

로봇 팔 진동 제어용 작동기 개발

김 승 호

박 혁 성

한국에너지연구소

연세대학교 기계공학과

Development of Actuator to Control the Vibration of Robot Arm

Seung Ho Kim

and

Hyuk sung Park

Korea Advanced Energy

Yonsei University

Research Institute

Abstract

A study has been carried out on the implementation of LMVCA (Linear Moving Voice Coil Actuator) to a flexible robot arm modelled as cantilever beam.

Control performances are evaluated by computer simulation and theoretical analysis is validated by experiments.

From this study, it is proved that the LMVCA can be applied easily to the control system and suppress vibration effectively.

1. 서 론

로봇 팔의 성능을 향상시키기 위해서 고속 동작을 행하거나, 특수 환경하에서의 사용목적으로 길이를 길게하면 계에 진동이 크게 발생하게 된다. 진동의 억제 방안으로 모달해석을 통한 서보 모터 제어가 Book[1]에 의해 1975년에 제안된 후 관련 연구가 활발하게 수행되고 있다.[2-5]

본 논문에서는 보다 효과적인 로봇 팔의 진동 제어를 위해 스피커형태의 음성코일 작동기를 개발하고 유연한 로봇 팔을 첨단질량이 있는 균일 외팔자로 모델한 뒤 최적 제어이론을 적용하여 시뮬레이션을 하였다. 이론적 해석의 타당성을 입증하기 위한 실험을 수행하였으며 고속 동작을 하는 로봇 팔에 대하여는 수치해석하여 작동기에 의한 제어의 타당성을 검토하였다.

2. 작동기 제작 및 선형실험

계에 제어력을 가하는데에는 유압모터, 서보모터, 전자석 작동기 등이 이용된다. 앞으로 언급할 음성코일 작동기는 선형적으로 움직이기 때문에 운동의

형태를 변환할 필요가 없어 구조가 간단하여 백래쉬(Back-Lash)의 문제가 없으며 제어성이 우수하고, 정류자(Brush)가 없어 노이즈에 대한 고려를 하지 않아도 된다. 또한 제어력은 코일에 흐르는 전류에 선형적으로 비례하므로 요구하는 힘을 용이하게 가할 수 있는 장점이 있다.

선형 작동기는 직류 서보 모터와 그 작동 원리가 근본적으로 같으나 구조는 스피커의 구조를 변형시킨 형태로 로봇 팔에 제어력을 직접 전달 시키도록 고안되었으며 구조는 그림 1과 같다. 음성코일의 원주 방향에 자력선이 집중되도록 음성 코일과 자석극 사이의 간극(Pole-Gap)을 최소로 설계함으로써 작동기의 발생력을 증대 시켰다. Fleming의 왼손 법칙에 따라 코일에 흐르는 전류에 비례하여 발생하는 힘은 음성코일이 감긴 보빈(Bobin)에서 스테인레스 새관을 통하여 외팔자로 전달된다. 이에 대한 전체 개략도가 그림 2에 있다.

작동기를 두 종류의 증폭기로 구동할 수 있다. 첫번째는 전압 모드 증폭기로서 회로의 개략도가 그림 3에 있다. 작동기에 걸리는 전압 E_a 와 전압 모드 증폭기 입력 전압 E_i 사이에는

$$E_a = K_V E_i \tag{1}$$

의 관계가 있으며 K_V 는 전압 모드 증폭기의 증폭상수이다. 이 경우의 작동기에 관한 전기방정식과 운동 방정식은 다음과 같다.

$$E_a = L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a + B_\phi \ell_c v \tag{2}$$

$$F = B_\phi \ell_c I_a \tag{3}$$

여기에서 B_ϕ 는 작동기의 자속밀도이며 ℓ_c 는 간극에서 자력선과 교차하는 음성코일의 길이이고 E_a , I_a 는 각각 작동기에 걸리는 전압 및 전류를 나타낸다. L_a 는 작동기의 인덕턴스(Inductance)이며 v 는 보빈의 운동속도, F 는 작동기에서 발생하는 힘이다. 식 (1)

에서 알 수 있는 바와 같이 작동기 양단에 걸리는 전압과 흐르는 전류의 관계식은 직류 모터의 전기 방정식과 동일하다.

