

분포센서를 가진 인공지의 PID-힘제어

이재정*, 홍동표**, 정태진***, 장남정이****, 정길도*****, 노태수*****

PID-Force Control of a Artificial Finger with Distributed Force Sensor and Piezoelectric Actuator

Jae-Jung Lee,* Dong-Pyo Hong,** Tae-Jin Chung,*** Seiji Chonan,**** Kil-To Chong,***** Tae-Soo No,*****

ABSTRACT

This paper is concerned with the theoretical and experimental study on the force control of a miniature robotic finger that grasps an object at three other positions with the fingertip. The artificial finger is a uniform flexible cantilever beam equipped with a distributed set of compact grasping force sensors. Control action is applied by a piezoceramic bimorph strip placed at the base of the finger. The mathematical model of the assembled electro-mechanical system is developed. The distributed sensors are described by a set of concentrated mass-spring system. The formulated equations of motion are then applied to a control problem which the finger is commanded to grasp an object. The PID-controller is introduced to drive the finger. The usefulness of the proposed control technique is verified by simulation and experiment.

Key Words: Artificial Finger(인공지), Distributed Sensor(분포센서), PID-controller(PID-제어기), Piezoceramic(압전소자)

제 1 장 서 론

로봇이 발전함에 따라, 로봇트 핸드의 고기능화, 고정밀화가 점점 요구되고 있다. 작업의 능률성향상과 작업환경개선등은 물론 에너지의 절약을 위한 자동화가 크게 발전하고 있다. 로봇트는 다양한 환경에 도입되고, 다양한 물체를 파지하는 기회가 증가하고 있다. 특히, 장래 반도체 생산 공정이나, 생체 공학, 의학 관련 분야에서는 유

연하고 부서지기 쉬운 작은 물체를 파지하는 필요성이 생기며, 살아 있는 생물을 잡는 경우에 살아 있도록 손상을 주지 않고 물체를 잡을 필요가 있다. 이와 같은 생물공학과 관련된 작업의 특징은, 미세한 상처나기 쉬운 조직이나 생물체를 무균상태로서 부드럽게 취급하지 않으면 안된다. 이와 같은 모든 작업은 조작하는 사람의 개입으로 잡균에 의한 오염이 최대 원인이 되고 있다. 이와 같은 점에서 보면, 최근에 다종의 생물공학용 로봇트 그리퍼의

* 전북대학교 대학원
 ** 전북대학교 정밀기계공학과
 *** 군산대학교 공과대학
 **** 일본동북대학공학부
 ***** 전북대 제어계측공학과
 ***** 전북대 우주항공공학과

개발이 수행되어 유연한 수작업이 가능하다고 생각된다. 최근 로봇트 핸드에 관해서 수많은 보고가 되고 있다. 일반적으로 이의 연구는 액츄에이터로서 서보 모터가 사용되며, 동력을 wear(마모와마찰)가 있는 ball 나사에 의해 관절로 전달하는 방법이 채택되고 있다. 그러나 이와 같은 구동계는 wear의 compliance나 마찰 backlash에 의해 임의의 전달계에 hysteresis나 먼지 발생이 생기며 고속-고정도 위치 결정이나 미소력 제어의 실현이 곤란하며 소형화에도 한계가 있다. K. Ikuta는 형상기억 합금을 액츄에이터로서 사용한 micro gripper를 개발하여, 손끝의 변위제어와 파지력 제어를 행했다. 그러나 형상기억 합금은 환경의 변화(특히 온도의 변화등)에 의해 영향 받기 쉽다. 정밀도가 떨어지며, 응답속도가 느린 등 문제가 있다. 이것에 비해 압전소자는 소자의 질량에 비해 발생력이 크고, 힘의 반복성이 좋고, 내열성이 있는 등의 특징을 가지며 기구의 고속 고정밀과 소형화가 가능하다. 또한 로봇트 핸드를 청정실의 반도체 제조 가공 공정에 사용하도록 한 경우는 마찰에 의한 먼지가 발생되지 않도록 해야하며, 압전소자는 이조건도 만족하는 구동원의 하나로서 위치 결정에 사용되고 있다. 대상물을 파지하기 위해서는 파지력을 정확히 제어할 필요가 있어 이를 위한 힘 제어형 로봇트 암, 로봇트 핸드에 대한 연구가 많이 있다. 이와같은 연구에 대한 제어법으로서 주로 P I D제어나 최적제어, 적응제어가 채택되고 있다. 최근 강인한 제어설계를 위해 H_∞ 제어이론이 많이 연구되고 있으며, H_∞ 이론을 사용할 경우 모델로 표현되지 않는 불확실성을 고려한 제어계를 설계하는 일이 가능하다. 파지 동작에 관한 많은 연구가 되고 있지만, 전부가 손의 선단에 대해 논술하고 있다. 그러나, 인간의 손은 감각점이 많이 분포되고 있기 때문에, 손 전체가 센서 기능을 겸하고 있어서 손끝의 대부분의 다양한 점에서 대상물을 일정력으로 파지하는 일이 가능하다. 이를 위해서는 인간의 손과 같은 마이크로 핑거에 분포센서를 부착할 필요가 있다. 이상의 관점에서 볼때, 본 연구는 압전소자를 액츄에이터로 하는 핑거의 모델에 관하여, 각각 3지점의 접촉점에 위치하도록 한, 분포센서를 가진 핑거의 모델에 대해, 이론해석 및 실험에 의해 구동 제어특성에 대해 검토한다.

