

## 가상 물체와 정확한 상호작용을 위한 개선된 손가락 굽힘각 측정

왕혁\*, 황선욱\*, 이용구\*\*

### Improved Finger Bending Angles Measurements for Accurate Interactions with Virtual Objects

Hyuk Wang\*, Sun-Uk Hwang\* and Yong-Gu Lee\*\*

#### ABSTRACT

Various virtual gloves have been developed for the past four decades. These gloves have sensors that can measure bending angles at finger joints and the positions as well as orientations of hands. Previous researches were mostly concentrated on utilizing different kinds of sensors. As the technology matured, more interests are given towards building virtual reality applications. Furthermore, due to the recent reduction of costs, these devices have been widely adopted. Our particular interest lies in three-dimensional applications where virtual objects are grasped and manipulated. For these applications, it is crucial to accurately measure finger joints angles for realistic object interactions with the virtual hand. With inaccurate measurements, virtual hands would penetrate inside virtual objects after they are grasped. Or alternatively, virtual objects would be grasped before hands are making any contacts with virtual objects. In this paper, we introduce new design of virtual gloves for improved finger joints measurements.

**Key words** : Virtual Gloves, Flex (bend) sensors, Virtual Reality, Human-Computer Interface

#### 1. 서 론

인간의 손은 인간의 진화에 밀접한 관련을 가지고 있으며, 이러한 인간의 손은 엄지와 검지가 마주보고 있어 물건을 자유롭게 집을 수 있고, 정교한 손놀림이 가능한 장점을 가지고 있다. 인체 감각기관의 3분의 1이 집중된 손을 통해 인간은 자연계의 수많은 정보들을 받아들일 수 있었고, 뛰어난 '창조' 능력을 바탕으로 새로운 문제가 생겼을 때 도구를 개발하여 이러한 문제들을 끊임없이 해결해나오게 되었다<sup>[1]</sup>.

가상 공간 상에서 가상의 물체를 조작하기 위해서도 손의 역할 역시 매우 중요하다. 현실 세계에서 손으로 물체를 조작하는 것과 동일하게 가상 공간 상의 물체를 조작할 수 있어야만, 물체의 특징이나 성질들을 파악하는 것이 훨씬 용이해진다. 이러한 현실 세계

에서의 손의 움직임을 가상 공간 상에 정확히 나타내기 위해서는 손의 공간상의 위치와 회전에 관한 정확한 정보(손 위치 추적 기술)와 손가락의 각 관점에서 굽힘 각이 요구된다.

1970년대 MIT에서 Polhemus 사의 3-SPACE 자기 추적장치(Magnetic tracker)를 사용한 핸드 모션의 직접 해석을 시초로 본다<sup>[2]</sup>. 이후로 손 위치 추적 기술은 광학식(Optical tracking), 자기식<sup>[6]</sup>, 음향식(Acoustic tracking)<sup>[7]</sup> 등이 개발되었다. 광학식으로는 표적 시스템(Marker systems)<sup>[3]</sup>, 윤곽 분석(Silhouette analysis)<sup>[4,5]</sup>이 있다.

손가락 굽힘 정보가 요구되는 잠각 기술은 1980년대에 본격적으로 시작되었다. 1987년에 10개의 손가락의 굽힘과 6자유도 기반의 DataGlove<sup>[8]</sup>가 개발되었다. DataGlove는 세계에서 가장 널리 사용되었으며, 카메라 기반의 한계를 극복하고 실시간 동작이 가능한 장치였다. DataGlove에는 10개의 굽힘 센서가 손등에 부착되었고, 3-SPACE 자기 추적장치<sup>[9]</sup>가 손등에 부착되어 손바닥의 위치와 회전을 측정하였다. Dexterous HandMaster<sup>[10]</sup>는 Utah/MIT Dexterous Hand

\*학생회원, 광주과학기술원 기전공학과  
\*\*교신저자, 정회원, 광주과학기술원 기전공학과  
- 논문투고일: 2007. 10. 04  
- 논문수정일: 2008. 06. 02  
- 심사완료일: 2008. 06. 03

robot hand의 주 조종 장치로서 개발되었으나, 1989년에 홀 센서를 부착하여 손의 20자유도를 측정할 수 있는 외골격(Exoskeleton) 장치로 개발되었다. Power-Glove는 닌텐도의 가정용 비디오 게임 조종 장치로서 저가형 가상 장갑이었다<sup>[11]</sup>. 이것은 손등에 굽힘 센서를 부착하였고, 음향 추적장치를 통해 손 위치 추적을 하였다. 1990년대에 개발된 CyberGlove<sup>®</sup><sup>[12]</sup>는 가장 정밀하고 정확하면서, 사용하기 쉽고 편안한 장치이다. 손등에 부착된 18개 또는 22개의 굽힘 센서에 의해 손가락의 굽힘 정보가 전달되고, 3-SPACE 자기 추적장치를 통해 손의 위치 정보가 전달된다.

최근의 장갑 기반의 입력장치는 하드웨어 개발보다는 개발된 하드웨어를 바탕으로 응용하는 것을 강화하고 있는 추세이다. 그 대표적인 예로써, 물체 집기(Hand grasping)와 손 자세(Hand posture)<sup>[13]</sup> 등이 있다. 물체 집기는 감아 쥐기 동작(Power grip)과 정밀한 집기 동작(Precision grip)에 대한 각각의 힘의 분포를 분석하여, 이를 통해 가상공간 상에서 쥐는 과정 또는 조작 과정에서 힘의 영향을 좀 더 상세하게 알 수 있게 해준다. SensorGlove MKIII<sup>[14]</sup>는 악력(Grasping force)을 측정하기 위해 개발이 되었으며, 이것은 연성 인쇄회로기판(FPCB-flexible print circuit board)에 압력 분포를 측정하는 센서가 부착되어 악력을 측정하였다. 손 자세는 다양한 물체를 가상공간 상에서 잡았을 때의 손 자세값을 분석하여 여러 분야에 활용하는 것이다. Sensorised Glove는 가상 물체를 잡는 손 자세(Hand Posture) 분석을 위해 개발되었다<sup>[15]</sup>.

지난 40년 동안 장갑 기반의 입력 장치는 많은 개발이 되었다. 그 중에서 굽힘 센서를 사용한 가상 장갑은 다른 센서들에 비해 저렴하고, 주위 환경의 변화에 대한 영향을 거의 받지 않는 장점이 있어, 근래에 손가락 굽힘 정보 측정을 위해 가장 널리 사용되고 있다. 하지만, 여기서 흥미로운 점은 대부분의 장갑 기반의 입력 장치는 손가락 각 관절의 굽힘 각을 측정하기 위한 굽힘 센서가 손등에 부착되었다는 점이다. 이것은 손등과 손바닥의 굽힘 각이 일정할 것이라는 가정에 기반한 것이다.

