

힘 센서를 이용하지 않는 혼합형 햅틱 마스터 시스템의 개발

배 병 훈* · 박 기 환†

(2001년 3월 16일 접수, 2001년 6월 7일 심사완료)

Development of a Hybrid Haptic Master System Without Using a Force Sensor

Byunghoon Bae and Kyihwan Park

Key Words: Tele-operation(원격조정), Haptic Device(힘 반영 기구), Magnetic Levitation(자기부상), Moving Magnet Actuator(자석구동 액추에이터), Moving Coil Actuator(코일구동 액추에이터)

Abstract

A hybrid type master system is proposed to take the advantage of the link mechanism and magnetic levitation mechanism without using a force sensor. Two different types of electromagnetic actuators, moving coil type and moving magnet types are used to drive the master system which is capable of 4-DOF actuation. It is designed that the rotation motions about x-y axis are decoupled and the whole system is represented by simple dynamic equations. The force reflection is achieved by using the simple relation between the force and applied current and position. The simulation and experimental results are presented to show its performance.

1. 서 론

원격조종 시스템은 인간의 작업이 힘들거나 극히 위험한 환경, 예를 들면 우주작업, 화재현장, 방사능 오염지역, 세포시술과 같은 초 정밀 수술 등에 활발히 연구, 적용되고 있다^(1~4) 이런 원격조종에서는 실제의 작업정보를 원거리의 작업자가 실제처럼 상황을 인식하는 것이 무엇보다도 중요하다. 사람은 외부의 정보들을 오감이라 부르는 시각, 청각, 힘 또는 촉각, 미각, 후각 등으로 인식하는데, 원격 작업과 같은 어떤 물체를 다룰 때 가장 많이 사용하는 두 가지의 정보는 시각과 힘 또는 촉각의 정보이며 어느 하나의 정보가 미비하더라도 작업자의 원격조종에 대한 인식력은 매우 저조해지며 작업에 심각한 상황을

초래할 수 있다.⁽⁵⁾ 힘과 촉각에 대한 정보는 마스터(Master)와 슬레이브(Slave)의 운용에 따라 결정되는 요소이므로 시스템의 안정성에도 결부되어 있으며 제어루프 내에서 마스터 운용시 시각정보에 비해 더 중요하게 고려되어야 한다. 하지만 힘이나 촉각에 대한 정보는 일반적으로 마스터와 슬레이브의 기구학적 구조의 불일치로 인해 많은 데이터 변환이 필요하며, 이들 자체는 마스터와 슬레이브의 운용에 따라 결정되는 요소이므로 시스템의 안정성에도 결부되어 있는 요소이다. 원격작업의 대부분은 물체를 다루는 작업이므로 힘과 촉각에 대한 정보가 제한되어 있을 때 시스템과 작업환경 사이의 안정성 저하는 심각한 상황을 초래할 수 있다.⁽⁵⁾ 특히 공간상에서의 인간의 동작을 흉내내기 위해서는 다 자유도 모션이 필요한데, 개발된 대부분의 로봇은 다 자유도를 가지기 위해 매우 복잡한 링크구조를 가지므로 서로간의 정보 교환에 있어 시간지연과 같은 많은 문제점을 가지게 된다. 예를 들어 병렬기구를 힘반영 마스터로 사용한다면 동역학 운동방정식이 필요하다. 그러나 링크구조에서 마찰과 압력각,

* 광주과학기술원 기전공학과

† 책임저자, 회원, 광주과학기술원 기전공학과

E-mail : khpark@kjst.ac.kr

TEL : (062)970-2391 FAX : (062)970-3509

또는 히스테리시스 등은 수학적 모델링이 어려울 뿐만 아니라 큰 비선형성을 갖고 있어 모델에 대한 정확도는 크게 떨어져 토크센서의 활용 없이는 힘의 반영은 거의 불가능하다. 또한 큰 비선형으로 인해 동역학 계산부하가 커져 실시간 해석 및 제어가 어렵기 때문에 방정식 차수를 줄여 계산부하를 줄이는 방법들이 연구되고 있다.⁽¹⁰⁾ 링크구조 마스터는 높은 강성, 큰 작동영역과 같은 많은 장점에 불구하고 이와 같은 복잡성 때문에 부가 센서(extra sensor)를 사용하여 기구학적 계산량을 줄이기도 하지만 대부분의 마스터에서는 고가에 속하는 6축 토크센서를 사용하여 조인트 마찰이나 압력각, 관성과 중력보상과 같은 외란을 보상함으로써 힘 제어를 수행하고 있다.⁽⁶⁾ 데이터 변환이 용이한 기구학적 단순모델로서 자기부상식 마스터 시스템이 제안되었다.⁽⁷⁾ Hollis 등이 제안한 마스터 시스템은 시스템 관성이 최소화 되었다고 가정할 경우, 액추에이터에서 발생하는 힘을 사용자가 직접 느낄수 있는 자기부상 원리를 따르고 있어 제어루프 상에서 전류의 조절만으로도 고 정도의 힘 반영이 가능한 특징을 가지고 있다. 자기부상 시스템은 자체적으로 중력이 보상된 시스템이며, 관절요소가 없으므로 관절의 압력각 요소가 없고 마찰이 없거나 최소화 된 시스템이다. 따라서 마스터 내에서 위치 제어만을 이용하여 고정도의 힘 반영이 가능하다. 하지만 자기부상 시스템은 액추에이터 자체가 공극(air-gap)에서의 자속 밀도를 이용하고 있기 때문에 마스터의 작동영역(workspace)이 제한되는 한계점을 가지게 된다. 따라서 큰 작동영역을 가지면서도 간단한 동역학 모델링이 가능하며, 적은 개수의 값싼 센서를 사용하는 마스터 시스템은 중요한 의미를 가진다.

