

## 초음파 모터 구동방식의 역감제시 기구

최 병 현\* · 최 혁 렬†

(2000년 5월 2일 접수, 2001년 1월 26일 심사완료)

### Hand Exoskeleton with PWM Driving Method

Byunghyun Choi and Hyoukryeol Choi

**Key Words:** Haptic Device(역감제시 기구), Exoskeletal Type(외골격형), Semi-Direct Drive(반직접 구동), Ultrasonic Motor(초음파모터), Pwm(폭변조 방식)

#### Abstract

In this paper, we present an exoskeletal haptic device named SKK Hand Master. This device is directly driven by linkages actuated with small ultrasonic motors. By adopting ultrasonic motors that have advantageous features useful for cybernetic actuators, a compact haptic device containing whole driving packages can be established without additional power transmissions such as tendons. Methods for measuring joint postures and joint torques are developed and a new control strategy called PWM/PS is proposed to overcome intrinsic disadvantages such as hysteresis. Issues regarding design and construction of the device are addressed and several results of experiments for the evaluations of performance are included.

#### 1. 서 론

최근 들어 원격로봇, 시뮬레이션, 훈련, 게임/오락 등의 다양한 분야에 있어서 가상현실과 휴먼 인터페이스(human interface)에 관한 연구는 괄목할 만한 성장을 보여왔다.<sup>(1~4)</sup> 그러나 이와 같은 성장의 배경은 그래픽 기술의 발전에 의한 것으로, 다양한 적용분야에 있어서 보다 실제적인 경험을 느끼고자 하는 사용자의 욕구를 충족시키기에는 아직도 개선되어야 할 점이 남아 있다.

가상현실의 한 분야로 분류되는 역감제시(haptic display) 기술은 사용자에게 촉감(touch), 역감(force feel) 등을 제시할 수 있는 것으로, 수많은 연구자들에 의해 연구되어 왔으며, 이 기술은 사용자로 하여금 가상공간 혹은 원격지에 존재하는 대상을 만지거나, 느끼고, 다룰 수 있도록 하는 것이라고 할 수 있다.

역감제시 기술을 개선하기 위해서는 다음과 같은 두 분야를 고려할 수 있다. 첫 번째는 역감제시 기구, 즉 사용자의 움직임을 측정하고 또 사용자에게 힘을 제시할 수 있는 근간이 되는 기계전기 시스템이며, 두 번째는 대상을 모델링하고 이를 시뮬레이션하여 역감을 제시하는 방법으로 역감의 질을 향상시키는 역감제시 알고리즘을 말한다. 본 논문에서는 역감제시 기구의 설계와 구성 및 제어에 관하여 중점을 두었다.

일반적으로 역감제시 기구는 하드웨어는 고정 방식에 따라 크게 신체부착형과 바닥고정형으로 구분할 수 있으며,<sup>(5)</sup> 신체부착형은 사람의 신체부위를 이용하여 고정된다. 바닥고정형은 책상 위, 바닥, 천장 등에 고정이 되며, 조이스틱, 핸들, 매스터 매니플레이터 등과 같은 형태를 하고 있다.<sup>(6,7)</sup> 이와 같은 바닥고정형의 단점은 사용자의 자유도를 감소시킨다는 것이다. 반면, 대부분의 신체부착형 기구는 외골격 형태로 구성되어 있으며, 기구의 부착 방식으로 인하여 바닥고정형에 비하여 사용자의 자유도를 상당히 증가시킬 수 있다. 또한 신체부착형 기구는 다시 암 매스터(arm master)와 핸드 매스터(hand master)로 분류할

\* 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : hrchoi@mecha.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7449 FAX : (031)290-5849

수 있으며, 암매스터는 사용자의 팔, 어깨 혹은 등에 고정되며,<sup>(8)</sup> 핸드매스터는 사용자의 손바닥, 손목 혹은 전완(forearm)에 고정되는 형태이며<sup>(9~12)</sup> 이로 인하여 무게와 부피 등의 제한을 받게 되어 설계에 많은 어려움이 따르게 된다.

현재까지 개발된 대부분의 외골격형 기구는 텐던과 같은 동력전달 요소를 이용하여 간접 구동방식을 채용하였다. 그러나 이와 같은 기구들은 과도한 마찰력, 구성요소간의 간섭 그리고 제어의 어려움 등으로 인하여 실제사용에 있어서 많은 문제점을 안고 있다. 텐던구동 방식을 제외하면, 링크기구에 의하여 역감을 전달하는 방법이 있으나, 이 경우는 액추에이터와 링크기구의 무게가 역감의 질에 상당히 많은 영향을 주고 또한 복잡한 메카니즘을 포함하게된다. 이로 인하여 핸드매스터의 경우 간접구동방식을 적용한 예를 찾아보기가 거의 드물다.

본 논문에서는 SKK 핸드매스터(SKK Hand Master)로 명명한 새로운 형태의 역감제시 기구를 제안한다. 제안된 기구는 경량의 초음파 모터와 링크를 이용하여 반직접구동 방식으로 구동된다. 기본적인 구성은 4절 링크 메카니즘을 채용하였으며, 링크의 한 관절은 초음파 모터에 의해 구동된다. 또한 사용자 손가락에 대하여 손바닥과 손등 방향의 양방향 힘 제시가 가능하며, 각 조인트의 위치와 토크를 측정하기 위하여 실시간 간접 측정방식을 사용하였다.

액추에이터로 사용된 초음파 모터(ultrasonic motor : USM)는 기존의 전자기모터에 비해 경량, 저소음, 중량 대 토크비가 크다는 장점을 가지고 있다. 또한, Tomovic과 McGee 등이 제안한 사이버네틱 액추에이터의 구비조건을 만족시킨다.<sup>(17)</sup> 그러나, 초음파 모터 역시 몇 가지 단점을 가지고 있으며 히스테리시스와 장시간 구동시 모터 자체의 온도상승이 그 것이다. 본 논문에서는 이와 같은 문제점을 해결하고자 PWM/PS라는 새로운 형태의 PWM 구동방식을 제안한다.

본 논문에서는 SKK 핸드매스터의 설계와 구성에 관하여 논할 것이며 기초적인 몇 가지 실험 결과에 대하여 언급할 것이다. 이후 2장에서는 개발배경에 대하여 설명하고, 3장에서는 기구 메카니즘을 살펴 보고, 제안된 기구의 기구학과 토크해석에 관해서

는 4장과 5장에서 언급할 것이다. 초음파 모터의 제어 방법은 6장에서 소개하고, 7장에서는 기초적인 실험결과에 대하여 고찰하였다.