제 2 장 이론해석

인간의 손은 감각점이 다수 분포되고 있어, 각점의 힘의 정보에 의해 미세한 힘제어가 가능하다. 그러나, 인공

손으로 인간의 감각을 실험하기 위해서는 다수의 미소 센서가 필요하며, 센서의 수가 많을수록 실험 system이 복잡하다. 본 연구에서는 인공손이 대상물을 파지하는 접촉점의 위치가 어디에 있든지간에 일정력으로 파지하는 인공지제어 구동법을 적용한다. 실험장치를 간략화 하기 위해 본 연구에서는 핑거의 대표적인 3지점에 센서를 설치한다.

2-1 핑거의 모델화

본 해석에서 취급한 모델은 Fig. 1에 있으며 분포센서를 가진 핑거이다. 이것은 구리 박막보의 근원에 바이폴형 압전소자를 붙인 것으로서, 구리보를 파지영역으로 하여 힘 센서를 3개 가지고 있다.

이 모델에서 압전소자의 길이는 핑거 전체의 약 절반이다. 센서의 설치점은 파지영역의 근원부근, 중앙부근, 선단에 대하여 각각 $x_1 = 0.6l$, $x_2 = 0.8l$, $x_3 = 1.0l$ 로 된다.

2-2 핑거의 운동방정식 도출

핑거는 구리보와 세라믹 압전소자로 구성되며, 핑거의 단위길이당의 질량 $\rho A(x)$, 굽힘강성 $EI(x)$ 는

$$\rho A(x) = \begin{cases} \rho_b A_b & (\text{for } a \leq x \leq l) \\ \rho_p A_p & (\text{for } 0 \leq x \leq a) \end{cases} \quad (1)$$

$$EI(x) = \begin{cases} E_b I_b & (\text{for } a \leq x \leq l) \\ E_p I_p & (\text{for } 0 \leq x \leq a) \end{cases} \quad (2)$$

윗 식에 있어서 ρ_b, A_b, E_b 및 I_b 는 구리보의 밀도, 단면적, 종탄성계수 및 단면 2차 모멘트이며, ρ_p, A_p, E_p 및 I_p 는 압전소자의 밀도, 단면적, 종탄성계수 및 단면 2차 모멘트이다.

핑거의 운동방정식은

$$\begin{aligned} [\rho A(x) + \sum_{k=1}^3 m \delta(x - x_k)] \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} [EI(x) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}] \\ = M_p [\delta'(x) - \delta'(x - a)] - F_s \end{aligned} \quad (3)$$

로 얻어진다.

윗식에 따른 핑거의 내부감쇠를 고려하면, 압전소자를 가진 flexible 핑거의 운동방정식은

$$\begin{aligned} [\rho A(x) + \sum_{k=1}^3 m \delta(x - x_k)] \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} [EI(x)(1 + c \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}] \\ = M_p [\delta'(x) - \delta'(x - a)] - F_s \end{aligned} \quad (4)$$

로 된다. 여기서는 c 는 핑거의 내부감쇠계수로 된다. 힘 센서를 붙여 핑거에 작용하는 F_s 는

$$F_s = K_s y(x_s, t) = K_s y(x, t) \delta(x - x_k) \quad (5)$$

와 같이 생각된다. 식 (5)를 식 (4)에 대입하면 압전소자를 가진 소형 유연한 핑거의 운동 방정식은

$$\begin{aligned} [\rho A(x) + \sum_{k=1}^3 m \delta(x - x_k)] \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} [EI(x)(1 + c \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}] \\ + K_s y(x, t) \delta(x - x_k) = M_p [\delta'(x) - \delta'(x - a)] \quad (6) \end{aligned}$$

로 된다.

2-3 변위 모드 함수의 결정 및 상태 방정식과 출력방정식
운동방정식 (6)의 해를 구해 계의 모드함수를 구한다. 식 (6)에 따른 소자에 의한 모멘트 M_p 를 0으로 놓으면 핑거의 자유진동의 운동방정식은

$$\begin{aligned} [\rho A(x) + \sum_{k=1}^3 m \delta(x - x_k)] \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} [EI(x)(1 + c \frac{\partial}{\partial t}) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}] \\ + K_s y(x, t) \delta(x - x_k) = 0 \quad (7) \end{aligned}$$

로 된다. 핑거는 근원에 압전소자를 가진 보이며 단면은 불연속으로 된다. 식 (7)의 해를 다음과 같이 가정한다.

$$y(x, t) = w^j(x) e^{pt} \quad (8)$$

이것을 식 (7)에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} [w^j(x)]_{xxxx} + \frac{p^2 \rho A(x)}{EI(x)(1 + cp)} w^j(x) + \frac{mp^2}{EI(x)(1 + cp)} w^j(x) \delta(x - x_k) \\ + \frac{K_s}{EI(x)(1 + cp)} w^j(x) \delta(x - x_k) = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

로 된다. 여기서

$$[w^j(x)]_{xxxx} = \frac{d^4 w(x)}{dx^4} \quad (10)$$

로 된다. 식 (9)을 라플라스 변화하여 그것을 정리하여

역변환하여 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} W^j(x) = A^j S(\xi^j x) + B^j T(\xi^j x) + C^j U(\xi^j x) + D^j V(\xi^j x) \\ + \sum_{k=1}^3 \alpha^4 \xi^j w(x_k) V[\xi^j(x - x_k)] H(x - x_k) \quad (11) \\ + \beta^4 \xi^j w(x_k) V[\xi^j(x - x_k)] H(x - x_k) \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} (\xi^j)^4 = -\frac{(\rho A)^j p^2}{(EI)^j (1 + cp)}, \quad \alpha^4 = -\frac{mp^2}{E_b I_b (1 + cp)}, \\ \beta^4 = -\frac{K_s}{E_b I_b (1 + cp)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S(\xi x) &= \frac{1}{2} [\cosh(\xi x) + \cos(\xi x)] \\ T(\xi x) &= \frac{1}{2} [\sinh(\xi x) + \sin(\xi x)] \quad (12) \\ U(\xi x) &= \frac{1}{2} [\cosh(\xi x) - \cos(\xi x)] \\ V(\xi x) &= \frac{1}{2} [\sinh(\xi x) - \sin(\xi x)] \end{aligned}$$

