

論文 99-36T-12-6

조미동 구동기의 반복추종제어에 관한 연구

(A Study on Repetitive Tracking Control of a Coarse-Fine Actuator)

崔基相*, 吳宗炫**, 崔基興***

(Gi-Sang Choi, Jong-Hyun Oh, and Gi-Heung Choi)

요약

본 논문에서는 조미동 구동기의 반복추종제어에 관하여 논의한다. 제안되는 시스템은 조동구동기로 선형 자기드라이브를, 미동구동기로 선형 압전구동기를 사용하여 구성된다. 특히, 선형 자기드라이브에 내재된 비선형 마찰과 선형 압전구동기의 이력현상이 먼저 모델링되고 되먹임선형화 루프가 이들을 추종제어에 사용한다. 주기적인 입력신호를 추종하는 경우 이를 더욱 확장하여 반복제어 알고리즘을 포함하도록 제어기를 설계한다. 즉, 반복제어기는 되먹임선형화가 적용된 PID 제어기에 설치된다. 실험결과에 의하면 정현파 입력을 추종하는 경우 PID 제어기에 되먹임선형화와 반복제어기를 함께 적용함으로써 추종성능을 크게 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

Abstract

This paper discusses the repetitive tracking control method for a coarse-fine actuator. The proposed system is composed of a magnetic linear drive as a coarse actuator and a piezoelectric linear positioner as a fine actuator. In particular, nonlinear friction in a magnetic linear drive and hysteresis characteristic of a piezoelectric linear positioner are modeled first. The feedback linearization loop uses these models in tracking position control. The control strategy is then further extended to include a repetitive control algorithm in tracking periodic reference inputs. This repetitive controller is implemented on the existing PID controller augmented with feedback linearization loop. The experimental results show that performance in tracking sinusoidal waveforms is noticeably improved by augmenting a PID controller with feedback linearization loop and a repetitive controller together.

I. 서론

오늘날 전기구동장치를 이용한 정밀위치제어 시스템

* 正會員, ** 學生會員, 서울市立大學校 電氣電子工學部
(Department of Electrical Engineering, University of Seoul)

*** 正會員, 한성大學校 産業시스템工學部
(Department of Industrial Systems Engineering, Hansung University)

接受日字: 1999年6月17日, 수정완료일: 1999年11月25日

은 산업현장에서 다양한 용도로 사용되고 있다. 특히, 고정밀도 뿐만 아니라 고응답성 및 큰 스트로크(stroke)를 지닌 시스템에 대한 수요는 과거 어느 때 보다는 많다고 할 수 있다. 이는 생산 자동화의 궁극적인 목표가 생산성 향상 및 품질개선인 점을 감안할 때 당연한 추세라고 할 수 있다. 고속, 고정밀도, 큰 스트로크의 위치결정을 위해서는 1 자유도에 대해 2 종류의 기구를 사용하는 방법이 있다. 즉, 고속, 큰 스트로크의 조동 위치결정과 변위분해능을 높이는 정밀 위치결정을 병행하여 실시하는 것이다. 그러나, 이들 기구의 제어방법은 기구의 구성조건에 따라 다르며, 서로 다른 2 중

류의 구동기로 원하는 정밀도를 얻기 위해서는 기구에 알맞는 제어방법이 필요하다.

최근, 이러한 목적으로 제안된 다양한 제어 알고리즘 중에서도 조-미동 구동기(coarse-fine actuator)의 제어에 대한 연구가 활발히 진행중이다^[1,2,3]. 즉, 조동구동기의 변위 뿐만 아니라 미동 구동기 선단에서의 위치 센싱을 활용한 조-미동 제어(coarse-fine control)를 통하여 위치결정기구의 성능이 크게 향상될 수 있음이 입증된 바 있다. 이 경우 정밀 위치제어용 구동장치(fine actuator)는 조동구동기(coarse actuator) 위에 놓이게 된다. 결과적으로, 이러한 일종의 직렬 메카니즘(serial mechanism)은 여자유도 시스템(redundant system)을 이루게 된다^[4].

본 연구에서는 조-미동 구동기를 대상으로 되먹임 선형화 루프(feedback linearization loop)가 가미된 기존의 PID 제어기에 적용할 수 있는 반복추종제어(repetitive tracking control) 방법에 관하여 논의한다. 조동구동기는 선형 자기드라이브(linear magnetic drive, LMD)이며 미동기구로는 선형 압전구동기(linear piezoelectric positioner, LPP)를 사용한다^[5,6]. 특히, 조동구동기에 내재된 마찰과 미동구동기의 이력현상(hysteresis)에 의한 비선형성이 우선 모델링된다. 그런 다음, 되먹임 선형화 루프가 가미된 PID제어기(PIDF+FL 제어기)가 위치 추종제어를 위해 고안된다. 또한, 주기적인 입력신호를 나타내는 응용에 적용하는 경우 제어방법을 확장하여 반복제어기를 포함하도록 한다(PID+FL+R 제어기). 조-미동 구동기의 반복추종제어 성능은 실험을 통하여 평가된다.