## 2. 개발 배경

장착형 역감제시 기구로 분류되는 핸드매스터는 일반적으로 사용자의 신체에 고정되는 방식을 취하게된다. 따라서, 기구의 자중을 사용자가 직접 받게되고 만일 기구가 무겁다면 사용도중 사용자가 쉽게 피로를 느끼게 된다. 따라서 장착형 기구가 갖추어야 할 가장 중요한 요구조건은 가능한 가벼워야 한다는 것이다. 그러나, 전자기 모터 혹은 유압 액추에이터와 같은 기존의 액추에이터는 직접 구동방식을 구현하기에는 너무 무겁기 때문에 텐던과 같은 동력전달요소 또는 중력보상 기구와 같은 추가적인 구성요소를 필요로 하게 된다. 더욱이 이와 같은 구성요소는 기구를 더욱 복잡하게 하여 자중을 증가시킬 뿐만 아니라 사용자에게 전달되는 역감의 질을 감소시키게 된다. 결국 장착형 역감 제시기구, 특히 핸드매스터를 개발함에 있어 가장 관심이 되는 것은 토크 대 중량비가 크고 경량인 구동방식이라고 할 수 있다.

두 번째 요구조건으로는, 역감제시 기구는 사용자의 신체에 적당한 힘을 반영할 수 있어야 할 수 있어야 하며, 사용자가 자유운동을 하고 있을 경우에는 사용자의 신체에 어떠한 힘도 가해서는 안된다는 것을 의미하는 투명성이 보장되어야 한다는 조건을 동시에 만족해야 한다. 기존의 전자기모터만을 이용해서는 언급한 두 가지 조건을 동시에 만족시킬 수는 없다. 이에 관한 조건은 Tomovic과 McGee가 제안한 사이버네틱 액추에이터의 요구조건과 상당히 일치한다. 이들이 제안한 요구조건은 자유상태(free state), 증가상태(increase state), 감소상태(decrease state), 그리고 구속상태(locking state)이며, 이 네 가지 상태 중 증가상태와 감소상태는 전자기모터만을 이용하여 충분히 구현할 수 있으나 자유상태와 구속상태의 경우는 쉽게 구현하기 어렵다. 여기서 자유상태란 액추에이터에 가해진 외력에 대하여 아무런

반력을 발생시키지 않는 것을 의미하며, 구속상태는 가해진 외력에 대하여 어떠한 움직임도 없이 반력을 발생시키는 것을 의미한다. 이 두 가지 상태는 전자기모터만으로는 구현할 수 없으며, 만일 이를 구현하고자 한다면 클러치와 브레이크 같은 동력전달요소가 필요하게 된다. 그러나 이 역시 기구의 부피를 증가시키게 되므로 적절한 방안이라고 할 수는 없다.

본 논문에서는 앞서 언급한 요구조건을 만족시키기 위하여, 초음파 모터를 이용한 구동방식을 제안하고자 한다. 실제로 초음파 모터는 증가/감소 상태뿐만 아니라 자유상태와 구속상태를 구현할 수 있는 등 사이버네틱 액추에이터와 유사한 특성을 가지고 있다. 특히, 특별한 부가 장치나 알고리즘 없이 역감제시 기구의 투명성을 보장할 수 있으며, 기존 액추에이터에 비하여 중량 대토크 비가 상대적으로 크다. 물론 히스테리시스나 온도상승과 같은 몇 가지 문제점을 가지고 있지만, 장착형 역감제시 기구의 액추에이터로서 충분히 고려해 볼만하다.

### 3. 기구 메커니즘

Fig. 1은 두 손가락(엄지와 검지)에 대한 모델로 구성된 외골격형 구조를 갖는 역감제시기구로 본 논문에서 제안한 SKK 핸드메스터의 개념도이다. 제안된 기구는 모듈화되어 있어 쉽게 다섯 손가락 구조로 확장시킬 수 있으며, 초음파 모터와 링크기구를 이용한 반직접 구동방식으로 구동되어 각 손가락에 힘을 반영하게 된다. Fig. 1에 보인 것과 같이 각 링크구조는 손가락의 한 관절에 대하여 4절링크를 구성하고 있으며 1 자유도 메커니즘이 된다. 따라서 링크를 구성하는 네 개의 관절 중 한 관절의 변위를 이용하여 모든 관절의 변위를 계산할 수 있으며, 힘/토크의 경우도 마찬가지로 한 관절의 힘/토크 정보를 이용하여 모든 관절의 힘/토크를 계산할 수 있다. 이론적으로는 링크의 임의의 관절에 액추에이터나 센서를 부착하여도 무방하지만, 센서로부터 얻어지는 정보의 정확성과 실용성을 고려하여 액추에이터와 센서의 위치를 Fig. 1에 보인 것과 같

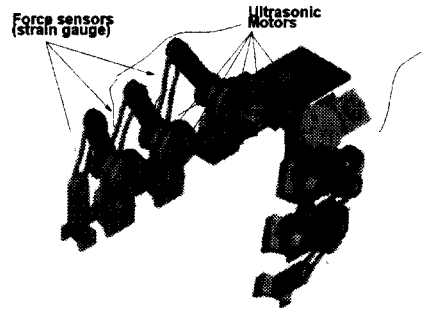


Fig. 1 Conceptual model of SKK Handmaster

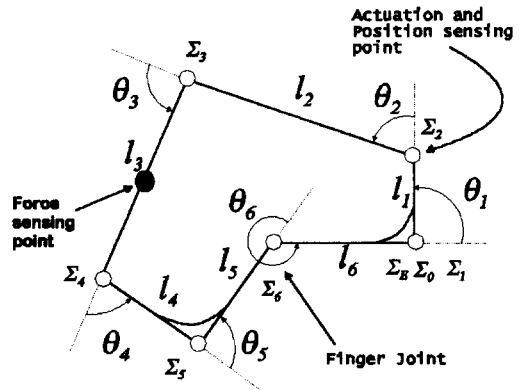


Fig. 2 Schematic diagram for single joint

이 설정하였다. 이들 위치 센서와 손가락 변위의 관계 그리고 손가락토크와 힘 센서의 관계는 다음 장에서 설명하기로 한다.

### 4. 링크 기구학

이 장에서는 제안된 역감제시 기구의 기구학 관계식을 유도할 것이며, 이 관계식들로부터 기구를 반직접 구동방식으로 구동할 수 있고, 각 관절의 위치와 힘을 간접적으로 측정할 수 있으며, 역감을 제시할 수 있게 된다.

