

텐던 구동방식의 장착형 역/촉감 제시기구의 개발에 관한 연구

Development of Exoskeletal Type Tendon Driven Haptic Device

°이 규훈*, 최 혁렬**

*성균관대학교 대학원 기계공학과(Tel:+82-331-290-7481;Fax:+82-331-295-1937;E-mail:hiena@mecha.skku.ac.kr)

**성균관대학교 기계공학부(Tel:+82-331-290-7449;Fax:+82-331-295-1937;E-mail:hrchoi@mecha.skku.ac.kr)

Abstract The basic technology of virtual reality can be described as the cognition of the condition change in virtual world by stimulating the visual, auditory, kinesthetic and tactile sensation. Among these, the kinesthetic and tactile sensation is one of the most important things to recognize the interaction. In this paper, it is addressed the haptic device which help the human feel the sense of touch in palmar and dorsal directions. The haptic device consists of two fingerlike parts taken by thumb and index of the operator, and is designed in modular type to expand for five fingers later. The haptic device is driven by tendon and ultrasonic motors located in the wrist part. Each joint is actuated by coupled tendons and adopts more actuator by one than the number of the joints, called 'N+1 type'. The haptic device adopts metamorphic 4-bar linkage structure and the length of linkages, shape and the location of joint displacement sensor are optimized through the analysis.

Keywords haptic device, palmar and dorsal directions, tendon, metamorphic 4-bar, modular

1. 서론

작업을 수행하는 인간의 능력은 지능적인 면보다는 물리적인 힘이나 공간적인 측면에서 많은 제약을 받는다. 인간의 지능을 가지고 인간이 가지고 있는 힘을 증폭시켜서 커다란 힘을 낼 수 있도록 하거나, 또는 아주 작은 공간에서 미세한 작업을 할 수 있게 된다면 지능을 가지고 자율적으로 움직이는 로봇보다 더욱 더 유익한 결과를 가져다 줄 수도 있다[5]. 이와같이 공간적으로 떨어져 있는 물체(remote object)를 대상으로 하는 기술을 원격조작(teleoperation), 가상으로 존재하는 물체(virtual object)에 관한 기술을 가상현실(virtual reality or artificial reality)이라고 하는데, 이 두 기술은 대상물이 실제로 존재하는 물체인가 혹은 컴퓨터상에 시뮬레이션되어 나타내지는 물체인가의 차이만 있을 뿐 조작자측에서는 동일한 개념의 기술을 실현하는 것이므로 이 둘을 통합한 개념으로 원격존재(tele-existence or tele-presence)라는 용어를 사용한다[16].

가상현실의 기본기술은 인간과 기계의 인터페이스(man-machine interface)라고 할 수 있으며 이는 조작자의 의지를 가상환경내의 물체에 전달하고 이로 인한 가상환경내의 상황의 변화를 조작자에게 전달하는 것이다.

인간의 감각중 시각에 관해서는 최근까지 컴퓨터의 발전과 컴퓨터 그래픽스(computer graphics)의 발전에 힘입어 가상환경상에서 다양한 시각적인 이미지를 표현할 수 있는 기술이 발표되어 왔다[10]. 그러나 시각적인 이미지의 전달만으로는 조작자가 상황의 변화를 현실적으로 인식하는데에는 어려움이 있으며 청각, 역각 및 촉각의 전달이 필수적이다. 특히 감각자극중 역각(force feel)과 촉각(tactile feel)은 대상물의 상호작용을 인식하기 위한 가장 중요한 정보중의 하나이다[8].

가상현실을 구현하기 위해서는 가상으로 시뮬레이션되어 컴퓨터상에 존재하는 물체와 환경, 그리고 조작자의 움직임을 가상물체와 가상환경에 전달하고 그것의 상호작용에 대한 정보를 조작자에게 전달하여 주는 감각 전달기구를 필요로 한다.

이중에서 역각 및 촉감을 전달하는 기술을 역/촉감 제시(haptic display)라고 하며, 역각 혹은 촉감의 감지 및 제시에 사용되는 기구를 역/촉감 제시기구(haptic device)라 한다(앞으로 역/촉감 제시기구를 간단히 역각 제시기구라고 하자).