실제 사람의 손가락 굽힘은 피부 내부의 뼈와 관절에 의해 이루어지는 각도로 결정된다. 하지만, 실제로 측정을 해보면, 손가락의 굽힘 각이 손등과 손바닥을 기준으로 할 때, 서로 다르다는 것을 알 수 있다. 이것은 기존의 손바닥이 아닌 손등에 굽힘 센서를 부착하는 것이 모순되었음을 의미한다.

손등과 손바닥의 굽힘 각을 측정하면, 각이 서로 틀린 것을 알 수 있으며, 물체를 쥐거나 조작하는 경우

에 가장 먼저 접촉하는 것은 손바닥의 마디 또는 관절이다. 그러므로, 물체를 쥐는 경우에는 센서를 손바닥에 부착시키는 것이, 가상 공간 상에 표현된 가상 손과 가상 물체와의 상호 작용을 더욱 정확히 할 수 있을 것이다. 상업용으로 판매되고 있는 CyberGlove<sup>®</sup>로 가상 물체를 쥌 때에도, Fig. 1과 같이 3차원 가상 공간에 구현된 원통을 쥐기 위해서는 엄지와 검지가 표면을 통과했을 때, 쥐어진 것으로 인식된 것을 볼 수 있다. 굽힘 센서의 위치에 따라, 가상 물체와 가상 손 사이에 부정확한 접촉이나 통과하는 문제가 발생하고 있는 것이다.

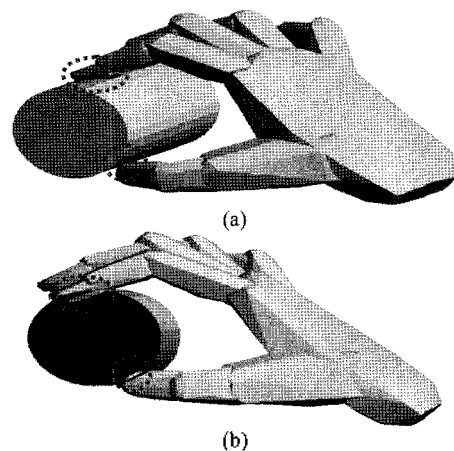


Fig. 1. Virtual hand penetrating into the cylinder when grasping the virtual object.

Fig. 2에서 proximal interphalangeal joint(PIP)의 손바닥 굽힘 각이 손등보다 작은 것을 볼 수 있고( $35^\circ < 42^\circ$ ), 반대로 distal interphalangeal joint(DIP)는 손바닥의 굽힘 각이 더 큰 것을 볼 수 있다( $28^\circ > 18^\circ$ ).

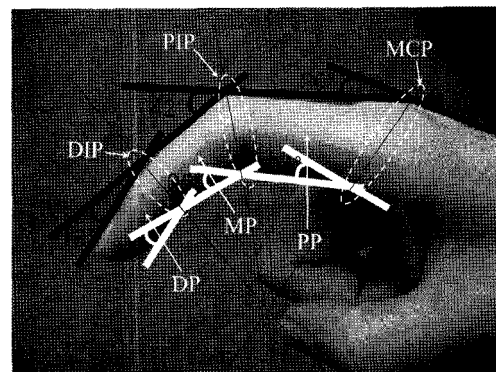


Fig. 2. The measurements of real angles on the back and at the palm.

Fig. 2의 각과 손가락 마디 길이를 이용해서, metacarpophalangeal joint(MCP)를 같은 위치(Fig. 3에서 왼쪽으로 표시된 부분)에 두고 표현하면 아래 Fig. 3에서 보듯이 손가락 마디의 오차를 확인할 수 있다. 참고로, 손가락 마디 길이는 성인 남성의 평균 길이를 사용하였고, 그 값은 Table 1과 같다.

Table 1. Lengths of phalanges

	Index finger
Distal phalanx	2.5 cm
Middle phalanx	2.5 cm
Proximal phalanx	4.5 cm

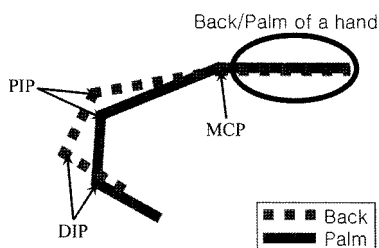


Fig. 3. Bending angle differences between the back and palm of finger joints in a virtual space.

Fig. 3의 점선은 Fig. 2에서 측정된 손등의 굽힘 각을 기준으로 하였고, 실선은 손바닥의 굽힘 각을 기준으로 하였다. PIP는 손바닥의 각도가 작으므로 손등보다 더 굽혀진 형태이고, DIP는 손바닥의 각도가 크므로 손등보다 퍼져있는 모습이 된다.

본 논문에서는 손등보다 손바닥에 굽힘 센서를 부착하였을 경우, 손바닥으로 접촉하는 응용 예에서 오차가 감소한다는 것을 실험을 통해 증명해 볼 것이다.

## 2. 실험 원리

본 논문에서는 전체 손가락이 아닌 집게 손가락의 굽힘 각도 측정을 통해 실험을 실시하였다.

Fig. 4는 집게 손가락을 골격(skeleton) 모델을 사용하여 3개의 관절과 3개의 마디(phalanx)로 구성한 것이다. 이를 바탕으로 회전된 관절을 3개 가지는 구조물의 손끝 위치(x, y)와 관절 각도  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 의 기하학적인 조건은 아래 식과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 x &= l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
 y &= l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

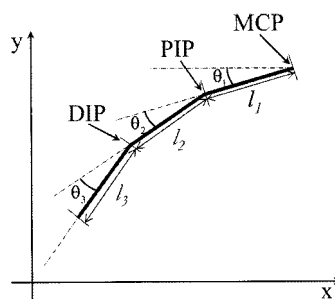


Fig. 4. Kinematics of a finger.

식 (1)에서  $\theta_1$ 은 MCP의 각,  $\theta_2$ 는 PIP의 각,  $\theta_3$ 는 DIP의 각을 각각 나타내고,  $l_1$ 은 proximal phalanx(PP)의 길이,  $l_2$ 는 middle phalanx(MP)의 길이,  $l_3$ 는 distal phalanx(DP)의 길이를 나타낸다. 각각의 관절의 위치는 순운동학(forward kinematics)을 통해 쉽게 구할 수 있다.

Fig. 5는 관절의 굽힘 각 측정을 위해 자체 제작한 가상 장갑이며, (a)는 굽힘 센서가 손등에 부착되어 있고, (b)는 손바닥에, (c)는 집게 손가락의 손등과 손바닥에 동시에 부착되어 출력값 비교를 위해 사용된다.