Fig. 2는 SKK 핸드메스터의 손가락 한 관절에 대한 기구학 모델과 기구해석을 위하여 설정된 좌표계를 보여주고 있다. 여기서  $\theta_i$ 는 각 관절의 회전 변위를,  $l_i$ 는 링크의 길이를,  $\Sigma_i$ 는  $i$ 번째 좌표계의 원점을 의미한다. 이후에서는 위의 기구

학 모델을 이용하여  $\theta_2$ 와  $\theta_6$ 의 기구학 관계식을 유도할 것이며,  $\theta_2$ 에 대한  $\theta_6$ 의 관계를 표현하는 것을 순기구학으로, 그 반대의 경우를 역기구학으로 정의하였다.

4.1 기구학 모델링

다음 절에서는 액추에이터의 회전변위로부터 손가락의 회전변위를 측정하는 방법과 그 반대의 경우를 구하는 방법을 보일 것이다. Fig. 2은 손가락의 한 관절에 대하여 단순화된 링크구조를 보여주는 것으로  $\theta_i (i=1,2,\dots,6)$ 는 링크  $i-1$ 로부터 측정된 링크  $i$ 의 변위를 의미한다. 여기서  $\theta_i$ 의 합은 기하학 관계로부터 다음과 같이 된다.

$$\sum_{i=1}^6 \theta_i = 4\pi \quad (1)$$

4.2 링크역기구학

링크역기구학은 액추에이터의 변위  $\theta_2$ 를 손가락 관절변위  $\theta_6$ 로 표현하고자 하는 것이다. Fig. 2에 보인 링크는 페루프를 구성하므로  $\Sigma_0$ 에 대한  $\Sigma_6$ 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$x = l_1 C_1 + l_2 C_{12} + l_3 C_{123} + l_4 C_{1234} + l_5 C_{12345} + l_6 \quad (2)$$

$$y = l_1 S_1 + l_2 S_{12} + l_3 S_{123} + l_4 S_{1234} + l_5 S_{12345} \quad (3)$$

여기서  $C_i, S_i, C_{ij},$  그리고  $S_{ij}$ 는 각각  $\cos\theta_i, \sin\theta_i, \cos(\theta_i + \theta_j)$  및  $\sin(\theta_i + \theta_j)$ 을 의미한다. Fig. 2로부터 링크  $l_1$ 과  $l_3$ 는 손가락에 대하여 항상 수직하다고 가정하면 식 (2)와 (3)은 다음과 같이 된다.

$$x = -l_2 S_2 - l_3 S_{23} - l_4 S_{234} + l_5 S_{234} + l_6 = 0 \quad (4)$$

$$y = l_1 + l_2 C_2 + l_3 C_{23} + l_4 C_{234} + l_5 C_{234} = 0 \quad (5)$$

식 (4)에서  $\theta_6$ 는 손가락 관절의 변위이며, 액추에이터 변위  $\theta_2$ 를 출력으로 하고자 하므로 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 3\pi - \theta_6 \quad (6)$$

식 (4)와 (5), (6)을 이용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$l_2 S_2 + l_3 S_{23} = -l_{4,5} S_{6-a} + l_6 \quad (7)$$

$$l_2 C_2 + l_3 C_{23} = l_{4,5} C_{6-a} - l_1 \quad (8)$$

여기서  $l_{4,5} = \sqrt{l_4^2 + l_5^2}$ ,  $\tan a = l_5 / l_4$ 이다. 이제 식 (7)과 (8)의 양변을 제곱한 후 연립하여 풀면  $\theta_3$ 와  $\theta_6$ 의 관계는 다음과 같이 된다.

$$C_3 = \frac{l_{1,6}^2 + l_{4,5}^2 - l_2^2 - l_3^2 - 2l_{4,5}l_{1,6}C_{6-a-\beta}}{2l_2l_3} \quad (9a)$$

$$S_3 = +\sqrt{1 - C_3^2} \quad (\because 0 < \theta_3 < \pi) \quad (9b)$$

여기서  $l_{1,6} = \sqrt{l_1^2 + l_6^2}$ ,  $\tan\beta = l_6 / l_1$ 이다. 이제  $\theta_3$ 를  $\theta_6$ 의 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\theta_3 = \text{Atan2}(S_3, C_3) \quad (10)$$

이제 식 (7)을 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$S_2 = \frac{l_6 - l_{4,5}S_{6-a} - l_3S_3C_2}{l_2 + l_3C_3} \quad (11)$$

또, 식 (8)로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$C_2 = -\frac{l_1 - l_{4,5}C_{6-a} - l_3S_3S_2}{l_2 + l_3C_3} \quad (12)$$

다시 식 (11)과 (12)를 이용하면  $C_2$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$C_2 = \frac{-(l_2l_3C_3)(l_1 - l_{4,5}C_{6-a}) + (l_6 - l_{4,5}S_{6-a})l_3S_3}{l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3C_3} \quad (13)$$

마지막으로 식 (11)과 (13)으로부터 구하고자 하는 변위  $\theta_2$ 는 다음과 같이 구할 수 있게 된다.

$$\theta_2 = \text{Atan2}(S_2, C_2) \quad (14)$$

또한  $\theta_4$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_4 = 3\pi - \theta_6 - \theta_3 - \theta_2 \quad (15)$$

4.3 링크 순기구학

앞서 언급한 바와 같이 링크 순기구학은 초음파 모터의 변위  $\theta_2$ 에 대하여 각 링크의 변위를 찾아내는 과정이다. 이 과정 역시 역기구학의 경우와 마찬가지로  $\Sigma_2$ 에 대하여  $\Sigma_0$ 를 표현하는 식으로부터 시작된다.

$$-l_2 C_2 = l_2 + l_3 C_3 + l_4 C_{34} + l_5 C_{345} + l_6 C_{3456} \quad (16)$$

$$l_2 S_2 = l_3 S_3 + l_4 S_{34} + l_5 S_{345} + l_6 S_{3456} \quad (17)$$

링크 역기구학의 경우와 유사하게 식 (6)으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\theta_3 + \theta_4 + \theta_6 = 3\pi - \theta_2 \quad (18)$$