역각 제시기구는 크게 장착형(몰입형)과 비장착형(개방형)으로 나눌 수 있다. 장착형기구는 데이터 글로브브(data glove)처럼 조작자의 신체에 착용하도록 되어있고, 비장착형기구는 조이스틱과 같이 조작자의 손으로 쥐게 되어있는 기구를 말한다. 비장착형기구는 착용으로 인한 이물감이 없고 기구가 간단해지는 반면에 제시할 수 있는 정보에 한계가 있다. 반면에 장착형기구는 궁극적인 역각 제시기구의 형태라고 볼 수 있으나 혁신적인 기구의 개발이 필요하다고 여겨진다.

비장착형중 Cybernet Systems사의 CyberImpact는 6자유도로서 6개의 작은 서보모터를 가지고 기어와 모터의 연결에 의하여 구동된다[1]. Laparoscopic Impulse Engine은 외과수술용 가상현실 시스템에 사용되는 역각 제시 기구이며[6], Berkelman등은 Magnetic Levitation을 이용한 역각 제시기구를 개발하였다[11]. 그밖에 Washington대학의 Buttolo와 Hannaford의 펜타입(pen type)의 역각 제시기구가 있다[12].

대표적인 장착형 역각 제시기구로서는 9자유도의 스투어드 플랫폼(steward platform)을 사용한 Iwata의 역각 제시기구를 들 수 있으며[4], Gomez등의 Rutgers Master II는 조작자의 손바닥에 4개의 공압실린더를 장치한 것이다[2]. 또한 Bergamasco는 텐던(tendon)과 회전스프링으로 구성된 4개의 손가락에 장착할 수 있는 역각 제시기구를 개발하였다[8]. Massie와 Salisbury의 PANToM은 손가락끝에 끼우도록 하여 힘을 제시할 수 있도록 한 것이며[14], Yamamoto등의 SPIDAR(The SSpace Interface Device for Artificial Reality)는 텐던으로 구동되는 3차원 역각 제시기구이다[18].

지금까지의 장착형 역각 제시기구는 대부분 조작자가 가상환경상의 물체를 손가락의 손바닥방향으로 조작할 경우를 고려하여 개발되어왔다. 하지만 가상환경상의 다양한 조작정보를 표시하기 위해서는 손바닥방향의 감각과 더불어 손등방향의 감각이 매우 중요하며, 이에 본 논문에서는 손가락의 손바닥방향으로의 감각과 손등방향으로의 감각을 모두 느끼게 할 수 있도록 양방향으로 제어가 가능한 장착형 역각 제시기구를 개발하려고 한다. 먼저 개발하려고 하는 기구는 엄지와 검지, 두 개의 손가락에 장착할 수 있도록 개발하려고 하며 모듈라 타입으로 설계하여 추후 다섯 손가락으로 확장할 수 있는 구조로 설계될 것이다.

2. 기구부 설계

2.1 사람 손가락의 기구학적 모델링

사람의 손은 많은 뼈와 복잡하게 얽혀진 근육의 집합으로 이루어져 있고, 또한 사람에 따라서 일정하지 않으므로 이를 역감 제시기구에 사상(mapping)시킨다는 것은 어렵다. 따라서 사람의 손을 다음과 같이 간략화하여 이 데이터를 기준으로 역감 제시기구의 기구학적 변수들을 도출하였다. 먼저, 표(1)은 15구의 시신으로부터 시편을 채취하여 사람의 손가락에 대한 평균길이와 표준편차를 계산한 데이터를 나타낸 것이며, 그림(1)은 그와 관련된 사람의 손가락에 좌표축이 설정된 것을 보여준다[3]. 표(1)에서, 엄지손가락의 경우에는 기부의(proximal) 마디의 길이로 정규화(normalize)된 것이고, 검지는 가운데 마디의 길이로 정규화된 것이다.

