

초음파 모터의 위상차를 이용한 직접구동 매니플레이터의 컴플라이언스 제어

吳金坤, 金大賢, 金永燭, 金在玟

Compliance Control of a Direct-Drive Manipulator using Phase-Difference of Ultrasonic Motor

Geum-Kon Oh, Dae-Hyun Kim, Young-Dong Kim, Jae-Min Kim

요 약

본 논문에서는 초음파 모터의 위상차 구동원리에 관해서 명확히 하였고, 이를 이용하여 점·탄성 특성을 갖는 컴플라이언스 제어를 제시하였다. 제안된 컴플라이언스 제어는 인간의 근골격 시스템으로부터 유출하여 인간의 운동특성과 같이 매니플레이터의 관절 토크를 점성과 탄성계수의 조절에 의해 매니플레이터의 위치와 자세가 제어되도록 하였다. 초음파 모터의 위상차 구동원리에 대한 타당성을 모의실험을 통해 검증하였으며, 제시된 제어방법의 타당성을 검증하기 위하여 초음파모터를 이용하여 2축 수평형 직접구동 매니플레이터를 제작하여 점성과 탄성 특성에 대한 실험을 하였다.

ABSTRACT

In this paper, the compliance control method was proposed and the phase-difference operating principle of an ultrasonic motor described. The compliance control can be implemented with spring/damper properties of the musculo-skeletal system of the actual limb in controlling its net configuration and movement. The proposed phase-difference driving scheme is verified through the computer simulation. Also, performance of the proposed control method of a two-link direct-drive manipulator are examined by the experimental results with respect to spring/damper properties.

Key Words : compliance control, phase difference, ultrasonic motor, spring/damper properties

1. 서 론

오늘날 산업 현장에서는 공장 자동화에 대한 관심이 집중되면서 자동화에 근간이 되는 로봇에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 사람을 대신하여 지속적으로 작업을 할 수 있는 로봇의 꿈을 실현시킨 산업용 로봇의 시초는 1962년 미국 Unimation사에 의해서이며, 그 후 다양한 종류의 로봇이 개발되어 왔다.^[1-5] 산업용 로봇에서 말단부(end-effector)로 지칭되는 로봇 손은 대부분의 경우, 그 구조가 간단하여 제작은 용이하나

단순한 기능만을 할 수 있기 때문에 실질적으로 그 응용범위는 물류운반, 용접, 도장 및 포장과 같은 단순 반복적인 조작에만 국한되어졌다. 그러나 현대에 와서는 조립과 같은 정교한 작업을 대상으로 하기 때문에 고속화 및 정밀화가 요구되고 있어서 로봇 손은 Utha/MIT hand^[1]를 시초로 구동 메커니즘에 텐던을 연결하여 관절을 구동시키는 Stanford/JPL^[2]등의 다양한 형태로 발전되어 왔다. 이러한 로봇 손은 텐던 메커니즘을 근거로 개발되었기 때문에 액츄에이터를 포함한 로봇 손의 전체적인 시스템이 크게되고, 초기에 텐던을

정확하게 장착하기가 쉽지 않을 뿐만 아니라, 장시간 사용에 따른 텐던의 변형으로 인하여 정밀한 제어가 어렵다. 또한 일반적인 서보 액추에이터의 경우, 저속의 고 토크를 얻기 위해 감속 기어를 사용함으로써 백러쉬와 토크 리플과 같은 문제점을 가지게 된다.^[6~7] 이와 같은 텐던방식과 기어의 사용으로 발생하는 문제점을 개선하고, 액추에이터의 소형화를 위해 초음파 모터가 소개되어졌다. 초음파 모터는 압전소자에 의한 초음파 진동을 이용한 마찰 구동형 모터로서 그림 1과 같이 압전 세라믹소자를 접착 진동원으로 사용하고 있는 고정자와 알루미늄 원판의 회전자로 크게 구성되어진다.^[8] 고정자와 회전자 사이에는 금속 원판 스프링과 고무를 가압 접촉시킨 구조로 전자식과는 달리 가압, 마찰 접촉되어 있다. 이러한 초음파 모터는 저속에서의 큰 토크를 얻을 수 있으며, 정·역의 응답속도가 빠르고, 운전시 소음이 없다는 특성을 가지고 있다.^[9]