핑거의 모드함수 식 (7) 사용 식 (6)의 해를

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^N w_n^j(x) f_n(t) \quad j = I, \Pi \quad (13)$$

로 하여 식 (13)을 식 (6)에 대입하면

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N [\rho A(x) + \sum_{k=1}^3 m \delta(x - x_k)] w_n^j(x) \ddot{f}_n(t) \\ + \sum_{n=1}^N EI(x) [w_n^j(x)]_{xxxx} [f_n(t) + c \dot{f}_n(t)] \quad (14) \\ + \sum_{n=1}^N K_s w_n^j(x) \delta(x - x_k) f_n(t) = M_p [\delta'(x) - \delta'(x - a)] \end{aligned}$$

로 되어 식 (14)에 겔러킨 법을 적용하여 정리하여 얻어진 식을 정리하면 이하의 행렬 표시의 운동방정식이 얻어진다.

$$M\ddot{F}(t) + \Gamma\dot{F}(t) + KF(t) = UM_p(t) \quad (15)$$

여기서 M, Γ, K 및 U 의 매트릭스 요소는 각각

제 3 장 핑거 시스템 및 구동제어법

$$m_{ij} = \int_0^l [\rho A(x) + \sum_{k=1}^3 m\delta(x-x_k)]w_j(x)w_i(x)dx$$

$$\gamma_{ij} = \int_0^l cEI(x)\frac{\partial^4 w_j(x)}{\partial x^4}w_i(x)dx \quad (16)$$

$$k_{ij} = \int_0^l [EI(x)\frac{\partial^4 w_j(x)}{\partial x^4}K_s w_j(x)\delta(x-x_k)]w_j(x)dx$$

$$u_i = \int_0^l [\delta'(x) - \delta'(x-x_k)]w_i(x)dx \quad i, j = 1, 2, \dots, N$$

로 생각한다. 식 (15)를 연속시간계의 상태방정식으로 표시하면

$$\dot{x}(t) = A_c'x(t) + B_c'M_p(t)$$

$$F_s(t) = C_c'x(t) \quad (17)$$

로 된다. 여기서

$$x(t) = \begin{bmatrix} F(t) \\ \dot{F}(t) \end{bmatrix}, A_c' = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}\Gamma \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$B_c' = [0 \quad M^{-1}U]^T, C_c' = K_s[w_1 \dots w_n, 0 \dots 0]$$

로 된다. 상태량 $x(t)$ 를 $x(t) = [f_1(t) \quad \dot{f}_1(t) \dots f_N(t) \quad \dot{f}_N(t)]^T$ 로 치환하여 식 (17)을 표시하면

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c M_p(t)$$

$$F_s(t) = C_c x(t) \quad (19)$$

로 된다. 여기서 A_c, B_c, C_c 은 A_c', B_c', C_c' 을 치환한 것으로 된다. 암을 디지털 제어계로 구동 제어하는 것으로 샘플링 주기 T 로 이산화하면 상태방정식 및 출력방정식은

$$x(i+1) = Ax(i) + BM_p(i)$$

$$F_s(i) = Cx(i) \quad (20)$$

로 된다. 여기서

$$A = \exp[A_c T], B = \int_0^T \exp[A_c \tau] d\tau B_c, C = C_c \quad (21)$$

로 된다.

마이크로 핑거는 손 자체가 작으므로, 손자신에 분포 센서의 장치를 부착하는 것은 곤란하다. 이 장은 그것을 위해 센서 부분을 별도로 제작하여, 대상물과 파지하는 경우에는 파지물체와 손 간에 센서집합체를 삽입하여, 이것을 측정하여 정보를 얻어 제어를 행하는 제어법을 제안한다. Fig.1에 제안한 모델을 표시한다. 그리고, $x_1 = 0.6l, x_2 = 0.8l, x_3 = 1.0l$ 의 위치에 접촉한 경우의 구동제어 특성에 대해 검토한다.

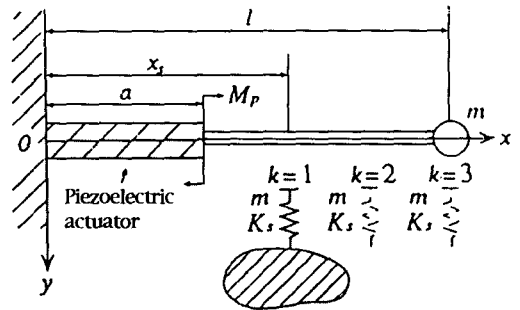


Fig. 1 Analytical model of finger.

3-1 접촉력 센서

로봇 핑거가 유연하고 부서지기 쉬운 작은 물체를 파지하기 위해서는 파지력을 미소하게 제어할 필요가 있어, 미소한 힘을 측정 가능한 고감도, 고정도 접촉력 센서가 필요하다. 본 연구에서는 수 gram중력을 측정 가능한 고정도 힘센서를 시험제작 했다 시험제작한 센서는 두께

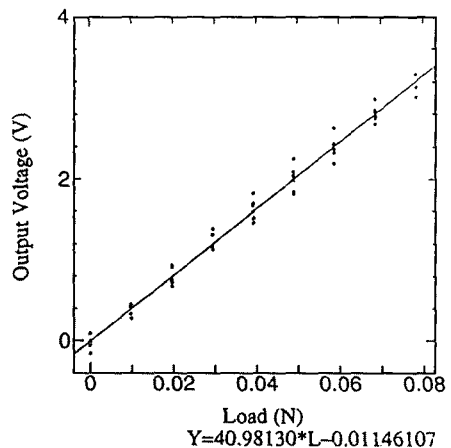


Fig. 2 Characteristic of contact force sensor.