식 (18)을 식 (16)과 (17)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$-l_{1,6} C_{2+\beta} - l_2 = l_3 C_3 + l_{4,5} C_{34+a} \quad (19)$$

$$-l_{1,6} S_{2+\beta} = l_3 S_3 + l_{4,5} S_{34+a} \quad (20)$$

또한, 식 (19)와 (20)의 양변을 제곱하여 더하면,

$$l_{1,6}^2 + l_2^2 + 2l_2l_{1,6}C_{2+\beta} = l_3^2 + l_{4,5}^2 + 2l_3l_{4,5}C_{4+a} \quad (21)$$

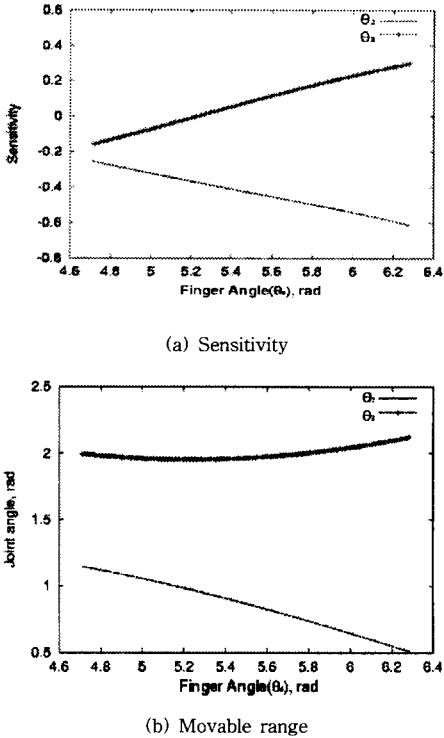


Fig. 3 Movable range and sensitivity plot of  $\theta_2$  and  $\theta_3$

이제  $\theta_4$ 를  $\theta_2$ 의 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\theta_4 = -\alpha + \arccos \frac{l_{1,6}^2 + l_2^2 - l_3^2 - l_{4,5}^2 + 2l_2l_{1,6}C_{2+\beta}}{2l_3l_{4,5}} \quad (22)$$

식(22)로부터  $\theta_4$ 를 구할 수 있기 때문에 식(19)와 (20)를  $\theta_3$ 에 대한 식으로 변형시키면 다음과 같다.

$$C_3 = \frac{-(l_2 + l_{1,6}C_{2+\beta}) + l_{4,5}S_4 + \alpha S_3}{l_3 + l_{4,5}C_4 + \alpha} \quad (23)$$

$$S_3 = \frac{l_{1,6}S_2 + \beta - l_{4,5}S_4 + \alpha C_3}{l_3 + l_{4,5}C_4 + \alpha} \quad (24)$$

이제 식 (23)과 (24)를 이용하여  $\theta_3$ 를 다음과 같이 구할 수 있게 된다.

$$\theta_3 = \arccos \frac{l_{1,6}l_{4,5}S_4 + \alpha S_2 + \beta - (l_2 + l_{1,6}C_{2+\beta})(l_3 + l_{4,5}C_4 + \alpha)}{l_3^2 + l_{4,5}^2 + 2l_3l_{4,5}C_4 + \alpha} \quad (25)$$

마지막으로 손가락의 변위  $\theta_6$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_6 = 3\pi - \theta_2 - \theta_3 - \theta_4 \quad (26)$$

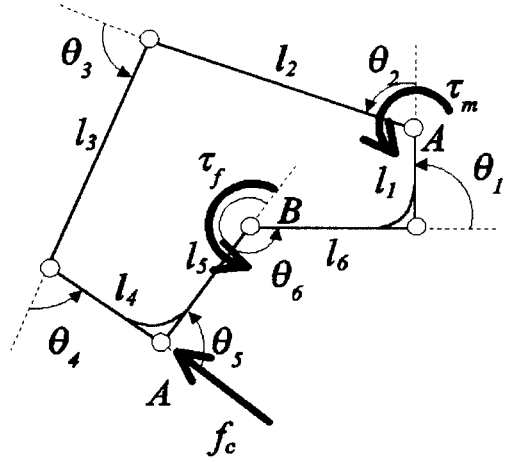


Fig. 4 External forces acting on single link

Fig. 2에서 센서를 부착시킬 수 있는 곳은  $\Sigma_2$ (또는  $\Sigma_4$ )와  $\Sigma_3$ 의 두 곳이며, 이 때  $\Sigma_2$ 와  $\Sigma_4$ 는 미러 이미지가 된다. 이 두 후보에 대하여 본 논문에서는  $\Sigma_2$ 를 선정하여 액추에이터와 위치센서를 부착하였다.

Fig. 3은 이 같은 선정 배경을 보여주는 것으로, 여기서 감도(sensitivity)  $S_{\theta_i}$  ( $i=2,3$ )는 손가락의 관절변위에 대한 각 관절의 변위의 비로 다음과 같이 정의된다.

$$S_{\theta_i} = \frac{d\theta_i}{d\theta_6} \quad (i=2,3) \quad (27)$$

이 때 Fig. 3의 (a)에서  $\Sigma_2$ 와  $\Sigma_3$ 의 감도  $S_{\theta_2}$ 와  $S_{\theta_3}$ 가 비슷함에도 불구하고,  $\Sigma_2$ 를 선택한 이유를 Fig. 3의 (b)에서 잘 알 수 있다. 제어의 관점에서 보면 센서의 측정범위가 넓을 수록 더 좋은 성능을 얻을 수 있기 때문이며, Fig. 3의 (b)에서  $\Sigma_3$ 의 측정범위가  $\Sigma_2$ 의 경우보다 좁다는 것을 쉽게 알 수 있다.

### 5. 힘/토크 해석

#### 5.1 힘 해석

Fig. 4는 손가락의 한 관절에 해당하는 링크 구조에 대하여 작용하는 모든 외력을 보여주는 것으로 여기서  $\tau_m$ ,  $\tau_f$ 와  $f_c$ 는 각각 모터 토크, 손가락 관절 토크 및 기구에 의해 손가락에 작용하