II. 구동기 역학의 모델링

1. 조동구동기

대부분의 기계장치를 사용할 때 정지마찰 또는 쿨롱 마찰이 발생한다. 현실적으로, 이와 같은 마찰은 기계장치 일부의 속도가 0이 되거나 가속도가 0이 아닌 값에서 0의 값으로 불연속적으로 변할 때 필연적으로 기계장치의 역학적 변화를 초래한다. 일반적으로, 선형 자기 구동기를 사용하는 이유는 이송나사(lead screw), 마찰 구동, 벨트(belt drive)에 의한 방법보다 마찰에 의한 비선형성이 적으며 반응속도가 빠르기 때문이다.

그러나, 선형 자기구동기에도 마찰에 의한 비선형성

이 내재한다. 이는 축이 운동방향을 바뀌어야 하는 궤적 추종(tracking)시 자주 위치에러를 유발한다. 또한, 이와 같은 비선형성은 위치에러를 단순히 비례제어(proportional control)만으로는 효과적으로 보상할 수 없게 한다. 따라서, 주어진 궤적의 추종제어(tracking control)를 시행할 때 제어기의 성능을 향상시킬 수 있는 별도의 방법이 필요하게 된다. 본 연구에서 조동구동기로 사용되는 선형 자기구동기는 드라이버 앰프(driver amplifier)로 부터의 입력 전압에 의해 구동되며 실험적으로 구해진 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다^[6] :

$$V_c = 0.113\ddot{x}_c + 1.0213\dot{x}_c + f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}_c) \quad (1)$$

식 (1)에서 우변의 세번째 항은 쿨롱 마찰력과 관계가 있는 항으로 선형 자기 드라이브의 물리적 성질로 인하여 운동방향에 따라 약간의 차이를 보인다. 예를 들면, 그림 1은 선형 자기 드라이브의 다양한 입력전압에 대한 전형적인 속도함수를 나타낸다. 그림 1에서 입력전압은 -1 [V]에서 +1 [V]까지 0.1 [V] 간격으로 증가되었다.

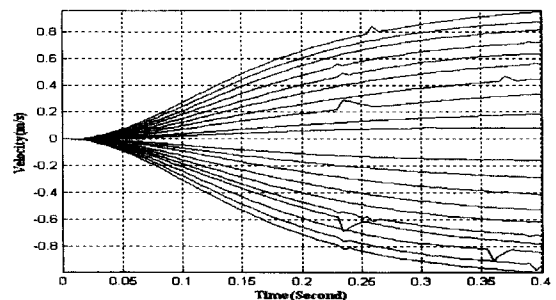


그림 1. 0.1 [V] 단위의 입력전압에 대한 통상적인 선형 자기구동기의 속도함수

Fig. 1. Typical velocity function of a linear magnetic drive for input voltage with 0.1 [V] steps.

2. 미동구동기의 모델링

압전(piezoelectric)소자는 기계적 에너지와 전기적 에너지 사이에서 양방향으로 변환을 일으킬 수 있으며, 이러한 성질을 이용하면 센서와 구동기 모두로 사용될 수 있다. 압전구동기는 높은 변위 해상도와 빠른 주파수 응답을 가지고 있어 전자 현미경이나 로봇의 그리퍼(gripper), 의학과 생물학 분야에서의 미세 외과수술

등과 같은 정밀한 위치제어를 필요로 하는 여러 분야에서 이용될 수 있다. 그러나, 압전구동기는 기본적으로 강유전체(ferroelectric)이므로 가해진 전압에 대한 변위 응답이 이력현상을 나타내게 되고 이러한 성질로 인해 추종제어에서의 정밀도에 한계가 있다.

Maxwell slip model에 의하면 압전구동기의 이력현상은 기계적인 쿨롱 마찰(coulomb friction)에 의해 나타난다^[7,8,9,10]. 그림 2에서와 같이 질량이 없는 물체에 N_1, N_2, \dots, N_n 의 수직력(normal force)이 작용하고 물체와 바닥 사이에 쿨롱 마찰력만이 작용할 때, 질량이 없고 스프링 상수가 k_1, k_2, \dots, k_n 인 스프링에 가하는 힘 F 와 위치 x 사이의 관계는 전형적인 이력현상에 의한 비선형성을 나타낸다. 이와 같이 변위와 힘 사이의 관계가 이력현상을 나타내는 원인은 다음과 같다: 즉, 힘이 스프링에 작용하여 스프링이 늘어나면 스프링에 에너지가 축적되고 스프링의 힘이 마찰력보다 크게 되면 물체는 밀리게 된다. 이때 힘에 의한 에너지는 스프링에 다 저장되지 못하고 일부가 마찰에 의해 소모된다. 따라서, 힘의 방향이 바뀌게 되면 이전 방향으로 움직일 때와는 다른 변위 경로를 나타낸다. 이때 변위와 힘 관계의 경로는 변위 구간별로 각 물체의 스프링 상수와 Breakforce 사이의 관계에 의해 결정된다.