본 논문에서는 링크구조의 메커니즘과 자기부상(Magnetic Levitation)원리를 혼합한 마스터 시스템을 제안한다. 자기부상 시스템을 위한 구동방식은 균일 자기장(uniform field)을 이용한 방식과 비균일 자기장(nonuniform field)을 이용한 방식을 혼합하여 크기를 작게 하면서 안정성을 높일 수 있도록 설계한다. 힘 반영을 위한 마스터 시스템은 슬레이브에서 발생하는 힘을 정확하게 작업자에게 전달해야 하므로 정밀한 힘 센서가 요구된다. 그러나 상품화된 다자유도 힘 센서는 고가이며 부피도 일반적으로 커서 조이스틱에 삽입시키

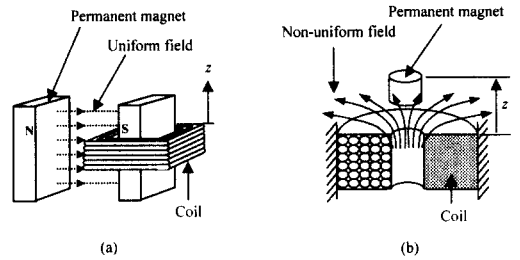


Fig. 1 Two types of the magnetically driven actuation; (a) moving coil type actuator(MCA) (b) moving magnet type actuator(MMA)

는 데는 문제가 있다. 본 연구에서는 자기부상시스템의 중력보상 및 관성보상의 용이성을 이용하여 전류와 위치센서를 가지고 힘을 반영할 수 있는 마스터 시스템을 개발하고⁽⁹⁾ 이론적 해석 및 실험을 수행한다.

2. 힘 반영 마스터 시스템의 설계

전자기력을 이용한 구동 시스템의 구성 형태는 균일 자기장을 이용하는 것과 비균일 자기장을 이용하는 것의 두 가지로 크게 나눌 수 있다.

균일 자기장을 이용하는 구동 시스템은 Fig. 1(a)와 같이 일정한 자기밀도를 갖도록 전자석 또는 영구자석이 쌍으로 사용되어 크기가 커지고 제한된 전류입력에서 큰 힘을 얻고자 할 경우 코일의 감은 횟수가 증가하므로 시스템이 무거워지게 되며, 이는 구동부의 관성을 증가시키는 요인으로 작용하여 액추에이터의 대역폭을 감소시키는 단점을 가지게 된다. 반면, 힘이 전류에 비례하며 위치에 따라 변하지 않는 특성을 가지고 있다. 따라서 선형적인 액추에이터의 힘 특성을 얻기가 용이하여 넓은 범위의 액추에이터 구동이 요구될때 많이 이용되고 있다. 균일자기장을 이용하는 구동시스템은 일반적으로 영구자석을 일정 형태로 배열하여 균일한 자기장을 만들고 코일에 흐르는 전류를 변화시키는 형태로 만들어지게 되며, 코일이 움직이는 부분이어서 코일 구동형(Moving Coil type) 액추에이터(MCA)라 부른다.

비균일 자기장을 이용한 구동시스템은 Fig. 1(b)와 같이 발생하는 자기 밀도가 불균일한 상태에서 전자기력이 발생하는 액추에이터로서, 영구자석 또는 전자석 하나만 사용하므로 구동부의 크

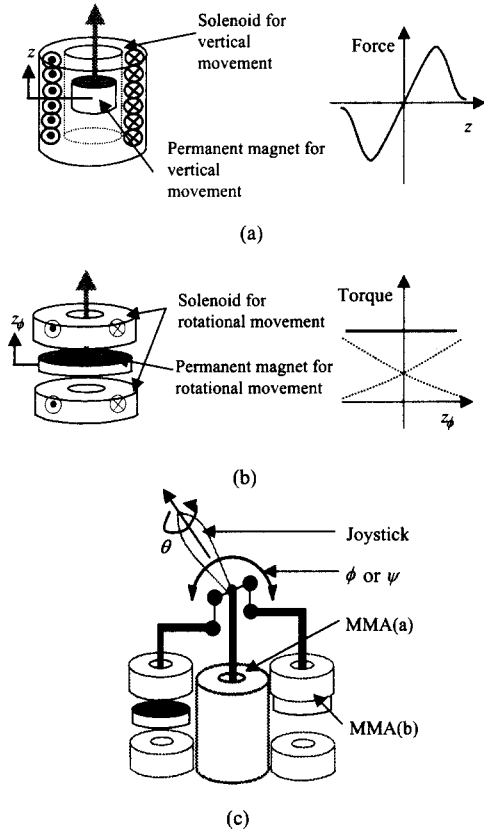


Fig. 2 Configuration and force characteristics of MMA;

- (a) the z-directed translational motion
- (b) the ϕ -directed rotational motion
- (c) the combined configuration of (a) and (b).