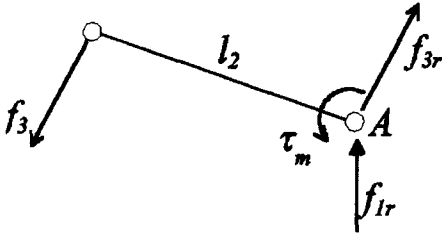


Fig. 5 The free body diagram of link \$l\_2\$

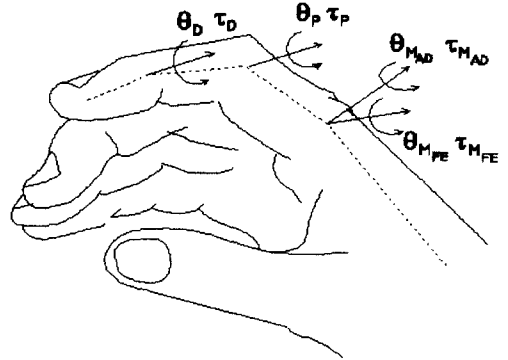


Fig. 7 Link frame for index finger

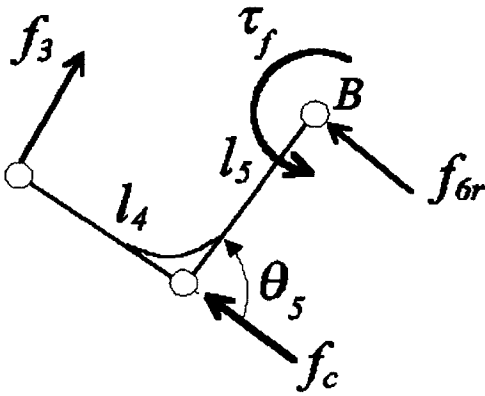


Fig. 6 The free body diagram of link \$l\_4\$ and \$l\_6\$

는 힘을 의미한다. 이때, 링크 \$l\_3\$는 양단이 베어링에 의하여 지지되므로 작용하는 힘은 순수인장 혹은 순수압축력만 작용하게 된다. 따라서 링크 \$l\_3\$에 작용하는 힘을 측정한다면, 다른 어떠한 모멘트/토크등이 연성된 것을 고려하지 않아도 모터 토크와 손가락 관절의 토크를 쉽게 구할 수 있다.

Fig. 5는 링크 \$l\_2\$의 자유물체도를 보인 것으로 여기서 \$f\_3\$는 링크 \$l\_3\$에 의하여 가해진 힘을 나타내며 \$f\_{3r}\$과 \$f\_{1r}\$은 각각 링크 \$l\_2\$에 작용하는 반력을 의미하며, A는 초음파 모터가 부착되어 있는 위치이다.

점 A에 대하여 힘/모멘트 평형방정식은 다음과 같이 된다.

$$\sum F_A = f_3 + f_{3r} + f_{1r} = 0 \quad (28)$$

$$\sum M_A = \tau_m + l_2 \times f_3 = 0 \quad (29)$$

식 (27)과 (28)로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$f_{3r} = -(f_3 + f_{1r}) \quad (30)$$

$$\tau_m = -l_2 \times f_3 \quad (31)$$

Fig. 6는 \$l\_4\$와 \$l\_5\$에 작용하는 외력을 보인 것으로

\$f\_{6r}\$과 \$f\_c\$는 각각 반력과 가상환경으로부터 반영된 가상접촉력을 의미한다. 앞서와 마찬가지로 평형방정식을 적어보면 다음과 같다.

$$\sum F_B = f_3 + f_{6r} = 0 \quad (32)$$

$$\sum M_B = \tau_f + (l_4 + l_5) \times f_3 = 0 \quad (33)$$

식 (31)과 (32)를 이용하여 힘 \$f\_{6r}\$과 손가락 관절 토크 \$\tau\_f\$를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$f_{6r} = -f_3 \quad (34)$$

$$\tau_f = -(l_4 + l_5) \times f_3 \quad (35)$$

식 (34)는 사용자가 가상환경내에 존재하는 물체와 접촉했을 경우 기구를 통해 느낄 수 있는 힘을 나타낸다.

식 (30)과 (34)에서 \$f\_3\$를 소거하면, 모터 토크와 손가락 관절 토크의 관계를 표현하는 식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\tau_m = \frac{l_2 S_2}{l_4 S_4 + l_5 S_{45}} \tau_f \quad (36)$$

### 5.2 토크 해석

로봇공학 분야에 있어서 자코비안행렬(jacobian

matrix)은 로봇의 엔드이펙터(end effector)와 관절 토크 사이의 관계를 나타내는 상당히 유용하다. 이 같은 자코비안행렬은 핸드메스터 시스템에서도 동일하게 적용 가능하다. Fig. 7은 검지 손가락에 대한 링크 좌표계를 보인 것이다.

일반화된 가상힘,  $F_E=[f_x, f_y, f_z, M_x, M_y, M_z]^T$ 가 손가락 끝에 작용한다고 가정하면, 자코비안행렬  $J \in R^{4 \times 6}$ 를 이용하여 손가락 관절의 토크를 다음과 같이 구할 수 있다

$$T_f = J^T F_E \quad (37)$$

여기서  $T_f = [\tau_{MAD}, \tau_{MFE}, \tau_D, \tau_P]^T$ 를 의미하며 하첨자  $M$ ,  $P$  그리고  $D$ 는 손허리손가락관절 (Metacarpophalangeal joint:MC), 손가락뼈사이관절 (Interphalangeal joint:PIP), 그리고 끝마디뼈(Distal phalanges:DIP) 관절을 의미하며, 하첨자  $MAD$ 와  $MFE$ 는 각각 손허리손가락관절의 모음-벌림 (abduction-adduction)운동과 굽힘-펴기 (flexion-extension) 운동을 의미한다. 또한 손가락의 자코비안 행렬  $J$ 는 다음과 같은 형태로 쓸수 있다.

$$J^T = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & 0 & 0 & 1 \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & 0 & 0 & 1 \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (38)$$

여기서

$$\begin{aligned} J_{11} &= -S_{MAD}(C_{MPD}l_D + C_{MP}l_P + C_{MFE}l_M) \\ J_{12} &= -C_{MAD}(S_{MPD}l_D + S_{MP}l_P + S_{MFE}l_M) \\ J_{21} &= -C_{MAD}(S_{MPD}l_D + S_{MP}l_P) \\ J_{22} &= -C_{MAD}S_{MPD}l_D \\ J_{23} &= C_{MAD}(C_{MPD}l_D + C_{MP}l_P + C_{MFE}l_M) \\ J_{31} &= -S_{MAD}(S_{MPD}l_D + S_{MP}l_P + S_{MFE}l_M) \\ J_{32} &= -S_{MAD}(S_{MPD}l_D + S_{MP}l_P) \\ J_{33} &= -S_{MAD}S_{MPD}l_D \\ J_{41} &= -C_{MPD}l_D - C_{MP}l_P - C_{MFE}l_M \\ J_{42} &= -C_{MPD}l_D - C_{MP}l_P \\ J_{43} &= -C_{MPD}l_D \end{aligned}$$

이고,  $l_M, l_P, l_D$ 는 손가락 각 관절의 길이를 의미한다. 또한  $S_{MAD}, C_{MAD}, S_{MFE}, C_{MFE}, S_{MP}, C_{MP}, S_{MPD}, C_{MPD}$ 는 각각  $\sin(\theta_{MAD}), \cos(\theta_{MAD}), \sin(\theta_{MFE}), \cos(\theta_{MFE}), \sin(\theta_{MFE} + \theta_P), \cos(\theta_{MFE} + \theta_P), \sin(\theta_{MFE} + \theta_P + \theta_D), \cos(\theta_{MFE} + \theta_P + \theta_D)$ 를 의미한다.