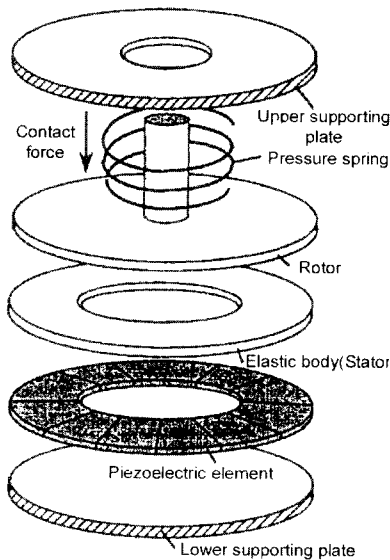


그림 1 초음파 모터의 내부 구조
Fig. 1 The structure of ultrasonic motor

이와 같은 장점에도 불구하고 많은 제어 방식들이 제안되고 있지 않고 있다. 대표적인 제어 방식으로는 주파수 제어가 있는데 이 방법은 초음파 모터의 구동 공진 주파수를 가변시켜 토크 제어를 하는 것이다. 그러나 주파수를 정확히 1Hz 단위 또는 그 이하로의 가변은 구현하기가 어려울 뿐만 아니라 공진 구동 주파수에 매우 민감한 초음파 모터를 정확히 제어하기란 매우 어렵다. 본 논문에서는 초음파 모터를 효과적으

로 제어할 수 있는 위상차 구동 방식을 이용한 컴플라이언스 제어 방식을 제안한다. 위상차 구동은 주파수 구동 방식과는 다르게 초음파 모터의 공진 구동 주파수를 고정시키고, 위상차 입력을 제어기에 입력함으로써 토크 제어를 할 수 있다. 따라서 제어 입력 토크는 위상차 구동과 함께 점성과 탄성의 특성을 가지고 계산되어진다. 이는 인간의 관절 운동 특성이 구현되는 것으로 생각될 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 초음파 모터의 기계적 동작원리에 대한 이론을 살펴보고, 3장에서는 인간의 근골격 동작 원리와 비슷한 컴플라이언스 제어 방식을 살펴본다. 다음 4장에서는 2축 수평형 매니플레이터에 대하여 제안된 컴플라이언스 제어를 통해 점성과 탄성 특성을 실험을 통하여 검증하고, 마지막 5장에서는 결론을 맺는다.

2. 초음파 모터의 기계적 동작원리

초음파 모터의 구동원인 세라믹 압전체에 두께 방향으로 정현파 전계를 인가하면 압전체의 분극 방향으로 따라서 기계적인 신장과 수축이 발생한다. 이것이 금속 탄성체(고정자) 표면에 정재파(standing wave)로 나타난다. 각 상에 의한 정재파가 탄성체 내부에서 합성되면서 고정자 표면에는 진행파(travelling wave)가 생성된다. 이 때 고정자 표면의 한 질점은 타원 운동을 하는데, 이 타원의 크기 및 모양 그리고 회전 방향을 조절함으로써 초음파 모터의 속도 및 토크를 제어할 수 있다. 일반적으로 진행파는 다음과 같이 표현된다.

$$Y = \zeta \sin \{ 2\pi / \lambda (x - vt) + \Psi \} \quad (1)$$

여기서, ζ 는 진폭, λ 는 파장, v 는 속도, 그리고 x , t , Ψ 는 각각 원주상의 위치, 시간, 위상이다. 초음파 모터의 한쪽 상에 단상 입력만을 인가하면 고정자에서 발생하는 기계적 정재파는 좌회전하는 진행파와 우회전하는 진행파로 동등하게 나눌 수 있다. 즉, 정회전하는 진행파 $Y_{(+)}$ 와 역회전하는 진행파 $Y_{(-)}$ 가 각각 발생하여 식 (2)와 같은 정상파가 된다.

$$Y_s = Y_{(+)} + Y_{(-)} \\ = 2\zeta \sin(2\pi x / \lambda + \Psi_1) \cos(\omega_0 t + \Psi_2) \quad (2)$$

$$\text{단, } \Psi_1 = (\Psi_{(+)} + \Psi_{(-)}) / 2, \Psi_2 = (\Psi_{(+)} - \Psi_{(-)}) / 2$$

따라서 A상과 B상에 각각 정현파 전압을 인가하면 각상에 의해서 다음과 같은 정상파가 발생한다.

$$Y_A = 2\zeta_A \sin(2\pi x/\lambda + \Psi_A) \cos(\omega_0 t + \theta_A) \quad (3)$$

$$Y_B = 2\zeta_B \sin(2\pi x/\lambda + \Psi_B) \cos(\omega_0 t + \theta_B) \quad (4)$$

A상에서 발생한 정상파의 공간적 위상 Ψ_A , B상에서 발생한 공간적 위상 Ψ_B 는 초음파 모터의 구조상 90° 의 위상차를 갖는다. 그리고 A상과 B상에 시간적으로 ϕ 인 정현파 전원을 공급하면 A상과 B상에서 발생하는 기계적 진동파인 정상파는 각각 식 (5)로 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_A &= \zeta_A \sin nx \sin \omega_0 t \\ Y_B &= \zeta_B \cos nx \sin(\omega_0 t + \phi) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, ζ_B 는 정수, x 는 원주상의 위치, 그리고 n 은 원주상의 정상파의 개수(=9)이다. A상과 B상의 정상파가 고정자 내부에서 합성되므로 식 (6)과 같은 진행파가 된다.

$$y = \zeta_A \{ \sin nx \sin \omega t + r \cos nx \sin(\omega t + \phi) \} \quad (6)$$

이 때 진폭 $r = \zeta_B / \zeta_A$ 이다.