기를 작게 만들 수 있는 장점이 있는 반면 위치에 따라 힘이 변하게 되는 단점이 있다. 큰 영역에서 선형적인 힘 특성을 얻기가 어려워, 좁은 범위의 구동에서 많이 사용되며, 필요에 따라서는 변형된 형태를 통해 선형성을 개선시키기도 한다. 주로 영구자석이 움직이는 부분으로 사용되어 자석 구동형(Moving Magnet type) 액추에이터(MMA)라 부른다.

본 연구에서는 MMA 방식을 이용하여 하나의 직선운동(z)과 2개의 회전운동 (ϕ, ψ)이 가능한 액추에이터를 설계하였으며 그 형상과 힘 특성이 Fig. 2에 나타나 있다. Fig. 2(a)는 z방향의 제어를 위해 솔레노이드 내부에서 자석이 움직일 때 일

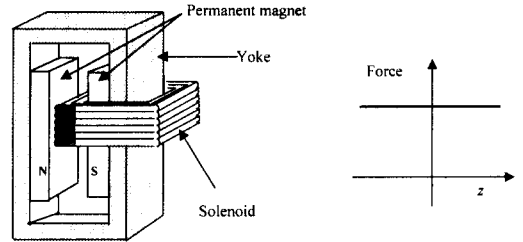


Fig. 3 Configuration and force characteristics of the MCA

정 구간 내에서 안정한 힘 특성을 얻을 수 있는 특성을 가지고 있다. Fig. 2(b) 회전운동(ϕ, ψ)을 위해 두개의 솔레노이드 사이에 자석이 놓여있는 MMA형의 모습과 힘 특성을 나타내고 있다. 솔레노이드를 위,아래로 사용하여 자석의 변위 이동에 관계없이 일정한 힘을 얻도록 한다. 마스터의 Moving frame에 대각선으로 고정시켜 자석의 운동에 따라 자유로운 2자유도 회전이 가능하도록 고안되었다. 링크구조를 사용하여 자석의 직선운동을 손잡이의 회전운동으로 바꿀 때 자석의 작은 변위이동으로 큰 회전각을 얻을 수 있다. 위의 두가지 형태의 구조가 결합한 전체 시스템의 외형은 Fig. 2(c)와 같다.

MCA형의 경우, 구동 힘은 다음과 같이 나타난다.

$$F = i \times B l \tag{1}$$

여기서 i, B, l 은 각각 주어진 전류, 자속 밀도, B 영역 내에서의 코일의 길이를 나타낸다. MCA의 형상과 그 힘 특성이 Fig. 3에 나타나 있다. MCA는 제한된 마스터 시스템에서 중력을 보상하기 위한 액추에이터로 사용하였다.

Fig. 2와 Fig. 3의 액추에이터는 전자기장 해석 패키지인 FLUX2D를 이용하여 최적화되었으며, 최적화된 파라미터 값이 Table 1에 나타나 있다.

Fig. 4는 40mm의 변위이동과 60° 정도의 회전이 가능한 4자유도 마스터 시스템의 전체적인 모습을 보여준다.

3. 시스템 해석

3.1 기구학 해석

본 시스템은 ϕ, ψ 회전각이 서로의 회전 축에

Table 1 The specification of the MMA and MCA

Actuator	Parameter	Value (mm)
MMA for the vertical directional movement	C_D	0.45
	S_d	20
	S_D	50
	S_l	55
	M_D	1.7
	M_l	20
MMA for the rotational movement	S_d	10
	S_D	35
	S_l	15
	M_D	20
	M_l	1.7
MCA for the gravity compensation	Yoke (SM20C)	$5 \times 20 \times 100$
	N	300
	PM (NdFeB)	$5 \times 20 \times 70$
Parameter	Description	
C_D	diameter of the coil	
S_d	inner diameter of the solenoid	
S_D	outer diameter of the solenoid	
S_l	vertical length of the solenoid	
M_D	diameter of the permanent magnet	
M_l	vertical length of the permanent magnet,	
N	number of turns	

간섭을 하지 않으므로 Fig. 5와 같이 구좌표계 (Spherical coordinate)를 $q = [\phi, \psi, l]^T$ 와 같이 놓으면 직교 좌표계(Cartesian coordinate) $x = [x, y, z]^T$ 는 다음과 같이 유도된다.

조이스틱의 z 방향 변위를 z_m 이라 하면

$$x = [lS\phi, lS\psi, z_m + \sqrt{C^2\phi - S^2\psi}]^T \quad (2)$$

가 되며, 이것을 가지고 작업공간(workspace)를 그려보면 Fig. 6과 같다.