표 1: 손가락 마디 좌표 간의 거리

	O_1, O_2	O_2, O_3	O_3, O_4	O_4, O_5	O_5, O_6
Thumb	0.243 ± 0.035	1.0 ± 0	0.338 ± 0.042	1.424 ± 0.097	0.333 ± 0.047
Index	0.224 ± 0.034	1.0 ± 0	0.288 ± 0.036	1.919 ± 0.227	0.432 ± 0.058

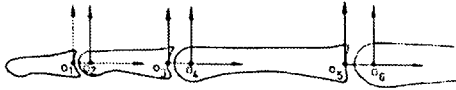


그림 1: 손가락 마디의 좌표

이를 기구학적으로 단순화하여 모델링하기 위하여 뼈 마디사이의 간격과 그에 의한 관절을 간략화하였다. 예를들어, 그림(2)와 같이 검지의 경우 4개의 링크로 구성되며 각 마디사이에는 하나의 회전조인트 갖도록 모델링하였다[13].

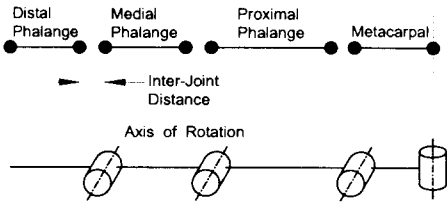


그림 2: 실제 손가락과 기구학적 손가락 모델

검지 손가락의 경우에, 그림(1)에서의 관절 O_2 , O_4 , 그리고 O_6 가 각각 DIP(Distal InterPhalangeal), PIP(Proximal InterPhalangeal), 그리고 MP(Metacarpal)관절로 단순화된 것을 알 수 있다.

각 마디의 길이는 사람손의 뼈 마디자체의 길이와 뼈 마디사이의 간격을 합한 것으로 계산되어진다. 이로부터 계산되어진 간략화된 사람손가락의 마디에 대한 길이를 바탕으로 역감 제시기구의 크기를 결정하였으며, 그 길이는 엄지의 첫번째 마디로부터, 29, 39.78mm이며, 검지는 26, 25.01, 45.64mm이다.

2.2 링크의 구조

역감 제시기구는 다른 기구들과 다르게 조작자의 움직임을 측정함과 동시에 조작자에게 힘을 가해주어야 하므로, 이러한 기구가 가져야 하는 조건은 지금까지의 로봇 메카니즘과는 다르다[15].

본 연구자가 제안하는 역감 제시기구는 조작자가 직접 착용하도록 되어 있으므로 구조적인 형태가 제한될 수 밖에 없다. 각각의 손가락이 자유롭게 움직이며, 기구에 의한 간섭을 최소한으로 하기 위해서, 본 연구에서는 그림(3)에서 보는 것처럼 각각의 손가락위(손가락은 위

로 꺾이지 않으므로)에 착용할 수 있는 변형된 4절링크구조를 제안하였다.

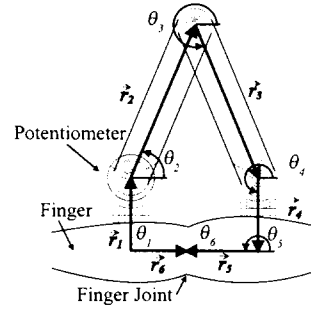


그림 3: 변형된 4절링크 메카니즘

제한된 역감 제시기구에 그림(3)에서 볼 수 있는 것과 같이 각 링크의 길이를 r_i ($i = 1, 2, \dots, 6$)으로 나타내고 링크를 벡터 \vec{r}_i ($i = 1, 2, \dots, 6$)로 모델링하자. 이때 손가락관절의 변위는 θ_5 가 되며 이는 직접 측정할 수 없으므로 \vec{r}_1 과 \vec{r}_2 의 교차점에 센서(potentiometer)를 부착하여 \vec{r}_1 과 \vec{r}_2 사이의 각 θ_2 를 측정하여 간접적으로 θ_5 를 알아내고 있다. θ_2 와 θ_5 의 관계는 그림(3)으로부터 다음과 같이 vector loop equation을 세워 구할 수 있다.

$$\vec{r}_1 + \vec{r}_2 + \vec{r}_3 + \vec{r}_4 + \vec{r}_5 - \vec{r}_6 = 0 \quad (1)$$