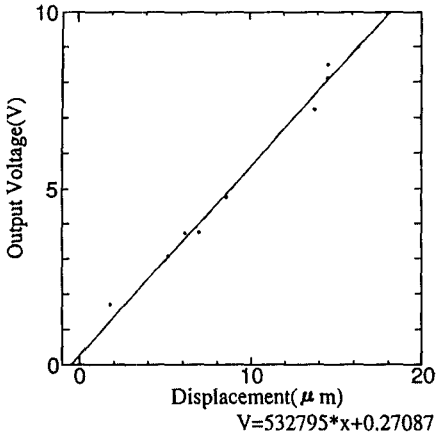


Fig. 3 Characteristic of contact force sensor.

0.1mm의 동판과 두께3mm 고무판 사이에 고감도 반도체 스트레인 gauge(KYOWA KSP-2-E4)을 부착, 동판 측에 점접촉이 되도록 압전편으로 물체를 잡아 그것을 접촉점으로 하여, 게이지의 출력전압에 의해 접촉력을 측정하는 것이다. 센서의 하중을 부하,제하시, 그경우의 센서의 출력전압을 측정 한 결과를 Fig.2에 표시한다.그림은 0~0.08N(0~8.16g중)의 하중에 대한 센서의 출력전압으로 되어 부하,제하 모두6번 측정을 행했다. 그림에 의해 부하, 제하시 모두 선형성이 있어, 수 gram중의 미소한 힘의 측정이 가능하다.

gap adjuster로 센서를 부착한 강체벽과 접촉시킨 강체벽과의 변위를 측정하고 gap adjuster를 사용하여 0~10μm에 눌러 부착한 경우의 출력전압을 측정한다.

이 경우 대상물과 힘센서 사이에 거리를 gap adjuster를 기준으로 하여 움직여서 레이저 변위계를 사용하여 변위를 측정하고, 힘센서의 출력전압을 측정 한 결과를 Fig.3에 표시한다. 그림에 의해 변위와 출력전압에도 선형성이 있음을 알수있다.

이것에 의해 센서는 등가스프링으로 모델화한 일은 타당하며, 센서의 스프링 정수 K_s 는 Fig.2, Fig.3에 의해 구하면

$$K_s = 13.000 \times 10^3 (N/m) \quad (22)$$

로 된다.

3-2 압전소자 및 flexible 핑거

핑거의 구리보부와 압전소자의 물성치를 Table.1에 표시한다. 핑거를 일단고정 일단자유의 경계 조건으로

Table 1. Physical parameters of finger.

	등재보부	압전소자
길이(m)	51.5×10^{-3}	29.7×10^{-3}
폭(m)	7.10×10^{-3}	12.0×10^{-3}
두께(m)	0.33×10^{-3}	0.65×10^{-3}
밀도(kg/m ³)	8.67×10^3	8.3×10^3
Young 율(N/m ²)	102.5×10^9	58.03×10^9
내부감쇠율(s)		2.9836×10^{-5}
센서질량(kg)		0.71×10^{-3}
선단질량(kg)		1.5×10^{-3}
스프링 상수(N/m)		13.000×10^3

Table 2. Natural frequency of clamped-free finger.

	이론치	실험치
고유진동수 (Hz)	21.7	21.0

Table 3. Natural frequency of clamped-free spring supported finger

x_s 점	이론치	실험치
1.0l	168	-
0.8l	74.5	74.5
0.6l	30.8	34.5

FFT analyzer를 사용 측정 한 진동수와, 수치계산에 의해 구한 고유진동수를 Table.2에 표시한다. 내부감쇠계수와 핑거를 자유진동시킨 경우에 얻어진 시간응답 곡선에 의해 대수감쇠율을 구해 결정했다. 센서의 위치를 $x_s = 0.6l, 0.8l, 1.0l$ 로 변화시킨 핑거에 접촉하고 있는 경우에 측정 한 진동수와, 수치계산에 의해 구한 자유진동수를 Table.3에 표시한다. $x_s = 1.0l$ 가 접촉점으로 된 경우의 발생변위가 작기 때문에 교류전압 50 Hz의 값이 최고 큰 peak로 되어, 그 밖의 잡음과 혼합되어 진동수를 알수 없다. 그리고 센서를 각각 3점에 접촉시킨 상태