이 진행파에 의한 기계적 진동은 탄성체의 두께 T 의 중앙인 중성면의 것이고, 그로부터 $T/2$ 인 탄성체 표면의 원주 방향의 변위 X 와 축방향의 변위 Y 를 각각 식 (7)과 (8)이라 하고

$$\begin{aligned} X &= x - \frac{T}{2} \sin \theta \doteq x - \frac{T}{2} \tan \theta \\ (\because \theta \doteq 0, \sin \theta \doteq \tan \theta = \theta) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Y &= y + \frac{T}{2} \cos \theta \doteq y + \frac{T}{2} \\ (\because \cos \theta \doteq 1) \end{aligned} \quad (8)$$

$\tan \theta$ 가 다음과 같을 때

$$\tan \theta = \frac{\partial y}{\partial x} = n\zeta_A \{ \cos nx \sin \omega t - r \sin nx \sin(\omega t + \phi) \} \quad (9)$$

식 (6)과 (9)를 식 (7)과 (8)에 대입하여 정리하면 식 (10)과 (11)이 된다.

$$\cos nx \sin \omega t - r \sin nx \sin(\omega t + \phi) = \frac{2(X-x)}{-nT\zeta_A} \quad (10)$$

$$\sin nx \sin \omega t + r \cos nx \sin(\omega t + \phi) = \frac{Y - \frac{T}{2}}{\zeta_A} \quad (11)$$

식 (10)과 (11)은 $\sin \omega t$, $\sin(\omega t + \phi)$ 에 대한 1차 연립 방정식이므로, 크래머의 법칙(Cramer's rule)을 이용하여 $\sin \omega t$ 에 대한 해를 구하여 정리하면

$$\sin \omega t = \frac{1}{\zeta_A} \left\{ \left(Y - \frac{T}{2} \right) \sin nx - \frac{2(X-x)}{nT} \cos nx \right\} \quad (12)$$

식 (11)의 $\sin(\omega t + \phi)$ 를 전개하여 $\sin \omega t$ 항으로 정리하면 식 (13)이 된다.

$$P \sin \omega t - \frac{Y - \frac{T}{2}}{\zeta_A} = Q \sqrt{1 - \sin^2 \omega t} \quad (13)$$

여기서, $P = \sin nx + r \cos nx \cos \phi$

$$Q = -r \cos nx \sin \phi$$

식 (13)을 양변제곱하고 식 (12)를 대입하여 정리하면 식 (14)가 얻어진다.

$$\begin{aligned} \alpha(X-x)^2 + \beta(X-x)\left(Y - \frac{T}{2}\right) + \gamma\left(Y - \frac{T}{2}\right)^2 &= 1 \\ \alpha &= \left(\frac{2\cos nx}{nT}\right)^2 (P^2 + Q^2) \left(\frac{1}{\zeta_A^2 Q^2}\right) \\ \beta &= \frac{P}{nT} \cos nx \{1 - \sin nx \cdot (P^2 + Q^2)\} \left(\frac{1}{\zeta_A^2 Q^2}\right) \\ \gamma &= (P \sin nx - 1)^2 + \sin^2 nx Q^2 \left(\frac{1}{\zeta_A^2 Q^2}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} a &= \sqrt{\frac{2}{(\alpha + \gamma) - \sqrt{(\alpha - \gamma)^2 + \beta^2}}} \\ b &= \sqrt{\frac{2}{(\alpha - \gamma) - \sqrt{(\alpha - \gamma)^2 + \beta^2}}} \\ \theta_R &= \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\beta}{\alpha - \gamma} \end{aligned} \right.$$

식 (14)는 중심 $(x, T/2)$, 장축 a , 단축 b , 그리고 회전 θ_R 이 있는 타원을 나타낸다. 여기서 위상차 파라

미터인 ϕ 를 가변 시킴으로써 타원방정식의 장축 a , 단축 b , 그리고 회전 θ_R 을 변화시킬 수 있으므로 초음파 모터의 속도 및 토크를 제어할 수 있다. 그림 2는 위상차 ϕ 를 -90° 에서 $+90^\circ$ 까지 변화시켰을 때의 3차원 진행파의 시뮬레이션 결과이며, 그림 3은 이때의 타원 궤적이다.