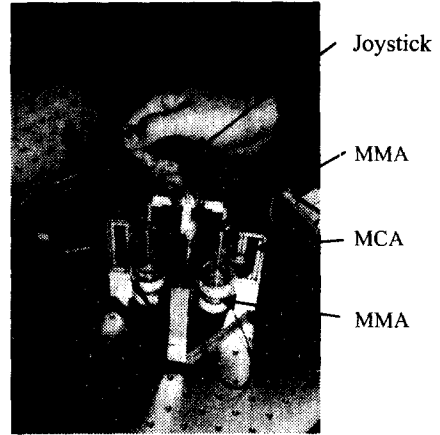


Fig. 4 A newly developed 4-DOF master system

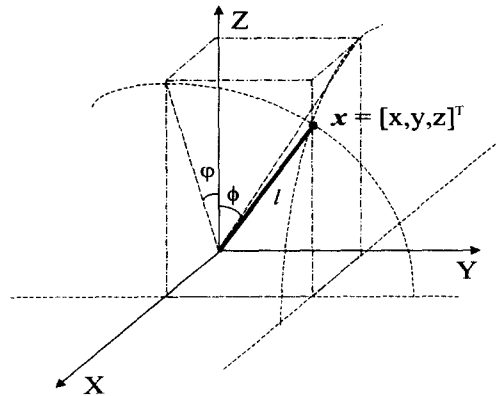


Fig. 5 The relationship of spherical coordinate and cartesian coordinate in the haptic device

여기서 $S = \sin$, $C = \cos$, $T = \tan$ 로 나타내기로 하자.

변수 제한 구간은

$$\begin{aligned} -30^\circ \leq \phi, \psi \leq 30^\circ \\ -20[mm] \leq z_m \leq 20[mm] \end{aligned} \quad (3)$$

이다.

작업공간내의 특이점(singularities) 유무 확인을 위해 자코비안(Jacobian) J 를 이용하면,

$$\begin{aligned} \det J \\ = \frac{-l^2 C\phi C\psi}{\sqrt{C^2\phi - S^2\psi}} - l^2 C\phi C\psi \sqrt{C^2\phi - S^2\psi} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

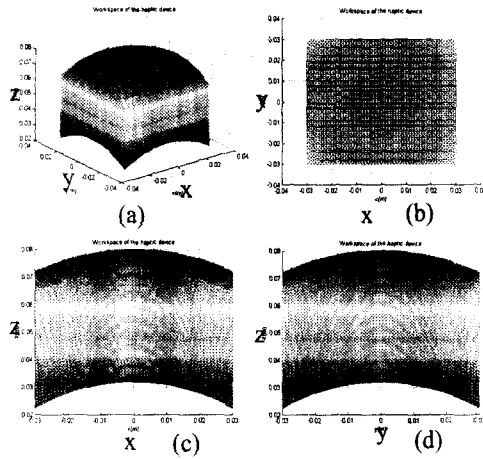


Fig. 6 Workspace analysis of the haptic device
 (a) 3-D view (b) x-y(2-D) view
 (c) x-z(2-D) view (d) y-z(2-D) view

여기서 $J = \frac{\partial x}{\partial q}$ 인 3×3 행렬이 된다.

$\phi, \psi = \pm 90^\circ$ 인 점이 특이점이 있는 곳인데, 작업공간 내에 존재하지 않으므로 조이스틱을 제어하는데 특이점을 고려할 필요가 없다.

조이스틱의 손잡이에서의 직교좌표계의 힘 (Static force) $F = [F_x, F_y, F_z]^T$ 는 구좌표계의 $P = [\tau_\phi, \tau_\psi, F_r]^T$ 와 다음 관계가 있다.

$$F = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = J^{-T} P = J^{-T} \begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\psi \\ F_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} -T\phi S\psi & C\psi & S\psi \\ IC_s & IC_s & C_s \\ C\phi & -S\phi T\psi & S\phi \\ IC_s & IC_s & IC_s \\ -T\phi C_{sl} & -T\psi C_{sl} & C_{sl} \\ IC_s & IC_s & C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\psi \\ F_r \end{bmatrix}$$

$$C_s = C^2\alpha + C^2\beta$$

$$C_{sl} = \sqrt{C^2\alpha - S^2\beta}$$

F_r 는 조이스틱의 손잡이 방향으로 작용하는 힘으로써 여기서는 0이 된다. 그런데 z 방향(OZ) 방향으로 동작하는 MMA 액추에이터의 힘 F_m 까지 고려한 총 힘 F_{za} 은 다음과 같다

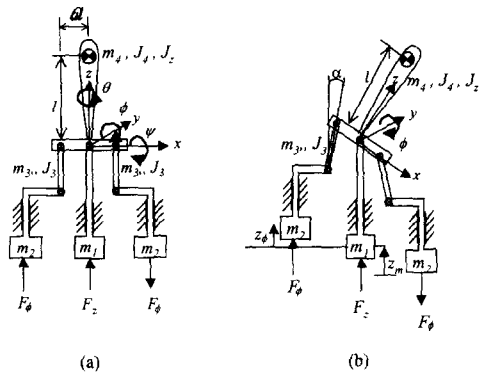


Fig. 7 A simplified structure of the master system

$$F_{za} = F_m + F_z \quad (6)$$

식 (5)에서 보듯이 직선좌표계의 힘 F 는 구좌표계의 위치벡터 $q = [\phi, \psi, l]^T$ 와 힘(토크)벡터 $P = [\tau_\phi, \tau_\psi, F_r]^T$ 와 모두 연성이 되어 있는 것을 알 수 있다.

