중 적응제어기의 직접 설계 등을 꼽을 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Chen S. J. S. and Busch-Vishniac I.J., "A Magnetically Levitated, Automated, Contact Analytical Probe Tool," *IEEE Trans. on Semi. Manuf.*, Vol. 8, No. 1, pp. 72-78, 1995.
- [2] Dragoslav D. Siljak, *Decentralized control of complex systems*, Mathematics in science and engineering, 1991.
- [3] 최기봉, "자기부상력의 상반구조 배열을 이용한 미세 위치결정기구," *한국과학기술원 박사학위논문*, 1998.
- [4] Bahram Shahian and Michael Hassul, *Control system Design Using Matlab*, Prentice Hall, 1993.
- [5] 신은주, "자기부상식 미세구동기의 비집중 적응제어기 설계," *충남대학교 석사학위논문*, 1999. 6.
- [6] K. S. Narendra and A. M. Annaswamy, *Stable Adaptive Systems*, Prentice Hall, 1989.

부 록

정리1의 증명에는 지루한 수식 전개와 상당량의 지면이 필요하므로, 이의 자세한 유도과정은 참고문헌

[5]를 참조하기로 하고, 여기서는 단계별로 요약된 윤곽만을 보여주기로 한다.

단계1 : Lyapunov 후보함수의 선정

$$V(e_i, \phi_{\bar{n}}, \phi_{\bar{z}}, i=1, 2, \dots, N) = \sum_{i=0}^N \{e_i^T H_i e_i + \gamma_{\bar{n}}^{-1} \phi_{\bar{n}}^2 + \gamma_{\bar{z}}^{-1} \phi_{\bar{z}}^2\} \quad (A.1)$$

단계2 : Lyapunov 함수의 미분 (\dot{V})을 구하고 (14), (16), (17)과 (12)식에 따라 평가

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \sum_{i=1}^N \{ -e_i^T G_i e_i - 2\alpha_i e_i^T \bar{K}_i^T \bar{K}_i e_i + 2 e_i^T \bar{K}_i^T v_i \\ & - 2e_i^T \bar{K}_i^T \phi_{\bar{z}} + 2\gamma_{\bar{n}}^{-1} \dot{\phi}_{\bar{n}} \phi_{\bar{n}} + 2\gamma_{\bar{z}}^{-1} \dot{\phi}_{\bar{z}} \phi_{\bar{z}} \} \quad (A.2) \\ \leq & \sum_{i=1}^N \{ -\rho_i \|e_i\|^2 - \gamma_{\bar{n}}^{-1} \sigma_{\bar{n}} \phi_{\bar{n}}^2 - \gamma_{\bar{z}}^{-1} \sigma_{\bar{z}} \phi_{\bar{z}}^2 \\ & + \frac{\mu_i^2}{\rho_i} + \gamma_{\bar{n}}^{-1} \sigma_{\bar{n}} \alpha_i^{*2} + \gamma_{\bar{z}}^{-1} \sigma_{\bar{z}} d_i^2 \} \quad (A.3) \end{aligned}$$

부등식 (A.3)에서 ρ_i 는 임의의 양의 실수, $\gamma_{\bar{n}}, \gamma_{\bar{z}}, \delta_{\bar{n}}, \delta_{\bar{z}}$ 는 적응법칙에 관련된 설계변수값들이고, d_i 는 offset의 크기, α_i^* 는 상호결합 정도, M_i 는 기준모델 상태변수의 크기를 나타낸다.

단계3 : 잔여집합(residual set)의 정의 및 안정정리의 적용

$$\begin{aligned} D = & \bigcup_{i=1}^N D_i \\ D_i = & \{ (e_i, \phi_{\bar{n}}, \phi_{\bar{z}}) \mid e_i \|e_i\|^2 + \gamma_{\bar{n}}^{-1} \sigma_{\bar{n}} \phi_{\bar{n}}^2 \\ & + \gamma_{\bar{z}}^{-1} \sigma_{\bar{z}} \phi_{\bar{z}}^2 \leq \frac{\mu_i^2}{\rho_i} + \gamma_{\bar{n}}^{-1} \sigma_{\bar{n}} \alpha_i^{*2} + \gamma_{\bar{z}}^{-1} \sigma_{\bar{z}} d_i^2 \} \quad (A.4) \end{aligned}$$

이러한 잔여집합 밖에서는 $\dot{V} < 0, V > 0$ 이므로 참고문헌[6]의 정리 2.24에 의하여 $e_i(t), \phi_{\bar{n}}(t), \phi_{\bar{z}}(t), i=1, 2, \dots, N$ 은 모든 t 에 대해 유한하다.

— 저 자 소 개 —



申 恩 株 (會員申請中)
 1965년 5월 16일생, 1987년 2월 충
 남대학교 전자공학과 학사 졸업,
 1999년 8월 충남대학교 전자공학
 과 석사 졸업, 1987년 10월~1997
 년 2월 한국과학기술원 기계공학
 과 연구원.

주요관심분야 : 로봇제어, 공장자동화, 비선형제어 등
 임.



柳 鎔 (正會員)
 第 3卷 第 1號 論文 99-01-17 參
 照.
 現在 忠南大學校 電子工學科 教授.



宋 泰 勝 (學生會員)
 1974년 6월 16일생, 1997년 2월 충
 남대학교 전자공학과 학사 졸업,
 1999년 2월 충남대학교 전자공학
 과 석사 졸업, 1999년 3월~현재
 충남대학교 전자공학과 박사과정.

주요관심분야 : 반도체 공정제어,
 다변수제어, 식별 및 추정 등임.



崔 起 鳳 (會員申請中)
 1985년 2월 전북대학교 정밀기계
 공학과 학사 졸업, 1988년 2월 한
 국과학기술원 생산공학과 석사 졸
 업, 1998년 2월 한국과학기술원 기
 계공학과 박사 졸업, 1998년 3월~
 현재 동경공업대학 정밀공학연구

소 연구원.
 주요관심분야 : 전자기력 구동시스템, 마이크로 매니
 플레이터, 제어시스템 등임.