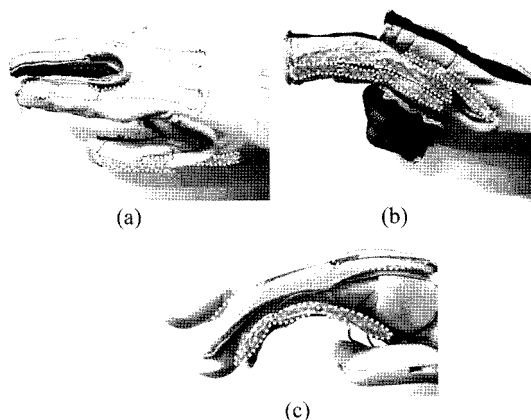


Fig. 5. Flex sensor attached to each joint (a) VirtualGlove Type B (VGlove B) with sensors attached on the back (b) VirtualGlove Type P (VGlove P) with sensors attached at the palm (c) VirtualGlove Type BP (VGlove BP) with sensors attached on the back and at the palm (the flex sensors attached are highlighted with dotted lines).

자체 제작한 VirtualGlove는 엄지의 interphalangeal joint(IP)와 MCP를 측정하기 위해 2개의 센서가 부착되었고, 엄지의 회전을 측정하기 위한 센서 미부착, 집지와 중지의 DIP, PIP, MCP를 측정하기 위해 각각 3

개의 센서가 부착되었다. 또한, 엄지와 검지 사이, 검지와 중지 사이의 외전(abduction) 측정을 위해 각각 1개의 센서가 부착되었고, 손목의 회전(ulnar deviation 또는 radial deviation)과 굽힘(extension 또는 flexion) 측정을 위해 각각 1개의 센서가 부착되어, 총 12개의 센서가 부착되었다. 이 중, 실험에는 검지의 3개의 센서가 사용되었다.

상용 제품인 CyberGlove®는 총 18개 또는 22개의 센서가 부착된 2종류의 제품이 있으나, 우리가 보유한 것은 18개 센서가 부착된 것으로써, 각 손가락에 2개씩, 엄지 손가락 회전 측정 센서 1개, 외전 측정 센서 5개(엄지와 검지 사이, 검지와 중지 사이, 중지과 약지 사이, 약지와 소지 사이, 손바닥), 손목의 회전과 굽힘 측정을 위해 각 1개로, 총 18개이다.

관절의 굽힘은 굽힘 센서의 저항이 변화하면서 전압이 변하게 되고, 이 전압이 DSP MCU(Micro Controller Unit)에 입력되어 변환과정을 거치게 된다. DSP MCU를 통해 출력되는 디지털 값들은 아래의 식 (2)를 통해 각도로 변환되게 된다.

Angle

$$=Gain(x) \times (Digital\ ADC\ value - Offset) [radian](2)$$

이득(Gain)과 오프셋(offset) 값은 소프트웨어에서 직접 설정해주는 값이며, 각각은 선형 방정식의 기울기와 y절편을 의미한다. 오프셋은 손가락을 모두 편 기준 상태에서의 값으로 정하였고, Gain은 굽혀진 손가락의 각도를 ADC(Analog to Digital Converter) 값(value)의 변화량으로 나눈 값이다. ADC 값의 단위는 모두 전압값(0~3.3 V)이 디지털 신호인 0~409의 사이의 값으로 변환된 것이다. DIP의 센서의 경우, 0°~90°로 굽혀질 때 전압값이 0.573~1.22453 V가 나오며, 이를 디지털 신호로 변환하면 71~151이 된다.

Fig. 6은 자체 제작한 VirtualGlove의 굽힘 센서의 성능을 확인하기 위해 CyberGlove®의 굽힘 센서와 비교를 한 실험 결과 그래프이다. 비교 실험에 앞서 VirtualGlove는 CyberGlove®와 달리 DIP의 각도를 측정하기 위한 센서를 부착하였다. 우리가 보유한 CyberGlove®의 센서 개수는 22개가 아닌 18개이며, DIP의 굽힘 각 측정을 위한 센서가 없다. Fig. 6(a)와 (b)는 Fig. 6(c)와 같은 손 모양으로 각각 VirtualGlove와 CyberGlove®를 착용하고 측정한 ADC 값이다. ADC의 측정 실험은 손가락을 완전히 편 상태에서 Fig. 6(c)와 같이 각 마디 별로 순차적으로 굽히는 과정으로 진행하였다.

비록, 우리가 보유한 CyberGlove®로 DIP의 측정

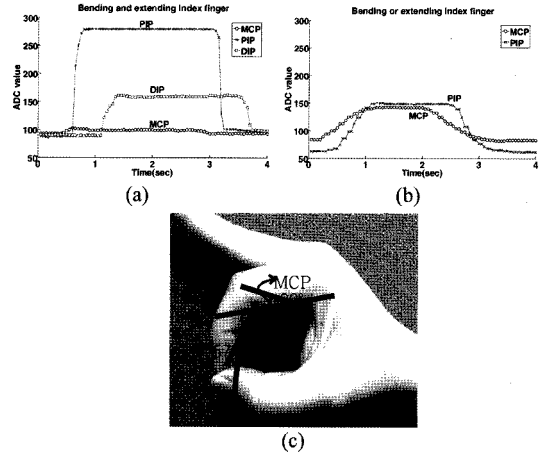


Fig. 6. ADC value of Virtual glove and CyberGlove® when bending or extending the index finger (a) Measurement data for three joints (MCP, PIP, DIP) of the index finger when wearing VGlove P (b) Measurement data for two joints (MCP, PIP) of the index finger when wearing CyberGlove® (c) Actual bending motion of a finger.

은 불가능하지만, Fig. 6의 (a)와 (b)에 나타난 ADC 측정값의 출력 형태가 CyberGlove® 센서의 변화 추이와 크게 차이가 나지 않는 것을 볼 수 있다. 처음 MCP를 굽히고, 0.3초 후에 PIP, 다시 0.5초 후에 DIP를 순차적으로 굽혀보았을 때, ADC 출력값이 곧바로 반응을 하여 값이 상승하였으며, 손가락을 Fig. 6(c)와 같이 유지한 상태에서 ADC 출력값이 요동치지 않고 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 손가락을 순차적으로 펴갈 때에도, ADC 출력값이 곧바로 떨어져서 다시 안정적인 상태로 돌아왔음을 볼 수 있다.