두번째는 전류 모우드 증폭기로서 회로의 개략도가 그림 4에 있다. 전류 모우드 증폭기를 사용하는 경우의 입력 전압 E_i 와 증폭기 출력 전류 I_a 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$I_a = K_a E_i \quad (4)$$

이때 K_a 는 전류모우드 증폭기의 증폭 상수이며, 운동 방정식은 식 (3)과 같다.

일반적으로 전압 모우드 증폭기가 많이 쓰이지만 두 종류의 증폭기에 대한 전기방정식을 비교하여보면 전류 모우드 증폭기가 사용하기 쉽다. 본 논문에서는 전류 모우드 증폭기를 사용하였다.

그림 2의 모델에 대하여 유연한 로봇 팔을 외팔보로 간주하였으며 이경우에 외팔보의 고정단에서 x_a 만큼 떨어진 곳에 작동기에 의한 외력 F 가 작용할 때 작용점에서의 변위 w_a 는

$$w_a = \frac{F x_a^3}{3EI} \quad (5)$$

이다. 여기서 BI 는 외팔보의 강성계수이다. 식 (5)에 식 (2)와 식 (4)를 대입하면 다음과 같은 관계를 얻게 된다.

$$w_a = K_c V_a \quad (6)$$

여기서

$$K_c = \frac{B_c \ell_c X_a^3 K_a}{3EI}$$

이다. 따라서 작동기에 대한 증폭기 입력전압이 외팔보의 변형과 선형적으로 비례하므로 이에 대한 검증을 위하여 그림 5와 같은 실험장치를 구성하여 실험을 하였다. 실험방법은 다음과 같다. 컴퓨터에서 D/A 변환기를 통하여 전류 모우드 증폭기에 입력 전압을 걸어주면 작동기에 입력전압에 비례한 전류가 흘러 전류에 비례한 힘이 외팔보에 가해진다. 작동기의 동작으로 인하여 생기는 외팔보의 변위를 간극 검출기(Gap Sensor)를 통하여 측정한다. 그림 6에 나타나 있는 실험결과를 보면, D/A 변환기의 최대 출력전압 범위 $\pm 5V$ 에서 입력전압과 외팔보 변위는 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

3. 외팔보 진동제어

제어계를 그림 7에서와 같이 첨단질량이 부착된 1 자유도계 외팔보로 이상화시켜 제어한다. 길이가 ℓ 인 외팔보를 Euler-Bernoulli 보로 간주하며 단위

길이당 질량 m , End Effector 및 부하질량을 M , 그리고 보의 질량을 M_b 로 단순화시켜 회전하지 않는 경우 ($\Omega = 0$)의 로봇 팔의 횡방향 진동에 대한 운동 방정식과 경계조건을 구하면 다음과 같다.

$$EI w''''(x,t) + \{m + M\delta(x-\ell) + M_b \delta(x-x_a)\} \ddot{w}(x,t) = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} w(x,t)|_{x=0} &= 0, & w'(x,t)|_{x=0} &= 0, \\ w''(x,t)|_{x=\ell} &= 0, & w'''(x,t)|_{x=\ell} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Galerkin의 모우드함 방법을 사용하여 식 (7)의 해를

$$w(x,t) = \sum_{j=1}^n \phi_j(x) q_j(t) \quad (9)$$

로 가정한다. 여기서 n 은 가정된 모우드 수이며 $q_j(t)$ 는 일반화 된 좌표이고 $\phi_j(x)$ 는 경계조건식 (8)을 만족하는 계의 비교함수이다. 다음의 미분방정식

$$EI \phi_j(x) - m \omega_j^2 \phi_j(x) = 0, (j=1,2,\dots,n) \quad (10)$$

과 고유함수 및 모달행렬의 직교성 조건을 이용하여 정리한 후 진동을 나타내는 일반화된 변환 좌표 벡터 H 를 요소로 하는 상태 변수 벡터를 다음과 같이

$$\chi = \begin{Bmatrix} H \\ \dot{H} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

도입하면 제어대상의 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\chi} = A \chi + B u \quad (12)$$

계의 출력을 외팔보 x_s 에서의 스트레인 ϵ_s 로 하여 출력식을 다음과 같이 표시한다.

$$y = C \chi \quad (13)$$

여기서

$$\begin{aligned} \chi &= \epsilon_s, & C &= \{ \phi_P^T \quad \phi^T \} \\ \phi^T &= -\frac{h}{2} \{ \phi_1(x_s), \dots, \phi_n(x_s) \} \end{aligned}$$

이며 h 는 외팔보의 두께이다.