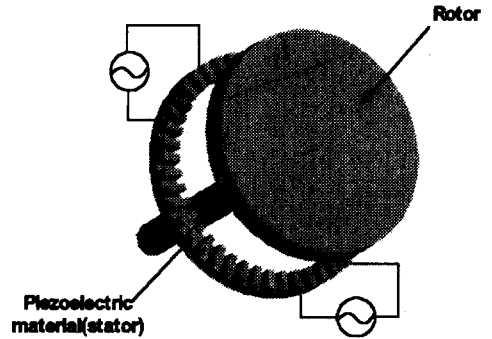


Fig. 8 Structure of ultrasonic motor

따라서, 손가락 관절의 토크와 모터 토크의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_m = C T_f \quad (39)$$

여기서  $T_m \in R^4$ 는 모터의 토크벡터를 의미하며,  $C$ 는 손가락관절의 토크를 모터토크로 변환시키는 토크 변환행렬로 다음과 같은 형태로 쓸수 있다.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l_2^p S_2^p}{l_4^p S_4^p + l_5^p S_5^p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l_2^p S_2^p}{l_4^p S_4^p + l_5^p S_5^p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{l_2^m S_2^m}{l_4^m S_4^m + l_5^m S_5^m} \end{bmatrix} \quad (40)$$

여기서 상첨자  $D, P$  그리고  $M$ 은 손가락의 DIP, PIP와 MC 관절을 의미한다.

이상으로부터 모터토크와 손가락 끝에 가해진 외력의 관계는 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$T_m = C J^T F_E \quad (41)$$

### 6. 초음파 모터의 제어

전자기 모터와는 달리 초음파 모터의 회전자와 고정자는 탄성체와 압전소자로 구성되어 있으며, 위상차를 갖는 두 개의 정현파를 입력하여 구동된다. Fig. 8은 초음파 모터의 구성을 보인 것이다.

초음파 모터에 입력되는 두 정현파의 위상차가 없을 경우, 회전자와 고정자는 상하로 진동하게 된다. 이때 초음파 모터는 외력에 대하여 어떠한 반력도 발생시키지 않으며, 이와 같은 상태를 자

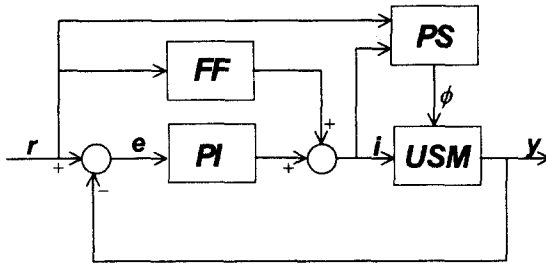


Fig. 9 Block diagram of PWM/PS

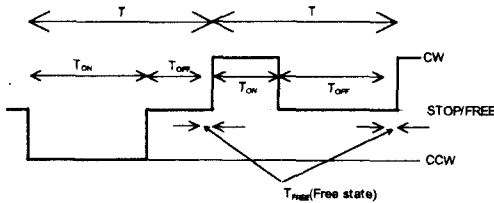


Fig. 10 Proposed PWM/PS method

유상상태라고 한다. 또한 위상차를 +90° 까지 증가 시킴에 따라 모터의 토크 역시 증가하게 되며, 음의 부호를 갖는 위상차가 입력되면 방향이 전환된다. 전원이 공급되지 않으면, 초음파 모터는 자결상태가 되어 마치 브레이크와 같은 역할을 하게 되며 외력에 대하여 최대 반력을 발생시키게 된다. 또한 초음파 모터는 전자기 잡음을 발생시키지 않기 때문에 센서에 아무런 영향을 주지 않는다. 이와 같은 초음파 모터는 구동입력에 따라 자유상태와 구속상태를 구현할 수 있기 때문에 사이버네틱 액추에이터와 거의 유사한 특성을 가지고 있다. 그러나, 초음파 모터 역시 몇 가지 단점을 가지고 있으며, 이는 히스테리시스와 장시간 구동시 발생하는 열로 인하여 모터 주변의 온도가 상승한다는 점이며, 실제 사용에 있어서는 새로운 구동방식이 요구된다.

이러한 문제를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 PWM/PS라는 새로운 PWM 구동방식을 제안한다. Fig. 9에 보인 PWM/PS는 비례적분제어기(PI), 앞섬 보상기(feedforward controller:FF)와 위상선택기(phase selector:PS)로 구성되어 있다. 초음파 모터의 제어입력인 듀티비(duty ratio)  $i$ 는 비례적분제어기와 앞섬보상기로부터 얻어지며, 다음과 같이 정의된다

$$i = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF} + T_{FREE}} \times 100\% \quad (41)$$

여기서  $T_{ON}$ 은 전원이 공급되는 시간,  $T_{OFF}$ 는 전원이 차단되는 시간, 그리고  $T_{FREE}$ 는 초음파모터의 자유상태가 유지되는 시간을 의미한다. 제안된 PWM/PS 구동방식이 기존의 다른 PWM 구동방식과 구별되는 것은 위상선택기(PS)를 포함하는 것으로, 이는 초음파 모터에 가해지는 입력신호의 위상차를 선택하는 역할을 하는 것이다. 또한 PWM/PS는 Fig. 10에 보인 것과 같이 한 주기의 마지막에 자유상태를 포함하고 있다.