이는 자체 제작한 VirtualGlove의 응답속도와 안정성이 CyberGlove®와 비슷하며, 오히려 굽힘에 대한 응답속도는 0.2~0.3초 빠른 것을 볼 수 있다.

Table 2. Bent value, extended value and gain when bending the index finger with VirtualGlove and CyberGlove® (Unit: 0.008 V/ADC value)

	Sensor position	Max. Value	Min Value	Max-Min	Gain
Virtual glove (Palm)	MCP	99.4752	93	6.4752	3.40
	PIP	279.9406	88	191.9406	0.297
	DIP	159.4257	89	70.4257	0.298
Cyber-glove® (Back)	MCP	142.2517	108	34.2517	0.64
	PIP	148.7285	72	76.7285	0.74

Table 2는 Fig. 6의 데이터를 바탕으로 굽힘 값과 편 값을 구한 것이며, 굽힘 값은 손가락을 굽혔을 때 출력 신호의 산술 평균값이다. 마찬가지로 편 값도 손가락을 뺐을 때 출력 신호의 산술 평균값이다. 손가락 각각의 굽힘 각을 센서의(Max-Min) 값으로 나눈 값이 이득의 값이고, 오프셋은 최소값이다. 이렇게 구해진 각도는 OpenGL™<sup>16)</sup>을 통해 컴퓨터 화면에 가상 손을 재구성하게 된다.

### 3. 하드웨어 구성

굽힘 센서(Flexpoint Sensor Systems, Inc.)는 센서의 굽힘에 비례하여 저항이 변하는 센서이다. 실험에 사용한 센서의 두께는 0.125 mm이고, 너비는 7.1 mm이다. 센서는 길이에 따라 3가지 종류로 나눌 수 있으며, 각각은 25.4 mm, 50.8 mm, 76.2 mm이다. 기본 저항은 25.4 mm는 8 kΩ, 50.8 mm는 21 kΩ, 76.2 mm는 29 kΩ이다. 굽힘 각도 변화에 따른 저항의 변화는 0~90° 굽혔을 때, 25.4 mm가 210 kΩ 정도(센서의 굽혀지는 부분이 위호를 그리며 굽혀지지 않고, 거의 직각 모양으로 굽혀져서 값이 큼), 50.8 mm는 59 kΩ 정도, 76.2 mm가 40 kΩ 정도이고, 굽힘 각도가 계속 증가하면 최대 500 kΩ 이상 증가한다.

Fig. 7은 굽힘 센서의 회로도이고, V+는 소스 전압으로서 3.3 V가 공급된다. R<sub>M</sub>은 요구되는 변형 감도 범위를 최대화하고, 전류를 제한하기 위한 저항이다. 저항 R<sub>M</sub>의 변화는 굽혀진 각도의 정밀성과 관련된 것으로, 저항이 낮을수록 같은 각도 범위 내에서 더 넓은 범위의 ADC 값을 얻을 수 있다. 예를 들어, 손가락의 굽힘 각도 범위가 큰 경우에는 큰 저항을 사용하여야 하고, 굽힘 각도 범위가 작은 경우에는 작은 저항을 사용하면 된다.

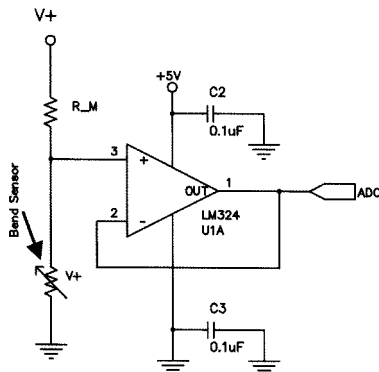


Fig. 7. The part of flex sensor circuit in VirtualGlove Control Unit (VCU).

적합한 R<sub>M</sub> 값이 정해지면, 식 (3)을 통해서 출력 전압값을 알아내서 ADC 값을 계산할 수 있다<sup>[7,18]</sup>.

식 (3)에서 V+는 3.3 V, R<sub>M</sub>은 100 kΩ으로 설정하고, R<sub>sensor</sub>의 범위가 50.8 mm의 경우 각도가 0°~90°로 변할 때 저항이 21~59 kΩ이므로, 출력 전압은 0.573 V~1.22453 V가 된다. 이 아날로그 전압이 MCU에 입력되어 디지털 신호로 출력이 되는데, 그 값의 범위는 0~3.3 V가 0~409으로 변환되게 되며, 즉, 0.573 V~1.22453 V는 71~151로 출력되어야 한다.

$$V_{out} = \frac{V+}{1 + \frac{R_M}{R_{sensor}}} \quad (3)$$

실험을 통해 측정된 값의 범위가 71~159이므로 측정 오차를 감안하면, 이론값과 실험값이 거의 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이렇게 센서의 저항이 정해져서 일정하게 값이 출력되면, 센서에서 출력되는 값을 통해 손가락의 굽힘 각도를 유추할 수 있다.

Fig. 8은 실험에서 사용할 25.4 mm와 50.8 mm 센서의 굽힘 각도 변화에 따른 ADC 출력값을 측정하여 나타낸 것으로서, 출력값이 굽힘각에 비례하여 선형적으로 증가 또는 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 VirtualGlove Control Unit(VCU)의 개략도이다. 각각의 굽힘 센서로부터 들어오는 아날로그

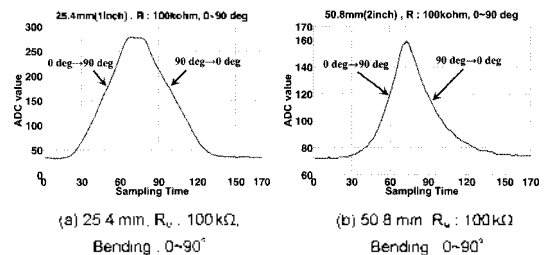


Fig. 8. Change of the ADC value with respect to the time when the bending angle varies from 0° to 90° with 25.4 mm and 50.8 mm length flex sensors (50 ms/ Sampling).

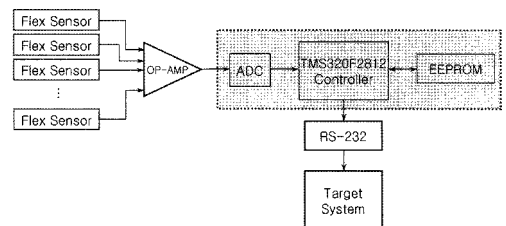


Fig. 9. Schematic diagram of VirtualGlove Control Unit (VCU).

신호는 TMS320F2812 DSP MCU에 의해 디지털 신호로 변환된다. 이 원시 신호는 DSP 내부에 프로그래밍된 필터를 통해 신호 처리되어, 직렬 통신으로 컴퓨터에 전달되어 3차원의 손 모델을 그리게 된다.