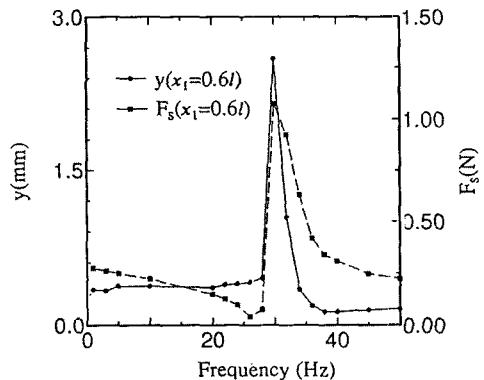


Fig. 4 Frequency spectrum of force and displacement at $x=0.6l$

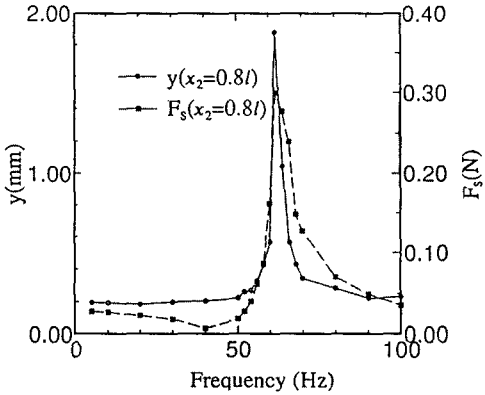


Fig. 5 Frequency spectrum of force and displacement at $x=0.8l$

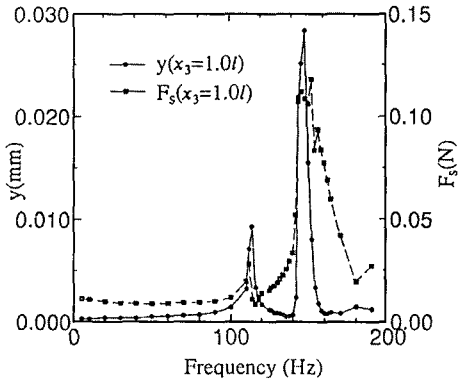


Fig. 6 Frequency spectrum of force and displacement at $x=1.0l$

로 압전소자에 신호 발생기를 연결하여, 20vp-p의 정현파 전압을 압전소자에 인가하여 주파수를 변화시킨 경우의 접촉점의 변위를 레이저 변위계(KEYENCE LC-2100 LC-2220)로, 접촉력을 앞의 센서에 의해 측정했다. 얻어진 힘 및 변위의 주파수 응답을 Fig.4, Fig.5, Fig.6에 표시한다. 횡축은 주파수, Y축은 발생변위, r축은 발생력이다. 그림중 실선은 발생변위, 파선은 발생력이다. Fig.4, Fig.5는 자유진동으로 구한 고유진동수와 폭이 같은 주파수로, peak가 보인다. Fig.6은 센서가 $x_3=1.0l$ 점으로 접촉점으로 된 경우는 1차 고유진동수 152Hz로 생각한 점에 peak가 보이지만, 118Hz에도 peak가 보인다. 이것은 핑거가 일단고정 일단 자유의 경우의 2차 고유진동수로 되어, 진동이 발생하기 때문이다. 힘 센서와 핑거의 접촉위치에 의해 고유진동수가 꽤 다르게 되어, 접촉점이 선단에 가까울수록 고유진동수가 높게 됨을 알 수 있다. 이것에 의해 실험치와 계산치는 일치하고 있어 분석 방법은 타당함을 알 수 있다.

3-2-1 시스템 구성

본 실험에서 사용한 장치의 개략도를 Fig.7에 표시한다. 장치는 flexible 핑거로 구성시킨 기구부, 접촉점의 힘을 측정한 접촉력 센서, 센서의 정보전달에 사용하는 pre-amp, 압전소자의 구동에 사용하는 power amp 및 센서의 정보를 기록해석하여 제어입력을 발생시키는 제어부(A/D 변환기, computer, D/A 변환기)에 의해 구성시킨다. 핑거의 접촉점의 힘은 접촉력 센서에 의해 측정한다. 센서 출력은 동적 스트레인 게이지에 의해 증폭시킨 후, A/D 변환기(ADTEK AB-98-05A; 분해능:12bit, 출력:8ch, 변환시간:25(μ sec/ch))로 아날로그 - 디지털 변환시켜 퍼스널 컴퓨터(NEC PC-9801VX; CPU:80286, 수치계산 coprocessor:80287)에 보내 연산을 행한다. 연산결과는 D/A 변환기(ADTEK AB-98-06A; 분해능 12bit, 출력:2ch, 변환시간:1.35(μ sec/ch))에 의해 $\pm 5(v)$ 의 아날로그 신호에 변환시켜 power amp에 보낸다. power amp도 증폭시킨 신호는 압전소자에 가하여 핑거가 구동된다. 실험에서 사용한 제어용 software는 c 언어 및 어셈블리 언어에 의해 기술하고 있다.

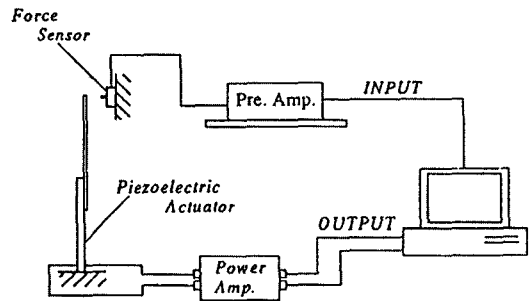


Fig. 7 Experimental setup.

3-3 핑거의 구동법

3-3-1 PID 제어

디지털 PID 제어법칙을 적용하여, 접촉점이 다른 경우의 힘제어에 대해 검토를 한다.

▽ 제어법칙

여기서는 핑거의 제어법으로서 PID(비례+미분+적분)제어를 적용하여, 핑거의 접촉점에 따른 접촉력 및 시간 미분을 피드백 신호로 사용하여, 소자에 가한 전압을 제어한다. 이 경우의 제어기의 블록선도를 Fig.8에 표시한다. 이것에 의해 압전소자에 가한 제어 모멘트는

$$M_p(t) = G_p[F_d(t) - F_s(t)] + G_v[\dot{F}_d(t) - \dot{F}_s(t)] + G_I \int_0^t [F_d - F_s(x_s, \tau)] d\tau \quad (23)$$

여기서, F_d, F_s 는 각각 목표치와 목표치의 시간미분, 또한 F_d, F_s 은 x_s 점의 접촉력과 접촉력의 시간미분을 표시하고 있다. 그래서, G_p, G_v, G_I 은 각각 비례, 미분 및 적분 이득이다. 식(23)을 샘플링 주기 T로 이산화 하면 제어 모멘트는

$$M_p(i) = G_p[F_d - F_s(i)] + G_v[\dot{F}_d(i) - \dot{F}_s(i-1)]/T + G_I \frac{1}{2} \sum_{k=0}^i [F_d(k) - F_s(k) + F_d(k-1) - F_s(k-1)] \quad (24)$$

로 된다.