앞서 언급한 바와 같이 초음파 모터가 자유상태에 있을 경우 회전자와 고정자는 상하로 진동을 하며 외력에 대하여 반력을 발생시키지 않게 된다. 따라서, PWM의 한 주기에 추가된 자유상태는 초음파 모터의 방향 전환시 회전자와 고정자 사이에 잔류하는 마찰력을 제거하게 된다. 그러나 추가된 자유상태에 의하여 히스테리시스 효과를 줄일 수는 있지만, 반대로 자유상태 유지기간인  $T_{FREE}$ 가 길어지면 초음파 모터의 출력 토크가 감소하게 된다. 결국 토크출력을 증가시키기 위해서는 자유상태 유지기간을 가능한 짧게 해야 하며, 본 논문에서는 자유상태 유지기간에 대하여 듀티비를 1%로 설정하였으며, 그 결과로 초음파 모터의 히스테리시스 효과가 감소할 것을 기대한다.

## 7. SKK 핸드메스터

### 7.1 시스템 구성

Fig. 11은 SKK 핸드메스터의 하드웨어 구성을 보여주는 것이다. 개발된 역감제시 기구는 모토로라 68040 CPU를 탑재한 싱글보드 컴퓨터(MV162-222)에 의하여 제어되며, 네트워크에 의하여 호스트 컴퓨터와 디스플레이 컴퓨터와 연결되어 있다. 호스트 컴퓨터로 사용된 SUN SPARC 워크스테이션은 개발환경을 제공하고 있으며, 가상환경은 OpenGL을 이용하여 Windows NT 워크스테이션에서 출력된다. 힘센서와 위치 센서로부터 얻어진 아날로그데이터는 VME 버스를 사용하는 A/D보드를 통하여 측정하였다. SKK 핸드메스터를 구동시키는 제어기는 100Hz의 샘플링 주기로 동작하며, 이 제어기의 블록다이어그램은 Fig. 12에 보였다. Fig. 13은 NT 워크스테이션에 출력되는



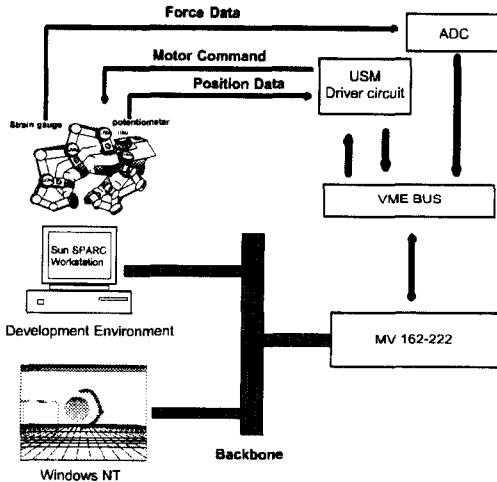


Fig. 11 Hardware setup



Fig. 12 Control blockdiagram of SKK Handmaster

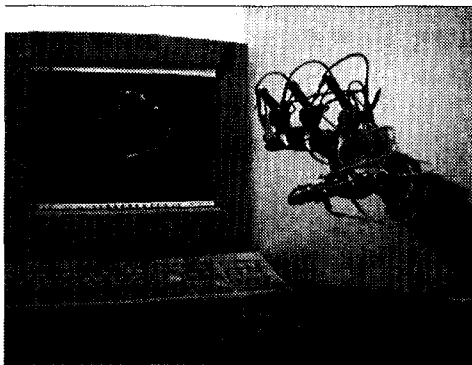


Fig. 13 SKK Hand master and virtual environment

Table 1 The specifications of ultrasonic motor

Driving freq.	Driving Voltage	Max. Torque	Holding Torque	Weight
50kHz	150Vrms	0.1 Nm	0.1Nm	20g

가상환경과 SKK 핸드매스터를 보인 것이다.

본 논문에서 개발된 역감제시 기구의 액추에이터로 사용한 초음파 모터의 재원은 Table 1에 보였다.

7.2 성능평가

개발된 SKK 핸드매스터의 성능평가를 위하여 몇 가지 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험은 초음파 모터의 제어기인 PWM/PS의 제어 성능을 알아보기 위한 것으로, Fig. 14와 같은 실험장치를 구성하여 초음파 모터와 연결된 링크의 한쪽 끝을 힘센서(JR3)와 접촉하게 하여 제어입력으로 0~2N 사이의 정현파 입력을 가하였으며, 비교를 위해 기존의 PWM 구동방법과 제안된 PWM/PS 구동방법을 각각 적용하였다.



Fig. 14 Experimental setup for ultrasonic motor

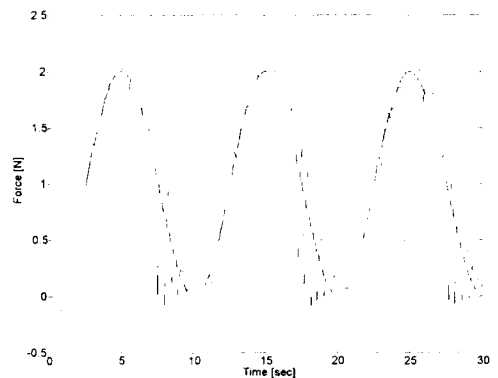


Fig. 15 Force tracking with conventional PWM

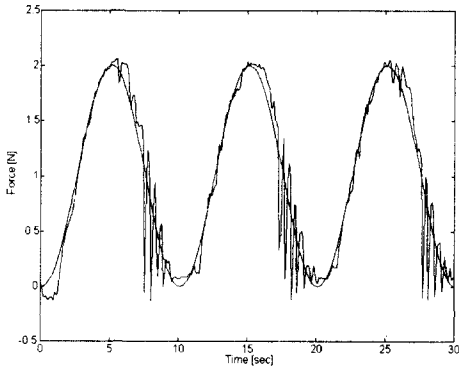


Fig. 16 Force tracking with PWM/PS

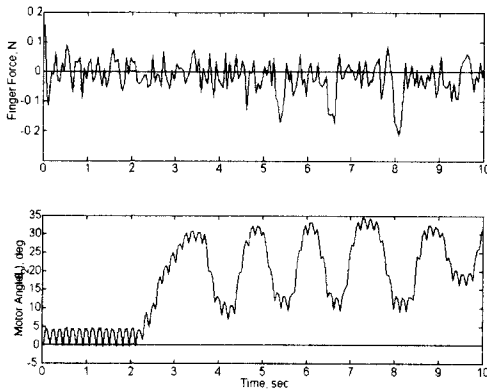


Fig. 17 Free motion test for single joint

Fig. 15와 16은 실험 결과를 보인 것으로 각각 기존의 PWM 구동방식과 제안된 PWM/PS 구동방식의 결과를 보인 것이다. 이 때 힘센서의 응답이 약간의 비대칭성을 보이는 것은 초음파 모터가 가지고 있는 썩기현상에 의한 것이며, 제안된 PWM/PS 구동방식이 훨씬 개선된 응답을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 실험결과로부터 제안된 PWM/PS 방법을 이용하면 초음파 모터의 성능을 개선할 수 있음이 입증되었다.