### 4. 실험 결과

#### 4.1 실험 계획

실험은 굽힘 센서를 손등과 손바닥에 부착시켜서 수행하였다. Fig. 10은 실험에 사용한 장비의 모습이다.

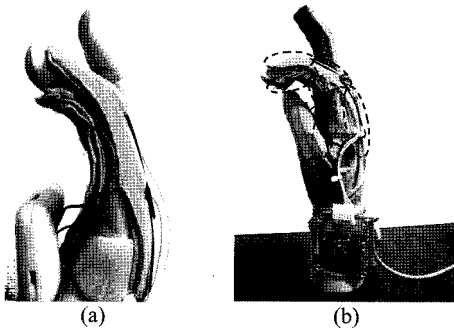


Fig. 10. Experimental setup (a) Three sensors attached to back and palm of the finger to compare the bending angle difference (b) Glove with sensor attached (the flex sensors attached are highlighted with dotted lines).

Fig. 10(a)는 손등과 손바닥에 각도 차이를 비교하기 위해 양쪽 면에 센서를 각각 3개씩 부착시킨 측정장치(VGlove BP)의 모습이다. 이 장치는 검지에 착용되어 각도 차이를 비교할 것이며, 쥐기 위해 필요한 엄지와 손의 위치 측정을 위해 Fig. 5(a)의 VGlove

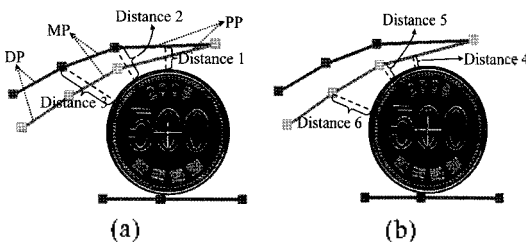


Fig. 11. Distance error between the coin center and each phalanx with the flex sensors located at the palm and on the back of a hand. (Distance 1 & 4 : between PP and coin center, Distance 2 & 5 : between MP and coin center, Distance 3 & 6 : between DP and coin center) (a) Distance error with sensors at the palm of a hand (b) Distance error with sensors on the back of a hand.

B와 결합시킨 모습이 Fig. 10(b)이다.

총 8개의 센서 데이터 - 검지의 손등에 3개의 센서 데이터와 손바닥에 3개의 센서 데이터, 엄지의 2개의 센서 데이터 -는 VCU를 통해 컴퓨터로 전달되어, Fig. 11의 손가락 골격 모델(finger skeleton model)로 재구성된 1개의 엄지(동전 하단)와 2개의 검지(동전 상단) - 손등과 손바닥 센서 -를 표현하게 된다.

센서의 부착 위치에 따른 오차는 측정각의 오차로 인해 발생하며, 이로 인해 물체를 쥌 때에 물체 표면과 닿게 되는 각 마디에서도 오차가 발생하게 된다.

Fig. 11은 손 등과 손 바닥의 각도 오차에 의해 발생하는 손가락의 각 마디와 동전 중심과의 거리 오차 측정 방법을 보여주고 있다. 동전의 중심에서 마디에 수선을 내려 동전의 반지름을 제외한 거리가 최소 거리 오차가 된다.

Fig. 11의 (a)와 (b)에서 PP의 경우에는 동전의 중심으로부터 내려진 수선이 마디와 접촉하게 되지만, MP와 DP는 수선이 마디와 접촉하지 않는다. 이러한 경우에는 동전 중심으로부터 MP와 DP의 각 관절과의 최소 거리를 사용하게 된다.

이렇게 구해진 최소 거리는 손바닥과 손등에 부착된 센서 위치에 따라 각도 오차가 발생하게 되고, Fig. 11의 동전과의 접촉면도 차이를 나타내게 된다.

#### 4.2 동전 직경에 따른 오차 분석

Fig. 12는 Fig. 6(c)의 모양으로 손가락을 굽히갈 때, 발생하는 여러 오차들을 나타내고 있다.

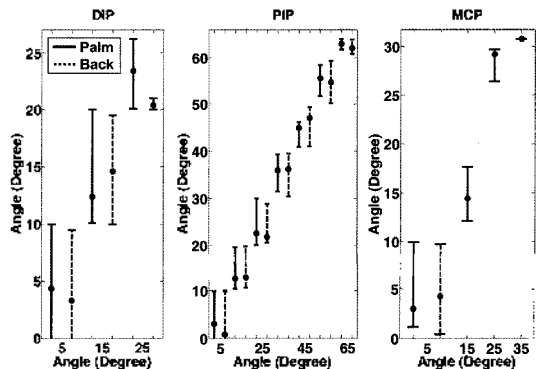


Fig. 12. Comparison of measured bending angle at each joint with respect to the real bending angle of a finger (back, palm). For back case, bending angle of MCP could be measured only at 5 degrees.

Fig. 12는 각각 VirtualGlove(실선)와 CyberGlove®(점선)를 착용하고 측정한, 손등과 손바닥 관절에서의 각도 변화를 보여주고 있다. 가로축은 굽힌 손가락의

실제 각도를 사노기를 이용하여 직접 측정했을 때의 각도이고, 세로축은 각 장각 기반 입력상치의 각도를 표현하고 있다. 가로축은 5° 부터 시작하여 매 10° 단위의 각도마다 Back과 Palm의 2종류의 값을 표현하고 있다. 예외적으로 MCP의 경우에만 15°부터 Palm의 값만이 표현되었는데, 이는 손등의 굽힘이 손바닥에 비해 거의 굽힘이 이루어지지 않았기 때문이다. 두 그래프를 비교하였을 때, VirtualGlove에 의해 측정된 각도가 실제 손가락의 굽힘 각도에 더 근접하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. Fig. 13은 각 손가락 마디와 동전의 중심과의 거리 오차를 보여주고 있다. Fig. 13을 보면, 손바닥의 센서가 Fig. 6(c)의 모양으로 굽혀서 동전을 쥐었을 때, 거리 차이가 0에 가까운 것을 볼 수 있으며, 이는 손등 센서에 비해 오차가 작게 나타난 것을 볼 수 있다.

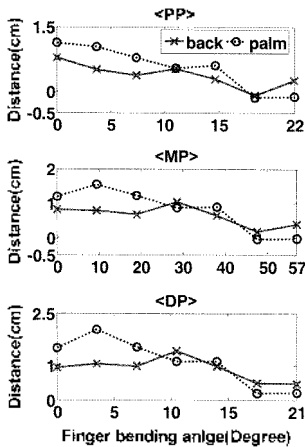


Fig. 13. Variance of the distance error between the coin center and phalanges while bending the finger with respect to the flex sensor location.