3.2 동역학 해석

Fig. 7은 제한된 마스터 시스템의 단순화된 구조를 나타내고 있다. Fig. 6(a)는 평형상태에서의 모습을, (b)는 주어진 힘에 의해 z방향과 ϕ 방향으로 일정한 변위운동이 일어난 모습을 나타낸다. m_1, m_2, m_3, m_4 는 각각 z 방향과 ϕ 방향으로의 자석의 무게와 링크 및 손잡이의 무게를 나타낸다. J_1 와 J_2 는 각각 주어진 방향으로의 회전 모멘트를, J_3 와 J_4 는 각각 링크부와 조이스틱의 회전 모멘트를 나타낸다.

시스템의 운동에너지와 위치에너지는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} (m_1 + 2m_2 + 2m_3 + m_4) \dot{z}_m^2$$

$$= \frac{1}{2} (m_2 + m_3) \dot{z}_\phi^2 + 2lS\phi \cdot m_4 \cdot \dot{\phi} \dot{z}_m$$

$$= (m_4 l^2 S^2\phi + J_4) \dot{\phi}^2 + J_3 \dot{\phi}^2 \quad (7)$$

$$V = (m_1 + 2m_2 + 2m_3 + m_4)g \cdot z_m - m_4 g l C\phi \quad (8)$$

기하학적 구속조건으로 부터 z_ϕ 와 ϕ 는 ϕ 에 대한 함수로 표현되며, 따라서 시스템의

Lagrangian 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 L &= T - V \\
 &= \frac{1}{2} M_t \dot{z}_m^2 + 2 l S \phi \cdot m_4 \cdot \dot{\phi} \dot{z}_m \\
 &\quad + \frac{1}{2} M_p a^2 (C^2 \phi + m_4 l^2 S^2 \phi + J_4) \dot{\phi}^2 \\
 &\quad - M_t g \dot{z} + m_4 g l C \phi
 \end{aligned} \tag{9}$$

여기서

$M_t = m_1 + 2m_2 + 2m_3 + m_4$, $M_p = m_2 + m_3$ 를 나타낸다. 최종적으로 시스템의 동특성은 다음과 같이 유도되어진다.

$$\begin{aligned}
 M_t \ddot{z}_m + (2 l S \phi \cdot m_4) \ddot{\phi} + 2 l C \phi \cdot m_4 \dot{\phi}^2 \\
 + (2 l S \phi \cdot m_4) \dot{\phi}^2 + 2 l C \phi \cdot m_4 \dot{\phi}^2 \\
 + C_z \dot{z}_m + M_t g = F_z
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 2 l S \phi \cdot m_4 \ddot{z}_m + (M_p a^2 C^2 \phi + J_4) \ddot{\phi} \\
 - M_p a^2 C \phi S \phi \cdot \dot{\phi}^2 + C_\phi \dot{\phi} \\
 + m_4 g l S \phi = 2 a F_\phi = \tau_\phi
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 2 l S \phi \cdot m_4 \ddot{z}_m + (M_p a^2 C^2 \phi + J_4) \ddot{\phi} \\
 - M_p a^2 C \phi S \phi \cdot \dot{\phi}^2 + C_\phi \dot{\phi} \\
 + m_4 g l S \phi = 2 a F_\phi = \tau_\phi
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$J_z \ddot{\theta} + C_\theta \dot{\theta} = \tau_\theta \tag{13}$$

식 (13)에서 τ_θ 는 조이스틱에 가하는 토크이다.

m_4 와 l 은 설계과정에서 충분히 작게 설계할 수 있으며, 이들의 영향을 무시할 경우 시스템 동특성은 다음과 같이 매우 간단해진다.

$$\begin{aligned}
 \ddot{z}_m + 0.1 \dot{z}_m + g = F_z \\
 1 \times 10^{-6} \ddot{\phi} + 0.1 \dot{\phi} = \tau_\phi \\
 1 \times 10^{-6} \ddot{\theta} + 0.1 \dot{\theta} = \tau_\theta
 \end{aligned} \tag{14}$$

4. 힘 반영 방법

마스터 시스템이 정밀한 힘 분해능을 갖기 위해서는 마스터 시스템에 정밀한 힘 센서를 부착해야 한다. 그러나 일반적인 상용 힘 센서는 가격이 높아 저가의 마스터에는 적합하지 않다. 자기부상시스템의 이용은 전류를 측정하여 쉽게 힘을 얻을 수 있는 구조로 설계할 수 있는 장점이 있다.