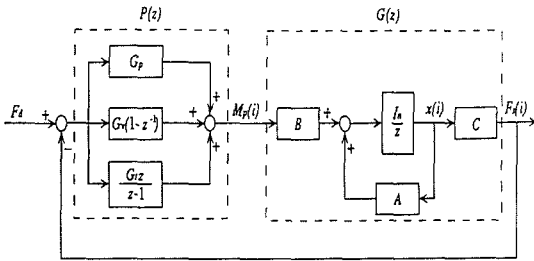


Fig. 8 Blockdiagram of PID controller.

▽제어사양에 의한 PID 게인의 결정

Fig.8과 같이, PID closed loop와 핑거의 이산간계를 전달함수로 각각 $P(z)$ 및 $G(z)$ 로 하면, 목표치 $F_d(z)$ 로부터 핑거의 선단력 $F_d(z)$ 까지의 폐 loop 전달함수 $H(z)$ 은 다음과 같이 표시된다.

$$H(z) = \frac{F_d(z)}{F_s(z)} = \frac{p(z)G(z)}{1 + P(z)G(z)} \quad (25)$$

여기서 전달함수 $P(z), G(z)$ 은 식(24) 및 식(20)에 의해

$$P(z) = G_p + \frac{G_v}{T}(1 - z^{-1}) + \frac{G_I(1 + z^{-1})}{2(1 - z^{-1})} \quad (26)$$

$$G(z) = C(zI - A)^{-1} B \quad (27)$$

로 표시된다. 이 폐 loop 전달함수의 응답에 최대로 관

계하는 저차 모드의 측에 주목하여, 그의 극이 희망하는 제어사양으로 부터 결정시킨 지정극에 최대한 가깝게 되도록 이득을 수치계산 방법에 의해 구한다. 단지 저차 모드의 극은 Z 평면에 대한 극의 각도가 더욱 작은 극이 된다.

▽실험순서

본 실험은 핑거의 접촉력이 힘을 0의 상태로 부터 빨리 목표의 일정치(0.03N)에 되도록 압전소자의 발생하는 굽힘 모멘트를 제어한다. 실험에서 핑거의 제어신호는 샘플링시간으로 다음식과 같이 계산하다.

$$V_d = g_p[V_d - V_s(i)] + g_v[\dot{V}_d(i) - \dot{V}_s(i-1)] + g_I \frac{1}{2} \sum_{k=0}^i [V_d(k) - V_s(k) + V_d(k-1) - V_s(k-1)] \quad (28)$$

여기에 V_d 및 V_s 은 각각 디지털화 시킨 핑거의 접촉점에 따른 접촉전압의 목표치 및 실험의 접촉전압으로 되며, g_p, g_v 및 g_I 은 각각 비례, 미분 및 적분 피드백 이득으로 된다.

여기서 접촉전압의 미분신호는 직접계측 할 수 없기 때문에, 여기서는 다음과 같이 고려한다.

$$\begin{aligned} &\text{시간 } i \text{에 따른 측정출력의 미분신호} = \\ &\frac{\text{시간 } i \text{에 따른 측정신호} - \text{시간 } (i-1) \text{에 따른 측정신호}}{T} \quad (29) \end{aligned}$$

단지 실험에 대해서는 간단히 미분 피드백 이드 샘플링 시간을 가져

$$\begin{aligned} &\text{시간 } i \text{에 따른 측정출력의 미분신호} = \\ &\text{시간 } i \text{에 따른 측정신호} - \text{시간 } (i-1) \text{에 따른 측정신호} \quad (30) \end{aligned}$$

로 고려한다. 이 방법을 사용한 경우, 속도신호를 위치신호의 차로 고려하기 때문에 잡음의 영향을 받기 쉽다. 잡음의 영향을 작게 하기 위해 속도 신호를

$$\Delta V_s = \{middle\}[\Delta V_s(i), \Delta V_s(i-1), \Delta V_s(i-2)] \quad (31)$$

로 고려한다. 위식은 3개의 값의 중간치를 의미한다. 이것에 의해 잡음의 영향이 적어진다.

수치계산에 사용한 피드백 이득과 실험에서 사용한 피드백 이득의 관계는, 0.6I, 0.8I 및 선단이 접촉점이 된 경우 각각, 다음과 같다.

$$G_{pk} = k_{MVK} \times 10.08 \times 10^2 \times g_{pk},$$

$$G_{uk} = k_{MVK} \times \frac{\sqrt{E_b I_b / \rho_b A_b T}}{J^2} 1008.15 \times g_{uk},$$

$$G_{ik} = k_{MVK} \times 10.08 \times 10^2 \times g_{ik} \quad (32)$$

3-3-2 PID 제어의 수치계산 및 실험결과

$x_1 = 0.6 l$, $x_2 = 0.8 l$, $x_3 = 1.0 l$ 점이 접촉점으로 되는 경우에 디지털 PID 제어를 사용하여, 접촉력이 $F_d = 0.03(N)$ 의 일정력에 유지 하도록 제어를 행한 결과를 표시한다. 수치계산 및 실험 모두 샘플링 주기를 3(msec)로 했다. Fig.4, Fig.5, Fig.6 에서, 같은 제어전압을 압전소자에 가하여, $x_1 = 0.6 l$ 점이 접촉점으로 된 경우가, 그 밖의 2점 ($x_2 = 0.8 l$, $x_3 = 1.0 l$)이 접촉점으로 된 경우에 비해 접촉력이 크게 됨을 알 수 있다. $x_1 = 0.6 l$ 점이 접촉점으로 된 경우를 기준으로 하여 제어사양 closed loop을 설계한다. 제어사양은 overshoot을 1%로 작게한 경우에는 정정시간이 0.5(sec)로 늦고, 정정시간을 0.1(sec)로 빠르게 설정한 경우에는 overshoot을 10%로 크게 되며, 또한, 중간값으로서 overshoot을 5%, 정정시간 0.3(sec)로한 제어사양도 고려했다. 여기서, 정정시간은 목표치의 $\pm 0.5\%$ 의 범위에 도달한 시간으로 하고, 접촉력은 목표치를 step 입력으로 고려한 경우의 응답으로 부터 얻은 지정극에 대해 PID 이득 및 폐 loop 계의 극을 표시한다. 이것을 보면 각각의 조건에 대해 폐 loop 계의 극은 지정극에 가까운 점을 가짐을 알 수 있다. Table5에서 얻어진 PID 이득을 사용한 경우의 수치계산 결과와 실험결과를 Fig.9~Fig.11에 표시한다. 그림(a), 그림(b)는 각각 계산결과, 실험결과로 그림의 횡축은 시간, 종축은 힘을 표시하고 있다. $x_1 = 0.6 l$ 점이 접촉점으로 된 경우를 모델로 하고 제어사양을 overshoot 1%, 정정시간 0.5(sec)로 하여 closed loop을 설