Fig. 14는 동전의 직경을 달리하여, 각 마디와의 거리 오차를 측정해 본 결과이다.

앞에서의 실험들은 동전의 직경이 2.75 cm일 때를 기준으로 하였고, Fig. 14에서는 직경을 2 cm부터 6 cm까지 변화시킨 후, 쥐기를 시도해보았다.

여기서 주목할 점은 동전의 직경이 5.2 cm 이상에서 손등 센서의 거리 오차가 0에서 크게 벗어나 음수 값을 가지는 것이다. 거리 오차에서 음수 값의 의미는 동전을 통과했다는 것이다. 즉, 손바닥 센서에 의해 구형되는 마디가 동전의 표면에 접촉한 것을 기준으로 할 때, 손등 센서에 의해 구성되는 손가락 마디는 동전을 통과하여 동전 인쪽에 위치하고 있다는 것이다. 물체와의 접촉이 손바닥에서 먼저 발생한다는 것을

생각해보면, 손등 센서는 잘못된 굽힘을 행한다고 생각할 수 있다. 손바닥 센서의 굽힘은 손바닥 면에 위치하였기 때문에, 손바닥의 변화 형태에 큰 영향을 받게 된다. 하지만, 실험에서 사용된 단순한 손가락 골격 모델은 피부(연성 조직)의 변화를 고려하지 않았기 때문에 거리 오차의 값이 현실과 다른 형태로 나타날 수 있다. 실험에 적용되지 못한 여러 가지 변수를 고려해보면, 손가락은 굽혀짐에 따라 손바닥 피부는 느슨해지면서 솟아오르고, 손등 피부는 팽팽해진다. 이러한 복잡한 변수가 고려되지 않은 손등 센서에 의해 가상 손의 물체를 쥐는 행위는 크게 잘못된 것이다. 손바닥의 변화 형태를 정확히 추종하는 손바닥 센서가 가상 손을 가상 정확하게 표현한다고 볼 수 있는 것이다.

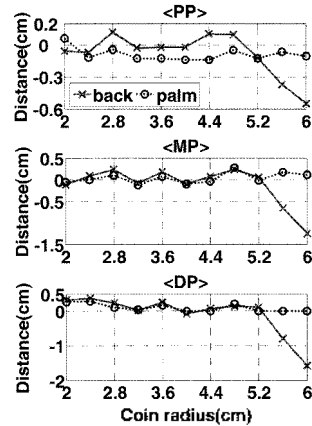


Fig. 14. Distance error between the coin center and phalanges while varying the coin radius.

### 4.3 손바닥 피부에 의한 영향 분석

Fig. 15(a)는 앞에 설명한 손바닥 피부의 영향을 좀 더 자세하게 확인하기 위해 손등과 손바닥에 센서가 부착된 VirtualGlove와 CyberGlove®를 동시에 착용한 후, 시간에 따라 검지를 서서히 굽혀가면서, 출력되는 각도값을 비교한 그래프이다. 그래프에 표시된 2개의 점선은 VirtualGlove와 CyberGlove®의 손가락을 굽혀가는 동안 각도값의 변화를 선형 구간법에 의해 구한 직선이며, 이 직선은 측정하는 동안의 평균 기울기가 된다. 손바닥 센서의 기울기는 손등 센서의 기울기보다 크며, 이로 인해 굽힘 초반에는 손등 센서보다 값이 작다가 30° 이후부터 손등 센서보다 값이 커지는 것을 볼 수 있다. 또한, 굽힘 초반(Sampling time이 30이하)에는 각도의 변화가 거의 나타나지 않은 것을

볼 수 있으며, 이는 손바닥 피부가 느슨해져 솟아오르는 현상에 의해 발생한 것으로 추측할 수 있다.

Fig. 15(b)는 (a)의 실험을 반복 실시하여 선형 보간된 직선의 기울기를 나타내는 것으로서, VirtualGlove의 기울기가 CyberGlove®의 기울기보다 항상 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 실험은 검지 손가락의 MCP를 40° 굽혔을 때의 값인데, VirtualGlove가 초반에 CyberGlove® 보다 값이 작았지만, 손등과 다른 손바닥의 피부 형태에 의해 손바닥 센서가 큰 기울기를 가지면서, 가상 물체에 빠르게 접근하여 CyberGlove® 보다 먼저 물체와 접촉하게 된다.

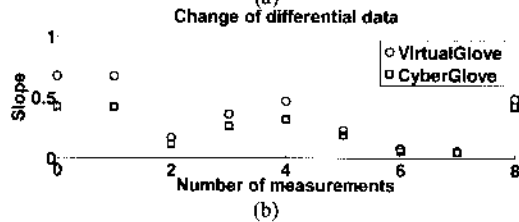
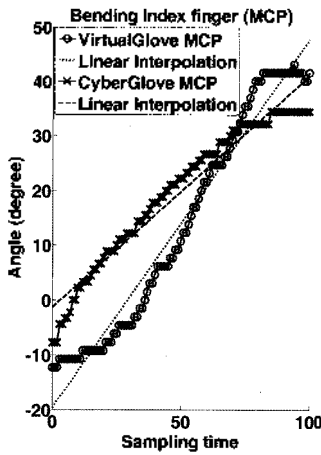


Fig. 15. (a) Comparison of the MCP angle while bending the finger using VirtualGlove and CyberGlove® (14.56 ms/Sampling) (b) Comparison of the slope while bending the finger with increased number of measurements.

Fig. 15의 실험을 통해 손바닥 MCP의 굽힘이 작은 경우, 손바닥의 피부 형태에 의해 측정값의 변화 추이가 완만하였으나, 굽힘이 증가할수록 손등 센서와 같은 값의 추이를 나타내게 된다. 이 외에 동전의 직경에 따른 거리 오차뿐만 아니라 마디의 길이에 따라 거리 오차도 달라 질 수 있다. 하지만, 마디의 길이는 독립적으로 변하지 않고, 일정한 비율로 변하기 때문에 동전의 직경을 변화시키는 비율과 비슷하게 변하

게 된다. 즉, 마디의 길이를 1/2로 줄이는 것과, 동전 직경을 2배로 늘리는 것은 상사가 된다.

#### 4.4 센서 부착 위치에 따른 접촉점과의 오차 분석

센서 부착 위치에 따른 오차의 차이를 좀 더 분명히 알아보기 위해서 동전의 직경이 아닌 동전과 PP와의 접촉점을 변화시키면서, 동전을 쥐었을 때의 손등과 손바닥 센서값을 비교해보았다. 여기서 접촉점은 PP의 한 점과 동전 표면에서의 접촉한 점으로 정의하였다(Fig. 16 참고). MCP의 각도 변화에 따른 PIP와 DIP의 각도 변화로 발생하는 오차의 범위를 구하기 위해서, 다음의 조건들이 필요하다.