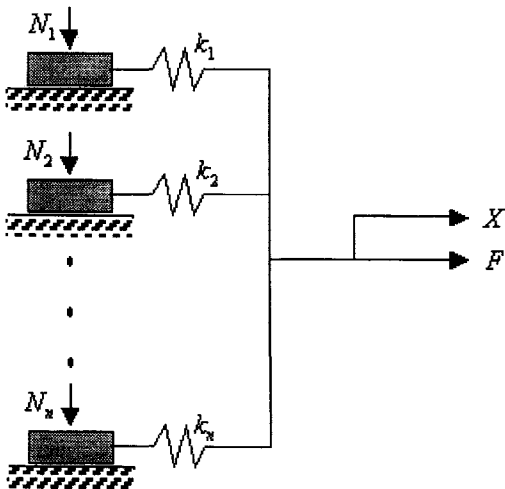


그림 2. Maxwell의 슬립모델
Fig. 2. Maxwell slip model.

본 연구에서는 7개의 물체를 이용하여 압전구동기(미동구동기)의 모델링을 수행한다. 표 1에 모델링에 이용된 스프링 상수와 Breakforce들이 나타나 있다. 그림 3

은 이러한 파라미터를 이용했을 때의 이력특성을 보여 준다. 모델에서 변위는 압전구동기의 변위를, 모델의 힘은 구동기의 전압을 나타낸다

표. 1. Maxwell 슬립모델에 사용된 파라미터
Table 1. Parameters used for Maxwell slip model.

Element	Stiffness (kn)	Breakforce
1	0.21	0.56
2	0.03	1.68
3	0.06	2.52
4	0.10	1.12
5	0.01	1.40
6	0.10	1.68
7	0.40	150.

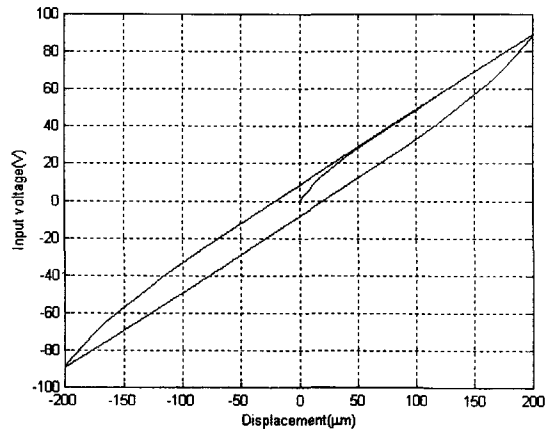


그림 3. 압전구동기의 이력특성(hysteresis) 모델
Fig. 3. Hysteresis model of a piezoelectric actuator.

III. 제어기 설계

1. 되먹임 선형화

실험에 의하면 앞에서 언급된 비선형성 때문에 조미동 구동기를 PID제어기만 사용하여 제어하는 경우 예측가능하고 만족할만한 결과를 얻기 힘든 것으로 나타났다. 이와 같은 비선형성을 보상하기 위해서는 되먹임 선형화 루프를 활용할 수 있다. 그림 4는 PID+FL 제어기의 블록 다이어그램을 나타낸다.

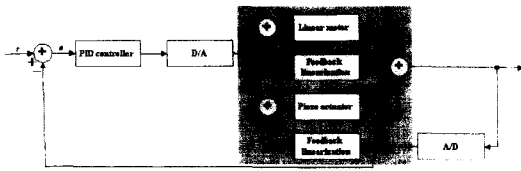


그림 4. PID+FL 제어기의 블록 다이어그램
Fig. 4. Block diagram of a PID+FL controller.

조동구동기 제어의 경우 쿨롱마찰을 모델링하고 되먹임 선형화 루프에서 선형화하여 사용한다. 반면에, 미동구동기의 경우 이력현상 모델을 사용하여 출력위치에 대응하는 입력전압을 계산하고 이를 되먹임 선형화 루프에서 이력현상을 상쇄시키기 위하여 사용한다. 두 경우 모두에서 모델링 에러가 충분히 작다면 구동기의 동적 모델은 선형이라고 가정할 수 있으며 각각의 구동기는 PID 제어기의 변수(Parameter)를 조절함으로써 쉽게 제어될 수 있다.

조동구동기의 쿨롱마찰을 보상하면 전달함수를 ARMAX 모델을 이용하여 Step Response로부터 구할 수 있으며 이산영역에서

$$G_{coarse}(z^{-1}) = \frac{0.0001565z^{-1} + 0.0001537z^{-2}}{1 - 1.947z^{-1} + 0.9472z^{-2}} \quad (2)$$

와 같이 표현된다.

유사한 방법으로, 이력특성이 보상된 미동구동기의 동적모델을 Step Response로부터 구할 수 있다. 엄격히 말하면, 이력현상이 보상된 시스템도 모델링 에러에 기인한 고차의 비선형성을 갖는다. 그러나, 이를 무시할 수 있다고 가정하면, 미동구동기의 전달함수는 ARMAX 모델을 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다:

$$G_{fine}(z^{-1}) = \frac{-0.132z^{-1} + 0.1775z^{-2}}{1 - 1.009z^{-1} + 0.8911z^{-2}} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)의 모든 극점과 영점은 단위원 안에 있음을 알 수 있다. 상세한 이력현상의 보상과정은 참고문헌에 나타나 있다^[5,6,7].