디지털제어를 위하여 식 (12), (13)을 이산시간계로 변환시킨 후 중요한 m 개의 모우드 ($m < n$)를 제어하면 다음의 식을 얻는다.

$$\chi_m(k+1) = A_m \chi_m(k) + B_m u(k) \quad (14)$$

$$y_m(k) = C_m \chi_m(k) \quad (15)$$

최적제어 이론의 성능 지수로 다음을 설정하고

$$PI = \lim_{k1 \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^{k1} \{ \chi_m^T(k) Q \chi_m(k) + R^2 u(k) \} \quad (16)$$

최적계수 행렬 K 를 구하면 성능지수를 최소화시키는 최적제어력 $u(k)$ 는 다음식으로 표현된다.

$$u(k) = -K^T X_m(k) \quad (17)$$

4. 결과 및 고찰

외팔보 모델의 파라미터값 (Parameter Values) 이 표 1에 있다. 정지 상태의 모델에 대하여 초기치가 $w(l,0)=0.04$, $w'(l,0)=0$, 샘플링 시간이 0.02초인 경우에 대해 디지털 최적제어를 적용했을 때의 시뮬레이션과 실험을 수행한 결과가 그림 8에 있다. 시뮬레이션 및 실험결과는 잘 일치함을 보인다. 따라서 시뮬레이션은 타당하게 이루어진 것임이 입증되었다. 실험 결과를 보면 2초안에 외팔보의 진동이 급격히 감소함을 알 수 있다.

동일의 회전하는 외팔보의 진동을 모터만으로 제어한 경우와 작동기를 병행제어한 수치해석 결과가 그림 9에 비교되어 있다. 목표 회전 각도는 90도, 목표 회전 시간이 0.1초이며 샘플링 시간은 모터만으로 제어한 경우 0.02초, 작동기를 병행제어한 경우 0.035초이다. 작동기를 병행하여 제어한 경우가 모터만의 제어보다 회전시 외팔보에 발생하는 진동을 더 효과적으로 제어하며 또한 서보 모터의 구동 동력을 감소시켰다.

5. 결론

작동기를 이용한 진동제어에 대하여 시뮬레이션 및 실험을 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 작동기는 선형적으로 움직이므로 구조가 간단하며 제어력이 전류에 비례하여 발생하여 용이하게 진동제어를 수행할 수 있다.
- 2) 외팔보에 대한 시뮬레이션은 실험과 잘 일치하였으며 작동기를 이용한 진동제어가 효과적으로 이루어 졌다.
- 3) 시뮬레이션과 실험의 결과로부터 선형 작동기는 로봇 팔의 진동제어를 위한 제어계에 용이하게 적용시킬 수 있음이 증명되었다.

참고 문헌

1. W.J. Book, O. Maizza-Neto and D.E. Whitney, "Feedback Control of Two Beam, Two Joint Systems with Distributed Flexibility," Trans. of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Dec., 1975, pp.424-431.
2. W.J. Book, "Analysis of Massless Elastic Chain with Servo Controlled Joints," Trans. of ASME,

J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1979, pp.187-192.

3. T. Fukuda, "Control of Flexible Robotic Arm," J. of JSME, Vol.51, No.468, Aug., 1985, pp. 2140-2144.
4. K. Yoshida and et al., "Digital Optimal Control of Elastic Structure Systems," J. of JSME, Vol.52, No.484, Dec., 1986, pp.3073-3081.
5. G.G. Hastings and W.J. Book, "A Linear Dynamic Model for Flexible Robotic Manipulators," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1987, pp.61-63.