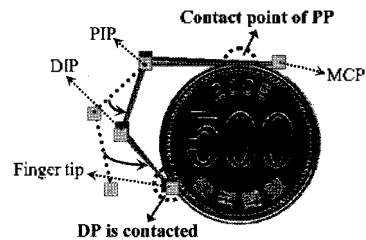


Fig. 16. Definition of a contact point when grasping a coin.

첫째, PP와 동전이 접촉되면 MCP의 각도는 고정되고, PIP와 DIP가 변화하면서 물체와 접촉을 한다. 각 관절의 각도에 의해 마디가 변화하므로, MCP가 고정되면 PP의 마디가 고정되어, 다른 두 개의 마디만 고려하면 된다. 둘째, 쥐는 것은 PP와 동전의 접촉을 기준으로 하여, Fig. 16에서처럼 DP가 동전과 접촉했을 때 쥐어졌다고 정의한다. 셋째, 동전의 직경은 2.75 cm, 마디의 길이는 PP가 4.5 cm, MP와 DP가 2.5 cm로 하여, 일정한 조건하에서 측정을 실시한다.

Fig. 17은 동전의 표면에 접촉되는 PP의 위치에 따라 다른 2개 마디(MP, DP)를 굽혀 동전을 쥐었을 때, 그 때의 동전 중심과의 거리 오차를 나타내고 있다. 실험은 PP의 접촉점을 0.4 cm 단위로 하여, 총 100회에 걸쳐 진행을 하였고, 각 PP 위치(MCP에서 0 cm, PIP에서 4.5 cm)에 따라 발생하는 오차의 범위를 표현하였다. 그림에서 실선은 손바닥에 센서가 부착된 경우의 PP의 위치에 따른 오차 값의 평균을 나타내고 있고, 점선은 손등에 센서가 부착된 경우의 PP의 위치에 따른 오차 값의 평균을 나타내고 있다. 그림을 보면, 센서가 손바닥에 위치했을 때의 평균 오차가 손등에 위치했을 때보다 0에 가까운 거리에 위치한 것을 볼 수 있으며, 오차의 범위도 훨씬 작게 나타나는 것을 볼 수 있다.



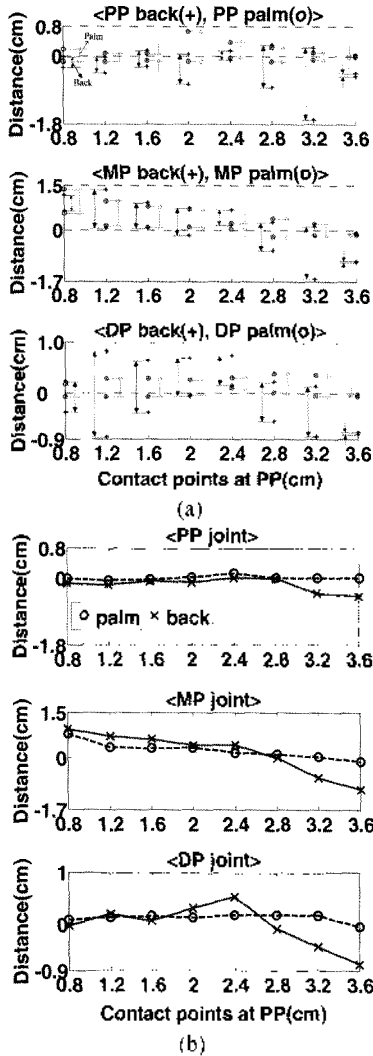


Fig. 17. Distance error between PP and the coin center while varying the contact point of PP on the coin surface with the flex sensors located at the palm and on the back of a hand. (a) Maximum and minimum of distance error (b) Mean of distance error.

Fig. 17에서도 PP가 2.8 cm 이상인 경우에, 손등 센서의 거리 오차 값이 0에서 크게 떨어져 음수 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 이것도 Fig. 14에서 설명한 피부의 영향을 고려해야만 한다. 우리의 실험에서는 쥐려는 물체가 원모양이기 때문에 이 물체의 곡률반경을 고려한 물체와의 접촉이 이루어진다. Fig. 18(b)에 서치던 PIP에 가까운 PP와의 접촉점은 상대적으로 (a)와는 달리 PIP의 각도 변화가 작은 것을 볼 수 있다.

왜냐하면, 쥐려는 동전에 의해 MP의 굽힘 반경이

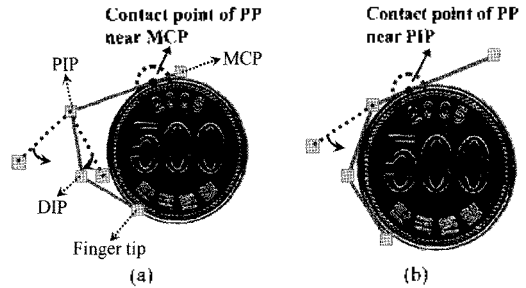


Fig. 18. Angle changes of PIP while varying the contact point of PP on the coin surface (a) near MCP (b) near PIP.

감소하기 때문에, PIP의 굽힘 각도 감소하게 된다.

즉, PP의 접촉점이 PIP에 가깝고, 물체의 직경이 클수록 MCP와 PIP 관절의 각도 변화는 감소하게 된다. 하지만, 손등의 센서는 큰 각도 변화를 통해 동전을 통과하는 음수 값을 가지게 되므로, 현실과 크게 다르다.

### 5. 결 론

가상 장갑을 사용하여 가상 물체를 쥐는 방법에는 많은 응용 사례가 있다. 하지만, 기존의 가상 장갑을 사용하면 실제 손가락이 굽혀진 모습과 다른 모습을 볼 수 있으며, 가상 물체를 만지거나 쥐 때 가상 물체를 통과하는 현상도 볼 수 있다. 이것은 가상 공간상에 재구성되는 손의 움직임이 실제 손가락의 굽힘 각을 손바닥이 아닌 손등에서 측정하기 때문이다.

현실 세계에서 가장 먼저 접촉하게 되는 손바닥은 피부의 영향도 고려했을 때, 손등의 굽힘 각에 의해서만 물체가 쥐어졌는지에 대한 여부를 판단하기가 더욱 어려워진다. 물론, 피부의 영향도 고려하여 좀더 수학적 해석을 하려면, 유한 요소 해석 등을 이용한 분석이 더욱 요구된다. 또한, 손바닥을 기준으로 한 마디 길이는 피부가 서로 겹쳐지면서, 그 길이가 약 20~30%정도 감소하게 된다. 손가락 마디의 길이를 일정한 상수로 생각하지 않고, 길이 변화에 대한 수학적 인 계산을 통해 일정한 방정식을 추출해야 한다. 이처럼, 길이의 변화도 가상 손에 표현하기 위해서는 더욱 복잡한 해석이 요구된다.