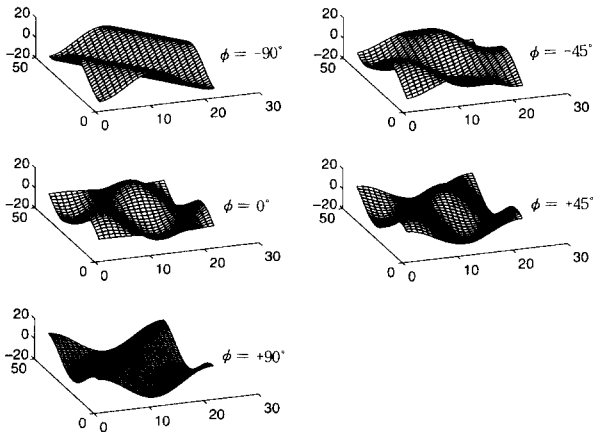


그림 2 위상차 제어에 의한 3차원 진행파
Fig. 2 3-dimensional travelling wave by phase difference control

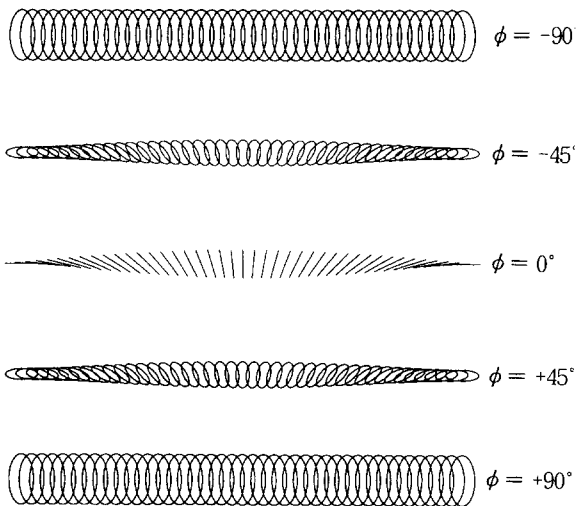


그림 3 위상차 제어에 의한 타원 궤적
Fig. 3 Oval trajectories by phase difference control

3. 컴플라이언스 제어

인간의 근·골격은 탄성특성을 가지는데 이는 그림

4와 같이 근사적으로 모델링 할 수 있다. 각 관절의 점·탄성 특성은 근육의 탄성 특성과 생물학적으로 밀접한 관계를 갖는다.^[10] 이는 관절이 팔의 끝점에서 임피던스를 측정하여 일정한 강성을 발생함으로써 탄성력을 가지고 움직인다는 의미와 같다. 따라서 관절의 강성에 변화를 주어 손의 임피던스를 바꾸어 다양한 작업들을 수행 할 수 있다.^[11]

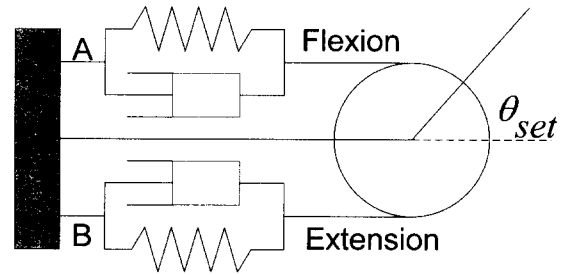


그림 4 탄성특성을 갖는 근골격 시스템의 모델링
Fig. 4 Modeling of the spring-like muscular system

그림 4에서와 같이 탄성체의 평형위치 θ_{set} 를 변화시킴으로써 관절 토크를 제어할 수 있는데, 이때 관절에 가해진 토크는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\tau = K_{joint}(\theta - \theta_{set}) + B_{joint}\dot{\theta} \quad (15)$$

이 관절은 점성과 탄성특성을 가지면서 A와 B의 신장과 수축에 의해 이동을 하게된다. 따라서 탄성체의 강성을 변화함에 따라 관절의 강성을 변화시킬 수 있다. 더욱이 같은 강성에서 위상차를 다르게 함으로써 관절의 토크변화도 변화시킬 수 있다. 이것은 2장에서 언급한 초음파 모터의 위상차 제어에 의해 쉽게 적용될 수 있다는 장점을 가진다. 이러한 특성의 관절을 실제 매니플레이터에 적용하기 위해 먼저 n -link 수평형 매니플레이터의 Euler-Lagrange 운동방정식^[12]을 살펴보면 식 (16)과 같다.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) = \tau \quad \theta \in R^n, \tau \in R^n \quad (16)$$

여기서 $M(\theta) \in R^{n \times n}$ 는 관성행렬이고, $\theta, \dot{\theta}$ 와 $\ddot{\theta}$ 는 각각 관절각도, 관절속도, 관절가속도이며 $C(\theta, \dot{\theta})$ 는 원심력(centrifugal)과 Coriolis 항을 나타내며 τ 는 관절토크이다. 그리고 초음파 모터에 입력되는 위상차를 $e(t)$ 라 하면 다음이 성립한다.