계한 경우의 결과를 Fig.9에 표시한다. 얻어진 closed loop을 사용 0.6l 점 뿐만 아니라 0.8l, 선단이 접촉점이 된 경우에도 적용하여, 제어한 결과를 표시한다. $x_1 = 0.6 l$ 점이 접촉점으로 된 경우에는 수치계산 결과에 저차 진동성분이 다소 보이지만, 수치계산과 실험 결과 모두 overshoot도 없이 0.5(sec)에서는 충분히 목표치에 추종하고 있어, 제어사양을 만족하고 있다. $x_2 = 0.8l$ 점이 접촉점으로 된 경우에는 실험결과 쪽이 다소 고차의 진동이 보인다. 실험 및 계산 모두 0.6(sec)정도로 목표치에 도달하고 있다. $x_3 = 1.0l$ 점이 접촉점이 된 경우에는 수치계산 결과, 실험결과 모두 안정하게 되었지만 1(sec)내에서는 목표치에 도달하고 있지 않다. Fig.10은 제어사양을 overshoot 5%, 정정시간 0.3(sec)로 한 경우의 결과이다. $x_1 = 0.6 l$ 점이 접촉점이 된 경우에는 저차 진동성분이 다소 보이지만, 양결과 모두 0.3(sec)에서는 충분히 목표치에 도달하고 있다. $x_2 = 0.8l$ 점이 접촉점이 된 경우에는 계산결과에서는 0.4(sec)에는 목표치에 도달하고 있지만, 실험결과 쪽이 다소 고차의 진동도 보여 도달된 시간은 0.6(sec)로 다소 시간이 걸린다. $x_3 = 1.0l$ 점이 접촉점이 된 경우에는 수치계산, 실험 결과 모두 약 1(sec)로 안정하게 목표치에 도달하고 있다.

Table 4. Theoretical natural frequency at the point of contact

제어사양	지정극
$O_s=10\%$, $t_s=0.1(sec)$	$0.8331 \pm 0.1835i$
$O_s= 5\%$, $t_s=0.3(sec)$	$0.9469 \pm 0.0527i$
$O_s= 1\%$, $t_s=0.5(sec)$	$0.9685 \pm 0.0210i$

Table 5. PID-Gain at the point of contact.

제어사양	PID gain	주요극
$O_s=10\%$, $t_s=0.1(sec)$	$G_p=0.0011, G_v=0.0021, G_i=0.03$	$0.8362 \pm 0.1625i$
$O_s= 5\%$, $t_s=0.3(sec)$	$G_p=0.001, G_v=0.002, G_i=0.042$	0.9462
$O_s= 1\%$, $t_s=0.5(sec)$	$G_p=0.001, G_v=0.00115, G_i=0.076$	0.9731

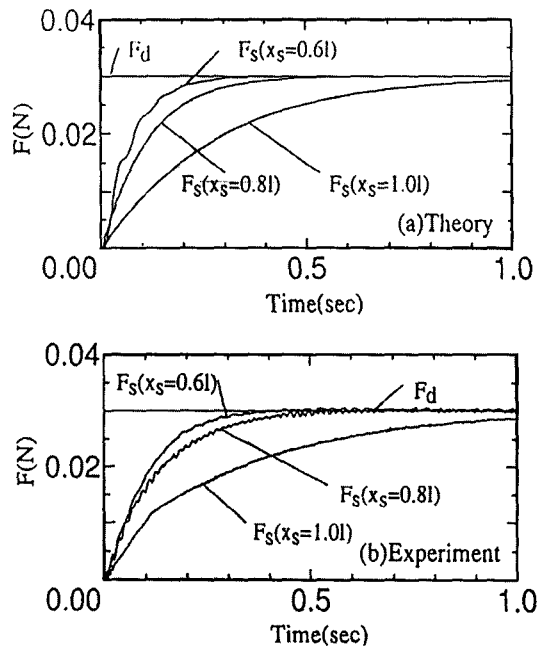


Fig. 9 Response of finger driven by pid controller. ($O_s=1\%$, $T_s=0.5(sec)$, $\epsilon = \pm 0.5\%$)

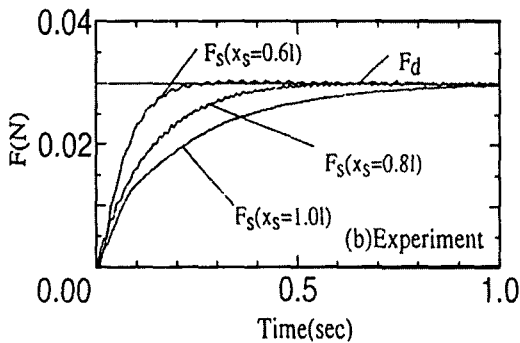
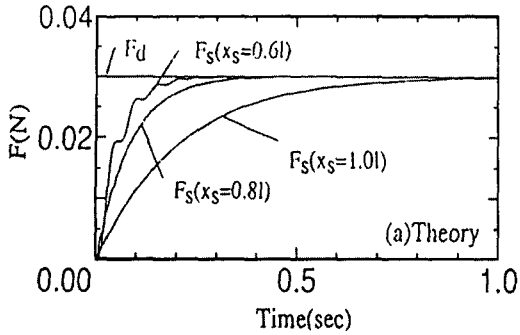