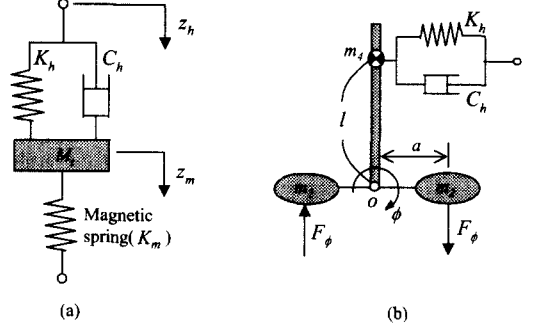


Fig. 8 A schematic model of the master system for (a)the z-directed translational motion and (b)the ϕ -directed rotational motion.}

Fig. 8은 작업자의 손의 운동 x_h 과 마스터 시스템 조이스틱의 운동 x_j 을 고려한 마스터 시스템의 z축 운동을 표현하기 위한 모델을 보여준다. 작업자의 손은 Kelvin 모델⁽⁸⁾을 이용하여 간단히 스프링과 댐퍼로 나타낼 수 있으며, 마스터 시스템은 자기 스프링과 질량으로 나타낸다.

손에 느끼는 힘 F_h 는 다음과 같다.

$$F_h = K_h(z_h - z_m) + C_h(\dot{z}_h - \dot{z}_m) \tag{15}$$

외력이 조이스틱에 가해질 경우, F_m 은 2장에서와 같이 조이스틱 변위인 z_m 와 가해진 전류인 i 에 의해 결정되어진다. z방향으로의 운동방정식은 다음과 같이 결정된다.

$$M_t \ddot{z}_m = F_h - F_m \tag{16}$$

식 (16)에서 $M_t \ddot{z}_m$ 가 존재하므로 F_h 와 F_m 은 같지 않다. 따라서 일반적으로 힘 센서를 M_t 에 부착하여 F_h 를 직접 얻어내게 된다. 만약 F_m 과 $M_t \ddot{z}_m$ 를 알 수 있다면 센서 없이도 작업자의 손에 미치는 힘을 간접적으로 얻을 수 있다. 이러한 간접적인 힘 측정을 가능케 하기 위하여 마스터의 무게는 최대한 작게 설계되어야 하며, 마스터의 관성력에 해당하는 $M_t \ddot{z}_m$ 를 보상해 주어야 한다.

Fig. 8(b)는 ϕ 또는 ϕ 방향으로 변형된 모습을 나타내고 있다. 조이스틱의 회전중심 o를 기준으로 한 momentum 식은 다음과 같다.

$$m_2ga + m_4gl\sin\phi - m_2ga = m_4gl\sin\phi \quad (17)$$

여기서 m_2 와 a 는 각각 방향으로의 영구자석 질량과 자석과 o점까지의 거리를 나타낸다. m_2, m_4, l 이 충분히 작게 설계될 경우 ϕ 방향으로의 중력은 자체적으로 보상이 된다. 따라서 작업자가 느끼는 마스터 자체의 중력이나 관성의 요소는 무시할 수 있게 설계할 수 있다.

5. 시뮬레이션 및 실험 결과

순수한 자기부상을 응용한 마스터 시스템은 일반적인 링크구조 마스터 시스템과는 달리 자체적으로 중력이 보상되어 있으므로 제어변수가 줄어드는 장점을 가지고 있다.

가상의 슬레이브로부터 힘 정보가 온다고 가정할 때 마스터는 이를 작업자에게 그대로 전달하는 것이 목적이므로, 마스터에게 요구되는 성능 실험으로 시간응답에서 정확한 명령추종과 주파수 응답 특성을 본다. 제어신호의 증폭소자로 APEX사의 PA10칩을 사용하였는데, 로드쪽의 저항이 50Ω 이하인 경우는 거의 이상적인 증폭기로 작동한다. 따라서 솔레노이드가 가지고 있는 저항이나 인덕턴스 요소를 무시할 수 있으며, 전류 응답을 통해서도 확인할 수가 있다.

본 연구에서 제안된 마스터 시스템은 중력이 자체적으로 보상되어 있다는 점에서 자기부상 마스터를 따르지만, 순수한 자기부상 시스템이 아니다. 따라서 필요에 따라 기계적 마찰을 고려하여 제어를 설계하여야 하는데 본 연구에서는 기계시스템의 마찰을 외란으로 보고 외란관측기(disturbance observer)를 설계하여 보상해 준다. 본 연구에서 제안된 마스터 시스템의 제어 블록은 Fig. 9와 같다. 마스터 시스템의 회전운동시 힘의 정보는 회전에 관계없이 토크가 전류에 비례하게 발생하기 때문에 입력 전류를 이용하여 얻을 수 있다. 종축(z 방향)운동의 힘은 위치와 전류에 관련하여 변하기 때문에 힘의 정보를 얻기 위해 이 두 변수를 모두 알아야 하며 힘 제어시 look-up table을 사용한다. Fig. 10은 제작된 마스터 시스템의 종축 제어용으로 사용된 액추에이터의 힘 특성을 나타낸 그림이다