2. 상태방정식

종래의 제어방식을 보면, 조동 위치결정과 미동 위치결정을 순차적으로 반복하여 제어하는 방식과 조동과 미동기구를 동시에 제어하는 연동 제어방식으로 나눌 수 있다^[10]. 전자와 같은 분리 방식의 경우에는 조동기구로 미동기구에서 위치편차보상이 가능한 위치결정을

실시한 후 나머지 편차를 보상하는 방식으로 조동과 미동 위치결정이 시간적으로 완전히 분리되어 있다. 연동제어방식은 조동동작이 실시되는 도중에 미동기구의 위치결정 동작을 실시하는 방법이다.

본 연구에서는 조동과 미동을 동시에 제어하도록 하고 미동기구의 스트로크가 대단히 작으므로 연동동작 중에 미동기구의 변위가 스트로크 범위를 넘지 않도록 설계되어야 한다. 본 기구는 2 개의 구동앰프에 제어동작을 입력하여 목표치인 1개의 출력력을 얻기 위한 시스템으로 가정한다. 시스템의 제어모델 설정을 위한 이산 시간 영역에서의 상태방정식은 $x_c[n], x_f[n], v_c[n], v_f[n]$ 을 각각 조동구동기의 변위, 미동구동기의 변위, 조동구동기의 입력전압, 미동구동기의 입력전압이라고 하면,

$$\begin{aligned} x_c[n+1] &= M_c x_c[n] + B_c v_c[n] \\ &= \begin{bmatrix} 1.947 & -0.9472 \\ 1.0 & 1.0 \end{bmatrix} x_c[n] + \begin{pmatrix} 0.156 \\ 0 \end{pmatrix} v_c[n] \\ x_f[n+1] &= M_f x_f[n] + B_f v_f[n] \\ &= \begin{bmatrix} 1.087 & -0.8911 \\ 1.0 & 0 \end{bmatrix} x_f[n] + \begin{pmatrix} 1.0 \\ 0 \end{pmatrix} v_f[n] \\ \mathbf{x}[n] &= \begin{pmatrix} x_c[n] \\ x_f[n] \end{pmatrix}, \quad \mathbf{v}[n] = \begin{pmatrix} v_c[n] \\ v_f[n] \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

일 때,

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}[n+1] &= \begin{bmatrix} M_c & M_{cf} \\ 0 & M_f \end{bmatrix} \mathbf{x}[n] + \begin{bmatrix} B_c & 0 \\ 0 & B_f \end{bmatrix} \mathbf{v}[n] \\ \mathbf{y}[n] &= [0 \ 1 \ 0 \ 1] \mathbf{x}[n] \end{aligned} \quad (5)$$

와 같이 표현할 수 있다. $\mathbf{y}[n]$ 는 조동구동기와 미동구동기가 연동하여 얻어지는 참조점에 대한 상대적인 변위이다. M_{cf} 는 조동구동기와 미동구동기의 운동을 연동시키는 동적커플링(dynamic coupling) 행렬이다. 미동구동기는 조동구동기 위에 볼트로 고정되며, 미동구동기의 밴드폭 (10Hz)이 조동구동기의 기본 공진주파수보다 작기 때문에 이와 같은 동적 커플링효과는 무시할 수 있다^[11].

3. 반복제어기

구동기를 이용한 많은 응용예에서 반복적인 작업을 행하는 경우가 많다. 또한, 주기적으로 반복되는 작업에서의 오차도 반복적으로 발생한다. 반복제어기(repetitive controller)는 일정한 주기를 가지는 반복적인 기준 신호와 오차를 발생하게 만드는 반복적인 외란

(disturbance)을 가진 시스템에서 유용하게 사용할 수 있도록 고안되었다. 이산시간에서 반복제어 알고리즘과 안정성은 Tomizuka^[12]에 의해 증명된 바 있다. 반복제어의 요점은 반복적인 입력신호 (또는 반복적인 외란)에 의해 발생한 현재의 에러를 줄이기 위해 바로 전 주기의 에러신호를 사용한다는 것으로 이전 정보를 이용한다는 점에서 일종의 학습제어(learning control)로 볼 수 있다. 되먹임 선형화에 의한 조-미동 구동기의 모델이 선형이라는 가정하에서 선형시스템에 적용되는 반복제어 기법을 적용할 수 있다.

기본적으로 이산시간 영역에서의 반복제어기 ($G_r(z^{-1})$)는 오차의 주기적인 신호성분이 0으로 수렴하더라도 제어입력신호를 제공하는 주기신호 발생기와 오차의 수렴특성을 향상시키는 보상기를 필요로 한다. 반복제어 시스템에서 주기당 샘플의 수 N 은 $N_1 + N_2 = N$ 을 만족하고 k_r 이 반복제어기의 이득이라고 하자. 그림 5에 나타난 주기신호 발생기는 시스템의 동적거동에 근거하여 설계되며 식 (6)과 같은 전달함수를 갖는다:

$$G_r(z^{-1}) = \frac{k_r z^{-N_1}}{1 - z^{-N}} = \frac{k_r z^{-N_2}}{z^{-N} - 1}, \quad N_1, N_2 \geq 0 \quad (6)$$

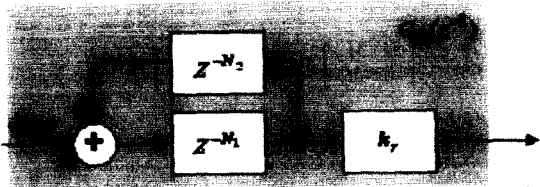


그림 5. 반복제어기에 사용되는 주기신호 발생기
Fig. 5. Periodic signal generator used for a repetitive controller.