여기서 $\vec{r}_i = r_i e^{j\theta_i} = r_i \cos \theta_i + j r_i \sin \theta_i$ ($i = 1, 2, \dots, 6$)이며, 실수부분(real part)과 허수부분(imaginary part)으로 나누어서 계산하고 θ_5 에 관한 관계식을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_5 = & 2 \tan^{-1} [(2r_1 r_5 + 2r_4 r_6 - 2r_2 r_4 \cos \theta_2 + 2r_2 r_5 \sin \theta_2 \\ & + (-r_1^4 - 2r_1^2 r_2^2 - r_2^4 + 2r_1^2 r_3^2 + 2r_2^2 r_3^2 - r_3^4 \\ & + 2r_1^2 r_4^2 - 2r_2^2 r_4^2 + 2r_3^2 r_4^2 - r_4^4 + 2r_1^2 r_5^2 - 2r_2^2 r_5^2 \\ & + 2r_3^2 r_5^2 - 2r_4^2 r_5^2 - r_5^4 - 2r_1^2 r_6^2 - 2r_2^2 r_6^2 + 2r_3^2 r_6^2 \\ & + 2r_4^2 r_6^2 + 2r_5^2 r_6^2 - r_6^4 + 4r_1^2 r_2 r_6 \cos \theta_2 + 4r_3^2 r_6 \cos \theta_2 \\ & - 4r_2 r_3^2 r_6 \cos \theta_2 - 4r_2 r_4^2 r_6 \cos \theta_2 - 4r_2 r_5^2 r_6 \cos \theta_2 \\ & + 4r_2 r_6^3 \cos \theta_2 - 4r_2^2 r_4^2 \cos^2 \theta_2 + 4r_2^2 r_5^2 \cos^2 \theta_2 \\ & - 4r_2^2 r_6^2 \cos^2 \theta_2 - 4r_1^3 r_2 \sin \theta_2 - 4r_1 r_3^3 \sin \theta_2 \\ & + 4r_1 r_2 r_3^2 \sin \theta_2 + 4r_1 r_2 r_4^2 \sin \theta_2 + 4r_1 r_2 r_5^2 \sin \theta_2 \\ & - 4r_1 r_2 r_6^2 \sin \theta_2 + 8r_1 r_2^2 r_6 \cos \theta_2 \sin \theta_2 - 4r_1^2 r_2^2 \sin^2 \theta_2 \\ & + 4r_2^2 r_4^2 \sin^2 \theta_2 + 4r_2^2 r_5^2 \sin^2 \theta_2)^{\frac{1}{2}} \\ & / [(-r_1^2 - r_2^2 + r_3^2 + 2r_1 r_4 - r_4^2 - r_5^2 - 2r_5 r_6 - r_6^2 \\ & + 2r_2 r_5 \cos \theta_2 + 2r_2 r_6 \cos \theta_2 - 2r_1 r_2 \sin \theta_2 \\ & + 2r_2 r_4 \sin \theta_2)] \end{aligned} \quad (2)$$

그림(4)는 검지의 각 관절에 대한 θ_2 와 θ_5 의 관계를 나타낸 것이고, 그림(5)는 앞서 제안된 변형된 4절링크 구조를 가진 역감 제시기구의 개념도이다.

3. 구동부 설계

3.1 각 손가락마디 관절에서의 토크측정

사용목적과 범위에 맞는 역감 제시기구를 설계하기 위해서는 역감 제시기구가 얼마만한 힘을 작용하여야 하는지를 정하여야 한다. 본 연구에서 개발하려는 역감 제시기구는 손에 직접 착용하는 장착형이므로 조작자의 힘의 범위가 역감 제시기구가 작용할 수 있는 힘의 범위내에 포함되어야 한다.