$$\begin{aligned}
 e(t) &= \theta_{set}(t) - \theta(t) \\
 \dot{e}(t) &= \dot{\theta}_{set}(t) - \dot{\theta}(t) \\
 \ddot{e}(t) &= \ddot{\theta}_{set}(t) - \ddot{\theta}(t)
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

식 (17)을 식 (16)에 대입하고 $\ddot{e}(t)$ 에 대해 정리하면

$$\ddot{e}(t) = \ddot{\theta}_{set} + M^{-1}(\theta)[N(\theta, \dot{\theta}) - \tau]
 \tag{18}$$

가 되고 제어입력을 $u(t) = \ddot{e}(t)$ 라 하면 식 (15)으로부터 제어입력 $u(t) = K_{joint}\ddot{e} + B_{joint}\dot{e}$ 이므로 토크 방정식은 다음과 같다.

$$\tau = M(\theta)[\ddot{\theta}_{set} - B_{joint}\dot{e} - K_{joint}e] + C(\theta, \dot{\theta})
 \tag{19}$$

따라서 시스템의 상태방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ K_{joint} & B_{joint} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} w
 \tag{20}$$

여기서 $w = \ddot{e} - B_{joint}\dot{e} - K_{joint}e$ 이고 K_{joint} 와 B_{joint} 는 각각 탄성과 점성계수를 나타내는 $n \times n$ 대각행렬로 주어지므로 특성방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 K_{joint} &= \text{diag}[k_v], \quad B_{joint} = \text{diag}[b_v] \\
 \Delta_c(s) &= \prod_{i=1}^n (s^2 - k_{vi}s - b_{vi})
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

따라서 시스템이 안정적인 범위에서 k_v 와 b_v 를 선택하면 된다. 그림 5는 제어시스템에 대한 블록도를 나타낸다.

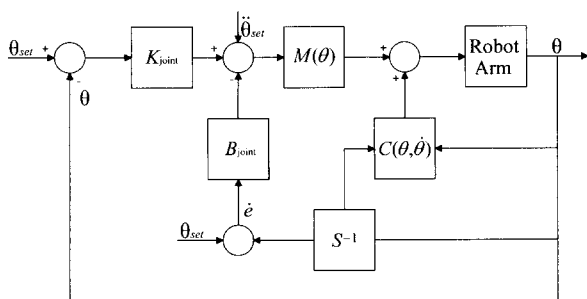


그림 5 위상차 제어를 이용한 제어기의 블록선도
Fig. 5 Block diagram of controller using phase difference control

4. 실험 및 고찰

본 논문에서 실험에 사용한 2축 수평 매니플레이터는 표 1에 제시된 초음파 모터를 사용하였으며, 각 관절의 위치는 엔코더의 신호를 24-Bit 카운터 회로를 통해 4 채널하여 디지털 I/O 보드를 통해 컴퓨터로 입력되어진다.

표 1 초음파 모터의 사양
Table 1 Specification of the ultrasonic motor

Type of motor	USR60-E4
Motor mass	240 g
Torque rating	3.2 Kg · cm
RPM rating	90 rpm
Optimal driving Freq.	41 KHz

입력된 위치정보는 회전각도, 각속도, 각가속도로 계산되어진 후 식 (19)에 나타난 탄성과 점성계수와 함께 액추에이터의 제어신호로 계산되어 제어기로 보내진다. 각속도와 각가속도는 하드웨어적으로 정확한 인터럽트 발생주기를 사용하여 제어프로그램에서 계산되어진 후 Butterworth 필터를 통해 구해진다. 이 인터럽트는 인터럽트 벡터를 생성한 후 타이머에 의해 1KHz의 주기로 발생한다. 그림 6은 시스템 블록다이아그램이다.

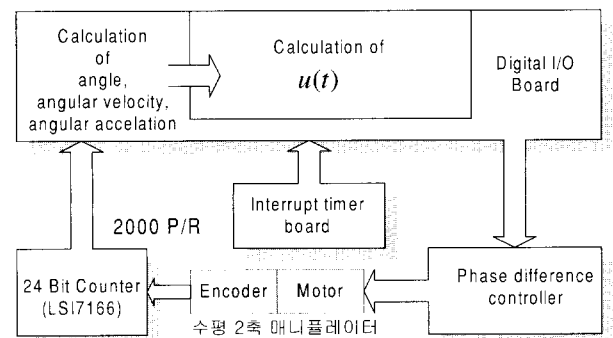


그림 6 시스템 블록다이아그램
Fig. 6 System block diagram

매니플레이터의 컴플라이언스 특성을 고찰하기 위해 점성과 탄성부를 각각 나누어서 그 특성을 고찰하였다. 먼저 점성에 대한 특성을 고찰하기 위해 탄성값인 K_{joint} 값을 고정시켜 놓고 B_{joint} 의 값을 소프트웨어적

으로 변화시켰다. 시뮬레이션의 조건 파라미터는 표 2와 같다. 위상의 목표각은 86° 로 지정하였고, 탄성계수는 고정, 점성계수는 가변시켰다.