그림 6에 기존의 제어기 (PID+FL 제어기)와 반복제어기를 함께 사용한 경우 (PID+FL+R 제어기)가 나타나 있다. 그림 6에서 반복제어기는 주기신호발생기와 보상기로 구성되어 있고 $G_p(z^{-1})$ 는 제어대상 플랜트의 전달함수를 나타낸다. 반복제어기는 플랜트가 안정할 경우에만 적용 가능하므로 플랜트가 불안정할 경우 적절한 보상기를 이용하여 전체 플랜트를 안정하게 만든 후에 반복제어기를 설계해야 한다. 그림 6에서 $G_s(z^{-1})$ 는 플랜트를 안정화시키기 위한 보상기이다.

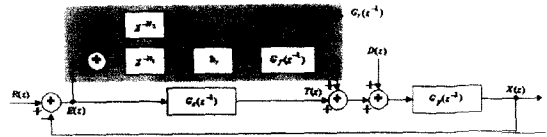


그림 6. 반복제어기의 블록 다이어그램
Fig. 6. Block diagram of a repetitive controller.

또한, $G_s(z^{-1})$ 는 $T(z)$ 에서 $E(z)$ 까지의 전달함수이며

$$G_s(z^{-1}) = \frac{z^{-d}B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (7)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-m}$$

와 같이 표현하기로 한다. 여기에서 $A(z^{-1})$ 와 $B(z^{-1})$ 는 서로 나누어지지 않아야 하고 플랜트가 안정해야 하므로 극이 모두 안정한 영역 즉 단위원 내부에 있어야 한다.

식 (7)에서 $B(z^{-1})$ 는 단위원 내부에 있는 영점 ($B^+(z^{-1})$)과 외부에 있는 영점 ($B^-(z^{-1})$)으로 다음과 같이 나뉘어 진다:

$$B(z^{-1}) = B^+(z^{-1})B^-(z^{-1}) \quad (8)$$

그러면 보상기는 $B(z^{-1})$ 의 영점이 모두 단위원 안에 있는지 그렇지 않은지에 따라 다르게 설계된다. 만약 $B(z^{-1})$ 의 영점이 모두 단위원 내부에 있을 경우 그림 6의 보상기 $G_f(z^{-1})$ 는

$$G_f(z^{-1}) = \frac{A(z^{-1})}{B^-(z^{-1})} \quad (9)$$

와 같이 된다.

한편, $B(z^{-1})$ 가 단위원 외부에 영점을 하나라도 가지고 있을 경우 보상기는 Zero Phase Error Tracking 제어기의 형태로 다음과 같이 설계된다^[13,14]:

$$G_f(z^{-1}) = \frac{z^{-N_s}A(z^{-1})B^-(z)}{B^+(z^{-1})b}$$

$$b \geq \max |B^-(e^{-j\omega})|^2, \omega \in [0, \frac{\pi}{T}] \quad (10)$$

여기에서 T 는 샘플링 주기이고 N_s 는 $B^-(z^{-1})$ 의 차수이다. 그러면 전체 반복제어기는 다음과 같이 된다.

$$G_r(z^{-1}) = \frac{k_r z^{N_2}}{z^N - 1} G_f(z^{-1}) \quad (11)$$

식 (11)로 표현되는 반복제어기는 반복제어 이득 k_r , 이 0 과 2 사이에 있을 경우 안정하다^[9]. 또한, 시스템의 파라미터가 불확실하거나 시스템이 고차일 경우 모델이 부정확할 수 있다. 이런 경우 안정성을 확보하기 위해서는 반복제어 이득 k_r 이 충분히 작아야 하고 크기가 1보다 작은 Zero Phase 저역통과 필터 $Q(z, z^{-1})$ 를 주기신호 발생기안에 도입해야 한다. 즉, $Q(z, z^{-1})$ 는 다음을 만족한다:

$$|Q(z, z^{-1})| \leq 1 \quad (12)$$

$$Q(z, z^{-1}) = \frac{q_m z^m + \dots + q_0 + \dots + q_m z^{-m}}{2 \times (q_m + \dots + q_1) + q_0}$$

그러면, 반복제어기의 주기신호 발생기는

$$G_{r1}(z^{-1}) = \frac{k_r Q(z, z^{-1}) z^{-N_1}}{1 - Q(z, z^{-1}) z^{-N}} \quad (13)$$

와 같이 되며 수정된 반복제어기는 식 (14)와 같이 된다.

$$G_r(z^{-1}) = \frac{k_r Q(z, z^{-1}) z^{-N_2}}{z^N - Q(z, z^{-1})} G_f(z^{-1}) \quad (14)$$

그림 7은 수정된 반복제어기를 나타낸다.

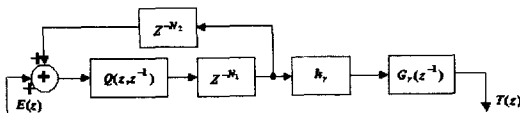


그림 7. 수정된 반복제어기의 블록 다이어그램
Fig. 7. Block diagram of a modified repetitive controller.