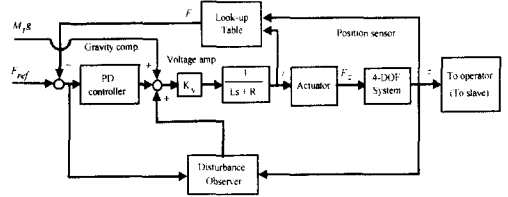


Fig. 9 Control block diagram

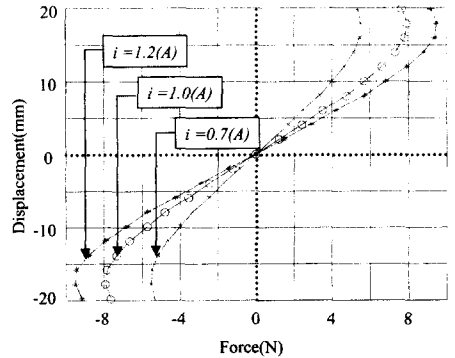


Fig. 10 The experimental result how the force is varied for the current and position in the working range

5.1 시간 응답 실험

MMA는 종축 변위와 인가전류에 따라 힘이 달라지므로, 종축 변위값에 관계없이 주어진 힘을 추종할 수 있도록 제어하는 것이 필요하다. 힘 센싱은 MMA의 인가 전류와 변위에 따른 힘 정보를 담고 있는 look-up table을 이용하였고, 기준 힘은 2N의 스텝입력이다. 손잡이를 잡고 종축으로 임의의 변위를 인가하였을 때, 손에 반영된 힘은 look-up table에 의해 계산되어지고, 기준 힘과 비교되어 제어가 이 차이에 해당하는 힘을 생성하도록 MMA에 전압을 인가하게 된다.

Fig. 11은 임의로 인가한 MMA의 종축 변위와 이에 따라 제어기에서 생성한 전류의 제어입력값이다.

Fig. 11(a)에서 변위가 0에 가까워지면, 작아진 힘을 보상하기 위해 제어전류값은 증가하고, 변위가 커지면, 커진 힘을 보상하기 위해 제어전류값이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이로부터 기준 힘의 추종 능력을 간접적으로 알 수 있다.

하지만 작은 변위에서는 MMA의 힘 특성과 인가전류의 제한 때문에 기준 힘의 크기에 따라 추

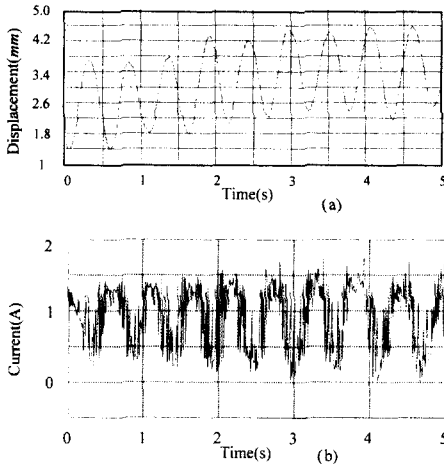


Fig. 11 The experimental result of time response (a)input displacement by the operator (b)controlled current response

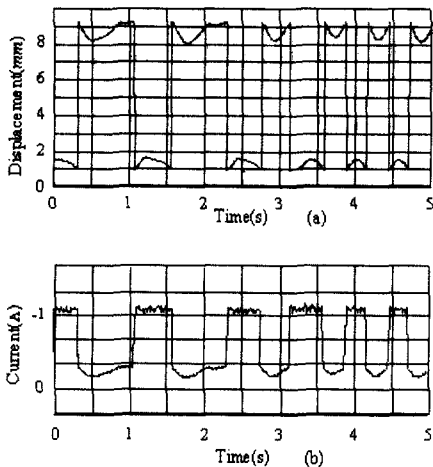


Fig. 12 The experimental results of square wave input (a) square wave input (b) controlled current response

중하지 못할 수도 있으므로, 0 근처의 변위에서는 아주 작은 힘밖에 느낄 수 없다. Fig. 12는 사각파 형태의 종축 변위를 주었을 때, 변위의 파형과 이에 따른 제어전류의 파형을 나타내고 있다. 급격한 변위의 변화에도 제어기는 이를 잘 보상하고 있음을 알 수 있다.

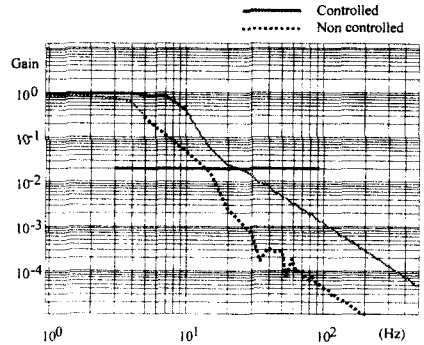


Fig. 13 The simulation result of the frequency response

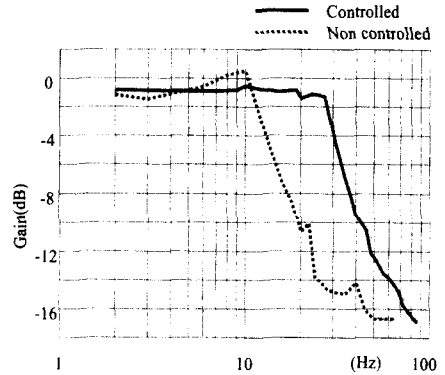


Fig. 14 The experimental result of the frequency response

5.2 주파수 응답 실험

Fig. 13은 100kHz의 대역폭을 갖는 백색잡음형태의 힘 파형을 가하면서 나타난 종축 방향에 대한 주파수 응답 결과이다. 점선의 경우는 개루프 제어일 경우에 대한 시뮬레이션이며, 실선은 PD 제어기를 사용하여 페루프 제어를 하였을 경우에 대한 주파수 응답선도이다. Fig 13에서 알 수 있는 바와 같이, 페루프 PD제어기를 사용하였을 경우 시스템 대역폭이 증가하고 있음을 알 수가 있다. 제어기를 사용함으로써 10Hz 정도의 대역폭을 25Hz영역까지 확장시킬 수 있었다.