무엇이든지 직관적으로 생각하고, 그에 따라 측정하는 것이 가장 적합한 방법이다. 비록 손등에 센서를 부착하는 것이 간편할지라도, 이 방법은 직관적이지 못하다. 손등으로 물체와 접촉이 되는 경우에는 손등 센서가 더욱 정확할 수 있을 것이다. 하지만, 일반적

으로 물체를 쥐는 경우에는 손바닥 센서가 더욱 정확할 것이다.

물론, 소프트웨어의 보정을 통해 실제 손가락의 굽힘보다 가상 손의 손가락이 더 굽혀지게 한다면, 이러한 문제를 해결할 수 있지만, 이것은 일시적인 방편일 뿐이다. 이득이나 오프셋을 손가락을 굽힌 손바닥 센서와 같은 모양이 나오도록 한다면, 손가락을 폈을 때, 가상 공간 상의 편진 손가락의 모양은 엉뚱할 것이다. 즉, 이러한 방법은 오히려 실제와의 오차만을 증가시켜 정확성을 더욱 훼손시킬 수 있다.

가상 공간과 현실 세계와의 차이를 좁혀나갈수록, 현실 세계에서 불가능한 수많은 일들을 가상 공간을 통해 경험해 볼 수가 있다. 이러한 차이를 좁히기 위해서 현실 세계와의 오차를 줄이는 것도, 그런 노력의 한 일부분이라고 볼 수 있다.

본 연구에서는 손바닥에 굽힘 센서를 부착함으로써, 물체를 쥐는 경우에 정확도를 증가시킬 수 있음을 보여주었다. 향후에는 손가락 마디의 피부 변화를 고려한 해석적 방법을 도입하여, 피부의 수축과 팽창을 통한 실제 변화되는 마디 길이를 적용시킴으로써 더욱 정확하게 현실의 움직임을 가상 공간상에 표현할 것이며, 손바닥의 특성상 손등에 비해 센서의 굽힘이 심하게 이루어져서 다시 손가락을 펼 때의 응답성을 향상시키기 위한 연구도 이루어져야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 추진되고 있는 정보통신부의 유비쿼터스컴퓨팅 및 네트워크원천기반기술개발사업의 지원에 의한 것이다.

## 참고문헌

1. Montgomery, S., *Walking with the Great Apes*, Mariner Books, 1992.
2. Sturman, D. J. and Zeltzer, D., "A survey of glove-based input," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 14, No. 1, pp. 30-39, 1994.
3. Wellner, P., "Interacting with paper on the DigitalDesk," *Communications of the ACM*, Vol. 36, No. 7, pp. 87-96, 1993.
4. Krueger, M. W., *Artificial Reality* (2nd ed.). Mass: Addison-Wesley, 1990.
5. Luck, J. P., Debrunner, C., Hoff, W., He, Q., and Small, D. E., "Development and analysis of a real-time human motion tracking system," Paper presented at the Sixth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV 2002), Orlando, Florida, USA, pp. 196-202, Dec. 2002.
6. Raab, F. H., Blood, E. B., Steiner, T. O., and Jones, H. R., "Magnetic position and orientation tracking system," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-15, No. 5, pp. 709-718, Sep. 1979.
7. Williams, M. and Green, P., *Interfacing the Nintendo Power Glove to a Macintosh computer*, Tech. Report, The University of Michigan Transportation Research Institute, Sep. 1990.
8. Zimmerman, T. G., Lanier, J., Blanchard, C., Bryson, S., and Harvill, Y., "A hand gesture interface device," Paper presented at the SIGCHI/GI conference on Human Factors in Computing Systems and Graphics Interface, Toronto, Ontario, Canada, pp. 235-240, Apr. 1987.
9. 3-SPACE® user's manual, Pothemus, 1998.
10. Jacobsen, S. C., Wood, J. E., Knutti, D. F., and Biggers, K. B., "The UTAH/M.I.T. dextrous hand: work in progress," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 21-50, 1984.
11. Power Glove® program guide, Nintendo Entertainment, 1991.
12. Virtual Hand® user's guide V2.7, Immersion Corporation, 2001.
13. Santello, M., Flanders, M., and Soechting, J. F., "Postural hand synergies for tool use," *The Journal of Neuroscience*, Vol. 18, No. 23, pp. 10105-10115, 1998.
14. Sato, S., Shimojo, M., Seki, Y., Takahashi, A., and Shimizu, S., "Measuring system for grasping," Paper presented at the 5th IEEE International Workshop on the Robot and Human Communication, Tsukuba, Ibaraki, Japan, pp. 292-297, Nov. 1996.
15. Micera, S., Cavallaro, E., Belli, R., Zaccone, F., Gulielmelli, E., Dario, P., Collarini, D., Martinelli, B., Santin, C., and Marcovich, R., "Functional assessment of hand orthopedic disorders using a sensorised glove: preliminary results," Paper presented at the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, 2, pp. 2212-2217, Sep. 2003.
16. Sato, M., Savchenko, V., and Ohbuchi, R., "3D freeform design: interactive shape deformations by the use of CyberGlove," Paper presented at the 2004 International Conference on Cyberworlds, pp. 147-154, Nov. 2004.
17. *Electronic interface design guide*, Bend sensor Technology, 1997.
18. *Mechanical application design guide*, Bend sensor Technology, 1997.



**왕 혁**

2007년 전북대학교 기계공학원장 겸사  
2007년 현재 광주과학기술원 기전공학과 석사과정  
관심분야: Automatic Control, Virtual Reality, Optical Tweezers



**황 선 욱**

2004년 강원대학교 메카트로닉스공회부 기계설계공학전공 석사  
2006년 광주과학기술원 기전공학과 석사  
2006년 현재 광주과학기술원 기산공학과 박사과정  
관심분야: Microassembly, Optical Tweezers, Haptics, Virtual Reality



**이 용 구**

1992년 서울대학교 기계설계학과 학사  
1994년 서울대학교 기계설계학과 석사  
1997년 서울대학교 기계설계학과 박사  
1997년-2000년 삼성SDS 책임연구원  
2000년-2003년 미국 상공부 산하 국립 표준기술연구소 객원 연구원  
2003년 현재 광주과학기술원 기전공학과 조교수

관심분야: Microassembly, Optical Tweezers, Virtual Gloves