IV. 실험

본 연구에서 사용된 실험장치는 그림 8에 도시되어 있다. 조동구동기로 사용된 선형 자기드라이브는 Yokogawa사의 $\pm 200 \mu\text{m}$ 의 최대해상도와 80mm의 최대변위를 가지는 Direct Drive Servo System(LM-11010J00-0002)을 사용하고 입력전압은 Servo Driver(TM11001045-3SN)에 의해 제어되었다. 미동구동기는 Piezo Systems사의 Linear Positioner(ILN2-001-M)를

사용하였는데 $\pm 90[\text{V}]$ 의 최대입력전압, $\pm 200 \mu\text{m}$ 의 최대 변위, $2.5 \mu\text{m}$ 의 해상도 그리고 밴드폭 10Hz의 성능을 가지고 있다. 이 압전구동기의 입력은 20배의 증폭율을 가지는 Piezo Systems사의 전압증폭기(EPA-102)를 26dB 레벨에서 이용하여 구하였다.

조-미동 구동기의 참조점에 대한 상대적인 변위는 각각의 구동기의 변위의 합으로 볼 수 있다. 이와 같은 상대변위 측정을 위해서는 MTI사의 $1.25 \mu\text{m}$ 해상도를 가지는 비접촉 정전용량형 센서(ASP-050)를 이용하였으며 센서신호는 MTI사의 AS-2021SAI 증폭기를 통과해 12bit D/A 변환기에 의해 전압증폭기로 입력되었다. 제어 알고리즘은 Windows NT 4.0 환경에서 Visual C++ 5.0 으로 구현하였으며 정전용량형 센서신호의 취득과 조동구동기와 미동구동기 앰프로의 제어신호 출력은 National Instrument사의 Data Acquisition Card인 AT-MIO-16E-2를 이용하여 이루어졌다. 전체 시스템의 샘플링 주기는 약 166Hz (6ms)로 고정하였다.

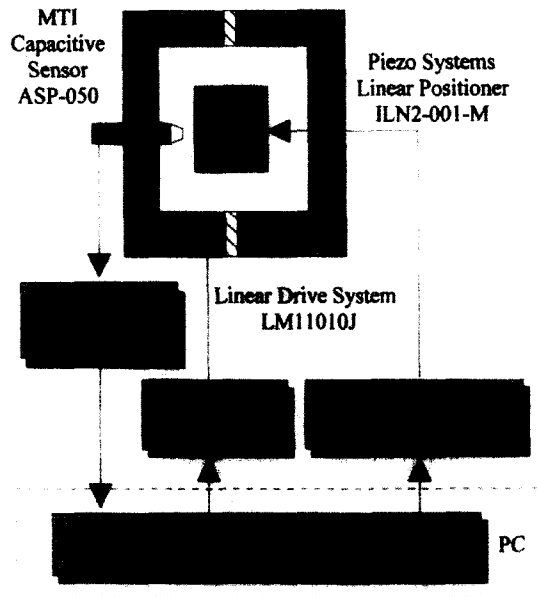


그림 8. 본 연구에서 사용된 실험장치
Fig. 8. Experimental setup used in this study.

V. 실험 결과 및 고찰

우선, PID+FL 제어기를 적용하였을 경우의 정현파 추종성능을 평가하였다. 입력의 변위폭과 주파수는 각

각 $800\ \mu\text{m}$ 과 0.5Hz 이었다. 주기당 샘플의 수는 300 이었다. 그림 9는 조동구동기만을 사용하였을 경우와 조동구동기와 미동구동기를 연동하여 사용하였을 경우의 정현파 추종성능을 나타낸다. 그림 10에 나타난 추종에러에 의하면 앞에서 논의한 조동구동기에 내재하는 비선형성의 결과로 전진과 후진을 반복하는 경우, 속도가 변하는 위치에서 큰 추종오차가 발생한다. 또한, 속도가 변하는 위치에서 떨림 즉 스틱-슬립(stick-slip)이나 백래쉬(backlash) 현상도 발생함을 알 수 있다. 이는 선형 자기드라이브에 존재하는 비선형 마찰인 쿨롱 마찰력을 보상하기 위한 정확한 모델을 세우기가 어려우며 미세한 범위에서의 정밀한 제어가 어렵기 때문이다. 이와 같은 이유로 이제까지 미끄럼이나 구름방식으로 움직이는 기계요소들은 연속적으로 높은 반복정밀도를 요하는 정밀한 운동을 실현하기에 부적합한 것으로 여겨져 왔다.

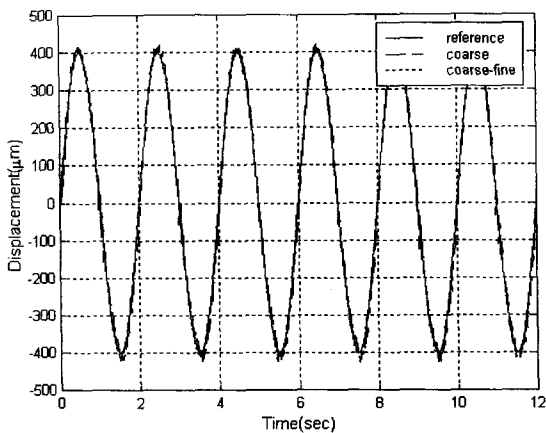


그림 9. PID+FL 제어가 적용된 경우, 조동구동기와 조-미동 구동기의 성능

Fig. 9. Performances of a coarse actuator and a coarse-fine actuator when PID+FL controller is applied.