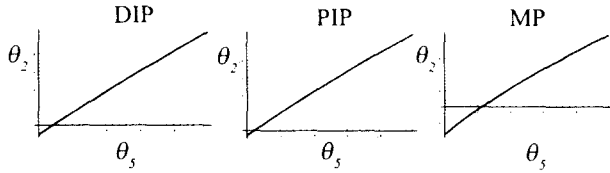


그림 4: 각 관절에서의 θ_2 와 θ_5 에 대한 관계

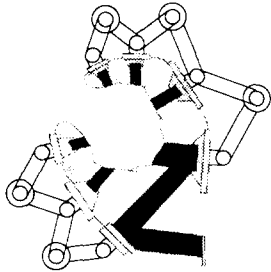


그림 5: 역감 제시기구의 개념도

따라서, 정규화되어있는 데이터를 실제 적용하기 위해서 실제 손가락의 치수를 측정하였으며, 측정하려는 마디외는 움직이지 않도록 고정시키고 각 마디에서 작용할 수 있는 최대 힘을 IMADA사의 push-pull scale (FB30K)로 측정하였다. 측정인원은 총 7명이며 데이터는 산술평균 내었다. 측정값은 최대 작용력이므로 위에서 측정한 실제 손가락의 치수데이터를 가지고 모멘트 방정식으로 각 조인트에서의 최대 모멘트를 계산하였다.

표(2)는 각 관절에서의 토크를 측정후 엄지손가락과 검지손가락에 대한 최대작용력과 토크를 관절별로 구분하여 나타낸 것이다.

표(2)를 기준으로 조작자의 손가락에 전달되는 감각의 크기정도가 정하여 지고, 또한 이것에 의해 역감 제시기구에 사용되는 모터의 용량이 최적화되게 선정되었다.

표 2: 각 관절에서의 힘과 토크

엄지손가락 (Thumb)			
조인트	$F_{max}[Kg_f]$	$M_{max}[Kg_f \cdot cm]$	비고
IP	6.725	9.75	flexion
MCP	10.95	21.78	
TMC	18.5	48.31	adduction
	4.25	39.10	
검지손가락 (Index)			
조인트	$F_{max}[Kg_f]$	$M_{max}[Kg_f \cdot cm]$	비고
DIP	4.7	6.11	flexion
PIP	7.25	9.07	
MP	8	18.26	adduction
	2.55	11.64	

사람이 작용할 수 있는 최대 작용력은 다음과 같지만 실제로 역감 제시기구는 그보다 작은 용량의 모터를 사용하여 조작자가 부리없이 가상현실을 느낄 수 있도록 하였다.

3.2 텐던 구동방식

본 논문에서는 구동모터가 가지는 하중이 조작자에게 미치는 영향을 피하기 위해서 텐던 구동방식을 취하여 원거리에서 구동하도록 하였다. 그림(6)은 검지의 경우 텐던 routing의 예를 보여준다.

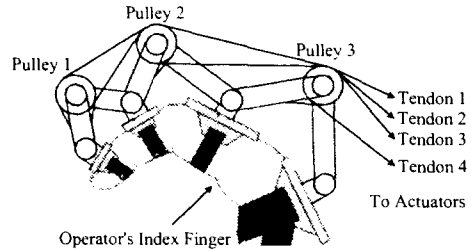


그림 6: 열린 텐던구동을 적용한 역감제시 기구의 검지손가락

n 자유도의 기구가 독립적으로 제어되기 위해서는 적어도 $n+1$ 개의 텐던이 요구된다[7]. 본 논문에서 개발하는 역감 제시기구는 텐던의 구동형식으로 굴신운동(flexion/extension)을 위해서는 $n+1$ type을, 내전/외전(adduction/abduction) 방향의 움직임을 위해서는 $2n$ type을 조합한 방식을 채택하였다. 따라서, 엄지는 3자유도, 검지는 4자유도를 갖게되어 있으므로 각각 5개의 텐던과 6개의 텐던으로 구동되어진다.

일반적으로 m 개의 텐던으로 구동되는 n -자유도 기구에서 텐던의 변위와 관절각의 관계식은 다음과 같이 표시된다.

$$S = A\Theta \quad (3)$$

여기서 $S \in R^m$ 는 텐던의 선형변위를 나타내며, $\Theta \in R^n$ 는 관절각을, $A \in R^{m \times n}$ 는 풀리의 반지름을 포함하는 계수행렬이다.