제작된 마스터 시스템의 주파수 응답특성을 알아보기 위해 마스터 시스템을 외부 플레이트에 부착된 스트레인 게이지를 통해 위치를 고정시켜 힘의 신호를 추출한 결과를 Fig. 14에서 보여준다. 힘 제어된 상태에서 시스템 대역폭이 30Hz까

지 증가하고 있음을 알 수가 있으며 시뮬레이션에서의 주파수 응답과 근사적으로 일치하고 있다.

본 마스터 시스템은 시스템 조인트의 압력각이 없고 시스템 마찰이 일반 링크구조에 비해 매우 작기 때문에 시스템 대역에 주요한 영향을 미치는 요소는 관성이다. 제어 루프내에 관성을 보상하고 있으나 완벽한 관성보상이 이루어지지 않아 시스템 대역폭을 늘리기에는 한계가 있다. 움직이는 부분의 관성을 줄이는 설계가 이루어진다면 큰 작동영역과 함께 넓은 범위의 주파수 대역폭을 얻을 수 있는 시스템 설계가 가능할 것으로 본다.

6. 결 론

링크구조와 순수 자기부상 마스터가 가지고 있는 단점들을 극복하기 위해 새로운 타입의 마스터 시스템을 제안하였으며, 기구학과 동역학 해석을 수행하였고, 시뮬레이션과 실제의 제작된 모델을 통한 실험으로 그 가능성을 살펴 보았다. 솔레노이드를 이용한 간단한 선형 액추에이터를 최적화 시켰으며, 자기부상 원리를 도입하고 각각의 회전자유도의 움직임이 연성되지 않는 타입으로 메커니즘을 설계하였다. 시뮬레이션을 통해 기준 입력에 대한 시스템의 응답을 시간역과 주파수역에서 실험을 통해 살펴보았다. 제안된 마스터 시스템은 z방향으로 40mm의 변위이동이 가능하며, ϕ 와 ϕ 방향으로는 $\pm 30^\circ$ 의 회전운동이 가능하다. 따라서 제안된 마스터 시스템은 순수 자기부상 시스템에 비해 큰 작동영역을 가지면서도 종축 제어만을 제외하면 입력 전류만으로 힘을 계산할 수 있는 자기부상의 잇점을 그대로 가지고 있어 센서의 개수를 줄일 수 있는 특성이 있다. 추후 6자유도의 메커니즘 확장과 시스템 관성을 줄이는 연구를 통해 보다 특성이 우수한 마스터의 개발이 가능할 것이다.

참고문헌

- (1) Sheridan T. B. "Telerobotics," 1989, *Automatica*, Vol. 25, No. 4, pp. 487~507.
- (2) Zhu Wen-Hong, Salcudean S. E., 1999, "Teleoperation with Adaptive Motion/Force Control," *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Detroit, Michigan, May.
- (3) Ouhyoung M, Tsai, Wu-nan, Tsai Ming-Chang 1995 "A Low-Cost Force Feedback Joystick and Its Use in PC Video Games," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 41, No. 3, pp. 787~794, August.
- (4) Young Woo Ki, Byoung Dae Jin, Dong-Soo Kwon, 1998., "A 6 DOF Force-Reflection Hand Controller Using the Fivebar Parallel Mechanism," *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Leuven, Belgium, May.
- (5) Daniel R. W., McAree P. R., 1998., "Fundamental Limits of Performance for Force Reflecting Teleoperation," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 17, No. 8, pp. 811~830, August.
- (6) Toshiyuke Murakami, Naoki Oda, Yuji Miyasaka, and Kouhei Ohnishi, 1995, "A Motion Control Strategy Based on Equivalent Mass Matrix in Multidegree-of-Freedom Manipulator," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 42, No. 2, pp. 123~130, April.
- (7) Berkelman P. J. , Butler Z. J. , and Hollis R. L., 1996, "Design of a Hemispherical Magnetic Levitation Haptic Interface Device," *International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Atlanta, DSC-Vol. 58, pp. November.
- (8) Shimoga K. B., Goldenberg A. A., 1996, "Soft Robotic Fingertips, Part II: Modeling and Impedance Regulation," *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 15, No. 4, pp. 335~350.
- (9) 서진규, 박기환, 2000, "자기부상원리를 이용한 햅틱 마스터 시스템의 개발," 제어,자동화,시스템 공학회 전남학술지부 학술회의.
- (10) 최혁렬, 이승룡, 류성무, 1998, "마찰을 고려한 탄성변형 환경과 접촉하는 가상도구의 조작감 제시," 대한기계학회논문집(A), Vol. 22, No. 4, pp. 790~800.