두 번째 실험은 SKK 핸드매스터의 투명성을 알아보기 위한 것으로, 사용자가 기구를 착용하고 자유운동을 하는 동안 기구에 부착된 힘센서를 이용하여 관절의 토크를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 17에 보였다. 실험 결과로부터 사용자가 자유로이 움직이는 동안 힘센서에 측정된 힘

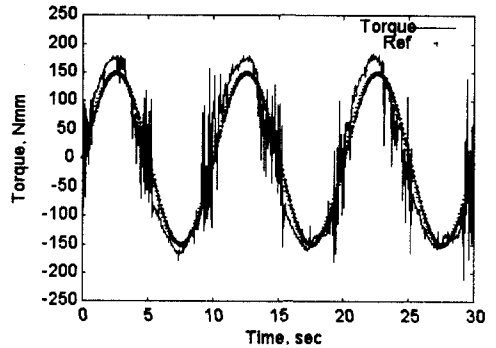


Fig. 18 Torque tracking performance

의 크기가 거의 변화가 없는 것을 알 수 있으며 이로부터 SKK 핸드매스터는 투명성이 충분히 보장된다고 말할 수 있다.

마지막으로 손가락 관절에 대한 토크 추종성을 알아보기 위하여 기준 토크 입력을  $\pm 150\text{Nmm}$ 의 정현파 입력으로 하였다. Fig. 18에 보인 실험결과에 발생한 잡음은 힘센서로 사용한 스트레인 게이지와 위치센서로 사용된 포텐시오미터에 의한 것으로 생각된다. 이와 같은 잡음에도 불구하고 SKK 핸드매스터로부터 얻어진 손가락관절의 토크는 기준입력을 상당히 잘 추종하는 것을 알 수 있다.

## 8. 결론

본 논문에서는 반직접 구동방식의 장착형 역감제시 기구인 SKK 핸드매스터 II를 소개하였다.

SKK 핸드매스터 II는 기존의 역감제시 기구에 비하여 경량이며 중량 대 출력토크 비가 크고 단순한 메커니즘을 가지고 있으며, 사용자에게 손바닥 방향과 손등 방향의 양방향 힘을 제시할 수 있다. 또한 초음파 모터를 액추에이터로 사용하여 특별한 제어방법이나 알고리즘이 없어도 사용자에게 투명성을 제공할 수 있었다.

이후 연구에서는 현재의 두 손가락을 다섯 손가락까지 확장시킬 것이며, 3차원 가상공간 내의 물체와 접촉시 발생하는 힘을 효과적으로 사용자에게 제시할 수 있는 알고리즘을 개발하고자 하며, 이를 이용하여 인간의 기술이전에 관한 연구를 수행할 것이다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 핵심연구(과제번호: 971-1001-008-2)의 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Hill, J. R., Green, P. S., Jensen, J. F., Gorf, Y. and Shah, A. S., 1994, "Telepresence Surgery Demonstration System," in *Proc. of IEEE International Conference on Robots and Automation*, pp. 2302~2307.
- (2) Hunter, I. W., Doukoglou, T. D., Lafontaine, S. R., Charette, P. G., Jones, L. A., Sagar, M. A., Mallinson, G. D. and Hunter, P. J., 1993, "Teleoperated Microsurgical Robot and Associated Virtual Environment for Eye Surgery," *Presence*, Vol. 2, No. 4, pp. 265~280.
- (3) Rohling, R. N. and Hollerbach, J. M., 1994, "Modeling and Parameter Estimation of the Human index Finger," in *IEEE International Conference on Robotics and Automations*, pp. 223~230.
- (4) Satava, R. M., 1998, *Cybersurgery*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- (5) Burdea, G., 1996, *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- (6) Buttolo, P. and Hannaford, B., 1995, "Pen-Based Force Display for Precision Manipulation in Virtual Environments," in *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 217~224.
- (7) Massie, T. and Salisbury, K., 1994, "The Phantom Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects," in *ASME Winter Annual Meeting*, pp. 295~300.
- (8) Bergamasco, M., 1996, "Force Replication to the Human Operator: The Development of Arm and Hand Exoskeletons as Haptic Interfaces," in *Robotics Research : The Seventh International Symposium*, Springer-Verlag London Ltd., pp. 173~182.
- (9) Iwata, H., Nakagawa, T. and Nakashima, T., 1992, "Force Display for Presentation of Rigidity of Virtual Objects," *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 24, No. 1, pp. 39~42.
- (10) Bouzit, M., Richard, P. and Coiffe, P., 1993, "The LRP Dextrous Hand Master Control System," *Technical Report*, Laboatoire de Robotique de Paris.
- (11) Bouzit, M., Burdea, G. and Coiffet, P., 1993, "The LRP Dextrous Hand Master," in *Virtual Reality Systems Fall '93*, NY.
- (12) Burdea, G., Zhuang, J., Roskos, E., Silver, D. and Langrana, N., 1992, "A Portable Dextrous Master with Force Feedback," *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 1, No. 1, pp. 18~27.
- (13) Tomovic, R. and McGhee, R. B., 1966, "A Finite State Approach to the Synthesis of Bioengineering Control Systems," *IEEE Trans. on Human Factor in Electronics*, Vol. 7, No. 2, pp. 65~69.
- (14) Sashida T. and Kenjo, T., 1993, *An Introduction to Ultrasonic Motors*, Oxford Science Publications.
- (15) Hagood IV, N. W. and McFarland, A. J., 1995, "Modeling of a Piezoelectric Rotary Ultrasonic Motor," *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 42, No. 1, pp. 210~224.
- (16) Kaneko, M., Nishihara, T. and Tsuji, T., 1995, "Active Control of Self-Locking Characteristic of Ultrasonic Motor," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2928~2934.
- (17) Noma, H., Miyasato, T., Kitamura, Y. and Kishino, F., 1996, "Haptic and Visual Feedback for Manipulation Aid in a Virtual Environment," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 58, pp. 469~476.
- (18) Choi, B. H. and Choi, H. R., 1999, "A Semi-Direct Drive Hand Exoskeleton Haptic Device Using Ultrasonic Motors," in *ROMAN '99*, pp. 205~209.
- (19) 대한해부학회 용어사전, <http://anatomy.or.kr>, 1997.