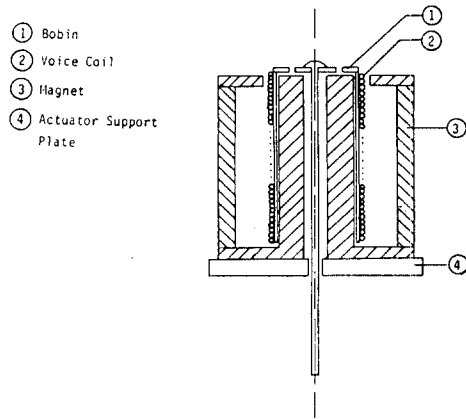


Figure 1. Linear Moving Voice Coil Actuator

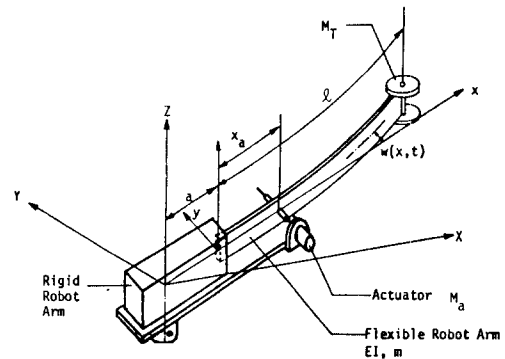


Figure 2. Diagram of a Flexible Robot Arm with a Tipmass and Actuator

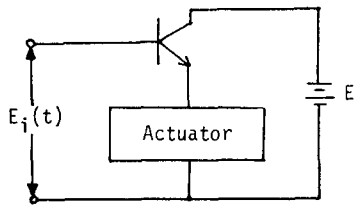


Figure 3. Voltage Mode Amplifier

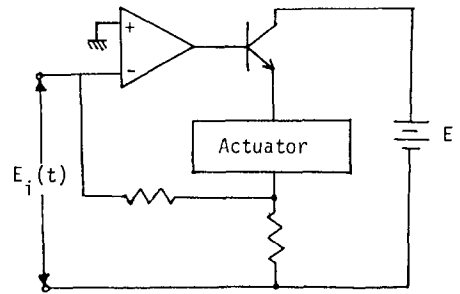


Figure 4. Current Mode Amplifier

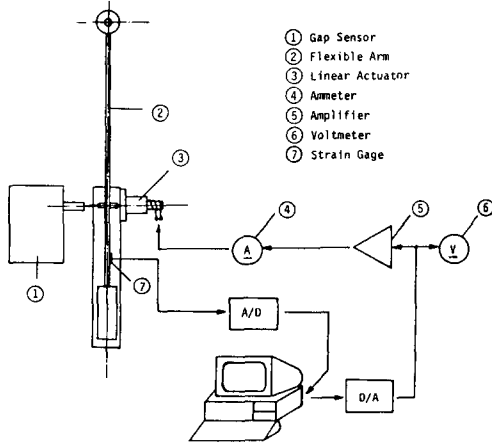


Figure 5. Schematic Diagram of Experimental Setup for Linearity Check of LMVCA

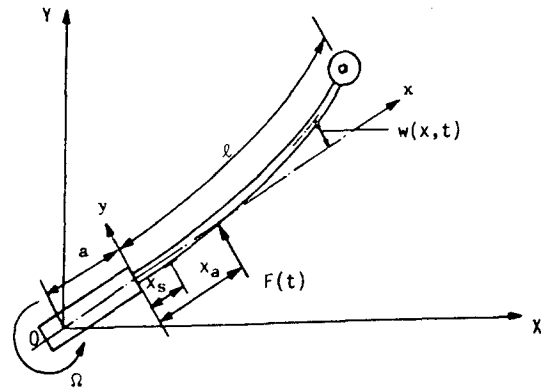


Figure 7. Geometric Parameters and Coordinate System of a Flexible Robot Arm in the Plane of Rotation