그러나, 그림 10에서와 같은 조동 구동기와 미동 구동기의 연동을 통해 추종오차를 크게 감소시킬 수 있으며 떨림현상이 크게 개선되는 것을 알 수 있다. 압전 구동기의 경우 정밀한 위치 제어를 할 수 있으나 그 범위가 너무 작다는 단점이 존재하였다. 따라서, 두 구동기를 연동하여 구동하면 큰 스트로크와 정밀도를 동시에 만족시키는 결과를 얻을 수 있음이 실험을 통하여 증명되었다.

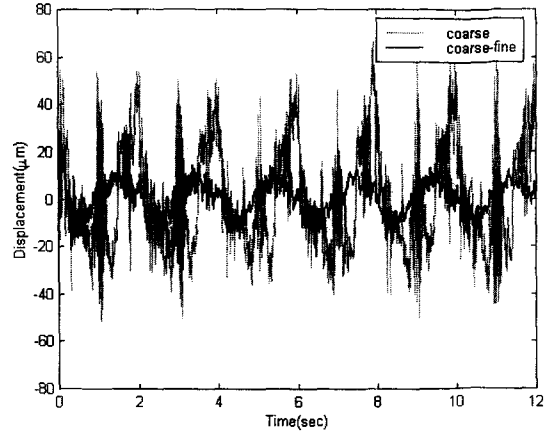


그림 10. PID+FL제어가 적용된 경우, 조동구동기와 조-미동 구동기의 추종에러

Fig. 10. Tracking error for both coarse actuator and coarse-fine actuator when PID+FL controller is applied.

다음으로, 앞의 결과에서 정현파를 추종하는 과정에서 발생하는 오차는 정현파와 거의 같은 주기적인 성분을 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 주기적인 오차를 반복제어 기법을 이용하여 보정한 결과가 반복제어기의 이득이 각각 0.01과 0.08인 경우에 대하여 그림 11에 도시되어 있다. 그림 11에 따르면 추종성능은 조-미동 구동기에 반복제어를 사용함으로써 더욱 개선될 수 있다. 예를 들면, 조미동구동기의 경우 PID+FL제어기와 비교하여 약 8%의 RMS 에러가 감소되었다. 이때 식 (15)에 주어진 저역통과 필터가 사용되었다 :

$$Q(z, z^{-1}) = \frac{z+6+z^{-1}}{8} \quad (15)$$

또한, 반복추종제어(PID+FL+R 제어기)시 작은 이득에 대하여 약간의 성능향상을 나타낸다. 일반적으로, 시스템의 불안정성을 유발하지 않는 반복제어 이득의 범위는 저역필터의 주파수 응답특성에 크게 좌우된다. 예를 들면, 모델링에러가 큰 경우 이득은 작아야 한다. 또한, 주기적인 입력신호의 주파수를 알고 있을 경우 제어기의 실제단계에서 특정 주파수대역에서 반복제어기를 강건하게 하는 필터를 설계할 수 있다.

반복추종제어의 경우 그림 9에서와 같은 떨림 현상이 거의 나타나지 않는 이유는 조동구동기와 미동구동기 앰프의 그라운드를 각각 다른 곳에 연결함으로써 전기적인 간섭효과를 줄이고, 정전용량형 센서의 입력

값에 저역통과 필터(low-pass filter)를 사용하여 기계적인 간섭효과를 여과시킨 결과이다.

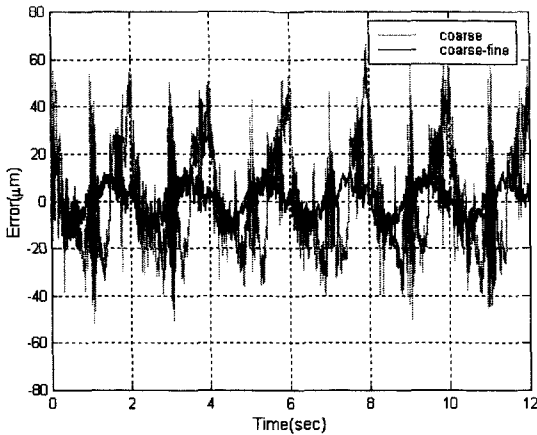


그림 11. PID+FL+R 제어기가 적용된 경우, 조동구동기와 조-미동 구동기의 추종에러

Fig. 11. Tracking errors for both coarse actuator and coarse-fine actuator when PID+FL+R controller is applied.