표 2 점성특성에 대한 파라미터
Table 2 Parameters for damper properties

경우	목표각 θ_{set}	k_v [Nm/rad]	b_v [Nms/rad]
(a)	86°	17.2	-0.15
(b)	86°	17.2	0.00
(c)	86°	17.2	2.70
(d)	86°	17.2	10.4

그림 7은 이때의 위치 응답을 나타내는 시뮬레이션 결과이다. 점성을 증가시키에 따라 최대 오버슈트(overshoot)는 감소하지만 상승시간이 증가함을 알 수 있었다. 그림 8은 시뮬레이션과 같은 조건에서의 실험으로부터 얻어진 결과이다. 최대 오버슈트가 시뮬레이션보다 더 작은 값을 가지고 있다. 이것은 매니플레이터의 파라미터에 대한 부정확성과 계산 오차에 의해 발생된 것이다. 그림 9는 매니플레이터가 구속환경에서 접촉을 하고 있을 때의 힘 응답이다. B_{joint} 의 변화에 따른 힘의 크기는 차이는 있지만 많은 차이는 없었다. 이것은 인터럽트 주기마다 계산되어지는 각도의 차이가 매우 적기 때문에 전체적인 힘에 대해서 많은 영향을 주지 못함을 나타낸다.

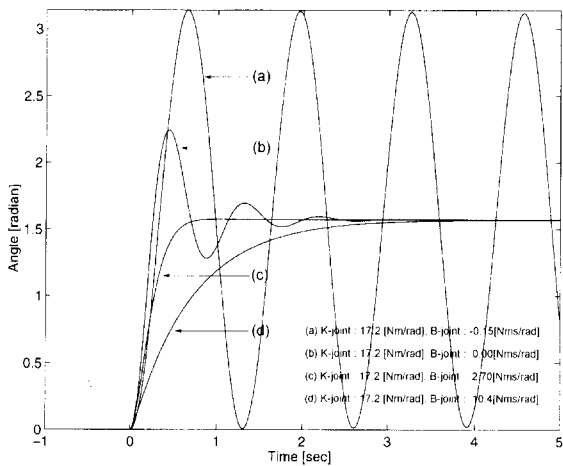


그림 7 고정 k_v 에 대한 b_v 의 변화시의 시뮬레이션 결과
Fig. 7 Simulation result when k_v is fixed and b_v is varying

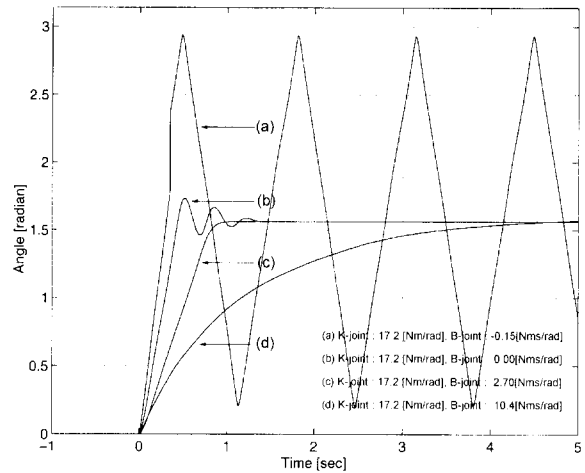


그림 8 고정 k_v 에 대한 b_v 의 변화시의 실험 결과
Fig. 8 Experimental result when k_v is fixed and b_v is varying

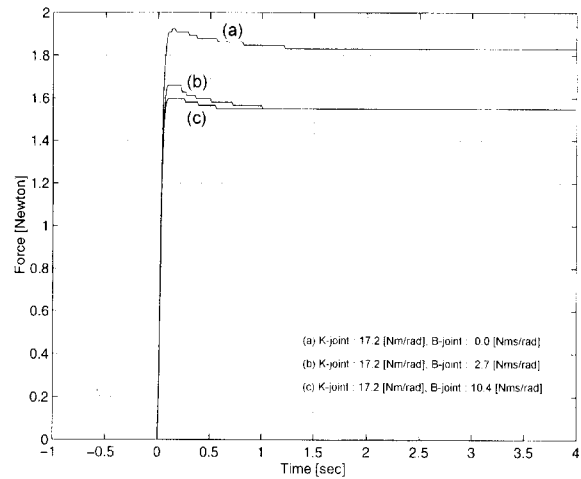


그림 9 고정 k_v 에 대한 b_v 의 변화시의 접촉힘의 응답
Fig. 9 Contact force response when k_v is fixed and b_v is varying