그림(6)에 나타낸 것과 같이 검지손가락의 굴신운동을 하는 부분의 경우 1개의 관절에 피봇(pivot)되어있는 모든 풀리들의 반지름이 같고 i 번째 풀리의 반지름을 p_i ($i = 1, 2, 3$)라고 하면 텐던이 감긴 방향에 따라서 A 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} -p_1 & -p_2 & -p_3 \\ p_1 & -p_2 & -p_3 \\ 0 & p_2 & -p_3 \\ 0 & 0 & p_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(3)을 다시 표현하면,

$$S = BP\Theta \quad (5)$$

이 되며, 여기서, $B \in R^{m \times n}$ 는 텐던의 감긴방향에 따라 $-1, 0, +1$ 로 정해지는 원소들로 구성된 행렬, $P \in R^{n \times n}$ 은 대각선 원소들이 풀리의 반지름을 나타내는 대각행렬이다. 검지의 경우의 예를 들어보면,

$$B^T = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 \end{bmatrix}$$

과 같이 된다. 또한, 텐던에 작용하는 힘 $F \in R^m$ 와 관절토크 $\tau \in R^n$ 의 관계는 가상일의 원리(principle of virtual work)로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\tau = (BP)^T F \quad (6)$$

식(6)으로부터 텐던에 작용하는 힘 F 를 구하면,

$$F = \{(BP)^T\}^+ \tau + [I - \{(BP)^T\}^+] F_0 \quad (7)$$

여기서, $(\cdot)^+$ 는 (\cdot) 의 의사역행렬(pseudoinverse of matrix)을 나타내며, $F_0 \in R^m$ 는 임의의 상수벡터를, $I - \{(BP)^T\}^+$ 는 관절토크에 영향을 주지않는 널공간(null space)의 장력조합이다.

4. 제어기 설계

개발중인 역감 제시기구는 각 손가락관절에 역감을 전달시켜 주기 위한 구동원으로 초음파 모터(ultrasonic motor, USR30-E3)를 사용하도록 하였으며, 각 관절에 작용되는 토크를 제어하기 위해서 텐던과 링크의 결합위치에 장력측정센서를 부착하였다. 이 장력측정센서는 스트레인 게이지(strain gauge)를 이용한 것으로 여기에서 발생한 신호로써 초음파 모터의 토크출력을 제어하게 된다. 또한, 그림(3)에서 보였던것처럼 각 링크의 말단에 위치센서로써 포텐서미터(potentiometer, FCP12A)를 부착하여 위치제어에 사용할 수 있도록 하였다. 그림(7)은 전체적인 제어 시스템의 개요를 나타내며, 그림(8)은 저차원 제어 알고리즘의 블럭 다이어그램을 나타낸다.

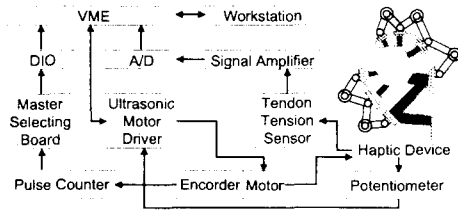


그림 7: 1-링크의 Control System

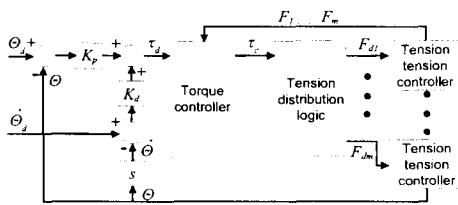


그림 8: 저차원 제어기의 블럭 다이어그램

5. 결론

역감 제시기구를 통한 가상물체 및 가상환경의 인식에 있어서, 손가락의 손등방향으로의 접촉은 매우 중요한 의미를 갖지만 구조적인 복잡성등의 문제로 인하여 쉽게 간략화하여 설계되어 왔다. 본 연구자는 이에 변형된 4절기구를 제안하고, 이것으로 인하여 양방향으로 모두 접촉의 인식이 가능한 기구를 설계하였다. 제안된 기구는 조작자의 손등에 부착하게 설계되어 있으므로 기구간의 간섭이 생기지 않으며 조작이 편리하도록 되어있다. 텐던구동 기구의 경우 원거리에서 구동원이 결합되어져있는 관계로 모터에서 토크가 발생되더라도 텐던 자체의 강성(stiffness)등의 영향으로 인하여 많은 문제가 야기되었으나, 장력을 바로 관절에서 측정함으로써 보다 용이한 제어를 가능하게 하였다. 또한, 링크의 관절에 위치센서를 부착하여 사람의 손가락 관절의 회전각을 정확하게 계산할 수 있게 하였다.