각각의 반복제어 이득에 대하여 10초간 계산된 평균 추종에러가 표 2에 나타나 있다. 이득이 커질수록 빨리 수렴하지만 불안정성을 유발하는 경향이 있다. 따라서, 참고문헌 [10]에 제시된 가변 반복제어이득 (variable repetitive control gain)을 적용하면 빠른 수렴성과 최소한의 정상에러 (steady state error)를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

표. 2. 다양한 k_r 값에 대한 반복추종에러
Table 2. Repetitive tracking error for various values of k_r

	$k_r = 0.01$	$k_r = 0.08$
Mean	-0.0457	-0.1988
RMS	7.3425	8.2777
Maximum (Absolute value)	46.5007	53.7230

VI. 결 론

본 연구에서는 우선 조동구동기와 미동 구동기에 내재하는 비선형적 요소들을 되먹임 선형화를 이용하여 보상하였고 이를 추종제어기 (PID+FL 제어기)에 적용

하였을 경우의 성능을 평가하였다. 실험결과에 의하면 조동구동기와 미동구동기를 연동하여 제어함으로써 추종성능을 크게 향상시킬 수 있었다. 또한, 주기적인 개적 (정현파)을 추종하는 과정에서 발생하는 주기적인 성분의 오차는 반복제어 기법을 이용하여 효과적으로 줄일 수 있었다.

향후 백래쉬(backlash)나 컴플라이언스(compliance) 등의 비선형성을 모델링하여 되먹임 선형화 루프에 적용, 보상하거나 비선형 시스템의 파라미터를 구하는 체계적인 방법이 정립되면 조-미동구동기의 성능이 향상될 것으로 기대된다. 이외에도, 비주기적인 성분에 대하여 반복제어기법을 변형 적용하며, 외란에 대응한 시스템의 강인성을 높일 수 있는 제어기법이 병행된다면 제안된 시스템은 더욱 높은 성능을 보일 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단의 연구비지원 (자유공모과제 97-001-E000103)에 의해 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] S. Salcudean and C. An, "On the Control of redundant Coarse-Fine Manipulator", *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp.1834-1840, 1989
- [2] A. Sharon, H. Neville and D. Hardt, "The Macro/micro Manipulator: An Improved Architecture for Robot Control", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol.10, No.3, pp.209-222, 1993
- [3] A. Sharon and D. Hardt, "Enhancement of Robot Accuracy Using Endpoint Feedback and a Macro/Micro Manipulator System", *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp.1836-1842, 1993
- [4] A. Azenha and J.A. Tenreiro Machado, "Variable Structure Control of Systems with Nonlinear Friction and Dynamic backlash",

- Proc. 13th Triennial World Congress, IFAC, San Francisco*, pp.515-520, 1996.
- [5] 오종현, 최기상, 최기홍, “되먹임선형화를 이용한 조미동구동기의 추종제어”, *Proc. KACC*, pp.1958-1961, 1998
- [6] G.H. Choi, J.H. Oh and G.S. Choi, “Repetitive Tracking Control of a Coarse-fine Control”, *’99 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, Atlanta, Georgia, Sep. 1999.
- [7] 임요안, 최기상, 최기홍, “피에조일렉트릭 액츄에이터의 히스테리시스 보상제어”, *한국정밀공학회 추계학술대회 논문집*, pp.219-224, 1996
- [8] G.S. Choi, H. Kim and G.H. Choi, “A Study on Position Control of Piezoelectric Actuator”, *Proc. IEEE Conf. on Mechatronics*, University of Minho, Portugal, pp.851-855, 1997.
- [9] 임요안, 최기상, 최기홍, “압전구동기의 반복추종제어”, *Proc. KACC*, pp.1209-1212, 1997
- [10] G.S. Choi, Yoan Im and G.H. Choi, “Tracking Position Control of Piezoelectric Actuator for Periodic Reference Inputs”, submitted for publication in *Mechatronics*, 1998.
- [11] 김재열, 조영태, 오보석, 박기형, “초정밀 조미동 위치결정기구의 설계 및 제어에 관한 연구”, *한국정밀공학회지*, Vol.13, No.10, pp. 88-93, 1996
- [12] M. Tomizuka, T. C. Tsao and K. K. Chew, “Discrete Time Domain Analysis and Synthesis of Repetitive Controllers”, *Proc. American Control Conf.*, pp.115-120, 1988.
- [13] K. K. Chew and M. Tomizuka, “Steady-State and Stochastic Performance of a Modified Discrete-Time Prototype Repetitive Controller”, *ASME Dynamic Systems and Control, Winter Annual Meeting*, 1988.
- [14] M. Tsai, G. Anwar and M. Tomizuka, “Discrete Time Repetitive Control for Robot Manipulator”, *Proc. IEEE Conf. on Robotics and Automation*, pp.1341-1347, 1988.

 저 자 소 개

崔 基 相(正會員)

1982년 서울대학교 기계공학과 학사. 1990년 University of California, Berkeley 기계공학과 박사. 1991년~현재 서울시립대 전기전자공학부 부교수. 연구분야 : 압전/자기/공압구동기의 정밀 위치제어, 센서 및 신호처리

吳 宗 炫(正會員)

1998년 서울시립대학교 제어계측공학과 학사. 1998년~현재 서울시립대학교 제어계측공학과 대학원 재학. 연구분야 : 조-미동 구동기의 위치제어

崔 基 興(正會員)

1982년 한양대학교 기계공학과 학사. 1990년 University of California, Berkeley 기계공학과 박사. 1993년~1995년 고등기술연구원 생산기술연구실 선임연구원. 1995년~현재 한성대학교 산업시스템공학부 부교수. 연구분야 : 생산자동화, 디지털 신호처리