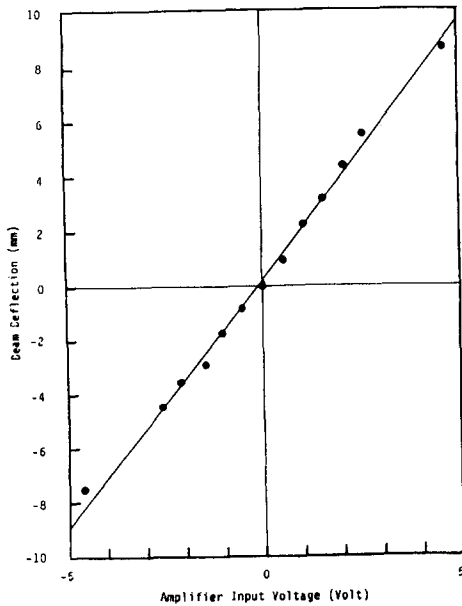


Figure 6. Relationship between the Amplifier Input Voltage and Beam Deflection

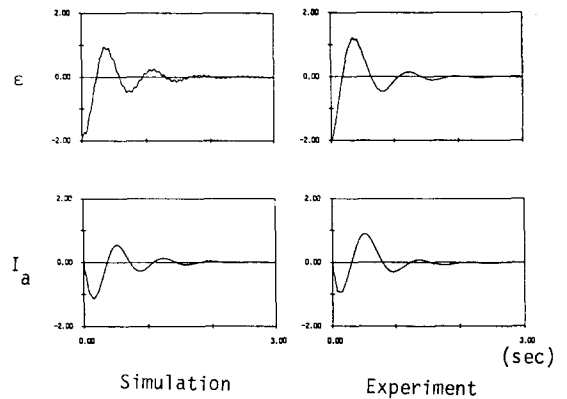
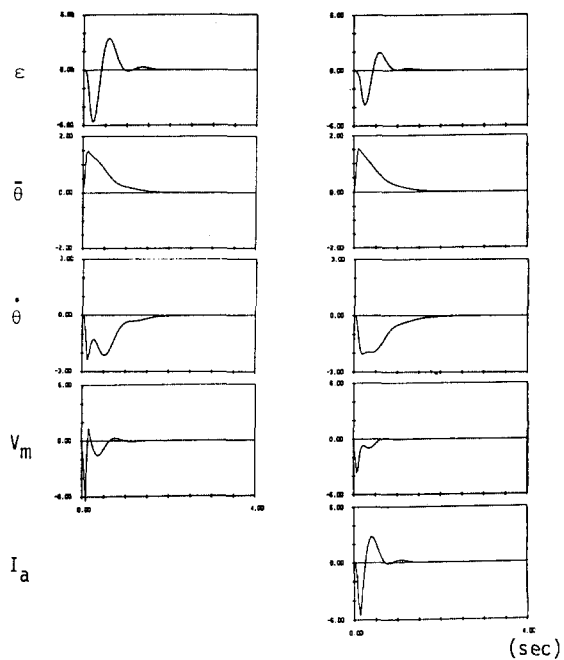


Figure 8. The Comparison between Simulation and Experiment of Stationary Cantilever Beam Vibration Control with LMVCA for Two Mode Control



T = 20 msec

R = 0.003

T = 35 msec

R = { 0.1, 0.03 }

Figure 9. Control Performance Comparison of a Rotating Cantilever Beam between One Input (Motor Torque) and Two Inputs (Motor Torque and Actuator Force) for Two Mode Control

Components	Parameters	Value(unit)
Robot Arm	Flexible Arm Part;	
	Length(l)	$5.2515 \times 10^{-1}(\text{m})$
	Mass per unit Length(m)	$2.5715 \times 10^{-1}(\text{Kg/m})$
	Thickness(h)	$1 \times 10^{-3}(\text{m})$
	Bending Stiffness(EI)	$4.702 \times 10^{-1}(\text{N m})$
	Rigid Arm Part;	
	Length(a)	$5 \times 10^{-3}(\text{m})$
	Pay Load(M)	$9.3 \times 10^{-2}(\text{Kg})$
Actuator	Actuating Point (Xf/l)	2.3235×10^{-1}
	Magnetic Flux Density * Coil Length ($B l_c$)	2.224 (Telsa-m)
	Total Mass	$4.19 \times 10^{-1}(\text{Kg})$
	Coil Mass(M_a)	$1 \times 10^{-2}(\text{Kg})$

Table 1. List of Parameters for the Simulation and Experiment of Control of a Flexible Robot Arm