다음은 고정된 점성값에 대한 탄성값을 가변시켜 시뮬레이션을 행하였다. 표 3은 이때의 파라미터를 나타낸다. 목표 위상각 θ_{set} 은 점성실험과 동일하게 고정하였으며, 점성계수를 0으로 하여 점성항에 대한 영향을 무시하도록 하였다. 이때의 제어입력은 등가적으로 식 (22)와 같이 증가될 수 있으며 그림 10은 이때의 시뮬레이션 결과이다.

$$\tau \approx k_v(\theta - \theta_{set}), \quad b_v \dot{\theta} \ll k_v(\theta - \theta_{set}) \quad (22)$$

표 3 탄성특성에 대한 파라미터
Table 3 Parameters for spring properties

경우	목표각 θ_{set}	k_v [Nm/rad]	b_v [Nms/rad]
(a)	86°	24.8	0.00
(b)	86°	8.8	0.00
(c)	86°	2.8	0.00
(d)	86°	0.8	0.00

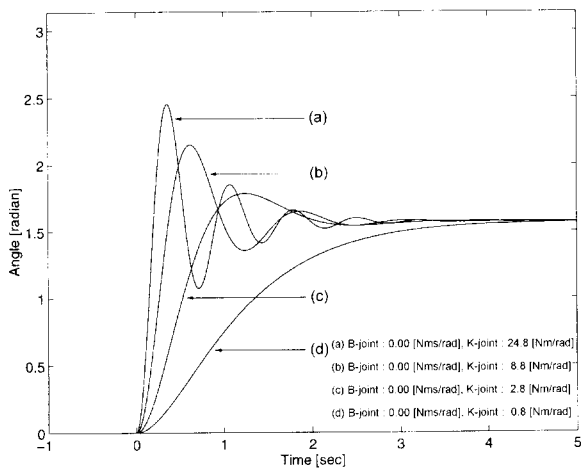


그림 10 고정 b_v 에 대한 k_v 의 변화시의 시뮬레이션 결과
Fig. 10 Simulation result when b_v is fixed and k_v is varying

k_v 값이 커질수록 스프링의 특성과 같은 오실레이션 (oscillation) 발생되지만 시스템은 안정적으로 동작을 하였다. 이후 진동이 감소되면서 일정시간 후에는 목표위치에 수렴을 하였다. 이것은 탄성성분을 변화하여 관절의 유연성을 제어할 수 있다는 것이다. 계속적으로 탄성값이 감소할 때 진동의 크기는 많이 감소하였지만 목표각에 도달하는 상승시간은 증가함을 보였다. 이것은 탄성의 계수가 제어시스템에서 2차원형계의 제동에 많은 영향을 주소 있음을 알 수 있었다.

그림 11은 같은 조건에서의 실험 결과이다. 응답곡선은 대체적으로 시뮬레이션 결과와 유사함을 보였다.

그림 12는 접촉면에 대한 힘 응답이다. 점성특성과는 다르게 탄성특성이 전체 힘에 대해 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

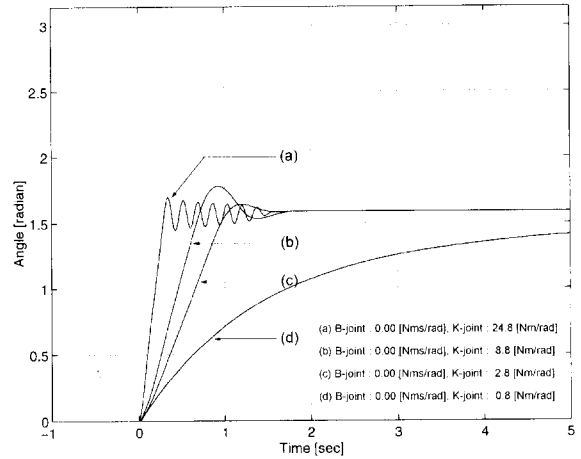


그림 11 고정 b_v 에 대한 k_v 의 변화시의 실험 결과
Fig. 11 Experimental result when b_v is fixed and k_v is varying

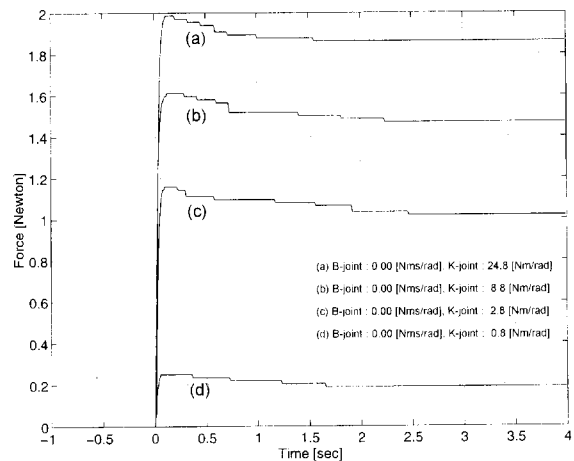


그림 12 고정 b_v 에 대한 k_v 변화시의 접촉힘의 응답
Fig. 12 Contact force response when b_v is fixed and k_v is varying