참고문헌

- [1] Cybernet Systems Co., *Company brochure*, Ann Arbor, MI, 1995.
- [2] D. Gomez, G. Burdea, and N. Langrana, "Integration of the Rutgers Master II in a Virtual Reality Simulation," *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium(VRAIS)*, pp. 198-202, 1995.
- [3] E. Y. S. Chao, K. An, W. P. Cooney III, and R. L. Linscheid, *Biomechanics of the Hand*, World Scientific, 1989.

- [4] H. Iwata, "Artificial Reality with Force-feedback," *ACM Computer Graphics*, Vol. 24, no. 4, pp. 165-170, 1990.
- [5] H. Kazerooni, "Human-Robot Interface via the Transfer of Power and Information Signals," *IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics*, Vol. 20, No. 2, pp. 450-463, 1990.
- [6] Immersion Co., "Laparoscopic Impulse Engine," *Company brochure*, Santa Clara, CA, 2pp. 1995.
- [7] L. Tsai, "Design of Tendon-Driven Manipulators," *Trans. ASME Special 50th Anniversary Design issue*, Vol. 117, pp. 80-86, 1995.
- [8] M. Bergamasco, "Force Replication to the Human Operator: The Development of Arm and Hand Exoskeletons as Haptic Interfaces," *Robotics Research: The Seventh International Symposium*(Springer-Verlag London Ltd.), pp. 173-182, 1996.
- [9] M. Driels, and L. Y. Turkegeneci, "Selective Backdriveability and Its Application to a Robotic Finger Design," *Trans. ASME J. Mechanical Design*, Vol. 116, pp. 44-46, 1994.
- [10] O. Renault, N. Magnenat-Thalmann, and D. Thalmann, "A Vision-based Approach to Behavioural Animation," *J. Visualization and Computer Animation*, Vol. 1, No. 1, pp. 18-21, 1990.
- [11] P. J. Berkelman, Z. J. Butler, and R. Hollis, "Design of a Hemispherical Magnetic Levitation Haptic Interface Device," *Proc. ASME Dynamics Systems and Control Division*, DSC-Vol. 58, pp. 483-488, 1996.
- [12] P. Buttolo, and B. Hannaford, "Pen-Based Force Display for Precision Manipulation in Virtual Environments," *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium(VRAIS)*, pp. 217-224, 1995.
- [13] R. N. Rohling, and J. M. Hollerbach, "Calibrating the Human Hand for Haptic Interfaces," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.2, No.4, pp. 281-296, 1993.
- [14] T. Massie, and K. Salisbury, "The PANToM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects," *ASME Winter Annual Meeting*, DSC-Vol. 55-1, pp. 295-300, 1994.
- [15] V. Hayward, and O. R. Astley, "Performance measures for Haptic Interfaces," *Robotics Research: The Seventh International Symposium*(Springer-Verlag London Ltd.), pp.195-205, 1996.
- [16] W. A. Aviles, "Telerobotic Remote Presence: Achievements and Challenger," *Proc. of Engineering Foundation and NASA Conf. on Human Machine Interface for Teleoperators and Virtual Environment*, Santa Barbara, CA., U.S.A., 1990.
- [17] W. T. Townsend, "The Effect of Transmission Design on Force - Controlled Manipulator Performance," *MIT Artificial Intelligence Lab. Technical Report 1054*, 1988.
- [18] Y. Yamamoto, M. Ishii, R. Takamatsu, and M. Sato, "A Virtual Collaborative Workspace with Force Sensation," *10th Symposium on Human Interface*, pp. 203-206, 1994.