Fig. 10 Response of finger driven by pid controller. ($O_s=5\%$, $T_s=0.3(\text{sec})$, $\epsilon=\pm 0.5\%$)

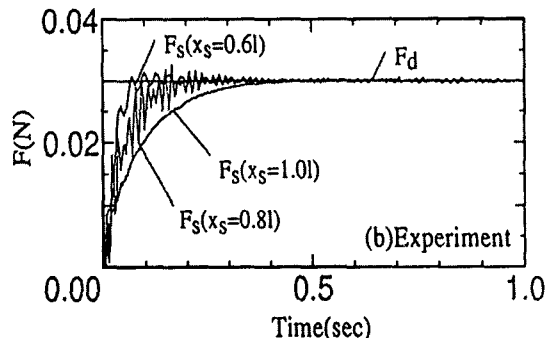
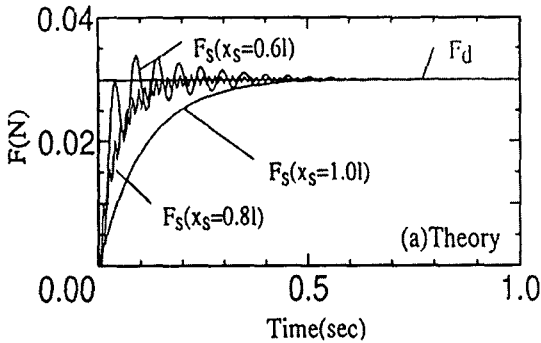


Fig. 11 Response of finger driven by pid controller. ($O_s=10\%$, $T_s=0.1(\text{sec})$, $\epsilon=\pm 0.5\%$)

Fig.11은 제어사양을 overshoot 10% 정정시간 0.1(sec)로 한 경우의 결과이다. $x_1 = 0.6l$ 점이 접촉점이 된 경우에는 수치계산 결과에는 크게 저차의 진동성분이 보여 overshoot는 15%로 크게 되고 있다. 실험에서는 3%로 작게 되고 있어 1차 진동성분이 보이고 있다. $x_2 = 0.8l$ 점이 접촉점이 된 경우에는, 수치계산 결과 및 실험결과로 고차 진동성분이 있다. $x_3 = 1.0l$ 점이 접촉점이 된 경우에는 수치계산 실험결과 모두 안정하게 약 0.5(sec)로 목표치에 도달하고 있다.

제4장 결론

본 연구는 센서 부분과 핑거를 제작하여, 대상물을 파지하는 경우에 파지물체와 핑거의 사이에 센서를 삽입하여, 측정된 정보를 얻어 힘제어를 행하는 제어방법을 제안했다. 분포 센서를 가진 인공지로서, 파지영역 3지점에 힘센서를 가진 flexible 핑거를 모델로 하여, 접촉점이 변화하는 경우에 대해, PID 제어를 적용하여, 이론해석 및 실험을 수행했다. 그 결과를 요약하면 다음과 같이 된다.

(1) 압전소자를 액츄에이터로 하는 인공지에 대한 운동방정식을 유도 하여, 모드급수 전개법을 적용한 후에, 연속시간계를 샘플링 주기로 이산화하였다. 얻어진 수치계산결과와 실험결과는 접촉점과 관계없이 유사한 경향을 보이며, 분해해석법의 타당성의 확인이 가능했다

(2) 인공지를 한개의 단면보로 생각한 경우, 대상물과의 접촉점이 자유단에 가까울수록 고유진동수는 높다.

(3) PID제어는 안정화되는 시간이 빠르지 않는 것이라면, 어떠한 점이 접촉점이되어도 안정한 제어가 가능하다.

참고문헌

1. T.OKADA 1979 IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics SMC-9..79-89. Object-handling system for manual industry.
2. J.K.SALISBURY and J.J.CRAIG 1982 International Journal of Robotic Research 1, 4017. Articulated hands: force control and kinematic issues.
3. P.DARIO and G.BUTTAZZO 1987 International journal of robotic research 6, 25-48. An Anthropomorphic robot finger for investigating

- artificial tactile perception.
4. J.K.PARKER and F.W.PAUL 1987 transactions of the American society of Mechanical Engineers, Journal of dynamic systems, Measurement, and Control 109, 328-334. Controlling impact forces in pneumatic robot hand designs.
 5. H.TERASAKI and T.HASEGAWA 1994 Journal of the Robotics Society of Japan 12, 138-147. Motion planning for intelligent manipulation by sliding operations with parallel two-fingered grippers.
 6. J.P.BAARTMAN and T.STORM 1994 Industrial Robot 21, 23-27. Flexible grippers for mechanical assembly.
 7. M.OHKA, M.KOBAYASHI, T.SHINOKURA and S.SAGISAWA 1994 JSME International journal, series C37, 138-146. Tactile expert system using a parallel fingered hand fitted with three-axis tactile sensors.
 8. T.OKAMOTO, O.KITANI T.TORII Journal of the society of Agricultural Machinery, Japan 55, 103-110. Robotic transplanting of orchid protocorm in mericlone culture.
 9. B.SHAHIAN and M.HASSUL Control System Design Using Matlab.
 10. K. OGATA Discrete Time Control Systems.