5. 결론

본 논문에서는 초음파모터의 위상차 구동방식을 이용한 컴플라이언스 제어 방식을 제안했다. 이를 위해 초음파 모터의 기계적인 구동원리로부터 위상차 구동에 대한 이론적인 설명과 시뮬레이션으로부터 이를 검증하였다. 이를 바탕으로 인간의 근골격 운동 특성으로부터 컴플라이언스 제어를 구현하였다. 컴플라이언스 제어는 힘 제어 방향과 위치 제어 방향을 서로 분

리하지 않은 장점을 가지고 있어서 구속환경에 대해서도 매니플레이터는 안정적으로 동작을 하였다. 따라서 조음과 모터는 백리쉬나 비선형 마찰이 거의 없는 직접구동 방식의 액츄에이터로 적합함을 확인하였다. 특히 컴플라이언스 제어는 점·탄성계수를 가변 제어함으로써 관절의 토크를 자유로이 변화시킬 수 있었다. 시뮬레이션 결과와 2축 직접구동 매니플레이터에 적용된 실험으로부터 성능의 우수함을 검증하였다.

참고문헌

[1] S. Jacobsen, E. Iversen, D. Knutti, R. Johnson, and K. Bigger, "Design of the Utah/MIT dextrous hand," Proc. of IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 1520-1532, 1986.

[2] C. S. Loucks, V. C. Jonson, P. T. Boissiere, G. P. Starr, and J. P. Steel, "Modeling and control of the Stanford/JPL hand," Proc of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 573-578, 1987.

[3] Lundstrom, G., Glemme, B., Rooks, Industrial Robot-GRIPPER REVIEW, International Fluidics Services Ltd., 1979.

[4] Brock, David L. Brock, and Salisbury, J. Kenneth, Implementation of Behavioral Control on a Robot Hand/Arm System, 1991.

[5] C. J. Abul-Haj and N. Hogan, "An Emulator System for Developing Improved Elbow-Prosthesis Designs", IEEE Trans. Biomed. Eng., BME 34, 11, pp. 724-737, 1987.

[6] H. Asada and T. Kanade, "Design of Direct-Drive Mechanical Arms", ASME Trans., Vol. 105, pp. 312-316, 1983.

[7] N. G. Dagalakis and D. R. Myers, "Adjustment of Robot Joint Gear Backlash Using the Robot Joint Test Excitation Technique" International Journal of Robotics Research, MIT, Vol. 4, No. 2, pp. 65-79, 1985.

[8] S. Ueha and Y. Tomikawa, "Ultrasonic Motors : Theory and Applications", Clarendon Press, Oxford, 1993.

[9] Y. Ohnishi, H. Sugimoto, and M. Yano, "Ultrasonic linear motor using torsional flexural traveling wave" in Proc. 2nd IPEC Tokyo, Vol. 2, pp. 894, 1990.

[10] Ferdinando A, Mussa-Ivaldi, Neville Horgan, and Emilio Bizzi, "Neural, mechanical, and geometric factors subserving arm posture in humans", Journal of Neuroscience, 2732-2743, October, 1985.

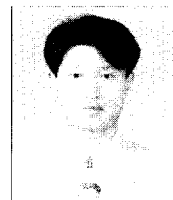
[11] Neville Horgan, The mechanics of multi-joint posture and movement control, Biomedical Cybernetics, 52 : pp. 315-331, 1993.

[12] K.S.Fu, R.C.Gonzalez, and C.S.G.Lee, Robotics : Control, Sensing, Vision, and Intelligence", McGraw-Hill International Edition, 1987.

저 자 소개



오금곤(吳金坤)
1946년 1월 17일생. 1968년 조선대학교 전기공학과 졸업(학사). 1994년 동신대학교 대학원 전기·전자공학부 졸업(공학석사). 현재 조선대학교 전기·제어계측공학부 교수.



김대현(金大賢)
1970년 12월 2일생. 1996년 조선대학교 제어계측공학과 졸업(학사). 1998년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사). 1998년~현재 동 대학원 제어계측공학과 박사과정.



김영동(金永炯)
1944년 11월 28일생. 1968년 조선대학교 공대 전기공학과 졸업(학사). 1984년 명지대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 조선대학교 공대 전기·제어계측공학부 교수.



김재민(金在玟)
1937년 10월 29일생. 1961년 전남대학교 전기공학과 졸업(학사). 1970년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 동 신대학교 전기·전자공학부 교수.